



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

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

Παναγιώτα Σολωμού

Επιβλέπων: Ηλίας Παπακωνσταντής, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2022

“Φτάσε όπου δεν μπορείς.”, Νίκος Καζαντζάκης.

Στους γονείς μου Κωνσταντίνο και Μάρβα  
και στην μνήμη του παππού και συναδέλφου μου Χρήστου.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας, κ. Ηλία Γ. Παπακωνσταντή, Επίκουρο Καθηγητή ΕΜΠ. Η καθοδήγησή του από την αρχή με την επιλογή του θέματος μέχρι και την ολοκλήρωση της εργασίας και η συνεχής υποστήριξη κατά τη διάρκεια της εκπόνησής της ήταν πολύ σημαντικές για εμένα.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Παναγιώτη Δημητριάδη, διδάκτορα μηχανικό ΕΜΠ για την βοήθεια τόσο στην διεξαγωγή των πειραμάτων όσο και στην ανάπτυξη του κώδικα για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Η επιμονή και η υπομονή του ήταν πολύ σημαντικές για την ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ θα ήθελα να εκφράσω σε όλους τους φίλους μου αλλά και στις συμφοιτήτριες μου Ελένη, Λυδία και Σμαράγδα για όλα τα χρόνια που περάσαμε μαζί και για όλες τις όμορφες αναμνήσεις που δημιουργήσαμε κατά τη διάρκεια των σπουδών μας.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλω στην οικογένεια μου για την απεριόριστη και απλόχερη στήριξη και την συμπαράστασή τους σε κάθε μου βήμα.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνώνται τα χαρακτηριστικά της ροής κατακόρυφης κυκλικής τυρβώδους φλέβας. Η διερεύνηση που πραγματοποιείται είναι τόσο θεωρητική όσο και πειραματική. Η θεωρητική ανάλυση περιλαμβάνει τη διατύπωση, με χρήση διαστατικής ανάλυσης, σχέσεων εκτίμησης των κυριότερων χαρακτηριστικών της ροής της φλέβας (πλάτος κατανομής συγκέντρωσης, ελάχιστη αραίωση) συναρτήσει των αρχικών συνθηκών (τιμές παραμέτρων στην εκροή της φλέβας) οι οποίες απαιτούν πειραματική επαλήθευση.

Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 12 πειράματα σχετικά με τη ροή κυκλικών τυρβωδών φλεβών σε πειραματική διάταξη του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Υδραυλικής του ΕΜΠ που περιλαμβάνει δεξαμενή, γεμάτη με νερό, διαστάσεων 1.00 m x 0.80 m x 0.70 m. Το νερό της δεξαμενής ήταν ήρεμο πριν την έναρξη των πειραμάτων και το υγρό της φλέβας, ήταν επίσης νερό ίδιας θερμοκρασίας με αυτό της δεξαμενής, που διοχετεύονταν κατακόρυφα προς τα πάνω από το κυκλικό στόμιο. Πιο συγκεκριμένα, έγιναν πειράματα για τρεις διαφορετικές διαμέτρους ακροφυσίου  $D = 0.5, 0.75$  και  $1.0$  cm και για παροχές από 9.32 έως 37.07 cm<sup>3</sup>/s οι οποίες μετρήθηκαν με χρήση βαθμονομημένου παροχομέτρου. Οι αριθμοί Reynolds κυμάνθηκαν από 2650 έως 7024, εξασφαλίζοντας τυρβώδη ροή σε όλα τα πειράματα.

Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν εφαρμόστηκε η οπτική τεχνική Laser Induced Fluorescence (LIF) και έγιναν μετρήσεις συγκέντρωσης στη ροή σε διάφορες αποστάσεις από την εκροή για τις παροχές και διαμέτρους που αναφέρονται παραπάνω.

Από την επεξεργασία των βίντεο των πειραμάτων και μετά από κατάλληλη βαθμονόμηση προέκυψαν οι συγκεντρώσεις στο πεδίο ροής.

Από τα πειραματικά αποτελέσματα προέκυψαν σε αδιάστατη μορφή οι εγκάρσιες κατανομές της μέσης συγκέντρωσης και της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή. Η κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε αδιάστατη μορφή για κάθε πείραμα φαίνεται να ακολουθεί τη θεωρητική κατανομή Gauss και με την παραδοχή αυτή προσδιορίστηκε το πλάτος της κατανομής. Επίσης, η κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης κατά την εγκάρσια διεύθυνση σε αδιάστατη μορφή δείχνει δύο μέγιστα εκατέρωθεν του άξονα και φαίνεται πως είναι σε συμφωνία με αποτελέσματα άλλων ερευνητών.

Επιπλέον, δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα μεταβολής του πλάτους της φλέβας, της αδιάστατης μέγιστης (αξονικής) συγκέντρωσης καθώς και της ελάχιστης αραίωσης κατά μήκος του άξονα της φλέβας. Επαληθεύτηκαν οι σχέσεις της διαστατικής ανάλυσης και προσδιορίστηκαν οι εξισώσεις συσχέτισης. Οι εξισώσεις αυτές συγκρίθηκαν με αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία κι διαπιστώθηκε πως υπάρχει καλή συμφωνία.

## ABSTRACT

In this thesis the flow characteristics in vertical round turbulent jets are investigated. The investigation carried out is both theoretical and experimental. The theoretical analysis includes the formulation, using dimensional analysis, of relations for estimating the main characteristics of the jet flow (concentration jet width, minimum dilution) as a function of the initial conditions (parameter values at the nozzle exit) which require experimental confirmation.

A total of 12 experiments were performed for the flow of round turbulent jets in an experimental apparatus located in the Laboratory of Applied Hydraulics of NTUA which includes a tank of dimensions 1.00 m x 0.80 m x 0.70 m. The tank was filled with water which was calm before the initiation of the experiments and the jet fluid was water of the same temperature, as the water in the tank, which was vertically discharged from a round nozzle.

More specifically, experiments were carried out for three different nozzle diameters  $D = 0.5, 0.75$  and  $1.0$  cm, for flow rates between  $9.32$  and  $37.07$   $\text{cm}^3/\text{s}$  measured with a calibrated flowmeter. Reynolds numbers ranged from  $2650$  to  $7024$ , ensuring turbulent flow in all experiments.

In the experiments carried out, the optical technique of Laser Induced Fluorescence (LIF) was applied and concentration measurements were made at various distances from the nozzle for the flow rates and diameters mentioned above. The concentrations in the flow field were obtained from the processing of the video recordings of the experiments after a proper calibration process.

From the experimental results the transverse distributions of the mean concentration and the intensity of the turbulent concentration fluctuations were obtained in dimensionless form at various distances from the source. The distribution of the mean concentration in dimensionless form for each experiment appears to follow the theoretical Gaussian distribution and with this assumption the width of the distribution was determined. Also, the dimensionless distribution of the intensity of turbulent concentration fluctuations (RMS values) in the transverse directions presents two maxima on either side of the axis and it seems to be in good agreement with results of other researchers

Then, graphs showing the variation of the jet width, the dimensionless maximum (axial) concentration and the minimum dilution along the jet axis were created. The relations obtained from dimensional analysis were confirmed and the trendline equations were determined. These equations were compared with results from the literature and a good agreement was found

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....   | 1  |
| 1.1   | ΓΕΝΙΚΑ .....  | 1  |
| 1.2   | ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....                            | 2  |
| 1.3   | ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....                              | 2  |
| 2     | ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ .....       | 4  |
| 2.1   | ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....                                     | 4  |
| 2.2   | ΤΥΠΟΙ ΡΟΩΝ .....  | 4  |
| 2.3   | ΑΠΛΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΦΛΕΒΑ (JET) .....                            | 5  |
| 2.4   | ΔΙΑΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΛΗΣ ΦΛΕΒΑΣ .....                     | 8  |
| 2.5   | ΘΕΩΡΙΑ ΑΝΩΣΤΙΚΩΝ ΦΛΕΒΩΝ .....                             | 11 |
| 2.6   | ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ .....                            | 13 |
| 3     | ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ .....   | 16 |
| 3.1   | ΓΕΝΙΚΑ .....  | 16 |
| 3.2   | ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ.....                                  | 16 |
| 3.2.1 | Κύρια δεξαμενή .....                                      | 17 |
| 3.2.2 | Δεξαμενή προετοιμασίας και τροφοδοσίας διαλύματος .....   | 19 |
| 3.2.3 | Βιντεοκάμερα.....   | 22 |
| 3.3   | ΤΕΧΝΙΚΗ LASER INDUCED FLUORESCENCE (LIF).....             | 22 |
| 3.4   | ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΠΑΡΟΧΟΜΕΤΡΟΥ .....                            | 25 |
| 3.5   | ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΥΠΙΚΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.....                         | 29 |
| 3.6   | ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΜΕ ΜΙΚΡΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΗ ΑΥΞΗΣΗ ΣΤΗ ΦΛΕΒΑ .....   | 31 |
| 3.7   | ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ.....                          | 33 |
| 3.8   | ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ .....                             | 35 |
| 4     | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....                   | 37 |
| 4.1   | ΓΕΝΙΚΑ .....  | 37 |
| 4.2   | ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΦΩΤΕΙΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΡΟΔΑΜΙΝΗΣ ..... | 37 |
| 4.3   | ΜΕΣΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΚΑΙ ΕΝΤΑΣΗ ΤΥΡΒΗΣ .....                  | 40 |
| 4.4   | ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....                             | 42 |

|     |                              |    |
|-----|------------------------------|----|
| 5   | ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....           | 53 |
| 5.1 | ΣΥΝΟΨΗ .....                 | 53 |
| 5.2 | ΚΥΡΙΟΤΕΡΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ..... | 53 |
| 6   | ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....           | 55 |
|     | ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....             | 57 |
|     | ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....             | 58 |

## ΣΧΗΜΑΤΑ

|  |    |
|--|----|
| <b>Σχήμα 1.1</b> Έκρηξη ηφαιστείου του όρους “St. Helens” στις ΗΠΑ (πηγή: <a href="https://www.popularmechanics.com/science/environment/a1969/mount-st-helens-history/">https://www.popularmechanics.com/science/environment/a1969/mount-st-helens-history/</a> )..... | 1  |
| <b>Σχήμα 2.1</b> Τυρβώδης διάχυση κατακόρυφης φλέβας (Παπανικολάου 2016) .....   | 6  |
| <b>Σχήμα 2.2</b> Τομογραφία απλής φλέβας με τεχνική LIF (Παπανικολάου 2016) .....  | 7  |
| <b>Σχήμα 2.3</b> Κατανομή πλάτους απλής φλέβας (Papanicolaou 1984).....  | 9  |
| <b>Σχήμα 2.4</b> Σχηματική αναπαράσταση φλέβας και τυπικό προφίλ συγκεντρώσεων ..  | 11 |
| <b>Σχήμα 3.1</b> Σχεδιάγραμμα πειραματικής διάταξης .....  | 16 |
| <b>Σχήμα 3.2</b> Κυκλικά στόμια που χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα διαμέτρων $D = 0.50, 0.75$ και $1.00$ cm (από αριστερά προς τα δεξιά) .....  | 17 |
| <b>Σχήμα 3.3</b> Υπερχειλιστής κύριας δεξαμενής .....  | 18 |
| <b>Σχήμα 3.4</b> Κύρια δεξαμενή διεξαγωγής πειραμάτων .....  | 18 |
| <b>Σχήμα 3.5</b> Μεταλλικός αναδευτήρας κύριας δεξαμενής.....  | 19 |
| <b>Σχήμα 3.6</b> Δεξαμενή προετοιμασίας του διαλύματος της φλέβας.....   | 20 |
| <b>Σχήμα 3.7</b> Διάλυμα ροδαμίνης 6G .....  | 21 |
| <b>Σχήμα 3.8</b> Θειώδες Νάτριο και ροδαμίνη 6G που χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα.....   | 21 |
| <b>Σχήμα 3.9</b> Βιντεοκάμερα Panasonic HC-V770.....   | 22 |
| <b>Σχήμα 3.10</b> Συσκευή ακτίνας laser .....  | 23 |
| <b>Σχήμα 3.11</b> Τροφοδοτικό κατόπτρου και Laser .....  | 24 |
| <b>Σχήμα 3.12</b> Διάταξη δημιουργίας φύλλου laser με την τεχνική LIF.....   | 25 |
| <b>Σχήμα 3.13</b> Παροχόμετρο πειραματικής διάταξης .....  | 26 |
| <b>Σχήμα 3.14</b> Ογκομετρικοί σωλήνες .....   | 27 |
| <b>Σχήμα 3.15</b> Διάγραμμα βαθμονόμησης παροχής.....  | 28 |
| <b>Σχήμα 3.16</b> Μαγνητικός αναδευτήρας .....   | 30 |
| <b>Σχήμα 3.17</b> Σύριγγες για την έγχυση ροδαμίνης στις δεξαμενές .....   | 31 |
| <b>Σχήμα 3.18</b> Στιγμιότυπο από τη χρονική στιγμή που εισχωρούν οι στρόβιλοι πάλι στην φλέβα .....   | 32 |
| <b>Σχήμα 3.19</b> Δημιουργία στρωμάτωσης εξαιτίας της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ αποδέκτη και φλέβας.....  | 33 |



|   |    |
|---|----|
| <b>Σχήμα 3.20</b> Στιγμιότυπα του πειράματος EXP002 με αριθμό Reynolds $Re=3869$ για χρόνους από αριστερά προς τα δεξιά $t= 60, 120$ και $165$ s .....  | 35 |
| <b>Σχήμα 3.21</b> Στιγμιότυπα του πειράματος EXP007 με αριθμό Reynolds $Re=4227$ για χρόνους από αριστερά προς τα δεξιά $t= 60, 180$ και $240$ s .....  | 36 |
| <b>Σχήμα 3.22</b> Στιγμιότυπα του πειράματος EXP009 με αριθμό Reynolds $Re=2902$ για χρόνους από αριστερά προς τα δεξιά $t= 60, 180$ και $300$ s .....  | 36 |
| <b>Σχήμα 4.1</b> Στιγμιότυπα του πειράματος EXP006 με αριθμό Reynolds $Re=5972$ .....   | 38 |
| <b>Σχήμα 4.2</b> Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή πριν και μετά την βαθμονόμηση (πείραμα EXP001, $Re=2818$ ) .....                                       | 39 |
| <b>Σχήμα 4.3</b> Μέση και RMS εικόνα της φλέβας σε μη επεξεργασμένη μορφή για το πείραμα EXP001 με αριθμό Reynolds $Re=2818$ .....  | 41 |
| <b>Σχήμα 4.4</b> Μέση και RMS εικόνα της φλέβας σε επεξεργασμένη μορφή για το πείραμα EXP001 με αριθμό Reynolds $Re=2818$ .....   | 42 |
| <b>Σχήμα 4.5</b> Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή στη ζώνη ανάπτυξης της ροής για το πείραμα EXP001 με αριθμό Reynolds $Re=2818$ .....               | 43 |
| <b>Σχήμα 4.6</b> Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή στη ζώνη της αναπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP001 με αριθμό Reynolds $Re=2818$ .....            | 44 |
| <b>Σχήμα 4.7</b> Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα EXP001 με αριθμό Reynolds $Re=2818$ .....           | 45 |
| <b>Σχήμα 4.8</b> Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP001 με αριθμό Reynolds $Re=2818$ .....  | 46 |
| <b>Σχήμα 4.9</b> Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης $C_M$ αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση $C_0$ με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP001 με αριθμό Reynolds $Re=2818$ ..... | 47 |
| <b>Σχήμα 4.10</b> Μεταβολή της ελάχιστης αραιώσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP001 με αριθμό Reynolds $Re=2818$ .....  | 47 |
| <b>Σχήμα 4.11</b> Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή στη ζώνη της αναπτυγμένης ροής για το σύνολο των πειραμάτων .....  | 48 |
| <b>Σχήμα 4.12</b> Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το σύνολο των πειραμάτων .....                                | 49 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Σχήμα 4.13</b> Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το σύνολο των πειραμάτων.....   | 50 |
| <b>Σχήμα 4.14</b> Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης $C_M$ αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση $C_0$ με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το σύνολο των πειραμάτων ..... | 51 |
| <b>Σχήμα 4.15</b> Μεταβολή της ελάχιστης αραιώσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το σύνολο των πειραμάτων.....  | 51 |
| <b>Σχήμα B.1</b> Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή στη ζώνη της αναπτυσσόμενης ροής για το πείραμα EXP002 .....                           | 58 |
| <b>Σχήμα B.2</b> Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα.....                           | 58 |
| <b>Σχήμα B.3</b> Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP002.....   | 59 |
| <b>Σχήμα B.4</b> Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης $C_M$ αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση $C_0$ με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP002 .....         | 59 |
| <b>Σχήμα B.5</b> Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή στη ζώνη της αναπτυσσόμενης ροής για το πείραμα EXP003 .....                           | 60 |
| <b>Σχήμα B.6</b> Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα EXP003.....                    | 60 |
| <b>Σχήμα B.7</b> Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP003.....   | 61 |
| <b>Σχήμα B.8</b> Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης $C_M$ αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση $C_0$ με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP003 .....         | 61 |
| <b>Σχήμα B.9</b> Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή στη ζώνη της αναπτυσσόμενης ροής για το πείραμα EXP004 .....                           | 62 |
| <b>Σχήμα B.10</b> Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα EXP004.....                   | 62 |
| <b>Σχήμα B.11</b> Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP004.....  | 63 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Σχήμα B.12</b> Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης $C_M$ αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση $C_0$ με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP004 ..... | 63 |
| <b>Σχήμα B.13</b> Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή στη ζώνη της αναπτυσσόμενης ροής για το πείραμα EXP005 .....                   | 64 |
| <b>Σχήμα B.14</b> Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή στη ζώνη της αναπτυσσόμενης ροής για το πείραμα EXP005 .....                   | 64 |
| <b>Σχήμα B.15</b> Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP005 .....  | 65 |
| <b>Σχήμα B.16</b> Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης $C_M$ αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση $C_0$ με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP005 ..... | 65 |
| <b>Σχήμα B.17</b> Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή στη ζώνη της αναπτυσσόμενης ροής για το πείραμα EXP006 .....                   | 66 |
| <b>Σχήμα B.18</b> Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα EXP006.....            | 66 |
| <b>Σχήμα B.19</b> Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP006.....   | 67 |
| <b>Σχήμα B.20</b> Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης $C_M$ αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση $C_0$ με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP006 ..... | 67 |
| <b>Σχήμα B.21</b> Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή στη ζώνη της αναπτυσσόμενης ροής για το πείραμα EXP007 .....                   | 68 |
| <b>Σχήμα B.22</b> Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα EXP007.....            | 68 |
| <b>Σχήμα B.23</b> Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP007 .....  | 69 |
| <b>Σχήμα B.24</b> Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης $C_M$ αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση $C_0$ με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP007 ..... | 69 |
| <b>Σχήμα B.25</b> Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή στη ζώνη της αναπτυσσόμενης ροής για το πείραμα EXP008 .....                   | 70 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Σχήμα B.26</b> Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα EXP008.....            | 70 |
| <b>Σχήμα B.27</b> Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP008.....   | 71 |
| <b>Σχήμα B.28</b> Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης $C_M$ αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση $C_0$ με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP008 ..... | 71 |
| <b>Σχήμα B.29</b> Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή στη ζώνη της αναπτυσσόμενης ροής για το πείραμα EXP009 .....                   | 72 |
| <b>Σχήμα B.30</b> Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα EXP009.....            | 72 |
| <b>Σχήμα B.31</b> Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP009.....   | 73 |
| <b>Σχήμα B.32</b> Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης $C_M$ αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση $C_0$ με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP009 ..... | 73 |
| <b>Σχήμα B.33</b> Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή στη ζώνη της αναπτυσσόμενης ροής για το πείραμα EXP010 .....                   | 74 |
| <b>Σχήμα B.34</b> Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα EXP010.....            | 74 |
| <b>Σχήμα B.35</b> Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP010.....   | 75 |
| <b>Σχήμα B.36</b> Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης $C_M$ αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση $C_0$ με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP010 ..... | 75 |
| <b>Σχήμα B.37</b> Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή στη ζώνη της αναπτυσσόμενης ροής για το πείραμα EXP011 .....                   | 76 |
| <b>Σχήμα B.38</b> Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα EXP011.....            | 76 |
| <b>Σχήμα B.39</b> Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP011.....   | 77 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Σχήμα B.40</b> Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης $C_M$ αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση $C_0$ με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP011 ..... | 77 |
| <b>Σχήμα B.41</b> Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή στη ζώνη της αναπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP012 .....                     | 78 |
| <b>Σχήμα B.42</b> Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα EXP012.....            | 78 |
| <b>Σχήμα B.43</b> Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP012.....   | 79 |
| <b>Σχήμα B.44</b> Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης $C_M$ αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση $C_0$ με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP012 ..... | 79 |

## **ΠΙΝΑΚΕΣ**

|   |    |
|---|----|
| <b>Πίνακας 2.1</b> Σταθερές εξισώσεων απλής φλέβας.....                               | 10 |
| <b>Πίνακας 2.2</b> Ορισμοί βασικών παραμέτρων ανωστικών φλεβών .....                  | 12 |
| <b>Πίνακας 3.1</b> Βαθμονόμηση παροχομέτρου και σύγκριση με άλλες εργασίες .....      | 28 |
| <b>Πίνακας 3.2</b> Αρχικές συνθήκες πειραμάτων για διάμετρο ακροφυσίου $D=0.75$ cm .  | 34 |
| <b>Πίνακας 3.3</b> Αρχικές συνθήκες πειραμάτων για διάμετρο ακροφυσίου $D=0.5$ cm ... | 34 |
| <b>Πίνακας 3.4</b> Αρχικές συνθήκες πειραμάτων για διάμετρο ακροφυσίου $D=1.0$ cm ... | 34 |
| <b>Πίνακας 4.1</b> Σταθερές εξισώσεων πλάτους και της αραίωσης απλής φλέβας .....     | 52 |

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

### Λατινικά Σύμβολα

|           |   |
|-----------|---|
| A         | εμβαδόν διατομής ακροφυσίου                           |
| b         | πλάτος κατανομής μέσης χρονικά ταχύτητας              |
| $b_c$     | Πλάτος κατανομής μέσης χρονικά συγκέντρωσης           |
| B         | ροή ειδικής άνωσης                                    |
| $C_o$     | αρχική συγκέντρωση ροδαμίνης 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                 |
| $l_a$     | 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     | μέση αραίωση   |
| t     | χρόνος   |
| U     | αρχική ταχύτητα φλέβας                                       |
| u     | ταχύτητα κατά τη διεύθυνση του άξονα της φλέβας              |
| z     | κατακόρυφος άξονας της φλέβας                                |

### **Ελληνικά σύμβολα**

|          |                           |
|----------|---------------------------|
| $\nu$    | κινηματική συνεκτικότητα  |
| $\mu$    | τοπική ογκομετρική παροχή |
| $\rho$   | πυκνότητα υγρού           |
| $\rho_0$ | αρχική πυκνότητα φλέβας   |
| $\rho_a$ | πυκνότητα αποδέκτη        |



# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Πολλές βιομηχανίες αφήνουν στον αέρα τα αερολύματά τους μέσα από μεγάλες καμινάδες, οπότε οι ροές που δημιουργούνται ονομάζονται φλέβες. Τα αερολύματα αποτελούν ένα είδος αποβλήτων που επηρεάζει πολύ την ποιότητα του περιβάλλοντος και επομένως την ανθρώπινη δραστηριότητα. Επίσης, άλλες βιομηχανίες διαθέτουν τα υγρά τους απόβλητα σε υδάτινους αποδέκτες όπως ποτάμια, λίμνες και θάλασσες οπότε σχηματίζονται πάλι τυρβώδεις ροές που λέγονται γενικά φλέβες. Η εξασφάλιση της ποιότητας του υδάτινου αποδέκτη ή του αέρα είναι ζωτικής σημασίας για την ανθρώπινη ζωή. Για το λόγο αυτό είναι σημαντική η μελέτη των ροών που δημιουργούνται ώστε να είναι δυνατός ο καλύτερος σχεδιασμός για την διάθεση τέτοιων αποβλήτων ή αέριων ρύπων.

Τυρβώδεις φλέβες εμφανίζονται επίσης στη φύση με τη μορφή υποθαλάσσιων φλεβών και κατά την έκρηξη ηφαιστείων. Μάλιστα, ένα από τα πιο εντυπωσιακά παραδείγματα φλέβας που έχουν παρατηρηθεί στη φύση είναι αυτό της ηφαιστειακής έκρηξης του όρους “St. Helens” στην πολιτεία Washington, ΗΠΑ (Σχήμα 1.1).



**Σχήμα 1.1** Έκρηξη ηφαιστείου του όρους “St. Helens” στις ΗΠΑ (πηγή: <https://www.popularmechanics.com/science/environment/a1969/mount-st-helens-history/>)

Κύριο χαρακτηριστικό της ροής τυρβωδών φλεβών είναι η συμπαράσυρση (entrainment) ρευστού από τον αποδέκτη στη ροή που οδηγεί στην αραιώση των ρύπων (Fischer et al. 1979).

Μεγάλος αριθμός ερευνητών έχει ασχοληθεί με τις τυρβώδεις φλέβες σε πειραματικό επίπεδο έτσι ώστε σήμερα να υπάρχει καλή γνώση της συμπεριφοράς της ροής. Επίσης, τα πειράματα έχουν μεγάλη σημασία γιατί παρέχουν αποτελέσματα για την ανάπτυξη απλών σχέσεων εκτίμησης κυρίων χαρακτηριστικών της ροής από τις παραμέτρους της εκροής καθώς επίσης και δεδομένα χρήσιμα για την ανάπτυξη και επαλήθευση μαθηματικών ή αριθμητικών μοντέλων

## 1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η πειραματική διερεύνηση των χαρακτηριστικών της ροής κατακόρυφης κυκλικής τυρβώδους φλέβας (χωρίς άνωση). Συγκεκριμένα, η ροή της φλέβας οπτικοποιείται με την τεχνική Laser Induced Fluorescence (LIF), μια προηγμένη τεχνική κατά την οποία η ένταση του φωτός συσχετίζεται με τη συγκέντρωση (Ferrier et al. 1993). Έτσι πραγματοποιούνται μετρήσεις συγκέντρωσης για διάφορες διαμέτρους και παροχές χωρίς καμία επέμβαση στη ροή.

Από τα πειράματα προκύπτουν χαρακτηριστικές εικόνες της ροής. Επίσης, από τις μετρήσεις προκύπτουν αποτελέσματα για την κατανομή της μέσης (χρονικά) συγκέντρωσης, την κατανομή της έντασης της τύρβης, για το πλάτος της φλέβας και τη μέγιστη συγκέντρωση ή την ελάχιστη αραιώση. Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται με κώδικα που καταστρώθηκε στο λογισμικό MATLAB και σε συνδυασμό με το λογισμικό Microsoft EXCEL. Με χρήση διαστατικής ανάλυσης τα αποτελέσματα αδιαστατοποιούνται κατάλληλα και συγκρίνονται με άλλα διαθέσιμα αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία. Από τη σύγκριση με άλλες εργασίες προκύπτει καλή συμφωνία των αποτελεσμάτων.

## 1.3 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία απαρτίζεται από πέντε (5) κεφάλαια και δύο (2) παραρτήματα. Στο παρόν κεφάλαιο, γίνεται μια εισαγωγή στο αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται η θεωρία των φλεβών και πιο συγκεκριμένα δίνεται έμφαση στις κατακόρυφες τυρβώδεις κυκλικές φλέβες και γίνεται μια μικρή αναφορά στην θεωρία των ανωστικών φλεβών. Επίσης, πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση και παρουσιάζονται αποτελέσματα από προγενέστερες εργασίες άλλων ερευνητών πάνω στις τυρβώδεις κατακόρυφες κυκλικές φλέβες.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η πειραματική διάταξη και η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την διεξαγωγή των πειραμάτων. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφονται οι συσκευές, τα βοηθητικά όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για την

διεξαγωγή των πειραμάτων καθώς και οι δυσκολίες που αντιμετωπίστηκαν κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Επίσης, παρουσιάζονται οι αρχικές συνθήκες των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται η διαδικασία της βαθμονόμησης κατά την οποία συσχετίζεται η ένταση του φωτός με τη συγκέντρωση. Για την διεξαγωγή των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε κώδικας στη γλώσσα προγραμματισμού MATLAB που παρουσιάζεται στο παράρτημα και το λογισμικό EXCEL. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με τη μορφή διαγραμμάτων για ένα χαρακτηριστικό πείραμα και για το σύνολο των πειραμάτων και συγκρίνονται με την θεωρία και με αποτελέσματα από την βιβλιογραφία από προγενέστερα πειράματα άλλων ερευνητών οπότε εξάγονται συμπεράσματα.

Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο συνοψίζονται τα κυριότερα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας.

Στο Παράρτημα Α παρουσιάζονται οι κώδικες που καταστρώθηκαν στη γλώσσα προγραμματισμού MATLAB για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

Τέλος, στο Παράρτημα Β παρουσιάζονται αποτελέσματα από επιλεγμένα πειράματα.

## 2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

### 2.1 ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Οι τυρβώδεις φλέβες ανήκουν στην κατηγορία των ελεύθερων διατμητικών ροών (free shear flows) και είναι φλέβες ή δέσμες ρευστού οι οποίες εκρέουν από ένα στόμιο οποιασδήποτε γεωμετρίας, σε ομοειδές ή μη ρευστό που λέγεται αποδέκτης (Παπανικολάου 2016). Εστιάζουμε την προσοχή μας στις τυρβώδεις ροές διότι τέτοιες ροές υπάρχουν κατά κύριο λόγο στα πρακτικά προβλήματα (Fischer et al. 1979). Στο πεδίο ροής τυρβώδους φλέβας υπάρχει χρονική διακύμανση της ταχύτητας και της συγκέντρωσης κάποιας ουσίας (δείκτη) που μεταφέρεται από την φλέβα (Παπανικολάου 2016).

Οι τυρβώδεις φλέβες εξαρτώνται ως προς τα χαρακτηριστικά και τη ρευστοδυναμική συμπεριφορά τους από τους παρακάτω παράγοντες (Fischer et. al 1979, Παπανικολάου 2016):

- (i) Από τα χαρακτηριστικά της φλέβας στην εκροή δηλαδή, την αρχική κατανομή ταχύτητας και την ένταση της τύρβης, την αρχική παροχή και ορμή της φλέβας, την συγκέντρωση ουσιών που περιέχονται στο ρευστό της φλέβας, την πυκνότητα του ρευστού κλπ.
- (ii) Από διάφορες περιβαλλοντικές παραμέτρους δηλαδή παραμέτρους που αφορούν τον αποδέκτη όπως η στρωμάτωση (θερμική ή πυκνομετρική), η κίνηση στον αποδέκτη.
- (iii) Από γεωμετρικές παραμέτρους όπως η μορφή (σχήμα) και ο προσανατολισμός των φλεβών, η αλληλεπίδραση με άλλες φλέβες ή με όρια του αποδέκτη.

Οι εκτοξευόμενες φλέβες μπορούν επίσης να διακριθούν σε (Παπανικολάου 2016):

- (i) Φυσικές όπως είναι οι υποθαλάσσιες φλέβες (sea vents ή black smokers) δηλαδή εκροές θερμού νερού στο βυθό και αυτές που δημιουργούνται κατά την έκρηξη των ηφαιστειών.
- (ii) Τεχνητές όπως οι φλέβες που σχηματίζονται από τον καπνό σε καμινάδες και πυρκαγιές, οι φλέβες που σχηματίζονται κατά τη διάθεση υγρών αποβλήτων από υποθαλάσσιους διαχυτήρες στους οποίους καταλήγουν τα λύματα από μονάδες βιολογικής επεξεργασίας και τέλος οι φλέβες που σχηματίζονται από την εξάτμιση των αυτοκινήτων.

### 2.2 ΤΥΠΟΙ ΡΟΩΝ

Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι ροών και είναι οι εξής (Παπανικολάου 2016):

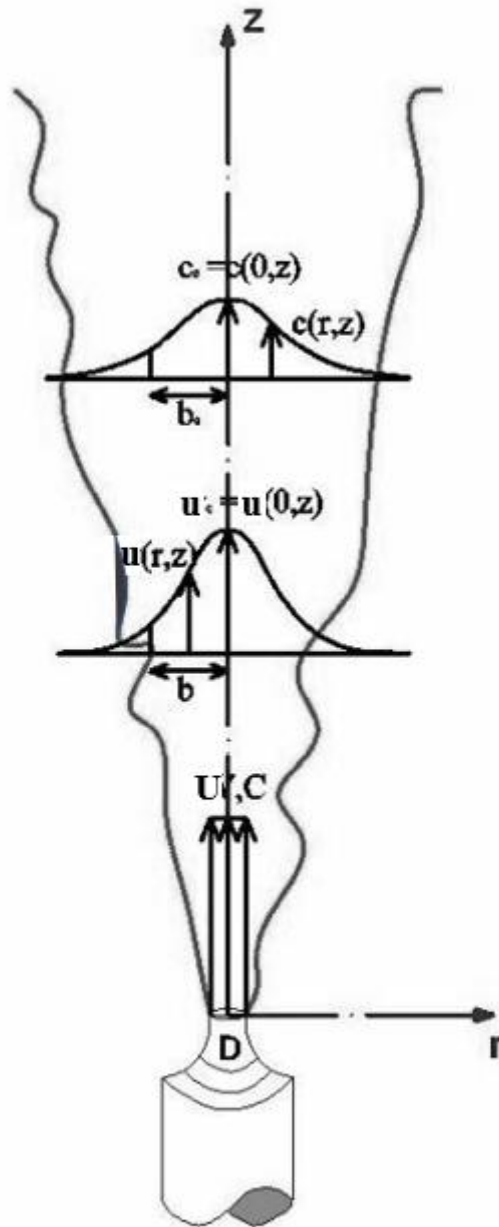
- (i) Η απλή (εκτοξευόμενη) φλέβα (jet) η οποία χαρακτηρίζεται μόνο από αρχική ορμή και δεν έχει άνωση αφού στην εκροή δεν υπάρχει πυκνομετρική διαφορά σε σχέση με τον αποδέκτη.

- (ii) Το πλούμιο (plume) που έχει πυκνομετρική διαφορά σε σχέση με τον αποδέκτη και χαρακτηρίζεται μόνο από αρχική άνωση και καθόλου από ορμή.
- (iii) Η ανωστική φλέβα (buoyant jet) η οποία έχει τόσο αρχική ορμή όσο και πυκνομετρική διαφορά στην εκροή σε σχέση με τον αποδέκτη, δηλαδή άνωση.

Μια φλέβα επίσης, μπορεί να παροχετεύεται από κυκλική ή διδιάστατη διατομή. Επίσης, η παροχέτευση μπορεί να είναι κατακόρυφη, οριζόντια ή ακόμα και υπό γωνία ως προς την οριζόντια. Όσον αφορά την ανωστική δύναμη αυτή μπορεί να είναι ομόρροπη ή αντίρροπη με την κατακόρυφη συνιστώσα της ορμής οπότε έχουμε φλέβα θετικής ή αρνητικής άνωσης, αντίστοιχα. Ακόμα, ο αποδέκτης πέρα από ομογενής (σταθερή πυκνότητα) μπορεί να παρουσιάζει στρωμάτωση ως προς το βάθος. Μπορεί επίσης να είναι ήρεμος ή να υπάρχει κίνηση (Παπανικολάου 2016). Στην παρούσα εργασία μελετώνται μόνο απλές κυκλικές φλέβες (jets) σε ακίνητο ομογενή αποδέκτη. Στη συνέχεια γίνεται θεωρητική ανάλυση της απλής φλέβας.

### 2.3 ΑΠΛΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΦΛΕΒΑ (JET)

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω ως απλή φλέβα μπορούμε να ορίσουμε την ροή που προέρχεται από μία συνεχή πηγή ορμής (Lee & Chu 2003). Σύμφωνα με τους Fischer et al. (1979) η απλή φλέβα (jet) είναι η ροή που δημιουργείται από την παροχέτευση ρευστού σε αποδέκτη με ομοειδές ρευστό. Η φλέβα είναι βυθισμένη στον αποδέκτη, έχει μόνο ορμή και η πυκνότητά της είναι ίση με αυτή του περιβάλλοντος ρευστού (Παπανικολάου 2016). Σύμφωνα με τους Lee & Chu (2003) η ανάμειξη σε μία απλή φλέβα έχει άμεση σχέση με την αδράνεια των στροβίλων της τυρβώδους ροής. Σε μία τυρβώδη φλέβα μπορούν να παρατηρηθούν πολλά είδη στροβίλων ως προς το σχήμα και το μέγεθος. Η έκταση της τυρβώδους ζώνης αυξάνεται και η συγκέντρωση της φλέβας μειώνεται με την απόσταση από την πηγή καθώς το ρευστό της φλέβας αναμιγνύεται με το ρευστό που συμπαρασύρεται από τον αποδέκτη και έτσι επιτυγχάνεται αραίωση. Η διαδικασία της συμπάρρσωσης καθορίζεται από τους μεγάλους στροβίλους που καταλαμβάνουν όλο το πλάτος της φλέβας. Η τελική ανάμειξη του συμπαρασυρόμενου ρευστού με το ρευστό της φλέβας πραγματοποιείται από μικρούς στροβίλους που κυκλοφορούν γύρω από τους μεγαλύτερους στροβίλους. Επίσης η αρχική ανάπτυξη της φλέβας περιορίζεται σε ένα στρώμα που εκτιμάται ότι έχει μήκος περίπου  $6D$  ( $D$  η διάμετρος του στομίου παροχέτευσης της φλέβας) από την εκροή της φλέβας.



**Σχήμα 2.1** Τυρβώδης διάχυση κατακόρυφης φλέβας (Παπανικολάου 2016)

Στη συνέχεια ορίζονται οι κύριες παράμετροι στην εκροή της φλέβας (Παπανικολάου 2016) Η αρχική ορμή της φλέβας στην εκροή είναι:

$$\rho M = \rho Q U \quad (2-1)$$

ενώ η κινηματική ή ειδική ορμή (specific momentum flux) είναι η ορμή ανά μονάδα μάζας κινούμενου ρευστού

$$M = Q U \quad (2-2)$$

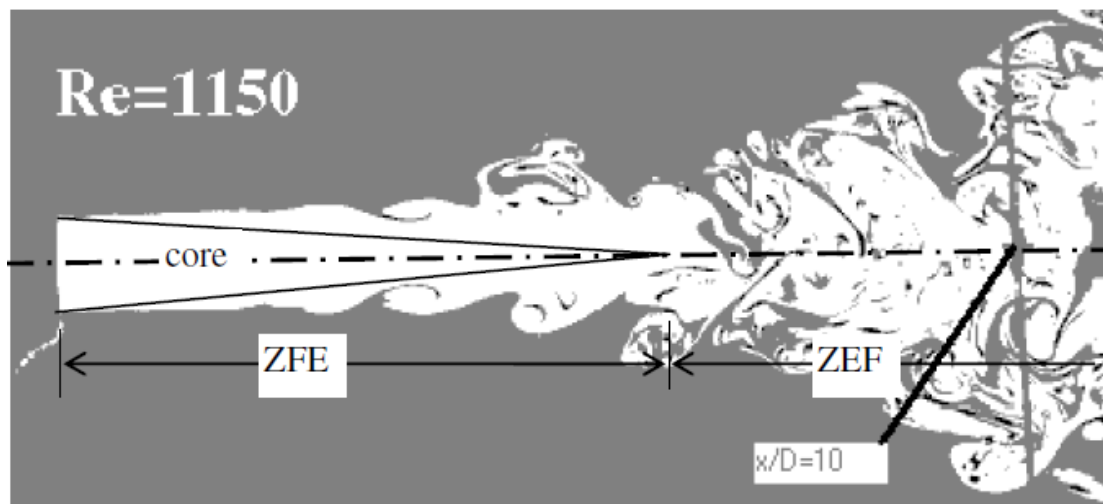
Η αρχική ογκομετρική παροχή (specific mass flux) στην εκροή είναι:

$$Q = AU \quad (2-3)$$

όπου  $A$  είναι η επιφάνεια της διατομής του στομίου παροχέτευσης της φλέβας και  $U$  η μέση ταχύτητα εξόδου. Στην περίπτωση εκροής από κυκλικό στόμιο διαμέτρου  $D$  η αρχική ογκομετρική παροχή κατά την έξοδο είναι:

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

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2 η ροή της φλέβας αρχικά είναι στρωτή και στη συνέχεια εμφανίζονται δακτυλιοειδείς στρόβιλοι (vortex rings) που ζευγαρώνουν (vortex pairing) οπότε η ροή αρχίζει να γίνεται τυρβώδης σε απόσταση περίπου 6 διαμέτρων από το ακροφύσιο. Η περιοχή ανάμεσα από την εκροή μέχρι και μια απόσταση  $6D$  όπου παρατηρείται το σημείο μετάβασης στην τύρβη ονομάζεται περιοχή ανάπτυξης της ροής (zone of flow establishment, ZFE), ενώ η περιοχή στα κατάντη του σημείου μετάβασης στην τύρβη, δηλαδή μετά το αρχικό μήκος  $6D$ , ονομάζεται περιοχή αναπτυγμένης ροής (zone of established flow, ZEF).



**Σχήμα 2.2** Τομογραφία απλής φλέβας με τεχνική LIF (Παπανικολάου 2016)

Η περιοχή  $0 < z/D < 6$  λέγεται και πυρήνας της φλέβας και σ' αυτόν τόσο η συγκέντρωση όσο και η ταχύτητα είναι περίπου ομοιόμορφες και ίσες με τις αρχικές τιμές τους (τιμές στην εκροή). Η απόσταση στην οποία εμφανίζεται ο πυρήνας της φλέβας εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds στην εκροή της και σύμφωνα με τη βιβλιογραφία εκτείνεται σε απόσταση περίπου 6 διαμέτρων από το ακροφύσιο, όταν ο αριθμός Reynolds  $Re \geq 2000$  (Fischer et. al 1979). Ο αριθμός Reynolds ορίζεται ως ο λόγος των δυνάμεων αδράνειας προς τις δυνάμεις συνεκτικότητας. Για μικρές τιμές αριθμού Reynolds η ροή θεωρείται στρωτή ενώ για μεγάλες ( $Re \geq 2000$ ) η ροή θεωρείται τυρβώδης. Ο αριθμός Reynolds ορίζεται ως:

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad (2-5)$$

όπου  $\nu$  ο συντελεστής κινηματικής συνεκτικότητας (κινηματικό ιξώδες) του ρευστού της φλέβας.

Στην περιοχή της ανεπτυγμένης (τυρβώδους) ροής (ZFE) και σε απόσταση  $z$  από την εκροή, η μέση (χρονικά) ταχύτητα  $u$  περιγράφεται με μια εξίσωση μορφής:

$$u = u(z, r) \text{ ή } u = u_c f(z, r) \quad (2- 6)$$

όπου  $u_c = u_c(z)$  είναι η μέγιστη μέση ταχύτητα στον άξονα η οποία είναι συνάρτηση μόνο της απόστασης από την "πηγή"  $z$  και  $f(z, r)$  είναι μια συνάρτηση κατανομής της μέσης ταχύτητας με  $f(z, 0) = 1$ . Από μετρήσεις έχει βρεθεί ότι η κατανομή της μέσης ταχύτητας  $u$  καθώς και της μέσης συγκέντρωσης  $C$  ουσίας που μεταφέρει η φλέβα προκύπτει ότι είναι μορφή Gauss (Fischer et al. 1979, Papanicolaou 1984).

Σε επίπεδο κάθετο στον άξονα της φλέβας που απέχει απόσταση  $z$  από την εκροή, η (ογκομετρική) παροχή και η ειδική ορμή ορίζονται ως εξής (Παπανικολάου 2016):

$$\mu(z) = \int_A u dA \quad (2- 7)$$

και

$$m(z) = \int_A u^2 dA \quad (2- 8)$$

όπου  $A$  είναι η επιφάνεια της διατομής της φλέβας.

## 2.4 ΔΙΑΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΛΗΣ ΦΛΕΒΑΣ

Η διαστατική ανάλυση αποτελεί ένα πολύ σημαντικό εργαλείο για την ανάλυση της θεωρίας των φλεβών. Χρησιμοποιείται συνήθως για την μερική λύση των προβλημάτων καθώς δεν μπορεί να προσδιορίσει με ακρίβεια τον συσχετισμό των μεταβλητών. Βασίζεται κυρίως, στην αρχή της ομοιογένειας των διαστάσεων στα δύο μέλη μιας εξίσωσης. Η διαστατική ανάλυση οδηγεί σε μερική λύση του προβλήματος που είναι συνήθως πολύτιμη στην καθοδήγηση της περαιτέρω μελέτης του. Η λύση συνήθως ολοκληρώνεται όταν υποστηρίζεται από πειραματικά δεδομένα που συσχετίζουν τις μεταβλητές (Παπακωνσταντής 2009).

Γνωρίζοντας ότι η αρχική ορμή  $M$  της φλέβας παραμένει αμετάβλητη με την απόσταση από την έξοδο της καθώς δεν επιδρούν δυνάμεις βαρύτητας στη ροή και με δεδομένα την διάμετρο  $D$  της φλέβας την ταχύτητα εξόδου  $U$  και την αρχική συγκέντρωση  $C$  μιας ουσίας διαλυμένης στο ρευστό της φλέβας, μπορούμε να δούμε με διαστατική ανάλυση την διασπορά, ανάπτυξη και το πεδίο των συγκεντρώσεων της φλέβας. Θεωρούμε ότι η διαλυμένη ουσία είναι συντηρητική και δεν αναλίσκxεται. Από τα αρχικά χαρακτηριστικά της φλέβας  $Q$  και  $M$  ορίζεται μια χαρακτηριστική κλίμακα μήκους (Fischer et al. 1979):

$$l_Q = \frac{Q}{\sqrt{M}} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{1/2} D = \sqrt{A} \quad (2- 9)$$

όπου  $A$  είναι το εμβαδόν της διατομής του στομίου παροχέτευσης της φλέβας. Σε μια απλή φλέβα όλες οι μεταβλητές της ροής εξαρτώνται από τα  $M$ ,  $Q$ ,  $z/l_Q$ . Σε



αποστάσεις  $z$  από την πηγή κατά μήκος του άξονα της φλέβας πολύ μεγαλύτερες της κλίμακας μήκους  $l_0$ , η αρχική παροχή  $Q$  είναι σημαντική και όλες οι μεταβλητές μπορούν να οριστούν με βάση τις αποστάσεις από την εκροή  $z$  και την αρχική ορμή  $M$  (Fischer et al. 1979, Παπακωνσταντής 2009).

Η διαστατική ανάλυση μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του πλάτους  $b$  της φλέβας συναρτήσει της απόστασης από την πηγή. Το πλάτος  $b$  είναι η ακτινική απόσταση από τον άξονα της φλέβας όπου η ταχύτητα μειώνεται σε συγκεκριμένο ποσοστό της μέγιστης (αξονικής) ταχύτητας. Συνήθως το πλάτος  $b$  θεωρείται ως η απόσταση  $r$  για την οποία  $u = u_c \cdot e^{-1}$ .

Αμελώντας την πυκνότητα  $\rho$  το πλάτος της φλέβας είναι συνάρτηση της μορφής  $b = b(z, M, Q)$ . Εφαρμόζοντας το θεώρημα  $\Pi$  του Buckingham, έχουμε 2 αδιάστατα μονώνυμα που σχετίζονται με τη σχέση::

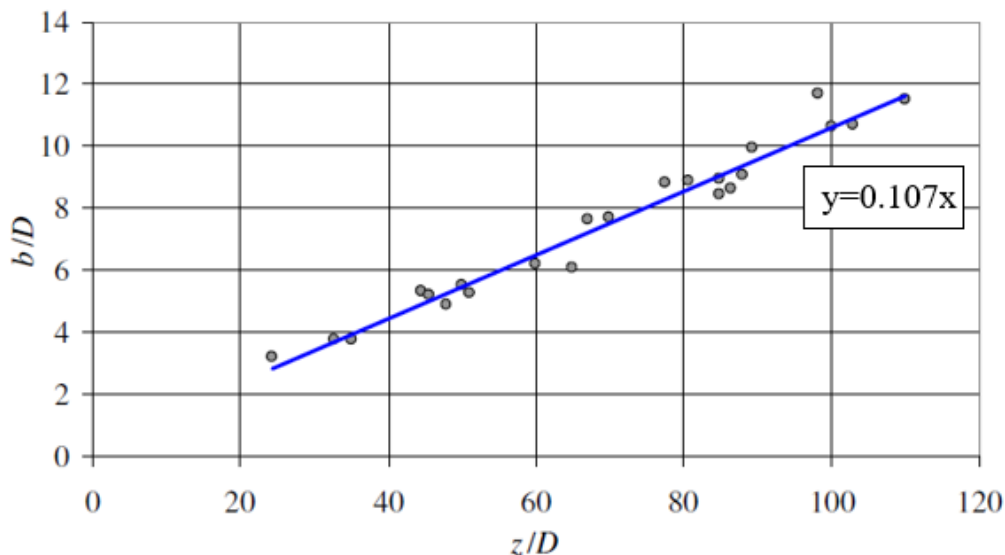
$$\frac{b}{l_0} = f\left(\frac{z}{l_0}\right) \quad (2-10)$$

Δεδομένου ότι η αρχική παροχή  $Q$  στην πηγή μπορεί να αμεληθεί για  $z \gg l_0$  (πρακτικά στη ζώνη ανεπτυγμένης ροής), πρέπει  $b \sim z$  ή

$$\frac{b}{l_0} = \alpha_1 \frac{z}{l_0} \quad \text{ή} \quad \frac{b}{D} = \alpha_1 \frac{z}{D} \quad (2-11)$$

όπου  $\alpha_1$  είναι μια σταθερά.

Στο Σχήμα 2.3 φαίνεται η μεταβολή του πλάτους  $b$  από την απόσταση  $z$  από μετρήσεις του Paranicolaou (1984). Η μεταβολή είναι γραμμική με σταθερά αναλογίας ίση με 0.107. Αντίστοιχη σχέση προκύπτει για το πλάτος της κατανομής της συγκέντρωσης  $b_c$ .



2

**Σχήμα 2.3** Κατανομή πλάτους απλής φλέβας (Paranicolaou 1984)

Για τον υπολογισμό της μέσης χρονικά συγκέντρωσης  $C_M$  στον άξονα της φλέβας σε απόσταση  $z$  από το ακροφύσιο θεωρούμε ότι η φλέβα περιέχει διαλυμένη

συντηρητική ουσία με αρχική συγκέντρωση  $C_0$ . Έτσι η μέση συγκέντρωση στον άξονα μπορεί να γραφτεί ως  $C_M(z)=C_M(z,M,Q,Y)$  αμελώντας την πυκνότητα  $\rho$ , όπου  $Y=QC_0$  είναι η ανά μονάδα χρόνου παροχή μάζας της διαλυμένης ουσίας που θεωρούμε ότι είναι συντηρητική.

Αγνοώντας την αρχική παροχή  $Q$  σε μεγάλη απόσταση από το ακροφύσιο καταλήγουμε σε τέσσερις μεταβλητές τις  $C_M$ ,  $M$ ,  $z$  και  $Y$  που εμφανίζουν τρεις διαστάσεις ( $L$ ,  $T$  και  $\Theta$ ), προκύπτει επομένως ένα αδιάστατο μονώνυμο το οποίο θεωρώντας το λόγο  $C_0/C_M$  ως την μέση αραιώση  $S$  προκύπτει:

$$S = \frac{C_0}{C_M} = a_2 \frac{z}{l_Q} \quad (2-12)$$

Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται οι σταθερές των εξισώσεων της απλής φλέβας που προσδιορίστηκαν από διάφορους ερευνητές.

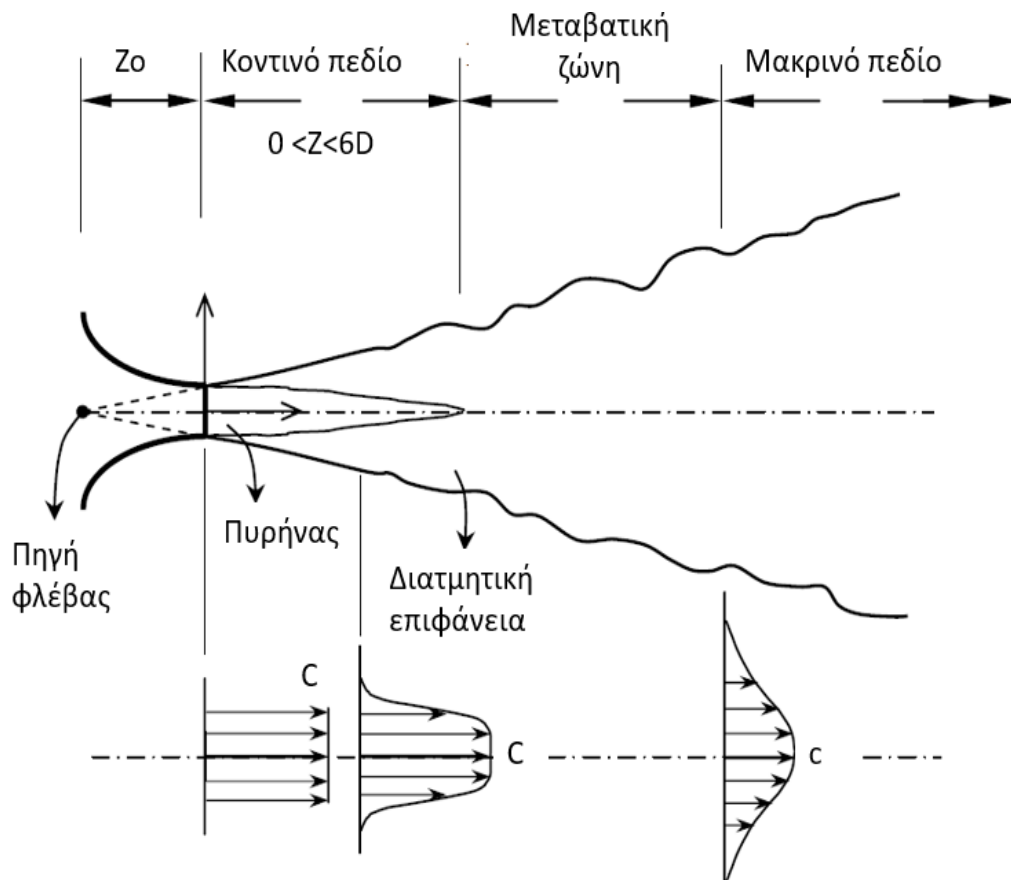
**Πίνακας 2.1** Σταθερές εξισώσεων απλής φλέβας

| Papanicolaou (1984)                     | Fischer et al. (1979)                   | Lee & Chu (2003)                        |
|---|---|---|
| $b(z) = 0.109z$                         | $b(z) = 0.107z$                         | $b(z) = 0.114z$                         |
| $b_c(z) = 0.126z$                       | $b_c(z) = 0.127z$                       | $b_c(z) = 0.125z$                       |
| $\frac{C_0}{C_M} = 0.165 \frac{z}{l_Q}$ | $\frac{C_0}{C_M} = 0.179 \frac{z}{l_Q}$ | $\frac{C_0}{C_M} = 0.168 \frac{z}{l_Q}$ |
| $\frac{C_M}{C_0} = 6.06 \frac{l_Q}{z}$  | $\frac{C_M}{C_0} = 5.60 \frac{l_Q}{z}$  | $\frac{C_M}{C_0} = 5.94 \frac{l_Q}{z}$  |
| $\frac{\mu}{Q} = 0.252 \frac{z}{l_Q}$   | $\frac{\mu}{Q} = 0.25 \frac{z}{l_Q}$    | $\frac{\mu}{Q} = 0.29 \frac{z}{l_Q}$    |
| $\frac{m}{M} = 0.90$                    | $\frac{m}{M} = 0.90$                    | -                                       |

Από πειραματικές μετρήσεις φάνηκε ότι στη ζώνη της αναπτυσσόμενης ροής η κατανομή της μέσης χρονικά συγκέντρωσης  $C$  (υπεράνω της συγκέντρωσης του αποδέκτη) παρουσιάζει αυτοομοιότητα (self similarity) και ακολουθεί κατανομή Gauss όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.4:

$$C = C_M e^{-r^2/b_c^2} \quad (2-13)$$

όπου  $r$  είναι η εγκάρσια ή ακτινική απόσταση από τον άξονα της φλέβας.



**Σχήμα 2.4** Σχηματική αναπαράσταση φλέβας και τυπικό προφίλ συγκεντρώσεων

Σε μια απλή φλέβα η ποσότητα κίνησης διατηρείται περίπου σταθερή δηλαδή  $m \approx M$  (Fischer et al. 1979).

## 2.5 ΘΕΩΡΙΑ ΑΝΩΣΤΙΚΩΝ ΦΛΕΒΩΝ

Όπως αναφέρεται και παραπάνω οι περισσότερες φλέβες οι οποίες παρατηρούνται στην φύση έχουν τόσο αρχική ορμή όσο και άνωση. Έτσι αν η αρχική ορμή είναι επικρατέστερη η ροή αρχικά συμπεριφέρεται σαν απλή φλέβα, ενώ στη συνέχεια μετά κάποια απόσταση από την πηγή σαν πλούμιο.

Η ροή ανωστικών φλεβών χαρακτηρίζεται από την ογκομετρική παροχή  $Q$ , τη ροή ειδικής ποσότητας κίνησης  $M$  και τη ροή ειδικής άνωσης  $B$  η οποία οφείλεται στην πυκνομετρική διαφορά μεταξύ του ρευστού της φλέβας και του περιβάλλοντος ρευστού. Όλες οι ιδιότητες μιας φλέβας περιγράφονται με βάση αυτές τις παραμέτρους (Fischer et al. 1979). Στον Πίνακα 2.2 δίνονται οι ορισμοί των βασικών παραμέτρων της ροής ανωστικών φλεβών.

**Πίνακας 2.2** Ορισμοί βασικών παραμέτρων ανωστικών φλεβών

| Μέγεθος                       | Ορισμός                                     |
|-------------------------------|---|
| Παροχή                        | $Q = \int_A u dA$                           |
| Ροή ειδικής ποσότητας κίνησης | $M = \int_A u^2 dA$                         |
| Ροή ειδικής άνωσης            | $B = \int_A g \frac{\Delta\rho}{\rho} u dA$ |

Ως ροή ειδικής άνωσης (specific buoyancy flux) στην «πηγή» ορίζουμε την ανά μονάδα μάζας ρέοντος ρευστού άνωση

$$B = \frac{(\rho_\alpha - \rho_o)}{\rho_\alpha} g Q = g'_o Q \quad (2-14)$$

που έχει διαστάσεις  $[B]=L^4/T^3$ , όπου  $\rho_\alpha$  η πυκνότητα του ακίνητου αποδέκτη και  $\rho_o$  η πυκνότητα της φλέβας ( $\rho_\alpha < \rho_o$ ).

Πέρα από την κλίμακα μήκους  $l_Q$  (Εξίσωση 2-9) από τις αρχικές παραμέτρους  $Q$ ,  $M$ ,  $B$  μπορούμε να ορίσουμε και την παρακάτω κλίμακα μήκους (Fischer et al. 1979) ως εξής:

$$l_M = \frac{M^{3/4}}{B^{1/2}} \quad (2-15)$$

Σε μια ανωστική φλέβα διακρίνουμε τις εξής περιοχές (Παπακωνσταντής 2009):

1.  $z/l_M \ll 1$  όπου η ανωστική φλέβα έχει συμπεριφορά απλής φλέβας (jet regime)
2. Ενδιάμεση ή μεταβατική περιοχή η οποία απέχει απόσταση από την εκροή της τάξης της κλίμακας  $l_M$  (buoyant jet ή forced plume)
3.  $z/l_M \gg 1$  όπου η ανωστική φλέβα έχει τις ίδιες ιδιότητες με το πλούμιο (plume regime).

Η αναλογία  $l_Q / l_M$  ονομάζεται αριθμός Richardson και ορίζεται ως ο λόγος των δυνάμεων αδράνειας προς τις δυνάμεις άνωσης. Για μια κυκλική φλέβα ο αρχικός αριθμός Richardson  $R_i$  είναι (Fischer et al. 1979):

$$R_i = \frac{l_Q}{l_M} = \frac{QB^{1/2}}{M^{3/4}} \quad (2-16)$$

Επίσης, συχνά χρησιμοποιείται και ο αριθμός Froude ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος των δυνάμεων αδράνειας προς τις δυνάμεις βαρύτητας

$$F = \frac{U}{\sqrt{g \frac{|\rho_\alpha - \rho_o|}{\rho_\alpha} D}} = \frac{U}{\sqrt{g'_o D}} \quad (2-17)$$

Για κυκλική φλέβα οι δύο αυτοί αριθμοί συνδέονται με τη σχέση:

$$R_i = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{1/4} \frac{1}{F} \quad (2-18)$$

## 2.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Οι ροές των φλεβών έχουν απασχολήσει την επιστημονική κοινότητα για πάνω από 6 δεκαετίες. Με τη διαρκή εξέλιξη της τεχνολογίας και τη σημασία των πρακτικών εφαρμογών τους έχει επιτραπεί η προσέγγιση της μελέτης τους με νεότερες και βελτιωμένες τεχνικές μετρήσεων. Το πλήθος των επιστημόνων που έχει ασχοληθεί με το μηχανισμό διάχυσης των φλεβών μέχρι και σήμερα αποδεικνύει πως αποτελεί αντικείμενο ενδιαφέροντος τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πειραματικό επίπεδο.

Πειραματικά αποτελέσματα και θεωρητική προσέγγιση της ροής απλών φλεβών, πλουμιών και ανωστικών φλεβών έχουν δοθεί στη βιβλιογραφία (Fischer et al. 1979, List στο Rodi (1982), Lee and Chu 2003). Οι περισσότερες εργασίες αφορούν στη ροή φλεβών θετικής άνωσης, ενώ πιο πρόσφατα έχουν παρουσιαστεί εργασίες που αφορούν σε φλέβες αρνητικής άνωσης που παροχετεύονται υπό γωνία (π.χ. Παπακωνσταντής 2009, Parakonstantis et al. 2011a,b, Lai and Lee 2012, Parakonstantis and Tsatsara 2018, 2019 ).

Επειδή κοντά στην εκροή η ροή κυριαρχείται από τις δυνάμεις ορμής, η μελέτη απλών φλεβών είναι σημαντική. Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται εργασίες που έχουν σαν αντικείμενο τις τυρβώδεις φλέβες με τα αποτελέσματά τους.

Επειδή κοντά στην εκροή η ροή κυριαρχείται από τις δυνάμεις ορμής, η μελέτη απλών φλεβών είναι σημαντική. Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται εργασίες που έχουν σαν αντικείμενο τις τυρβώδεις φλέβες με τα αποτελέσματά τους.

Οι Dimotakis et. al (1983) χρησιμοποίησαν την τεχνική LIF και έκαναν μετρήσεις ταχύτητας σωματιδίων για να διερευνήσουν τη δομή και την δυναμική σε κυκλικές κατακόρυφες τυρβώδεις φλέβες. Τα αποτελέσματα υποδηλώνουν εκτός από την περιοχή μετάβασης σε τύρβη και ότι στην περιοχή του μακρινού πεδίου της φλέβας κυριαρχούν στρόβιλοι μεγάλης κλίμακας, οι οποίοι φαίνεται να είναι αξονικά συμμετρικοί ή ελικοειδείς για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η εισαγωγή και η ανάμειξη του ρευστού της δεξαμενής με το ρευστό της φλέβας έχει βρεθεί ότι συνδέεται στενά με την κινηματική αυτών των δομών και δεν παρατηρήθηκε σταδιακή διάχυση.

Οι Paranicolaou & List (1988) χρησιμοποίησαν την τεχνική LIF και την ανεμομετρία με Laser-Doppler (LDA) για τον υπολογισμό των κατανομών της ταχύτητας και της συγκέντρωσης σε κυκλικές ανωστικές φλέβες. Στα αποτελέσματά τους έδειξαν πως τα μέγιστα στο διάγραμμα της εγκάρσιας κατανομής της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης για απλές φλέβες δηλαδή σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις όπου  $z/l_M < 1$  βρίσκονται γύρω από την τιμή 0.25.

Οι Abdel-Rahman et al. (1996) πραγματοποίησαν μια πειραματική μελέτη για τη διερεύνηση της επίδρασης του αριθμού Reynolds στην περιοχή του κοντινού πεδίου των κυκλικών τυρβωδών φλέβων αέρα. Οι μετρήσεις έγιναν με χρήση της τεχνικής της ανεμομετρίας με Laser Doppler (LDA) και περιελάμβαναν μέση ταχύτητα και ένταση τύρβης. Έγιναν μετρήσεις από την έξοδο του ακροφυσίου μέχρι και 10 διαμέτρους (10D) στην κατάντη κατεύθυνση για διαφορετικούς αρχικούς αριθμούς Reynolds με εύρος από 1400 έως 20000. Ο αριθμός Reynolds βρέθηκε να έχει ισχυρή επίδραση στη συμπεριφορά της φλέβας στην περιοχή του κοντινού πεδίου. Η ταχύτητα στον άξονα της φλέβας μειώνεται γρηγορότερα μειώνοντας τον αριθμό Reynolds.

Οι Zhang & Johari (1996) σε μια δεξαμενή διαστάσεων (Μ×Π×Υ) 1.20 m×1.20 m×1.50 m πραγματοποίησαν πειράματα με την τεχνική LIF και μελέτησαν τυρβώδεις φλέβες με διάφορα προφίλ επιτάχυνσης. Πριν την έναρξη της επιτάχυνσης δημιούργησαν μια φλέβα με σταθερή ταχύτητα και με αριθμό Reynolds  $Re=3000$ . Η επιτάχυνση προκάλεσε μείωση του ρυθμού συμπαράσυρσης, σε σύγκριση με τη σταθερή φλέβα, τουλάχιστον κοντά στο μπροστινό μέρος της φλέβας. Καθώς η ροή επιταχύνθηκε, δημιουργήθηκε ένα ευδιάκριτο «μέτωπο». Η επίδραση της επιτάχυνσης στην φλέβα είναι να δημιουργήσει ένα μέτωπο που διακρίνεται από την σταθερή φλέβα από τις υψηλότερες συγκεντρώσεις, όπως γίνεται αντιληπτό από τις εικόνες LIF .

Οι Webster et. al (2001) διερεύνησαν ταυτόχρονα την κατανομή της ταχύτητας και της συγκέντρωσης για κυκλικές τυρβώδεις φλέβες με αριθμό Reynolds  $Re=3000$  στο μακρινό πεδίο της φλέβας χρησιμοποιώντας τις τεχνικές LIF και DPTV . Από τα πειράματα τους έδειξαν πως η σταθερά της εξίσωσης του πλάτους έχει την τιμή 0.104 η οποία βρίσκεται μέσα στο εύρος τιμών που έχουν προταθεί από άλλους ερευνητές. Επίσης, τα μέγιστα στο διάγραμμα της εγκάρσιας κατανομής της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή είναι γύρω στο 0.25, τιμή η οποία επίσης συμφωνεί με μετρήσεις άλλων ερευνητών.

Οι Borg et. al (2001) χρησιμοποίησαν ταυτόχρονα τις τεχνικές LIF και PIV για τον υπολογισμό των κατανομών της ταχύτητας και της συγκέντρωσης στο κοντινό πεδίο της φλέβας. Πιο συγκεκριμένα, σε μία δεξαμενή διαστάσεων (Μ×Π×Υ) 1.00 m x 0.28 m x 1.20 m και διάμετρο ακροφυσίου της φλέβας  $d=10\text{mm}$  έγιναν μετρήσεις στο κοντινό πεδίο της φλέβας, δηλαδή μέχρι 6 διαμέτρους από την εκροή, για αριθμό Reynolds  $Re=6000$ . Τα αποτελέσματά τους για τη μέση συγκέντρωση και τις τυρβώδεις διακυμάνσεις είναι παρόμοια με εκείνα άλλων ερευνητών, δηλαδή η μέση συγκέντρωση κοντά στην εκροή παραμένει σταθερή και στη συνέχεια ακολουθεί κατανομή Gauss ενώ η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης παρουσιάζει δύο μέγιστα με τιμή περίπου 0.20.

Οι Hu et. al (2002) διεξήγαγαν πειράματα σε μια δεξαμενή διαστάσεων (Μ×Π×Υ) 0.60 m x 0.60 m x 1.00 m χρησιμοποιώντας ταυτόχρονα τις τεχνικές PIV και LIF σε κυκλική τυρβώδη φλέβα με διάμετρο ακροφυσίου  $D = 0.30\text{cm}$  . Το σύστημα εφαρμόστηκε για ταυτόχρονη μέτρηση της κατανομής της ταχύτητας και της συγκέντρωσης στο κοντινό πεδίο μιας κυκλικής φλέβας. Ο αριθμός Reynolds,

βασισμένος στη διάμετρο του ακροφυσίου της φλέβας και της ταχύτητας του πυρήνα της φλέβας είναι  $Re = 6000$ . Το ύψος του πυρήνα της φλέβας βρέθηκε ίσο με 4 διαμέτρους ( $z = 4D$ ).

Ο Abdel-Rahman (2010) έδειξε ότι στην απλή τυρβώδη φλέβα, οι κατάντη περιοχές σε ακίνητο αποδέκτη, αναπτύσσονται με ρυθμούς που εξαρτώνται από τις συνθήκες στην πηγή της φλέβας. Η παρουσία συνεκτικών δομών στο κοντινό πεδίο επιβεβαιώνεται για συγκριτικά χαμηλούς αριθμούς Reynolds και όπου το αρχικό προφίλ ταχύτητας δεν είναι τυρβώδες. Οι δομές με συνεκτικό στροβιλισμό λοιπόν, καθορίζουν, σε μεγάλο βαθμό, την εξέλιξη και τη δυναμική της ροής σε μια τυρβώδη φλέβα. Άρα αποδεικνύεται ότι διαφορετικοί μηχανισμοί μπορεί να έχουν έλεγχο σε διαφορετικές φλέβες ή σε διαφορετικές περιοχές μιας φλέβας.

Οι Mistry & Dawson (2014) σε μια ορθογωνική δεξαμενή διαστάσεων (ΜxΠxΥ) 1.00 m x 1.00 m x 7.00 m πραγματοποίησαν πειράματα με τις τεχνικές LIF και PIV για την μελέτη της συμπαράσυρσης στο μακρινό πεδίο μιας τυρβώδους κυκλικής φλέβας. Προσίδορισαν τα προφίλ ταχύτητας και συγκέντρωσης στο μακρινό. Από τις μετρήσεις προέκυψαν αποτελέσματα για την αξονική ταχύτητα και το αντίστοιχο πλάτος τα οποία συμφωνούν με τις σχέσεις από τη βιβλιογραφία για τυρβώδεις φλέβες. Παράλληλα έκαναν μετρήσεις χρησιμοποιώντας ταυτόχρονα τις δύο μεθόδους σε απόσταση  $z=50D$  από την πηγή της φλέβας.

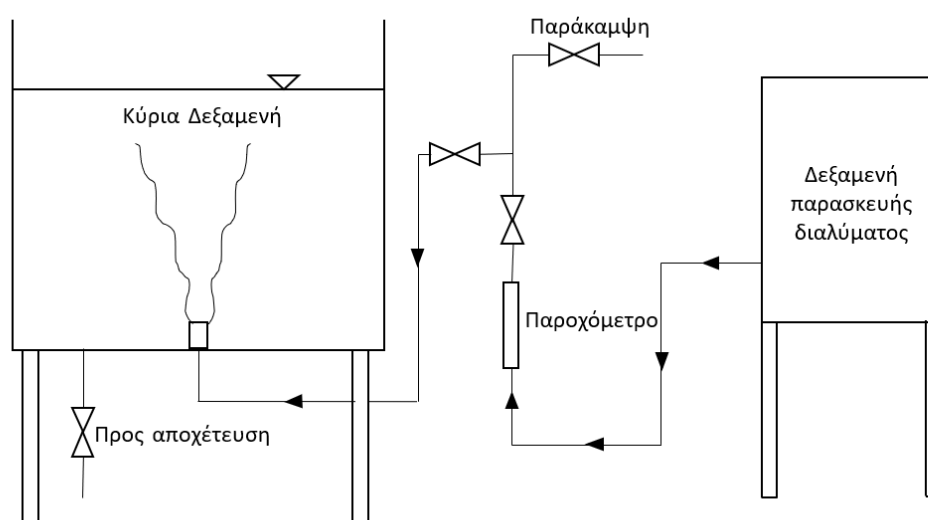
### 3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

#### 3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ. Μελετήθηκε η ροή τυρβωδών φλεβών που διοχετεύονται κατακόρυφα από κυκλικό στόμιο σε δεξαμενή με ήρεμο νερό. Ειδικότερα οπτικοποιήθηκε η ροή με την τεχνική LIF και έγιναν μετρήσεις συγκέντρωσης.

#### 3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Σκαρίφημα της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα φαίνεται στο Σχήμα 3.1.



**Σχήμα 3.1** Σχεδιάγραμμα πειραματικής διάταξης

Αναλυτική περιγραφή της διάταξης δίνεται από τον Μίχα (2008) στη διδακτορική διατριβή του. Η πειραματική διάταξη αποτελείται από τα εξής επιμέρους τμήματα:

1. Κύρια ορθογωνική δεξαμενή διαστάσεων (ΜxΠxΥ) 1.00 m x 0.80 m x 0.70 m.
2. Δεξαμενή – Θερμοσίφωνα χωρητικότητας 40 L για την προετοιμασία του διαλύματος και την τροφοδοσία της φλέβας.
3. Κυκλικό στόμιο (ακροφύσιο) διαμέτρων  $D= 0.50$  ,  $0.75$  και  $1.00$  cm από το οποίο διοχετεύεται η φλέβα στην κύρια δεξαμενή (Σχήμα 3.2).
4. Συσκευή δημιουργίας φύλλου Laser.
5. Κάμερα βιντεοσκόπησης.



6. Βοηθητικά όργανα (παροχόμετρο, ηλεκτρονικό θερμόμετρο, ζυγαριά ακριβείας, μαγνητικός αναδευτήρας κ.α.).
7. Ειδική κατασκευή για τη συσκότιση της πειραματικής διάταξης.

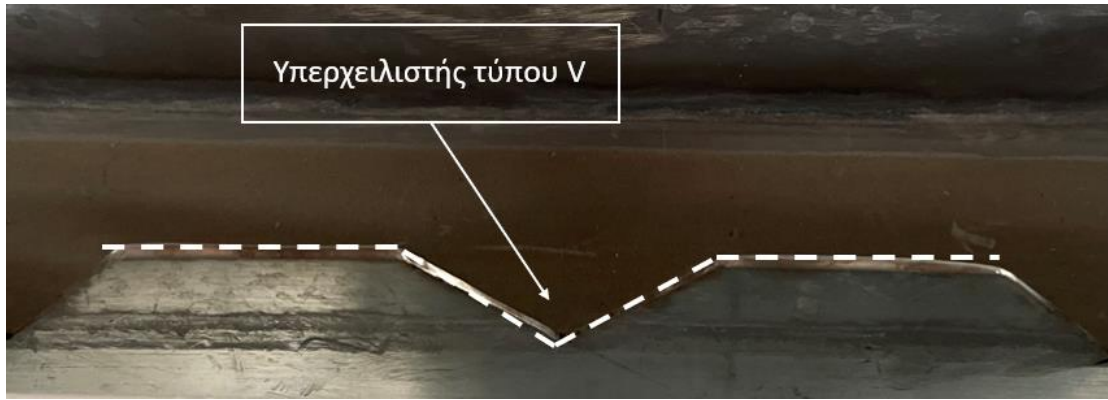


**Σχήμα 3.2** Κυκλικά στόμια που χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα διαμέτρων  $D = 0.50, 0.75$  και  $1.00$  cm (από αριστερά προς τα δεξιά)

Επιλέχθηκαν τρεις διάμετροι στομίων παροχέτευσης της φλέβας,  $D = 0.50, 0.75$  και  $1.00$  cm (Σχήμα 3.2), διότι έτσι εξασφαλίστηκε ένα μεγάλο εύρος παροχών για τις οποίες η ροή ήταν τυρβώδης, δηλαδή ο αριθμός Reynolds ήταν μεγαλύτερος από 2000 ( $Re > 2000$ ).

### 3.2.1 Κύρια δεξαμενή

Η κύρια δεξαμενή είναι διαστάσεων κάτοψης  $1.00$  m x  $0.80$  m και βάθους  $0.70$  m και χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή όλων των πειραμάτων. Η δεξαμενή είναι κατασκευασμένη στις τρεις κατακόρυφες πλευρές της από θερμικά επεξεργασμένο γυαλί πάχους  $12.5$  mm, ενώ ο πυθμένας και η μία πλευρά της είναι κατασκευασμένα από διάφανο Plexiglas ίδιου πάχους. Η δεξαμενή εδράζεται πάνω σε μεταλλική βάση που απέχει από το έδαφος  $80$  cm. Ο πυθμένας διαθέτει 2 οπές, μια στην άκρη για την αποχέτευση του νερού διαμέτρου  $2.5$  cm και μια στο κέντρο διαμέτρου  $5$  cm, όπου τοποθετείται το στόμιο της φλέβας. Στο επάνω μέρος της δεξαμενής υπάρχει περιμετρικά ορθογωνικό κανάλι με υπερχειλιστή με σχισμές τύπου V (V-notch weir) (Σχήμα 3.3) για τη διατήρηση σταθερής στάθμης νερού και την αποχέτευση της περίσσειας νερού (Μίχας 2008, Καπογιάννη 2018)). Επιλέχθηκε αυτός ο τύπος υπερχειλιστή για να επιτύχουμε μεγάλο ύψος υπερχειλίσης. Η δεξαμενή απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα (Σχήμα 3.4).



**Σχήμα 3.3** Υπερχειλιστής κύριας δεξαμενής



**Σχήμα 3.4** Κύρια δεξαμενή διεξαγωγής πειραμάτων

Για την ομογενοποίηση του υγρού της δεξαμενής πριν και μετά από κάθε πείραμα χρησιμοποιήθηκε ένας μεταλλικός αναδευτήρας ο οποίος απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.5)



**Σχήμα 3.5** Μεταλλικός αναδευτήρας κύριας δεξαμενής

### 3.2.2 Δεξαμενή προετοιμασίας και τροφοδοσίας διαλύματος

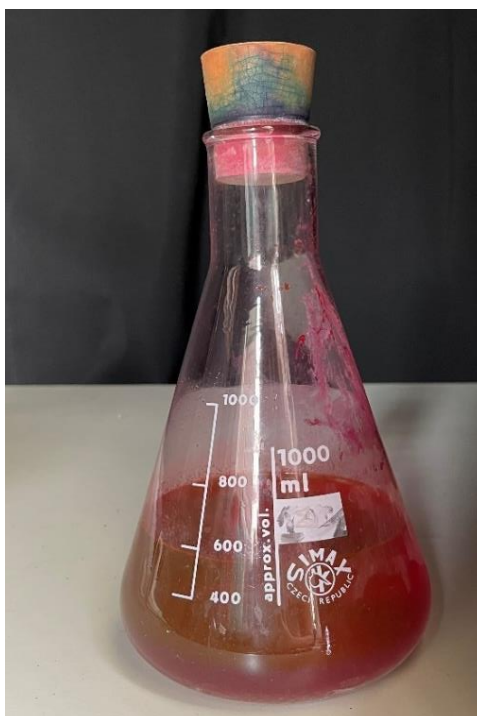
Σε αυτή τη δεξαμενή (Σχήμα 3.6) αρχικά προετοιμάζεται το διάλυμα της φλέβας. Έχει χωρητικότητα 40 L, είναι κατασκευασμένη από ανοξείδωτο χάλυβα και εδώ αναμειγνύεται το νερό με τη ροδαμίνη 6G. Πρόκειται για το δοχείο θερμοσίφωνα που στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ως απλή δεξαμενή προετοιμασίας του διαλύματος χωρίς θέρμανσή του. Η τροφοδοσία του διαλύματος γίνεται υπό πίεση 2-2.5 atm που παρέχεται από έναν αεροσυμπιεστή, πίεση ικανή για τη διατήρηση σταθερής παροχής. Στην δεξαμενή υπάρχουν 2 σπές, μια για την πλήρωση του δοχείου και μια για την μεταφορά του διαλύματος προς το παροχόμετρο και στη συνέχεια προς το στόμιο παροχέτευσης της φλέβας.



**Σχήμα 3.6** Δεξαμενή προετοιμασίας του διαλύματος της φλέβας.

Το διάλυμα της ροδαμίνης φαίνεται στο Σχήμα 3.7. Η συγκέντρωση του διαλύματος είναι  $C = 1 \text{ gr/L}$  και δημιουργήθηκε αναμειγνύοντας 1 gr ροδαμίνης 6G σε 1 L νερού. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων αποθηκευόταν στο δοχείο που φαίνεται στο Σχήμα 3.7 και φυλασσόταν σε σκιερό μέρος για την αποφυγή της αλλοίωσης του διαλύματος.





**Σχήμα 3.7** Διάλυμα ροδαμίνης 6G

Επίσης, επειδή το νερό του εργαστηρίου περιέχει χλώριο, το οποίο εξουδετερώνει την ροδαμίνη αφαιρώντας της έτσι την ιδιότητα του φθορισμού της φλέβας είναι απαραίτητη η προσθήκη ποσότητας θειώδους νατρίου ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) (Σχήμα 3.8) στο νερό της κύριας δεξαμενής και της δεξαμενής προετοιμασίας του διαλύματος ώστε να δεσμευτεί το ελεύθερο χλώριο. Οι ποσότητες των ουσιών αυτών είναι πολύ μικρές ώστε να μην επηρεάζουν τις μετρούμενες συγκεντρώσεις.



**Σχήμα 3.8** Θειώδες Νάτριο και ροδαμίνη 6G που χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα

### 3.2.3 Βιντεοκάμερα

Για την καταγραφή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε η ψηφιακή βιντεοκάμερα Panasonic HC-V770 (Σχήμα 3.9), η οποία καταγράφει με ρυθμό 50 fps (frames per second). Η βιντεοκάμερα είναι FULL HD με ανάλυση 1920 x 1080 pixels . Για την σταθερή λήψη κατά την διάρκεια των πειραμάτων η κάμερα τοποθετήθηκε σε ένα μεταλλικό τρίποδο. Η βιντεοκάμερα τοποθετήθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτευχθεί η βιντεοσκόπηση ολόκληρου του πεδίου ροής της φλέβας.



**Σχήμα 3.9** Βιντεοκάμερα Panasonic HC-V770

### 3.3 ΤΕΧΝΙΚΗ LASER INDUCED FLUORESCENCE (LIF)

Η τεχνική Laser Induced Fluorescence (LIF) αποτελεί μια τεχνική τομογραφίας με Laser και χρησιμοποιείται για την ανάλυση της τύρβης μέσω του υπολογισμού των συγκεντρώσεων στην φλέβα (Paranicolaou & List , 1988).

Πιο συγκεκριμένα είναι μια οπτική τεχνική που επιτρέπει τον άμεσο υπολογισμό της θερμοκρασίας ή των συγκεντρώσεων μιας ουσίας-δείκτη που μεταφέρεται σε μια επίπεδη επιφάνεια του πεδίου ροής. Η τεχνική αυτή συνήθως βρίσκει εφαρμογή στη διερεύνηση φαινομένων δυναμικής των ρευστών, όπως για παράδειγμα η τυρβώδης ανάμειξη και τα μοντέλα μεταφοράς θερμότητας. Κύριο χαρακτηριστικό της τεχνικής αυτής είναι ότι δίνει την δυνατότητα μετρήσεων μεγάλης ακρίβειας χωρίς να παρεμβαίνει στο πεδίο της ροής, σε αντίθεση με τις μετρήσεις με αισθητήρες (π.χ. θερμίστορες).

Όπως υποδηλώνει και το όνομα της, η τεχνική βασίζεται στο φαινόμενο του φθορισμού όταν αυτό προκαλείται με την χρήση ακτίνας Laser. Φθορισμός είναι το φωτοχημικό φαινόμενο της εκπομπής ακτινοβολίας, από μια ουσία που έχει απορροφήσει φως ή ακτινοβολία διαφορετικού μήκους κύματος.

Στις περισσότερες περιπτώσεις η ακτινοβολία που εκπέμπει η ουσία έχει μεγαλύτερο μήκος κύματος και επομένως, χαμηλότερη ενέργεια από αυτήν που απορροφά. Η γενική διάταξη για την διεξαγωγή της τεχνικής LIF περιλαμβάνει, μια

πηγή laser, μια διάταξη κατόπτρων για την μετατροπή της ακτίνας σε επίπεδο φύλλο laser, μια ουσία με ικανότητα φθορισμού και μια βιντεοκάμερα για την καταγραφή του φαινομένου.

Η τεχνική αυτή βασίζεται στο ότι μια ουσία με ικανότητα φθορισμού όπως η ροδαμίνη αναμιγνύεται με τη φλέβα, η οποία στη συνέχεια αλληλοεπιδρά με τον αποδέκτη. Η ακτινοβολία που εκπέμπεται με την μορφή φύλλου είναι γνωστού μήκους κύματος και απορροφάται από τα σωματίδια της φθορίζουσας ουσίας. Αυτά τα σωματίδια αμέσως εκπέμπουν ακτινοβολία διαφορετικού μήκους κύματος και αυτή καταγράφεται από μια βιντεοκάμερα. Η φωτεινότητα που καταγράφεται σε όλο το φάσμα της φλέβας, είναι ανάλογη της συγκέντρωσης των σωματιδίων που φθορίζονται εκεί. Τελικά η συγκέντρωση της φθορίζουσας ουσίας συσχετίζεται με την συγκέντρωση ή την θερμοκρασία του υπό μελέτη ρευστού (Μήνος 2019).

Για τα πειράματα αυτής της εργασίας χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα λέιζερ το οποίο αποτελείται από την συσκευή παραγωγής της ακτίνας λέιζερ και τον μηχανισμό μετατροπής της ακτίνας σε φύλλο που είναι τοποθετημένα σε ένα τρίποδο (Σχήμα 3.10). Επειδή το φύλλο laser είναι επίπεδο η τεχνική που εφαρμόστηκε αναφέρεται συνήθως ως Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF).



**Σχήμα 3.10** Συσκευή ακτίνας laser

Η συσκευή λέιζερ εκπέμπει ακτίνα ισχύος 1 W και είναι τύπου DPSS (Diode Pumped Solid State). Η μετατροπή της ακτίνας σε φύλλο γίνεται με ένα πολυγωνικό περιστρεφόμενο κάτοπτρο (rotator) που διαθέτει 24 έδρες και περιστρέφεται με συχνότητα 20 kHz. Αυτή η μεγάλη συχνότητα περιστροφής εξασφαλίζει ότι ακόμη και για μεγάλη ταχύτητα κλείστρου της βιντεοκάμερας η εικόνα στο βίντεο θα δείχνει σαν να υπάρχει ένα ενιαίο και συμπαγές φύλλο laser. Επίσης, το σύστημα περιλαμβάνει και τρία τροφοδοτικά για το Laser και το πολυγωνικό κάτοπτρο (Σχήμα 3.11). Το τρίποδο τοποθετείται με τέτοιο τρόπο ώστε το φύλλο λέιζερ να προσπίπτει κάθετα στο τοίχωμα της δεξαμενής, να έχει κατακόρυφο προσανατολισμό και η βιντεοκάμερα να καταγράφει τη φλέβα σε όλο το φάσμα της (Dimitriadis 2017).

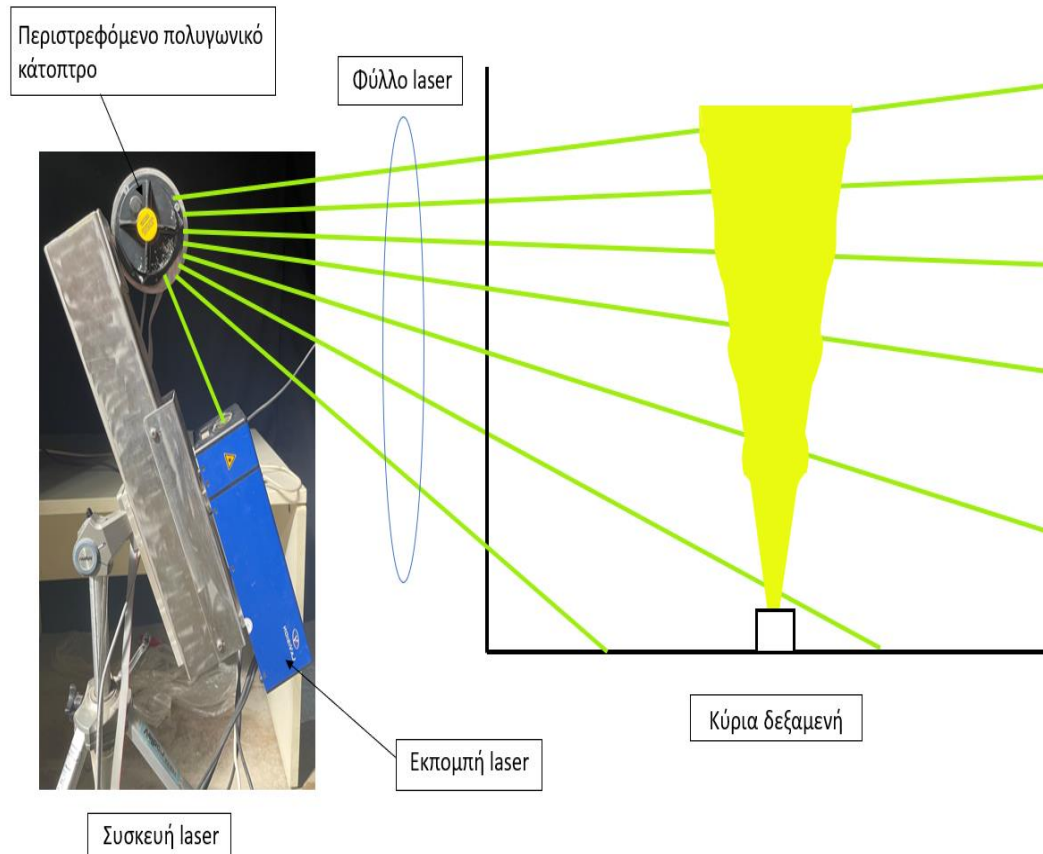


**Σχήμα 3.11** Τροφοδοτικό κατόπτρου και Laser

Για τον χρωματισμό της φλέβας χρησιμοποιήθηκε ροδαμίνη 6G (R6G) η οποία είναι μια φθορίζουσα ουσία που διεγείρεται από μονοχρωματική ακτινοβολία μήκους κύματος  $\lambda = 532$  nm (πράσινο χρώμα) και εκπέμπει ακτινοβολία με μήκος κύματος  $\lambda = 556$  nm (κίτρινο χρώμα). Η ένταση της ακτίνας φθορισμού είναι ανάλογη της συγκέντρωσης της ροδαμίνης στο νερό, εφόσον η συγκέντρωση δεν ξεπερνά τα 50 ppb (Ferrier et. al, 1993). Παράλληλα η ένταση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται είναι και αυτή ανάλογη της ισχύος του laser. Επομένως είναι απαραίτητη η διαδικασία της βαθμονόμησης του συστήματος για τη μέτρηση της συγκέντρωσης (Dimitriadis 2017).

Στο Σχήμα 3.12 φαίνεται η διάταξη του φύλλου Laser που δημιουργείται με τη βοήθεια του περιστρεφόμενου κυκλικού κατόπτρου.





**Σχήμα 3.12** Διάταξη δημιουργίας φύλλου laser με την τεχνική LIF

Το φύλλο Laser έχει πάχος 1 mm και είναι κατακόρυφο. Σχηματίζει οριζόντια γωνία 90° με την όψη της κάμερας, χτυπά κάθετα την κύρια δεξαμενή και διέρχεται από τον άξονα της φλέβας.

### 3.4 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΠΑΡΟΧΟΜΕΤΡΟΥ

Για την ρύθμιση της παροχής κατά τη διάρκεια των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε ένα παροχόμετρο με πλωτήρα με εύρος μετρήσεων 10 έως 160 L/h (Σχήμα 3.13). Είναι πολύ σημαντικό σε όλη τη διάρκεια του πειράματος η παροχή να παραμένει σταθερή για να έχουμε σωστές μετρήσεις.



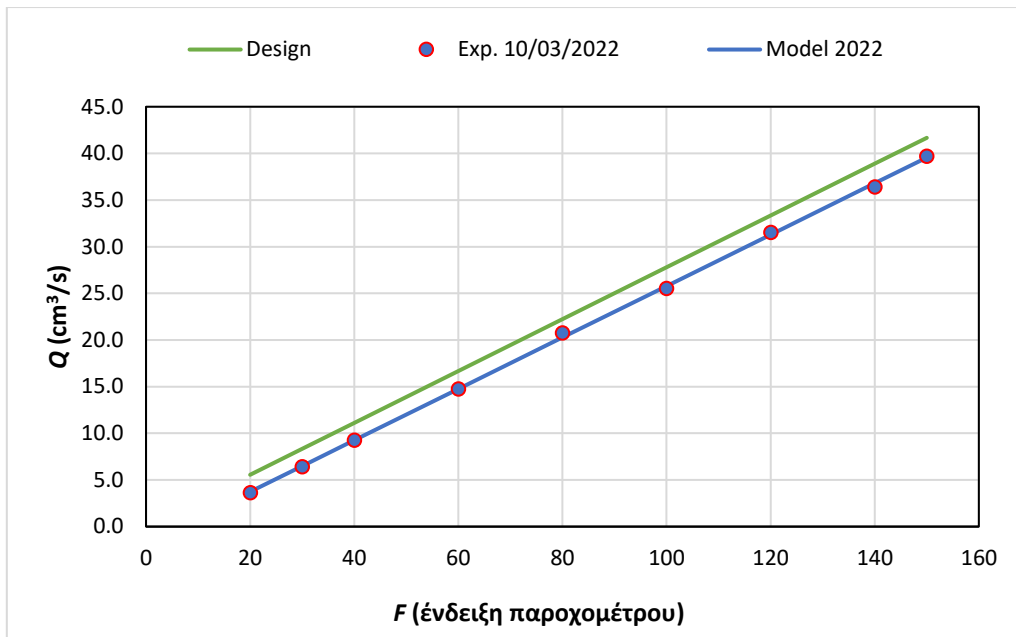
**Σχήμα 3.13** Παροχόμετρο πειραματικής διάταξης

Για την επίτευξη της σωστής μέτρησης της παροχής της φλέβας είναι απαραίτητη η βαθμονόμηση του παροχόμετρου. Η βαθμονόμηση αποτελεί μια διαδικασία αντιστοίχισης των ενδείξεων των οργάνων με τις πραγματικές τιμές. Για να πραγματοποιήσουμε την βαθμονόμηση του παροχομέτρου για διάφορες ενδείξεις του μετρήθηκε ο όγκος νερού που συλλέγονταν σε ένα δοχείο και ο αντίστοιχος χρόνος που κυμάνθηκε από 1 έως 5 λεπτά. Για να πετύχουμε μεγαλύτερη ακρίβεια στην μέτρηση του όγκου του νερού χρησιμοποιήθηκαν δύο ογκομετρικοί σωλήνες 1000 ml και 250 ml αντίστοιχα (Σχήμα 3.14).



**Σχήμα 3.14** Ογκομετρικοί σωλήνες

Με την παραπάνω διαδικασία δημιουργήθηκε το παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 3.15) στο οποίο φαίνονται και μετρήσεις από προηγούμενες βαθμονομήσεις (Old Model) καθώς και του κατασκευαστή του παροχομέτρου (Design). Πιο αναλυτικά, στο υπόμνημα του Σχήματος 3.15 με τον τίτλο “Design” εννοείται η σχέση που έχει δοθεί από τον κατασκευαστή και η οποία συνδέει την ένδειξη F του παροχομέτρου με την πραγματική παροχή. Με τον τίτλο “Model 2022” είναι η σχέση που δημιουργήθηκε από τη βαθμονόμηση (EXP 10/03/2022) που έγινε για αυτή την εργασία.



**Σχήμα 3.15** Διάγραμμα βαθμονόμησης παροχής

Στον Πίνακα 3.1 και στο Σχήμα 3.15 παρουσιάζονται οι μετρήσεις βαθμονόμησης του παροχομέτρου που έγιναν στην παρούσα εργασία.

**Πίνακας 3.1** Βαθμονόμηση παροχομέτρου και σύγκριση με άλλες εργασίες

| Index | Design     | Exp. 10/03/2022 | Model 2022 |        |            |
|-------|------------|-----------------|------------|--------|------------|
|       | Q' (cm³/s) | Q (cm³/s)       | t (min)    | V (ml) | Q' (cm³/s) |
| 20    | 5.6        | 3.6             | 5          | 1090   | 3.7        |
| 30    | 8.3        | 6.4             | 5          | 1920   | 6.5        |
| 40    | 11.1       | 9.3             | 3          | 1665   | 9.2        |
| 60    | 16.7       | 14.8            | 1          | 885    | 14.8       |
| 80    | 22.2       | 20.8            | 1          | 1245   | 20.3       |
| 100   | 27.8       | 25.5            | 2          | 3062.5 | 25.8       |
| 120   | 33.3       | 31.5            | 2          | 3783   | 31.3       |
| 140   | 38.9       | 36.4            | 2          | 4367.5 | 36.8       |
| 150   | 41.7       | 39.7            | 2          | 4762   | 39.5       |

Συνεπώς, η πραγματική παροχή υπολογίζεται πλέον από τη γραμμική σχέση:

$$Q' = 0.2755 F - 1.7752 \quad (3-1)$$

όπου η παροχή  $Q'$  είναι σε  $\text{cm}^3/\text{s}$  και  $F$  η ένδειξη του παροχομέτρου είναι σε  $\text{l/h}$ .

### 3.5 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΥΠΙΚΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Σε αυτό το υποκεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την διεξαγωγή των πειραμάτων. Η περιγραφή αφορά όλα τα πειράματα με κυκλική διάμετρο ακροφυσίου  $D=0.5, 0.75$  και  $1.00$  cm χωρίς θερμοκρασιακή μεταβολή. Ειδικότερα η διαδικασία διεξαγωγής ενός πειράματος αναλύεται στα παρακάτω βήματα:

- α) Αρχικά, φτιάχνουμε το διάλυμα της ροδαμίνης με συγκέντρωση  $1\text{gr/l}$ . Για το διάλυμα αυτό ζυγίζουμε σε ζυγαριά ακριβείας  $1$  gr ροδαμίνης 6G, την διαλύουμε σε  $1$  lt νερού και ανακατεύουμε μέχρι να ομογενοποιηθεί το μείγμα με τη βοήθεια μαγνητικού αναδευτήρα (Σχήμα 3.16).
- β) Παράλληλα, γεμίζουμε την κύρια δεξαμενή με νερό από το δίκτυο του εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Υδραυλικής. Η δεξαμενή αυτή έχει χωρητικότητα  $560$  L.
- γ) Στη συνέχεια γεμίζουμε την βοηθητική δεξαμενή (θερμοσίφωνα) με νερό για την προετοιμασία του διαλύματος.
- δ) Στις δυο δεξαμενές προσθέτουμε μικρή ποσότητα θειώδους νατρίου ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) για την εξουδετέρωση του χλωρίου που υπάρχει στο νερό πριν την διεξαγωγή των πειραμάτων.
- ε) Μετράμε  $2$  ml διαλύματος ροδαμίνης 6G συγκεντρώσεως  $1$  gr/l με την σύριγγα (Σχήμα 3.17) και το ρίχνουμε στη βοηθητική δεξαμενή όπου ανακατεύεται με σύστημα ανακυκλοφορίας μέχρι το διάλυμα να γίνει ομοιογενές. Τελικά προκύπτει στη δεξαμενή διάλυμα ροδαμίνης με συγκέντρωση  $50$   $\mu\text{g/L}$ .
- στ) Για την καλύτερη δυνατή οπτικοποίηση της ροής, στην κύρια δεξαμενή ρίχνουμε  $0.056$  ml του διαλύματος ροδαμίνης, με σύριγγα χωρητικότητας  $1$  ml για καλύτερη ακρίβεια (Σχήμα 3.17).. Στην κύρια δεξαμενή έχουμε πλέον διάλυμα ροδαμίνης συγκέντρωσης  $0.1$   $\mu\text{g/L}$ .
- ζ) Αναμένουμε περίπου  $30$  λεπτά έτσι ώστε ο αποδέκτης να βρεθεί σε κατάσταση ηρεμίας και να αποφευχθεί η εσωτερική κίνηση του νερού.

- η) Τοποθετούμε την βιντεοκάμερα με τη βοήθεια τρίποδου σε κατάλληλη θέση ώστε να φαίνεται όλο το φάσμα της φλέβας κατά την διάρκεια της βιντεοσκόπησης των πειραμάτων.
- θ) Ενεργοποιούμε το Laser και το ευθυγραμμίζουμε έτσι ώστε η ακτίνα να περνάει από το κέντρο της οπής του στομίου παροχέτευσης της φλέβας και να φωτίζει ολόκληρη τη ροή.
- ι) Ρυθμίζουμε μέσω της δικλείδας του παροχόμετρου την παροχή και όταν αυτή σταθεροποιηθεί ξεκινάμε την διεξαγωγή του πειράματος.
- ια) Η βιντεοσκόπηση διαρκεί περίπου 2-2.5 λεπτά για κάθε πείραμα.



**Σχήμα 3.16** Μαγνητικός αναδευτήρας



**Σχήμα 3.17** Σύριγγες για την έγχυση ροδαμίνης στις δεξαμενές

### 3.6 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΜΕ ΜΙΚΡΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΗ ΑΥΞΗΣΗ ΣΤΗ ΦΛΕΒΑ

Κατά την διάρκεια των πειραμάτων παρατηρήθηκε πως καθώς η φλέβα ανερχόταν στην ελεύθερη επιφάνεια μετά από λίγο οι στρόβιλοί της άρχιζαν να κινούνται οριζόντια και να έχουν μια καθοδική πορεία (Σχήμα 3.18). Το φαινόμενο αυτό είχε σαν αποτέλεσμα οι στρόβιλοι μέσα σε λίγα λεπτά να εισχωρούν και πάλι στην φλέβα με αποτέλεσμα να αλλοιώνονται τα χαρακτηριστικά της και τα αποτελέσματα. Για αυτό το λόγο αποφασίστηκε να υπάρξει μια μικρή θερμοκρασιακή διαφορά της τάξεως των 5 °C μεταξύ της φλέβας και του αποδέκτη.





**Σχήμα 3.18** Στιγμιότυπο από τη χρονική στιγμή που εισχωρούν οι στρόβιλοι πάλι στην φλέβα

Με αυτή την θερμοκρασιακή αύξηση της φλέβας πλέον επιδρούν ανωστικές δυνάμεις λόγω διαφοράς πυκνότητας. Επίσης, παρουσιάστηκε το φαινόμενο της στρωμάτωσης αφού όταν η φλέβα φτάσει στην επιφάνεια θα αρχίσει να κινείται οριζόντια (Σχήμα 3.19). Η οριζόντια αυτή κίνηση με την σειρά της θα δημιουργήσει μία στρώση ρευστού η οποία λόγω διαφοράς πυκνότητας θα παραμένει στην οροφή της δεξαμενής και όσο περνάει ο χρόνος η στρώση αυτή θα αυξάνεται καθ' ύψος. Η εξέλιξη αυτής της διαδικασίας έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία διεπιφάνειας.





**Σχήμα 3.19** Δημιουργία στρωμάτωσης εξαιτίας της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ αποδέκτη και φλέβας

Για την καλύτερη διεξαγωγή των πειραμάτων τελικά η θερμοκρασιακή αύξηση της φλέβας απορρίφθηκε αφού διαπιστώθηκε ότι δεν υπήρχαν διαφοροποιήσεις στα τελικά αποτελέσματα.

### 3.7 ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν συνολικά 12 πειράματα με την τεχνική LIF. Οι διάμετροι των στομιών (ακροφυσίων) που επιλέχθηκαν είναι  $D= 0.5, 0.75$  και  $1.0$  cm, οι παροχές κυμάνθηκαν από  $9.32$  έως  $37.07$  cm<sup>3</sup>/s και ο αριθμός Reynolds Re έχει εύρος από 2650 έως 7024.

Στους Πίνακες 3.2 έως 3.4 παρουσιάζονται οι αρχικές συνθήκες των πειραμάτων.

**Πίνακας 3.2** Αρχικές συνθήκες πειραμάτων για διάμετρο ακροφυσίου  $D=0.75$  cm

| EXP | Date      | D(cm) | F(l/h) | Q (cc/s) | U (cm/s) | T(°C) | M (cm <sup>4</sup> /s <sup>2</sup> ) | Re   | I <sub>Q</sub> |
|-----|-----------|-------|--------|----------|----------|-------|--------------------------------------|------|----------------|
| 001 | 15/9/2022 | 0.75  | 60.00  | 14.87    | 33.67    | 25.00 | 500.83                               | 2818 | 0.665          |
| 002 | 15/9/2022 | 0.75  | 80.00  | 20.42    | 46.23    | 25.00 | 944.29                               | 3869 | 0.665          |
| 003 | 15/9/2022 | 0.75  | 100.00 | 25.97    | 58.79    | 25.00 | 1527.19                              | 4921 | 0.665          |
| 004 | 15/9/2022 | 0.75  | 120.00 | 31.52    | 71.36    | 25.00 | 2249.53                              | 5972 | 0.665          |
| 005 | 15/9/2022 | 0.75  | 140.00 | 37.07    | 83.92    | 25.00 | 3111.32                              | 7024 | 0.665          |

**Πίνακας 3.3** Αρχικές συνθήκες πειραμάτων για διάμετρο ακροφυσίου  $D=0.5$  cm

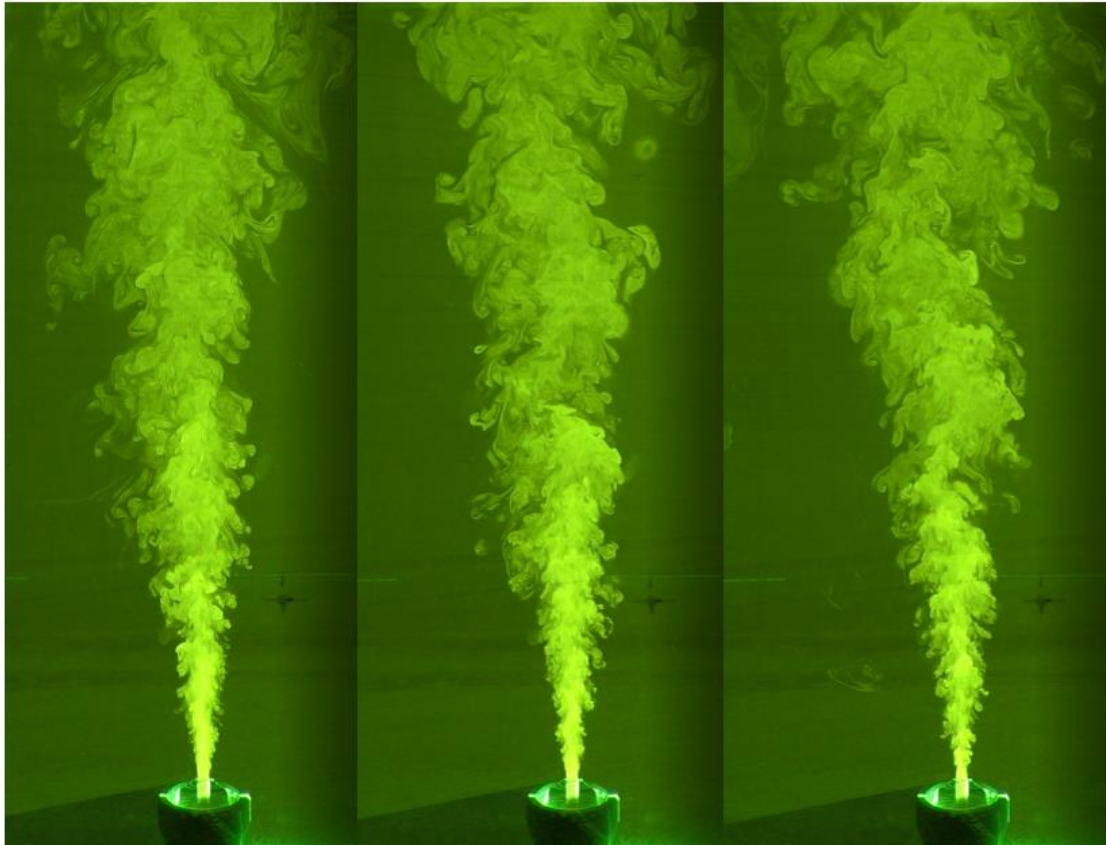
| EXP | Date      | D(cm) | F(l/h) | Q (cc/s) | U (cm/s) | T(°C) | M (cm <sup>4</sup> /s <sup>2</sup> ) | Re   | I <sub>Q</sub> |
|-----|-----------|-------|--------|----------|----------|-------|--------------------------------------|------|----------------|
| 006 | 30/9/2022 | 0.5   | 40.00  | 9.32     | 47.49    | 25.00 | 442.84                               | 2650 | 0.443          |
| 007 | 30/9/2022 | 0.5   | 60.00  | 14.87    | 75.76    | 25.00 | 1126.87                              | 4227 | 0.443          |
| 008 | 30/9/2022 | 0.5   | 80.00  | 20.42    | 104.02   | 25.00 | 2124.64                              | 5804 | 0.443          |

**Πίνακας 3.4** Αρχικές συνθήκες πειραμάτων για διάμετρο ακροφυσίου  $D=1.0$  cm

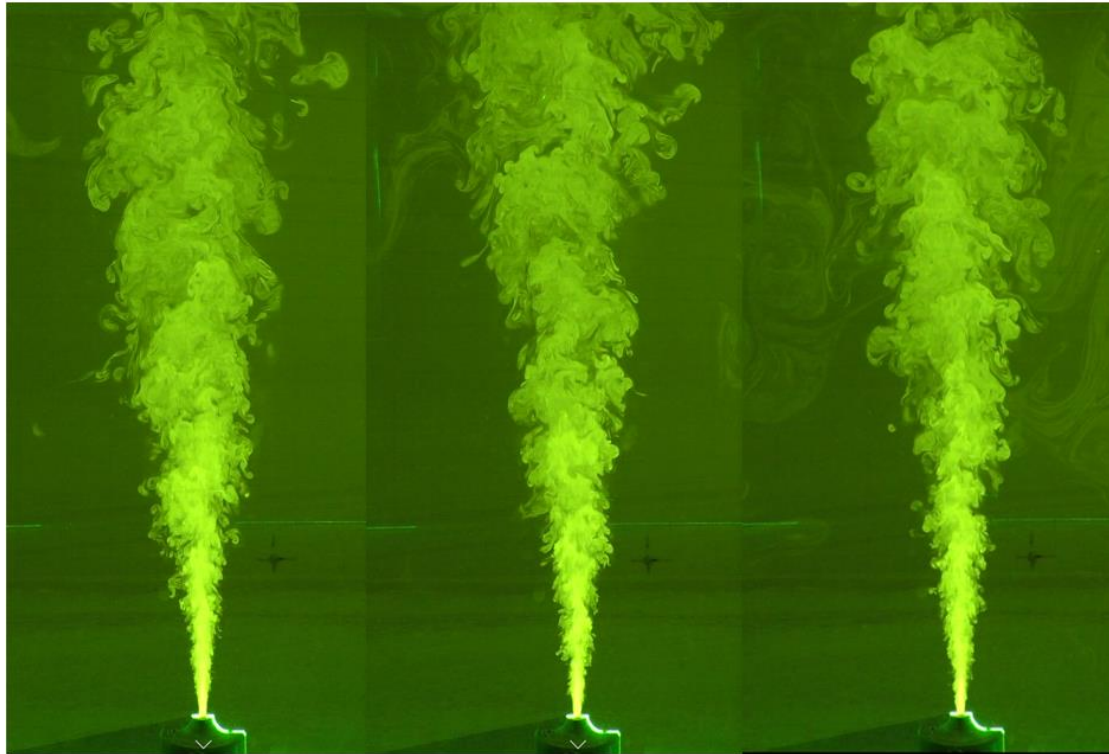
| EXP | Date      | D(cm) | F(l/h) | Q (cc/s) | U (cm/s) | T(°C) | M (cm <sup>4</sup> /s <sup>2</sup> ) | Re   | I <sub>Q</sub> |
|-----|-----------|-------|--------|----------|----------|-------|--------------------------------------|------|----------------|
| 009 | 5/10/2022 | 1.0   | 80.00  | 20.42    | 26.01    | 25.00 | 531.16                               | 2902 | 0.886          |
| 010 | 5/10/2022 | 1.0   | 100.00 | 25.97    | 33.07    | 25.00 | 859.04                               | 3691 | 0.886          |
| 011 | 5/10/2022 | 1.0   | 120.00 | 31.52    | 40.14    | 25.00 | 1265.36                              | 4479 | 0.886          |
| 012 | 5/10/2022 | 1.0   | 140.00 | 37.07    | 47.21    | 25.00 | 1750.12                              | 5268 | 0.886          |

### 3.8 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ

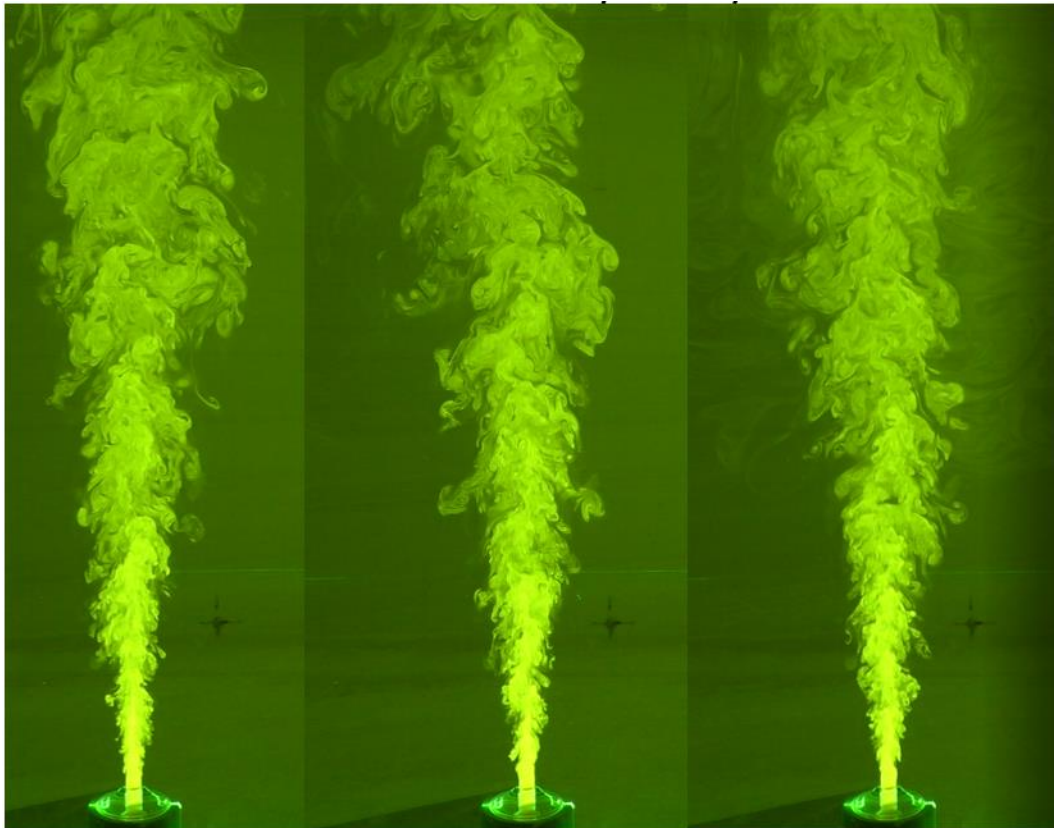
Χαρακτηριστικές εικόνες χωρίς επεξεργασία από τα πειράματα φαίνονται παρακάτω. Όπως απεικονίζεται και στα Σχήματα 3.20, 3.21 και 3.22 η ροή της φλέβας στην αρχή είναι στρωτή και στη συνέχεια εμφανίζονται οι στρόβιλοι οπότε η ροή αρχίζει να γίνεται τυρβώδης. Επίσης, παρατηρείται ότι αρχικά οι στρόβιλοι είναι μικρού μεγέθους και με το πέρασμα του χρόνου αρχίζουν και μεγαλώνουν.



**Σχήμα 3.20** Στιγμιότυπα του πειράματος EXP002 με αριθμό Reynolds  $Re=3869$  για χρόνους από αριστερά προς τα δεξιά  $t= 60, 120$  και  $165$  s



**Σχήμα 3.21** Στιγμιότυπα του πειράματος EXP007 με αριθμό Reynolds  $Re=4227$  για χρόνους από αριστερά προς τα δεξιά  $t= 60, 180$  και  $240$  s



**Σχήμα 3.22** Στιγμιότυπα του πειράματος EXP009 με αριθμό Reynolds  $Re=2902$  για χρόνους από αριστερά προς τα δεξιά  $t= 60, 180$  και  $300$  s

## 4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

### 4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν έγιναν μετρήσεις συγκέντρωσης στη ροή σε διάφορες αποστάσεις από την εκροή για διάφορες παροχές και διαμέτρους στομίων παροχέτευσης της φλέβας. Από τις μετρήσεις προέκυψαν οι τιμές της μέσης (χρονικά) συγκέντρωσης και της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης (RMS τιμές) στο πεδίο ροής, όπως εξηγείται στην παράγραφο 4.2. Σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις  $z$  από την εκροή προσδιορίστηκαν οι κατανομές της αδιάστατης μέσης συγκέντρωσης  $C/C_M$  και της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης  $C_{RMS}/C_M$  συναρτήσει της αδιάστατης απόστασης  $r/z$ , όπου  $r$  η οριζόντια απόσταση από τον άξονα της φλέβας σε ένα συγκεκριμένο ύψος  $z$  από την εκροή. Η αδιαστατοποίηση των συγκεντρώσεων έγινε με τη μέγιστη συγκέντρωση  $C_M$  που μετρήθηκε σε κάθε  $z$ . Έπειτα, δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα του πλάτους της φλέβας κατά μήκος του άξονα και τα διαγράμματα της αδιάστατης μέγιστης (αξονικής) συγκέντρωσης  $C_M/C_0$  κατά μήκος του άξονα της φλέβας, όπου  $C_0$  η αρχική συγκέντρωση στην εκροή.

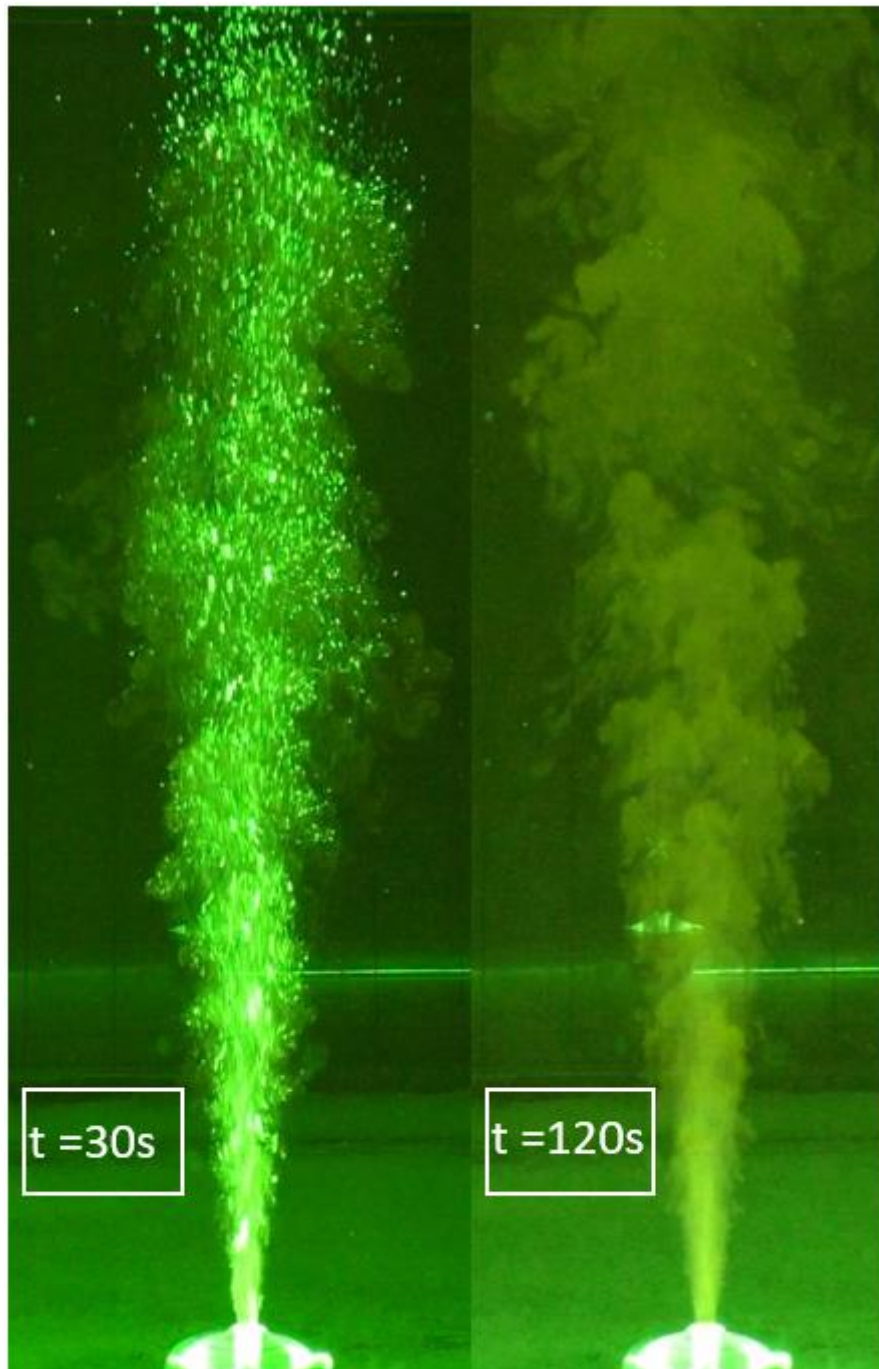
### 4.2 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΦΩΤΕΙΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΡΟΔΑΜΙΝΗΣ

Όπως έχει αναφερθεί και πιο πάνω όταν η συγκέντρωση της ροδαμίνης είναι μικρότερη από αυτή των 50 ppb, η ένταση της ακτινοβολίας που εκπέμπει είναι ανάλογη της συγκέντρωσης (Ferrier et al. 1993). Με βάση αυτή τη συσχέτιση έγινε και η βαθμονόμηση της συγκέντρωσης της ροδαμίνης στη φλέβα.

Σύμφωνα με τον Dimitriadis (2017) στο χρωματικό μοντέλο RGB κάθε εικόνα αποτελείται από ένα συνδυασμό τριών βασικών χρωμάτων. Μια εικόνα λοιπόν, μπορεί να αποσυντεθεί σε 3 υπο-εικόνες μία για κάθε βασικό χρώμα κόκκινο (Red), πράσινο (Green) και μπλε (Blue). Συνεπώς, κάθε pixel σε μια εικόνα είναι συνδυασμός των μεταβλητών R,G,B και μπορούν να πάρουν τιμές από 0 έως 255 ανάλογα με τη συγκέντρωση της κάθε μεταβλητής (R, G, B) στο κάθε pixel. Η ακτίνα του laser είναι πράσινου χρώματος και όταν η ροδαμίνη απορροφήσει την ακτίνα του laser φωσφορίζει σε κίτρινο χρώμα. Το κίτρινο χρώμα όμως είναι συνδυασμός του κόκκινου και του πράσινου χρώματος. Έπειτα από κατάλληλη επεξεργασία της εικόνας με κώδικα στη γλώσσα προγραμματισμού MATLAB, αποσυνθέτοντας την εικόνα στις 3 μεταβλητές και διαιρώντας κάθε τιμή του πίνακα με το 255 για να βγάλουμε την συγκέντρωση της ροδαμίνης σε κάθε pixel, επιλέγεται η μεταβλητή του κόκκινου χρώματος. Συνεπώς για την διεξαγωγή των απαραίτητων αποτελεσμάτων, και όλη την παραπάνω διαδικασία χρησιμοποιείται μόνο το κόκκινο χρώμα κάθε εικόνας, καθώς με βάση αυτόν έχουμε την εικόνα της ροδαμίνης. Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζονται κάποια στιγμιότυπα από τα πειράματα. Όπως φαίνεται και στο στιγμιότυπο που αντιστοιχεί σε χρόνο  $t=30s$  στην αρχή κάθε



πειράματος παρατηρούνται φυσαλίδες αέρα να εξέρχονται στόμιο. Επειδή οι φυσαλίδες αέρα αλλοιώνουν τα αποτελέσματα είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν στιγμιότυπα στα οποία δεν θα υπάρχουν.

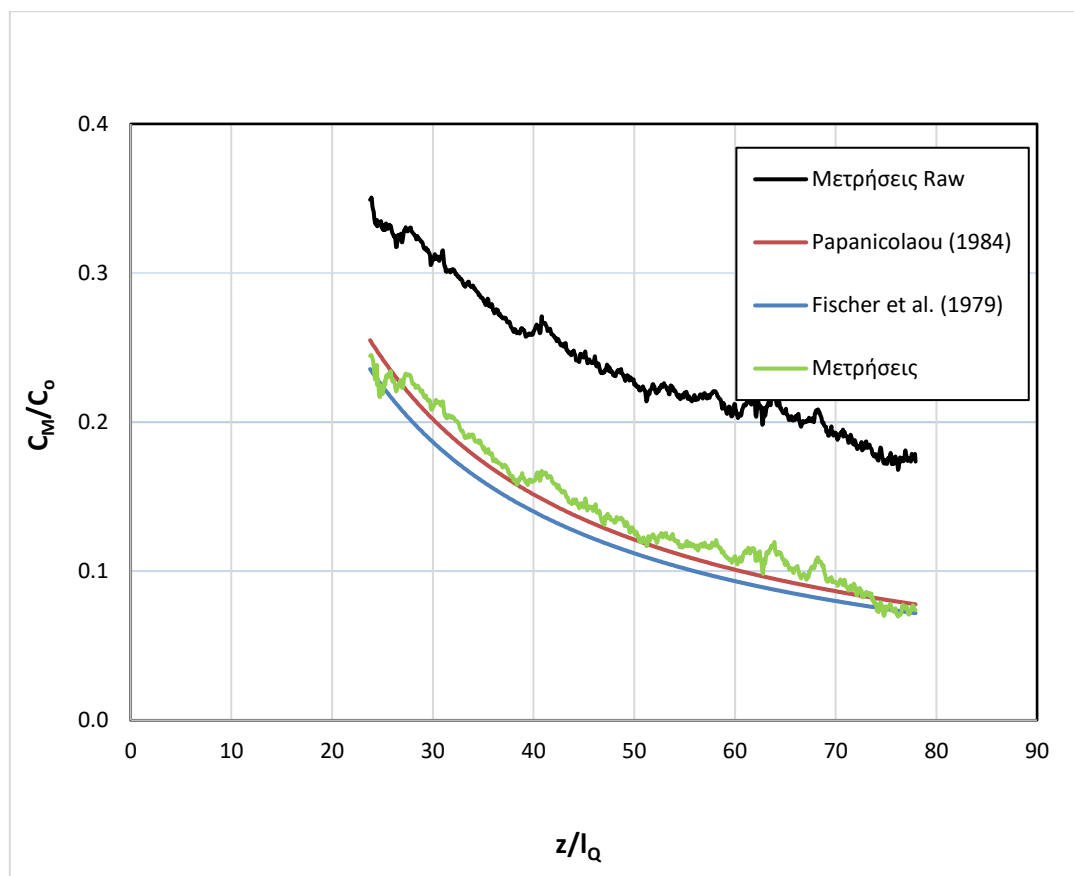


**Σχήμα 4.1** Στιγμιότυπα του πειράματος EXP006 με αριθμό Reynolds  $Re=5972$

Επειδή όπως έχει αναφερθεί και πιο πάνω, στον αποδέκτη έχει προστεθεί μικρή ποσότητα ροδαμίνης για την καλύτερη οπτικοποίηση των πειραμάτων, με αποτέλεσμα ο αποδέκτης να έχει συγκέντρωση ροδαμίνης  $0.1 \text{ mgr/l}$ , αυτή η τιμή έπρεπε να αφαιρεθεί για τη βαθμονόμηση της συγκέντρωσης σε όλη τη φλέβα. Στο

Σχήμα 4.2 παρουσιάζονται οι κατανομές της μέγιστης συγκέντρωσης στον άξονα  $C_M$  (έχει αδιαστατοποιηθεί με την αρχική συγκέντρωση  $C_0$ ) ως προς την κατακόρυφη απόσταση που αδιαστατοποιήθηκε με την κλίμακα μήκους της φλέβας  $l_0$ , πριν (raw μετρήσεις) και μετά τη βαθμονόμηση για το πείραμα EXP001 με αριθμό Reynolds  $Re=2818$ . Οι μετρήσεις συγκρίνονται με κατανομές από τα αποτελέσματα των Papanicolaou (1984) και των Fischer et al. (1979). Η πολύ καλή συμφωνία δείχνει την επιτυχή βαθμονόμηση και την πραγματοποίηση αξιόπιστων μετρήσεων. Αντίστοιχη διαδικασία έχει γίνει για όλα τα πειράματα.

Επίσης, πριν την δημιουργία των διαγραμμάτων είναι απαραίτητη η αντιστοιχία των pixels από μια εικόνα που τραβήχτηκε με τη βιντεοκάμερα σε cm. Για αυτό το σκοπό υπολογίστηκε πόσα pixels αντιστοιχούν στο πλάτος του ακροφυσίου με διάμετρο  $D=1.00$  cm χρησιμοποιώντας τον κώδικα MATLAB. Με αυτό τον τρόπο βρέθηκε πως 1 cm αντιστοιχεί σε 25 pixels.



**Σχήμα 4.2** Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή πριν και μετά την βαθμονόμηση (πείραμα EXP001,  $Re=2818$ )

### 4.3 ΜΕΣΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΚΑΙ ΕΝΤΑΣΗ ΤΥΡΒΗΣ

Η οπτικοποίηση των πειραμάτων με την τεχνική LIF επιτρέπει τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων σε όλο το πεδίο ροής της φλέβας χάρη στις ιδιότητες της και στην δυνατότητα του φθορισμού. Γνωρίζοντας τις συγκεντρώσεις στο πεδίο της ροής καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος, δίνεται η δυνατότητα εξαγωγής συμπερασμάτων για την μέση εικόνα της φλέβας, την αραίωση που επιτυγχάνεται και την τύρβη που επικρατεί σε όλο το φάσμα της φλέβας.

Θεωρώντας ότι λαμβάνονται  $N$  στιγμιαίες τιμές της συγκέντρωσης  $C_i$  σε ένα συγκεκριμένο σημείο όπου  $C_i$  η στιγμιαία συγκέντρωση του υγρού της φλέβας τότε ισχύει:

$$C_i = \bar{C} + C_i' \quad (4-1)$$

όπου  $\bar{C}$  είναι η μέση χρονικά συγκέντρωση και  $C_i'$  είναι η τυρβώδης διακύμανση της συγκέντρωσης. Για το πλήθος των παραπάνω  $N$  τιμών της συγκέντρωσης ορίζεται η μέση τιμή (arithmetic mean) των στιγμιαίων τιμών  $C_i$  και η RMS (Root Mean Square) τιμή των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης:

Μέση τιμή: 
$$\bar{C} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i = C \quad (4-2)$$

RMS τιμή: 
$$\sqrt{\bar{C}'^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (C_i - \bar{C})^2}{N-1}} \quad (4-3)$$

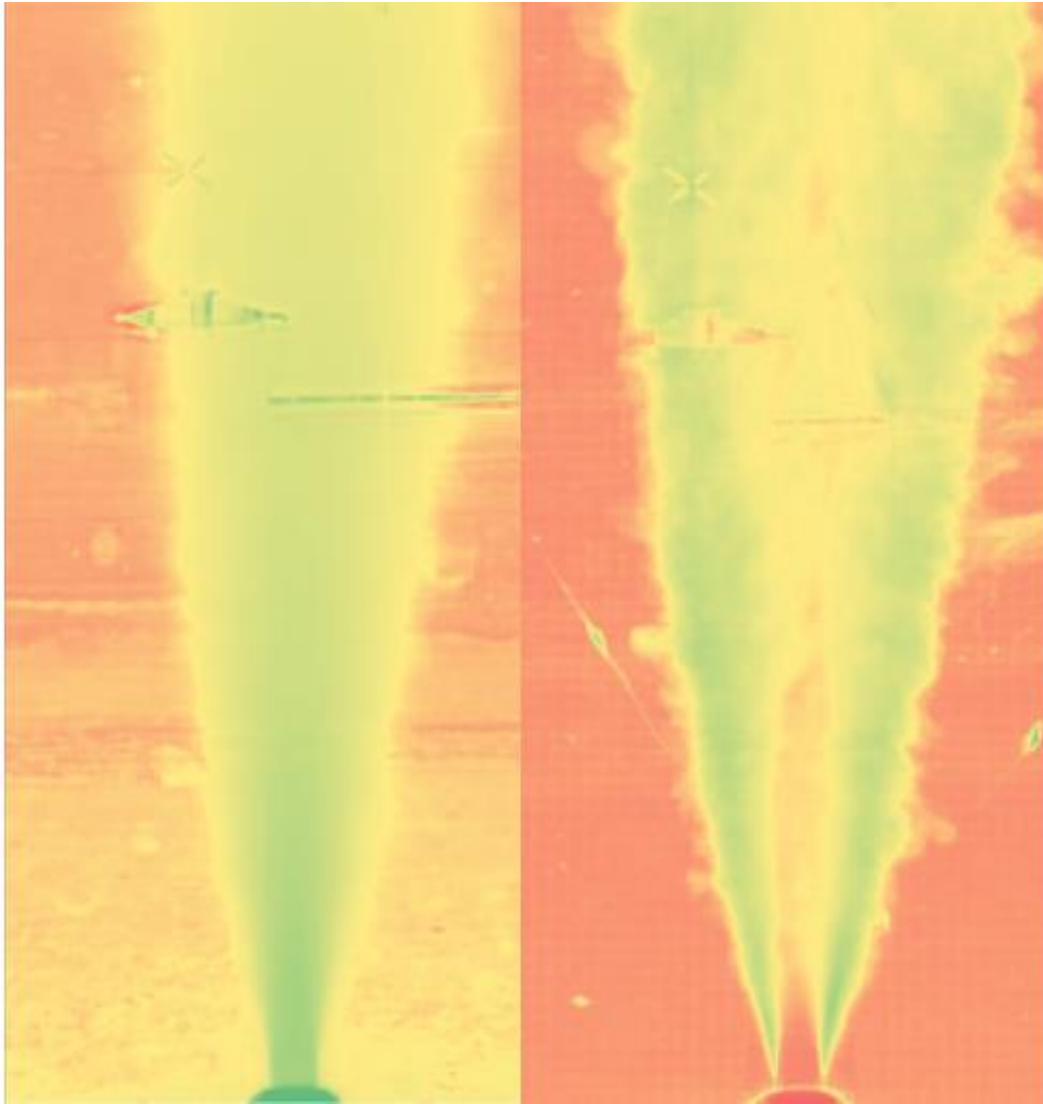
Η μέση τιμή αποτελεί τη μέση (χρονικά) συγκέντρωση στο εν λόγω σημείο και συμβολίζεται ως  $C$  και η RMS (Root Mean Square) τιμή των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης αποτελεί την τετραγωνική ρίζα της μέσης (χρονικά) τιμής των τετραγώνων των διακυμάνσεων της συγκέντρωσης και συμβολίζεται ως  $C_{RMS}$  (Παπακωνσταντής 2009).

Το πλήθος  $N$  των τιμών που χρησιμοποιήθηκαν για τα αποτελέσματα των πειραμάτων είναι  $N=1000$  τα οποία αντιστοιχούν και σε 1000 frames.

Αρχικά, έγινε η επεξεργασία του βίντεο με κώδικα στη γλώσσα προγραμματισμού MATLAB όπου διαχωρίστηκε το κάθε βίντεο στα επιμέρους στιγμιότυπα που το αποτελούν. Η μέση εικόνα λοιπόν, είναι η μέση τιμή των εντάσεων του κάθε χρώματος του μοντέλου RGB για κάθε pixel στο χρονικό διάστημα που έχει ορισθεί και η ένταση της τύρβης αντιστοιχεί στην τυπική απόκλιση του κάθε pixel για το ίδιο χρονικό διάστημα.

Κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων στο λογισμικό EXCEL αφαιρέθηκε η συγκέντρωση ροδαμίνης του αποδέκτη η οποία είναι 0.1  $\mu\text{gr/l}$  από κάθε τιμή συγκέντρωσης σε όλο το φάσμα της φλέβας. Στη συνέχεια, κάθε συγκέντρωση της φλέβας διαιρέθηκε με τη μέγιστη συγκέντρωση στον άξονα  $C_M$  έτσι ώστε να έχουμε αδιάστατες τιμές για τη μέση συγκέντρωση  $C/C_M$  και για την RMS συγκέντρωση  $C_{RMS}/C_M$ . Παρακάτω στο Σχήμα 4.3 απεικονίζονται οι αρχικές μορφές της μέσης εικόνας και της εικόνας της τυπικής απόκλισης (RMS) της φλέβας.

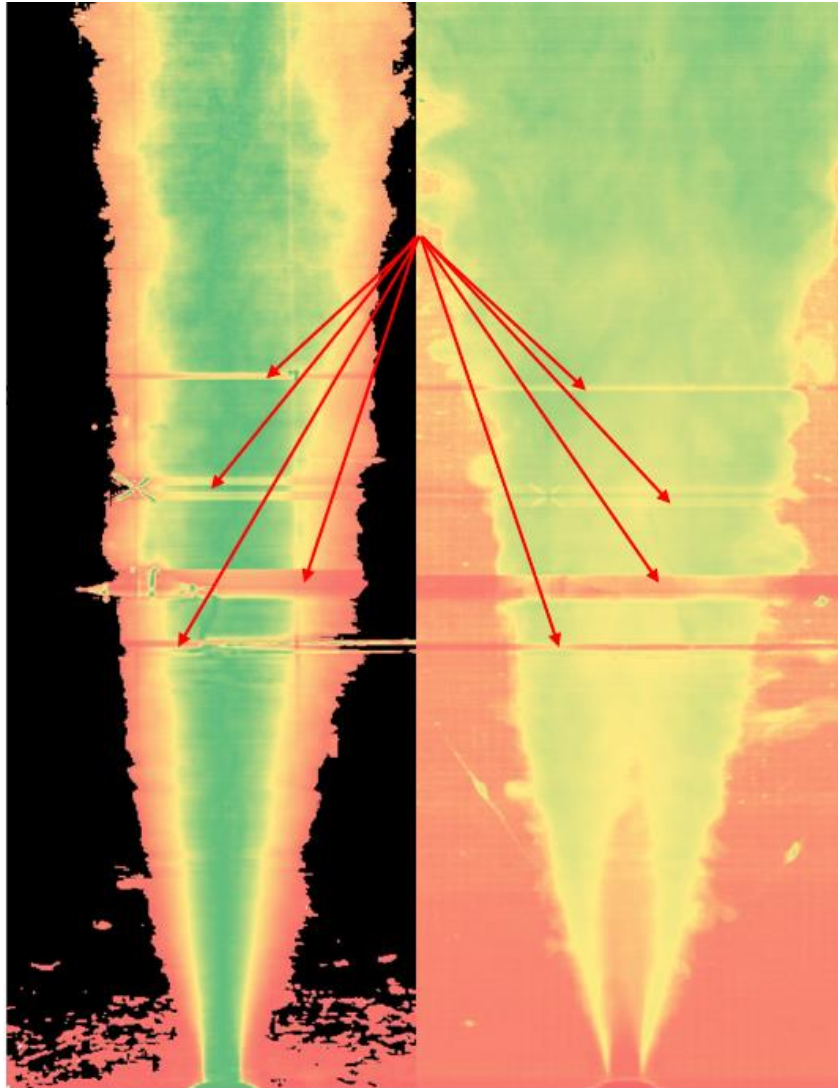




**Σχήμα 4.3** Μέση και RMS εικόνα της φλέβας σε μη επεξεργασμένη μορφή για το πείραμα EXP001 με αριθμό Reynolds  $Re=2818$

Στο Σχήμα 4.3 φαίνονται κάποιες προβληματικές περιοχές που οφείλονται στην αντανάκλαση του laser. Οι περιοχές αυτές για την αποφυγή αλλοίωσης των αποτελεσμάτων παραλήφθηκαν.

Παρακάτω στο Σχήμα 4.4 φαίνονται οι επεξεργασμένες μορφές της μέσης εικόνας και της εικόνας της τυπικής απόκλισης (RMS) της φλέβας.



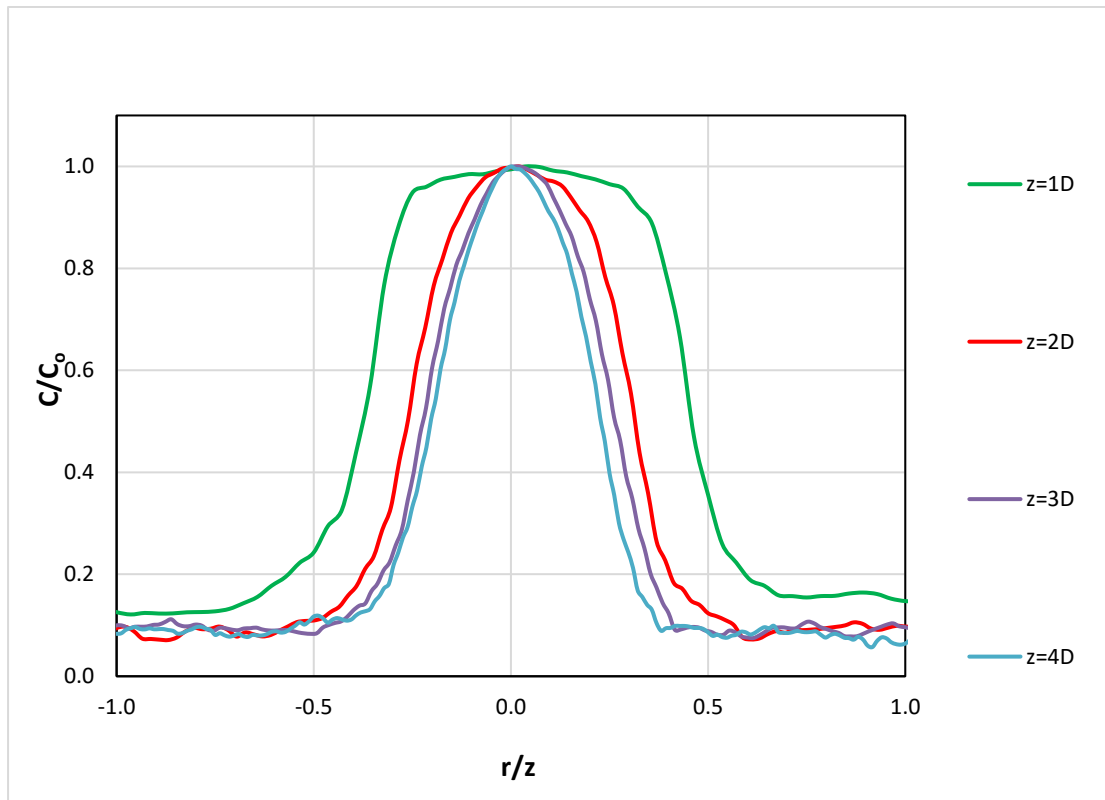
**Σχήμα 4.4** Μέση και RMS εικόνα της φλέβας σε επεξεργασμένη μορφή για το πείραμα EXP001 με αριθμό Reynolds  $Re=2818$

Τα βελάκια που υπάρχουν στο Σχήμα 4.4 υποδηλώνουν κάποιες προβληματικές περιοχές της φλέβας που δημιουργήθηκαν εξαιτίας της αντανάκλασης του laser. Οι περιοχές αυτές αγνοήθηκαν κατά την επεξεργασία και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Επίσης, στην RMS εικόνα φαίνεται ευδιάκριτα ο πυρήνας της φλέβας.

#### 4.4 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Παρακάτω, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το πείραμα EXP001 με διάμετρο ακοφυσίου  $D=0.75\text{cm}$  και με αριθμό Reynolds  $Re=2818$ . Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται κυρίως σε αδιάστατα διαγράμματα. Σε ορισμένες καμπύλες παρουσιάζονται κάποιες αυξομειώσεις τα οποία πιθανότατα να οφείλονται σε στίγματα που εμφανίζονται στο τζάμι της δεξαμενής και σε αντανάκλασεις από το laser.

Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζονται οι κατανομές της μέσης συγκέντρωσης στη ζώνη ανάπτυξης της ροής για διάφορες αποστάσεις από την εκροή της φλέβας. Όπως φαίνεται, οι κατανομές της μέσης συγκέντρωσης είναι περίπου ομοιόμορφες στη ζώνη ανάπτυξης της φλέβας. Η μέση συγκέντρωση παραμένει σταθερή και ίση με την αρχική συγκέντρωση  $C_0$  στην εκροή της φλέβας. Η ομοιόμορφη κατανομή περιορίζεται με την αύξηση της απόστασης από την εκροή.



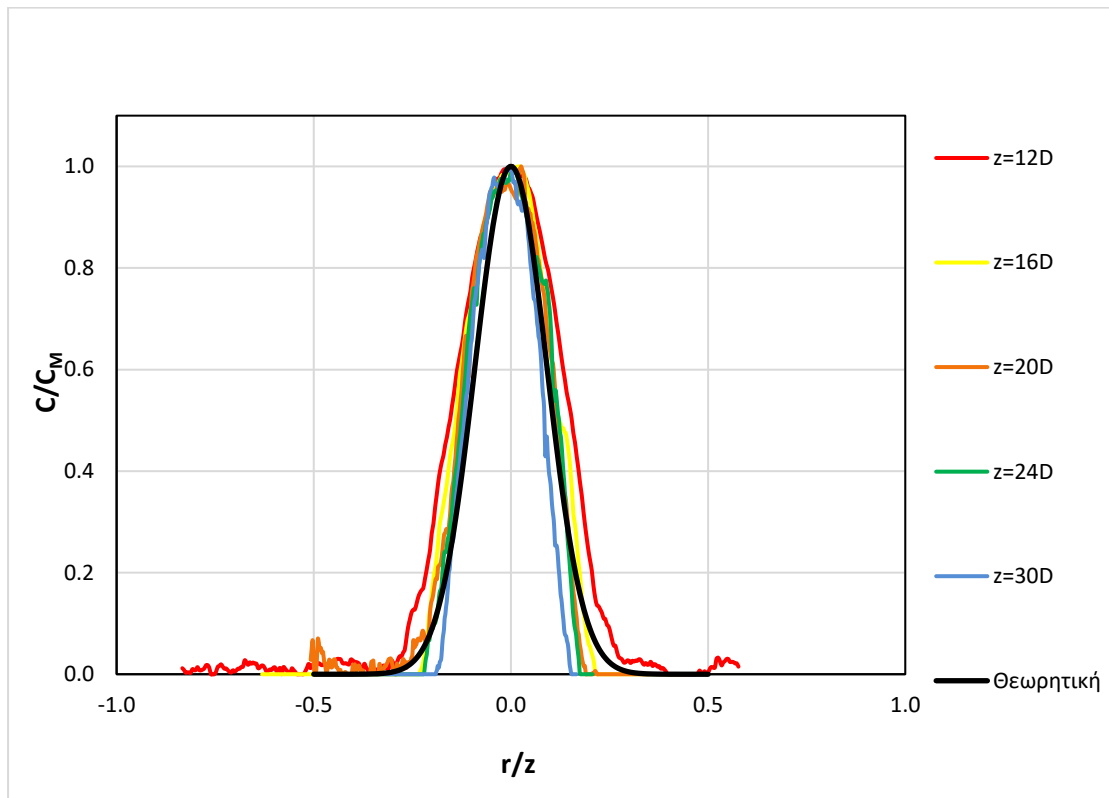
**Σχήμα 4.5** Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή στη ζώνη ανάπτυξης της ροής για το πείραμα EXP001 με αριθμό Reynolds  $Re=2818$

Οι κατανομές του Σχήματος 4.5 δεν έχουν ως ελάχιστο το μηδέν και αυτό οφείλεται στην ένταση του laser η οποία είναι πιο μεγάλη στην περιοχή κοντά στην εκροή.

Η μέση χρονικά συγκέντρωση αδιαστατοποιήθηκε με την μέγιστη συγκέντρωση και η ακτινική (οριζόντια) απόσταση  $r$  από τον άξονα της φλέβας με την κατακόρυφη απόσταση  $z$  από την εκροή. Οι κατανομές της αδιάστατης μέσης συγκέντρωσης  $C/C_M$  ως προς την αδιάστατη απόσταση  $r/z$  από τον άξονα της φλέβας παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.6 για διάφορες θέσεις  $z$  καθ' ύψος της φλέβας στη ζώνη της αναπτυσσόμενης ροής. Στο ίδιο Σχήμα έχει παρασταθεί γραφικά και η

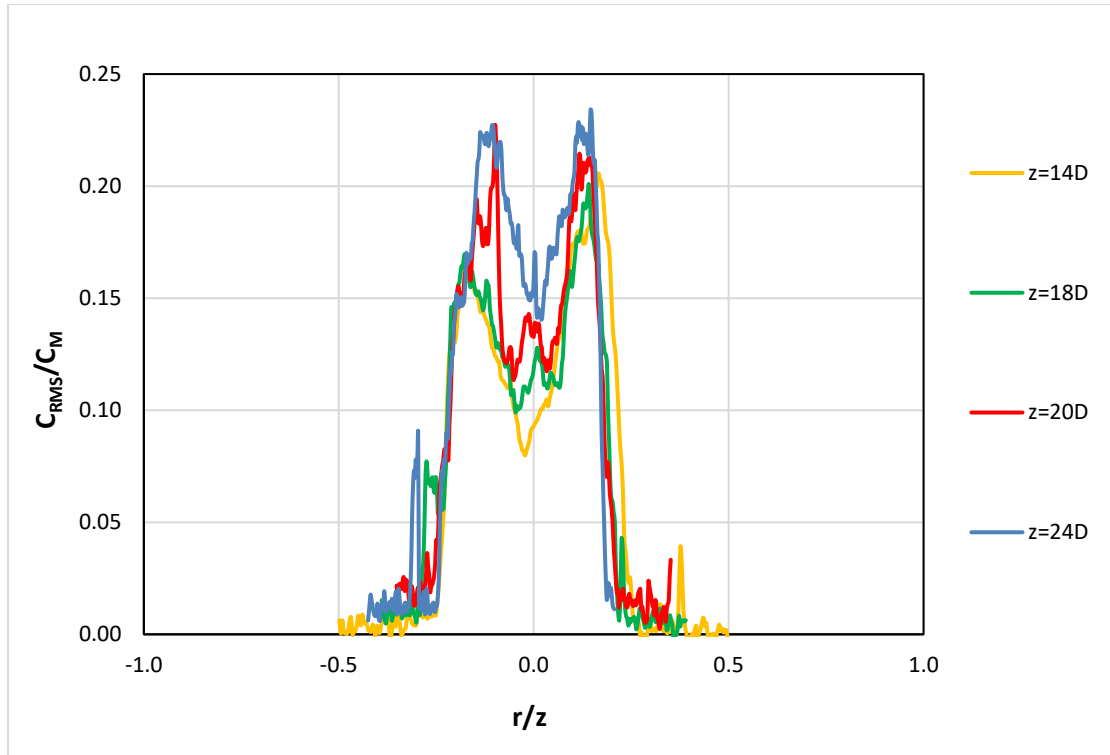
θεωρητική κατανομή Gauss ( $\frac{C}{C_M} = e^{-\frac{(\frac{r}{z})^2}{0.126^2}}$ ). Όπως φαίνεται οι μετρημένες κατανομές της μέσης συγκέντρωσης στη ζώνη της αναπτυσσόμενης ροής ακολουθούν ικανοποιητικά την αδιάστατη κατανομή Gauss, γεγονός που οφείλεται στην αδιαστατοποίηση και επιβεβαιώνει ότι υπάρχει αυτοομοιότητα (self-similarity),

όπως έχει βρεθεί και σε προηγούμενες εργασίες (Fischer et al. 1979, Papanicolaou & List 1988).



**Σχήμα 4.6** Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή στη ζώνη της αναπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP001 με αριθμό Reynolds  $Re=2818$

Η RMS συγκέντρωση αδιαστατοποιείται με την μέγιστη συγκέντρωση και η ακτινική (οριζόντια) απόσταση  $r$  από τον άξονα της φλέβας με την κατακόρυφη απόσταση  $z$  από την εκροή. Στο Σχήμα 4.7 απεικονίζονται οι κατανομές της αδιάστατης συγκέντρωσης  $C_{RMS}/C_M$  ως προς την αδιάστατη απόσταση  $r/z$ . Παρατηρούνται δύο μέγιστες τιμές λίγο μικρότερες από 0.25 οι οποίες δεν παρουσιάζονται στον άξονα αλλά εκατέρωθεν αυτού. Παρόμοια συμπεριφορά έχει παρατηρηθεί σε ροές όπου κυριαρχεί η ορμή (Papanicolaou & List 1987).



**Σχήμα 4.7** Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα EXP001 με αριθμό Reynolds  $Re=2818$

Με δεδομένο ότι οι μετρήσεις της μέσης συγκέντρωσης καθ' ύψος της φλέβας ακολουθούν κατανομή Gauss δίνεται η δυνατότητα προσδιορισμού του πλάτους  $b_c$  δηλαδή της απόστασης  $r$  όπου  $C = C_M e^{-1}$ . Πιο συγκεκριμένα, έχοντας σαν αφετηρία ( $r=0$ ) το σημείο όπου η μέση συγκέντρωση έχει τη μέγιστη τιμή, προσδιορίζονται οι αποστάσεις  $r$  όλων των σημείων της κατανομής. Στη συνέχεια, σύμφωνα με την κατανομή Gauss συσχετίζεται η απόσταση  $r$  με τις μετρημένες συγκεντρώσεις σύμφωνα με την Εξίσωση (2-13).

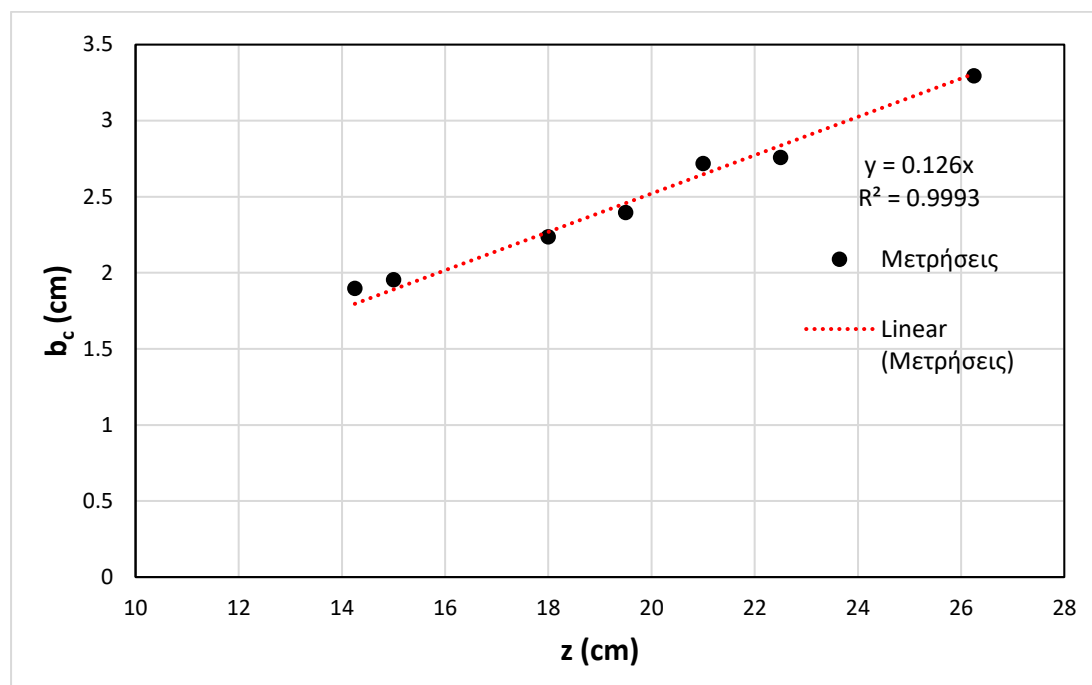
Λογαριθμίζοντας και τα δύο μέλη της Εξίσωσης (2-13) προκύπτει

$$\ln\left(\frac{C}{C_M}\right) = -\frac{r^2}{b_c^2} \quad (4-4)$$

Για τον προσδιορισμό του πλάτους  $b_c$  γίνεται γραμμική συσχέτιση των τιμών του πρώτου μέλους και των τιμών  $r^2$  (αποστάσεις  $r$  υψωμένες στο τετράγωνο) για κάθε πείραμα. Με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων προκύπτει η ποσότητα  $-bc^2$  ως η κλίση της ευθείας, οπότε προσδιορίζεται το πλάτος  $b_c$ . Δηλαδή έχοντας την ευθεία  $y=ax$  και όπου  $y$  θέσουμε την τιμή  $\ln\left(\frac{C}{C_M}\right)$  και ως  $x$  την τιμή  $r^2$  τότε το πλάτος  $b_c$  ορίζεται ως:

$$b_c = \sqrt{\frac{-1}{\alpha}} \quad (4-5)$$

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8 το πλάτος της κατανομής της συγκέντρωσης μεταβάλλεται γραμμικά και αυξάνεται όσο απομακρυνόμαστε από την εκροή. Η σταθερά που προκύπτει από τις μετρήσεις είναι ίση με 0.126, τιμή που συμφωνεί με προηγούμενα αποτελέσματα (Fischer et al. 1979, Papanicolaou 1984, Lee & Chu 2003).

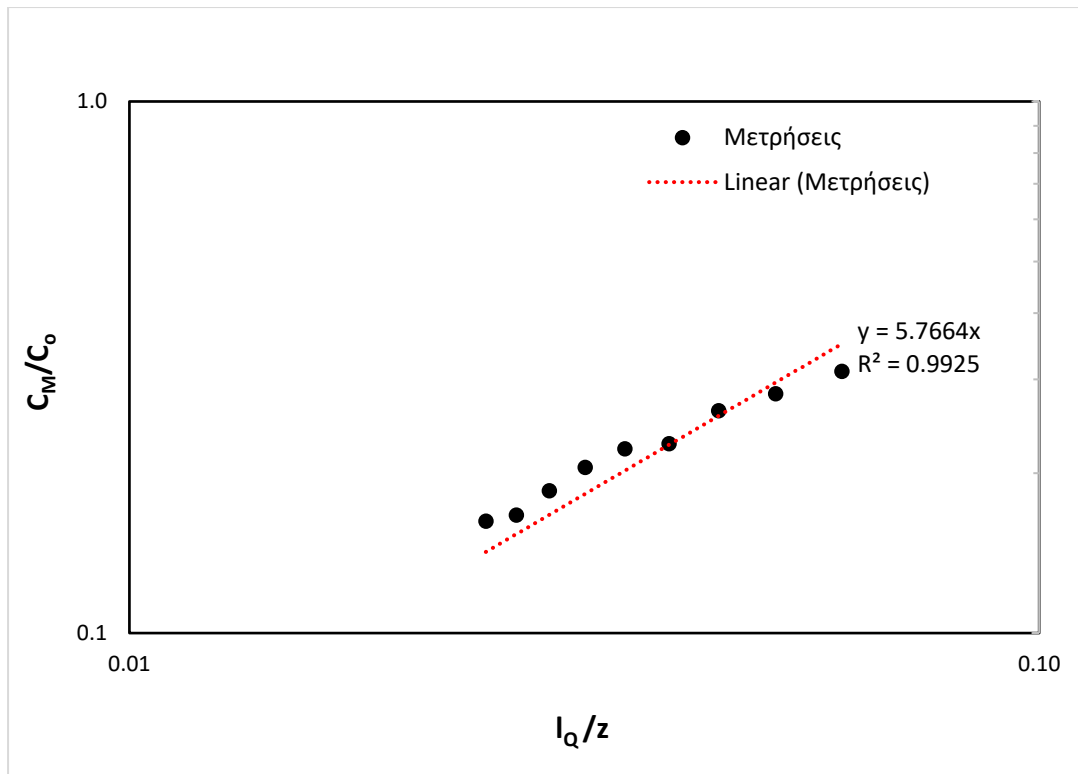


**Σχήμα 4.8** Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP001 με αριθμό Reynolds  $Re=2818$

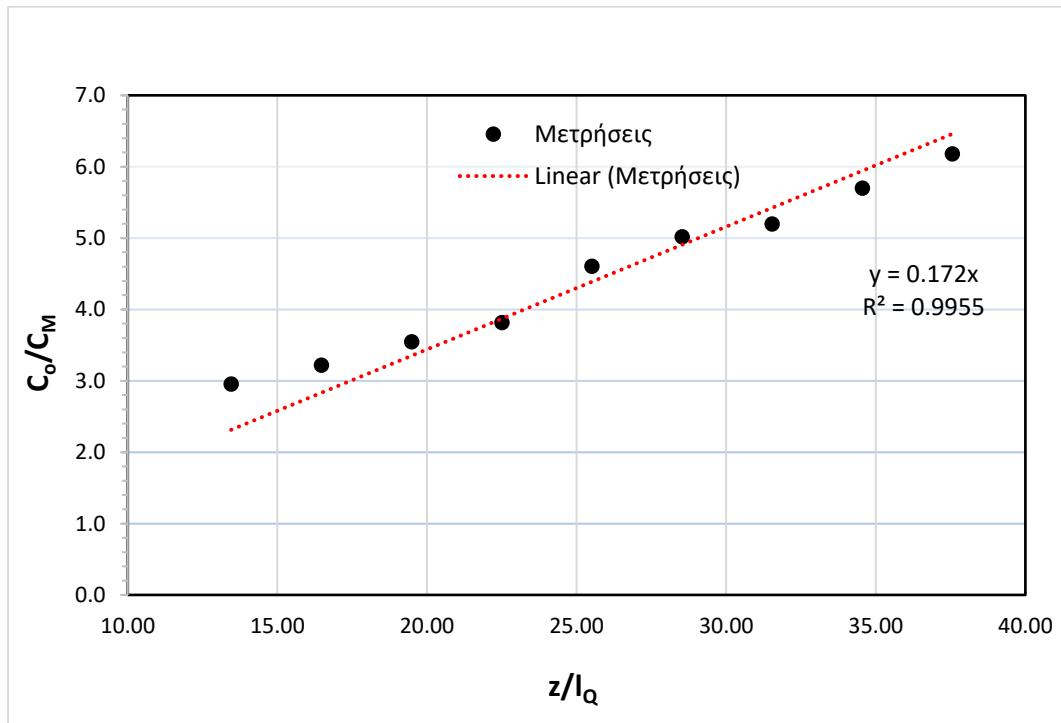
Η γραμμική σχέση του πλάτους συναρτήσεως της κατακόρυφης απόστασης από την εκροή ισχύει για την ζώνη ανεπτυγμένης ροής. Για αυτό το λόγο επιλέχθηκαν z τα οποία ικανοποιούν αυτή τη συνθήκη.

Η μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης  $C_M$  αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση  $C_0$  ως προς την αδιάστατη απόσταση  $l_0/z$  φαίνεται στο Σχήμα 4.9. Η μέγιστη συγκέντρωση στον άξονα της φλέβας αυξάνει γραμμικά καθώς αυξάνει το  $l_0/z$  ή ισοδύναμα μειώνεται με αύξηση του z δηλαδή μειώνεται καθώς απομακρυνόμαστε από την εκροή. Η σταθερά της εξίσωσης που προκύπτει από τις μετρήσεις είναι 5.77 η οποία ταιριάζει ικανοποιητικά με εκείνες από τα αποτελέσματα των Papanicolaou (1984), Fischer et al. (1979) και Lee & Chu (2003) (βλ. Πίνακα 2.1). Εναλλακτικά παρουσιάζεται η ελάχιστη αραίωση  $C_0/C_M$  με την αδιάστατη απόσταση  $z/l_0$  στο Σχήμα 4.10.

Οι αποστάσεις από την εκροή που φαίνονται στα παρακάτω Σχήματα 4.9 και 4.10 ικανοποιούν τη σχέση  $z/l_0 > 10$  δηλαδή βρίσκονται στην ζώνη της ανεπτυγμένης ροής.



**Σχήμα 4.9** Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης  $C_M$  αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση  $C_0$  με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP001 με αριθμό Reynolds  $Re=2818$

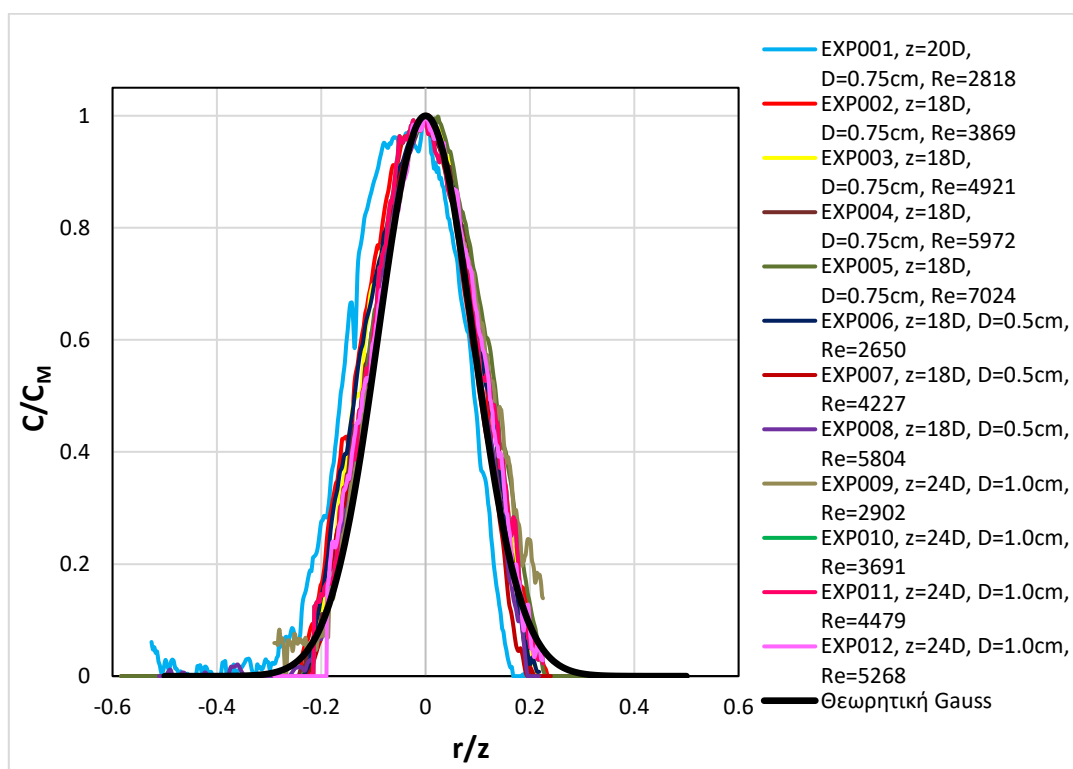


**Σχήμα 4.10** Μεταβολή της ελάχιστης αραιώσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP001 με αριθμό Reynolds  $Re=2818$

Αποτελέσματα από τα υπόλοιπα πειράματα δίνονται στο Παράρτημα Β.

Παρακάτω παρουσιάζονται διαγράμματα με αποτελέσματα από το σύνολο των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν. Τα αποτελέσματα πάλι παρουσιάζονται κυρίως σε αδιάστατα διαγράμματα. Τα αποτελέσματα αφορούν πειράματα με εύρος αριθμού Reynolds από 2650 έως 7024, για παροχές από 9.32 έως 37.07 cm<sup>3</sup>/s και για διαμέτρους D=0.5,0.75 και 1.0 cm.

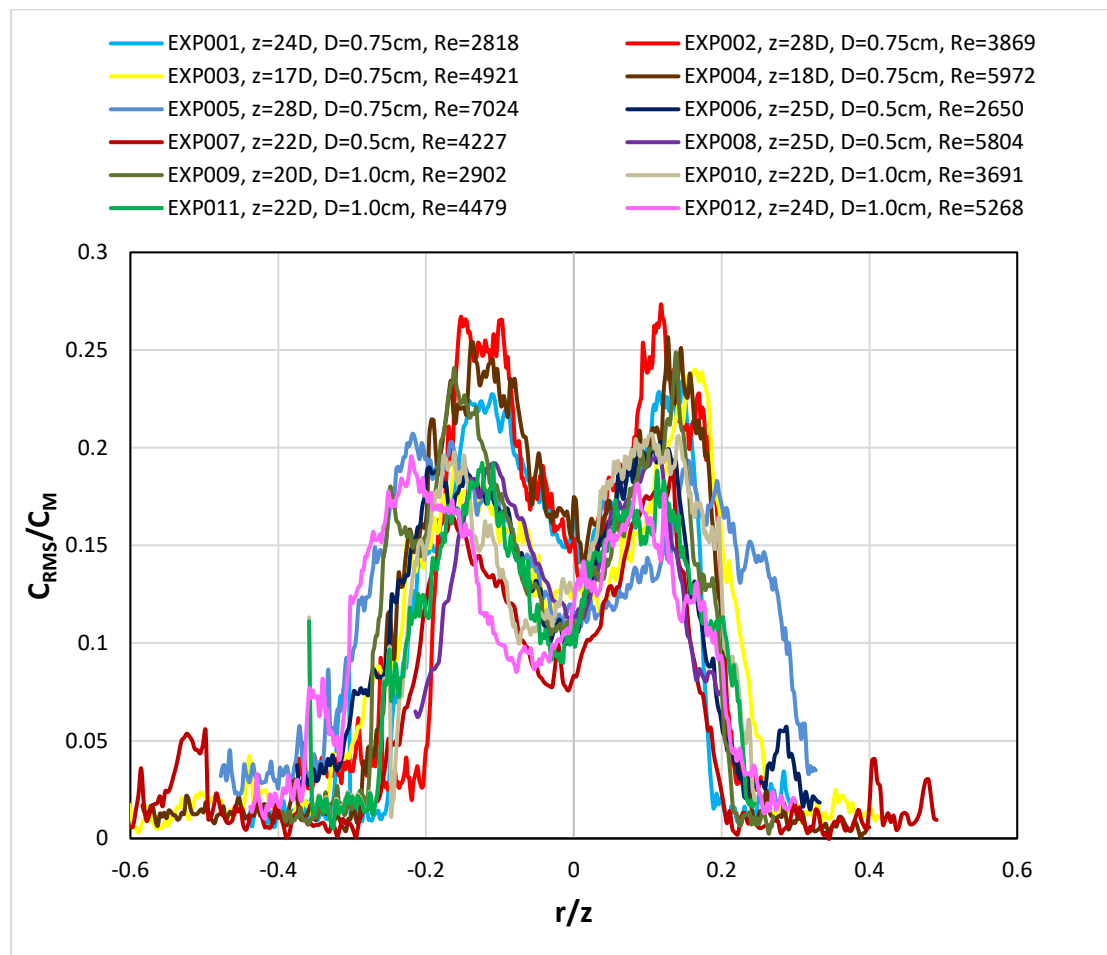
Η μέση χρονικά συγκέντρωση αδιαστατοποιήθηκε και εδώ με την μέγιστη συγκέντρωση και η ακτινική (οριζόντια) απόσταση r από τον άξονα της φλέβας με την κατακόρυφη απόσταση z από την εκροή. Οι κατανομές της αδιάστατης μέσης συγκέντρωσης C/C<sub>M</sub> ως προς την αδιάστατη απόσταση r/z από τον άξονα της φλέβας παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.11 για διάφορες θέσεις z καθ' ύψος της φλέβας στη ζώνη της αναπτυσσόμενης ροής. Έχει γίνει επιλογή μιας κατανομής (σε μια θέση z) από κάθε πείραμα. Στο ίδιο Σχήμα έχει παρασταθεί γραφικά και η θεωρητική κατανομή Gauss. Όπως φαίνεται οι μετρημένες κατανομές της μέσης συγκέντρωσης στη ζώνη της αναπτυσσόμενης ροής ακολουθούν ικανοποιητικά την αδιάστατη κατανομή Gauss. Φαίνεται ότι ανεξάρτητα από τη διάμετρο και την αρχική παροχή προκύπτει σύμπτωση των κατανομών διότι είναι κατάλληλα αδιαστατοποιημένες. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει ότι υπάρχει αυτοομοιότητα (self-similarity), όπως έχει βρεθεί και σε προηγούμενες εργασίες (Fischer et. al 1979, Paranicolaou & List 1988).



**Σχήμα 4.11** Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή στη ζώνη της αναπτυσσόμενης ροής για το σύνολο των πειραμάτων

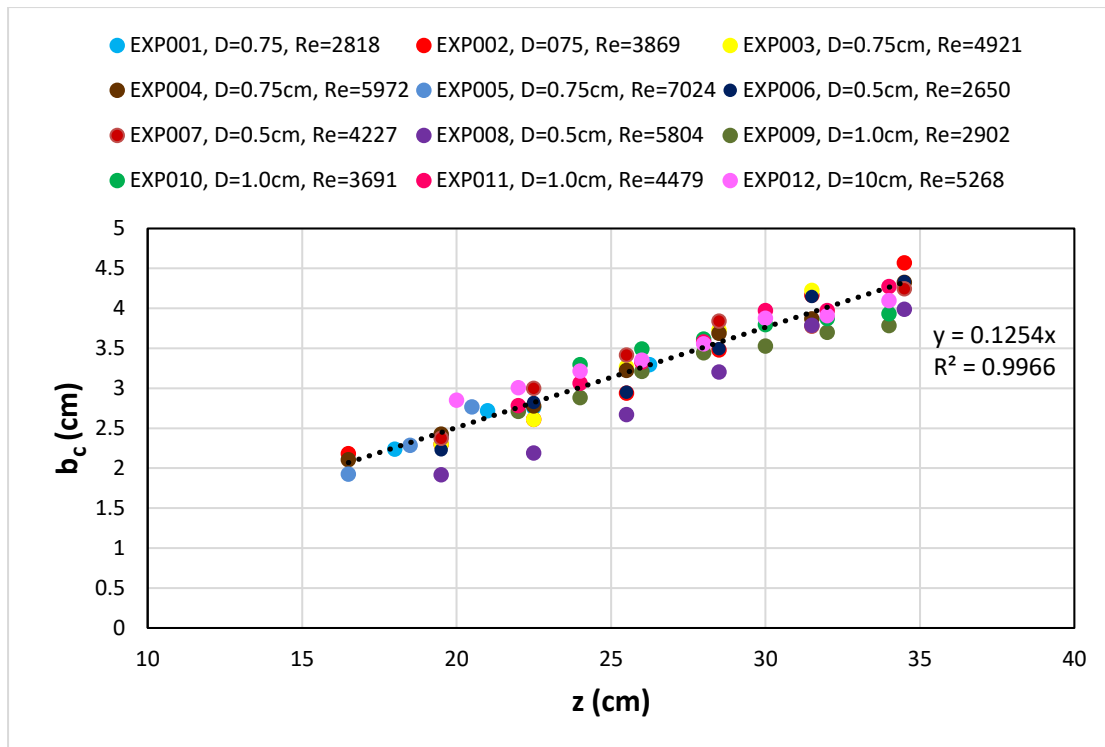


Η RMS συγκέντρωση αδιαστατοποιείται πάλι με την μέγιστη συγκέντρωση και η ακτινική (οριζόντια) απόσταση  $r$  από τον άξονα της φλέβας με την κατακόρυφη απόσταση  $z$  από την εκροή. Στο Σχήμα 4.12 φαίνονται οι κατανομές της αδιάστατης συγκέντρωσης  $C_{RMS}/C_M$  ως προς την αδιάστατη απόσταση  $r/z$ . Παρατηρούνται δύο μέγιστες τιμές περίπου ίσες με 0.25 οι οποίες δεν παρουσιάζονται στον άξονα αλλά αριστερά και δεξιά αυτού. Παρόμοια συμπεριφορά έχει παρατηρηθεί σε ροές όπου κυριαρχεί η ορμή (Papanicolaou & List 1987).



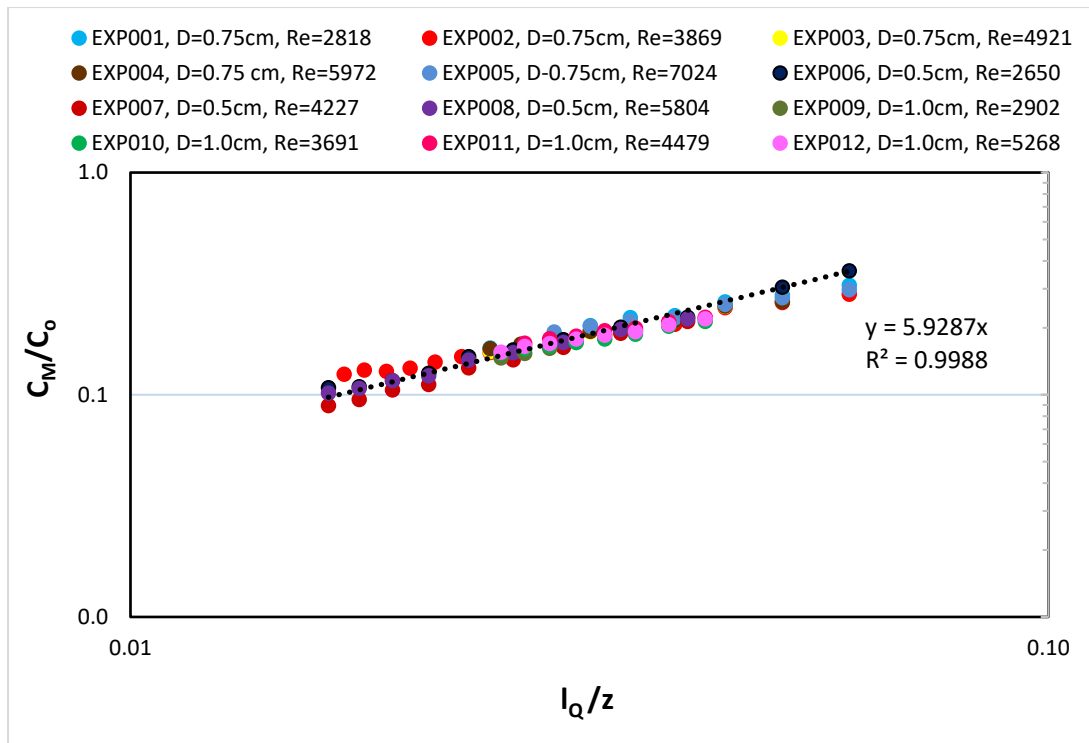
**Σχήμα 4.12** Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το σύνολο των πειραμάτων

Από τις κατανομές του σχήματος 4.11 προσδιορίστηκε το πλάτος  $b_c$  των κατανομών συγκέντρωσης με τον ίδιο τρόπο που περιγράφεται πιο πάνω, χρησιμοποιώντας τις Εξισώσεις (2-13), (4-4) και (4-5). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.13 το πλάτος της κατανομής της συγκέντρωσης μεταβάλλεται γραμμικά και αυξάνεται όσο απομακρυνόμαστε από την εκροή. Η σταθερά που προκύπτει από τις μετρήσεις είναι ίση με 0.125, τιμή που συμφωνεί με προηγούμενα αποτελέσματα (Fischer et al. 1979, Papanicolaou 1984, Lee & Chu 2003).

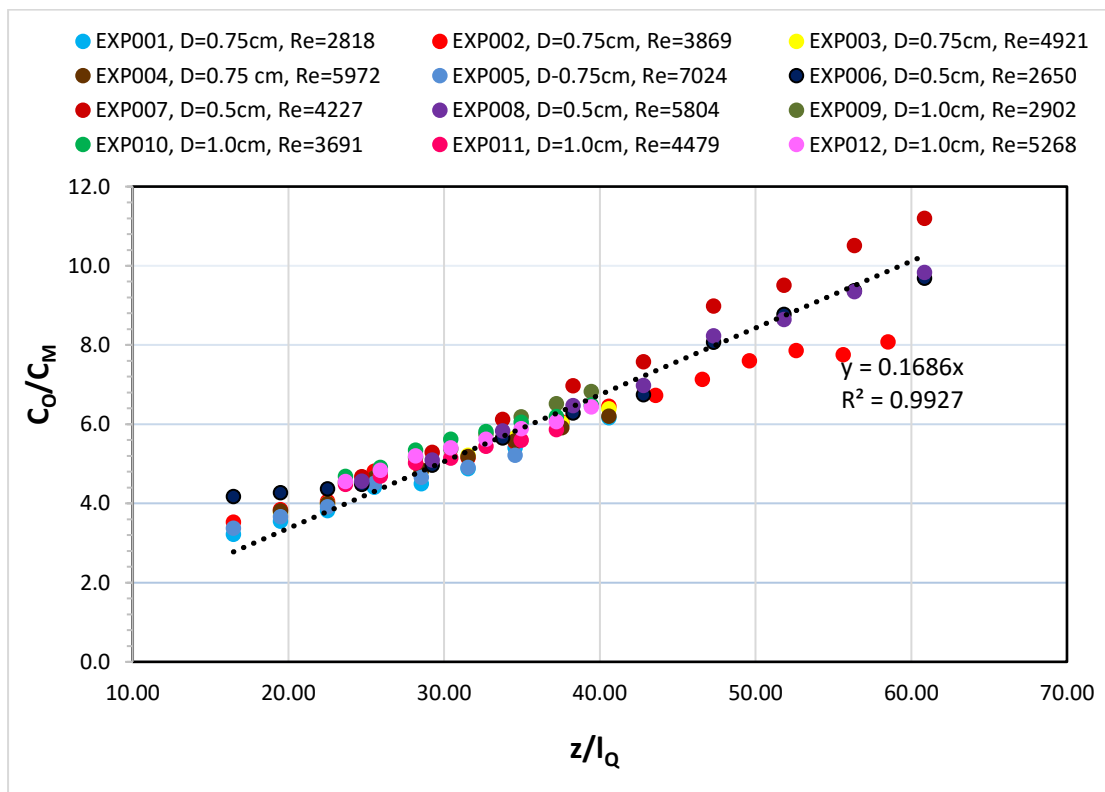


**Σχήμα 4.13** Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το σύνολο των πειραμάτων

Η μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης  $C_M$  σε αδιάστατη μορφή με την αρχική συγκέντρωση  $C_0$  ως προς την αδιάστατη απόσταση  $l_0/z$  φαίνεται στο Σχήμα 4.14. Η μέγιστη συγκέντρωση στον άξονα της φλέβας αυξάνει γραμμικά καθώς αυξάνει το  $l_0/z$  ή ισοδύναμα μειώνεται με την αύξηση της απόστασης  $z$  από την εκροή. Η σταθερά της εξίσωσης που προκύπτει από τις μετρήσεις είναι 5.93 η οποία ταιριάζει ικανοποιητικά με εκείνες από τα αποτελέσματα των Papanicolaou (1984), Fischer et. al (1979) και Lee & Chu (2003) (βλ. Πίνακα 2.1). Εναλλακτικά παρουσιάζεται η ελάχιστη αραιώση  $C_0/C_M$  με την αδιάστατη απόσταση  $z/l_0$  στο Σχήμα 4.15.



**Σχήμα 4.14** Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης  $C_M$  αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση  $C_0$  με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το σύνολο των πειραμάτων



**Σχήμα 4.15** Μεταβολή της ελάχιστης αραιώσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το σύνολο των πειραμάτων

Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται συνοπτικά οι σταθερές των εξισώσεων του πλάτους και της αραίωσης και συγκρίνονται με εκείνες που αναφέρονται στη βιβλιογραφία. Όπως φαίνεται οι σταθερές που προέκυψαν από τα πειράματα συμφωνούν ικανοποιητικά με αυτές που αναφέρονται στη βιβλιογραφία.

**Πίνακας 4.1** Σταθερές εξισώσεων πλάτους και της αραίωσης απλής φλέβας

| Σολωμού (2022)                          | Papanicolaou (1984)                     | Fischer et al. (1979)                   | Lee & Chu (2003)                        |
|---|---|---|---|
| $b_c(z) = 0.125z$                       | $b_c(z) = 0.126z$                       | $b_c(z) = 0.127z$                       | $b_c(z) = 0.125z$                       |
| $\frac{C_o}{C_M} = 0.169 \frac{z}{l_Q}$ | $\frac{C_o}{C_M} = 0.165 \frac{z}{l_Q}$ | $\frac{C_o}{C_M} = 0.179 \frac{z}{l_Q}$ | $\frac{C_o}{C_M} = 0.168 \frac{z}{l_Q}$ |
| $\frac{C_M}{C_o} = 5.93 \frac{l_Q}{z}$  | $\frac{C_M}{C_o} = 6.06 \frac{l_Q}{z}$  | $\frac{C_M}{C_o} = 5.60 \frac{l_Q}{z}$  | $\frac{C_M}{C_o} = 5.94 \frac{l_Q}{z}$  |

## 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 5.1 ΣΥΝΟΨΗ

Πραγματοποιήθηκαν 12 πειράματα σε πειραματική διάταξη του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Υδραυλικής του ΕΜΠ σχετικά με τη ροή κυκλικών τυρβωδών φλεβών. Η οπτικοποίηση των πειραμάτων έγινε με την τεχνική Laser Induced Fluorescence (LIF). Οι μετρήσεις που έγιναν αφορούσαν κυρίως τη συγκέντρωση στη ροή σε διάφορες αποστάσεις από την εκροή για παροχές από 9.32 έως 37.0,7 cm<sup>3</sup>/s και διαμέτρους D= 0.5,0.75 και 1.0 cm. Προέκυψαν εικόνες για το πεδίο ροής. Με κατάλληλη βαθμονόμηση προσδιορίστηκε η συγκέντρωση και δόθηκαν κατανομές σε αδιάστατη μορφή καθώς και αποτελέσματα για παραμέτρους που σχετίζονται με τη συγκέντρωση όπως η αραιώση και το πλάτος της φλέβας.

### 5.2 ΚΥΡΙΟΤΕΡΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τη διεξαγωγή και την επεξεργασία των 12 πειραμάτων που αφορούσαν τις απλές τυρβώδεις κυκλικές φλέβες εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η τεχνική LIF είναι πολύ σύγχρονη και δίνει τη δυνατότητα μετρήσεων σε όλο το φάσμα της φλέβας. Επίσης, η εικόνα του βίντεο εξαιτίας της ροδαμίνης παρουσιάζει μεγάλη ευκρίνεια και έτσι δίνεται η δυνατότητα παρατήρησης της ροής και διεξαγωγής μετρήσεων μεγάλης ακρίβειας.
- Οι κατανομές της μέσης συγκέντρωσης και της έντασης της τύρβης στην εγκάρσια διεύθυνση είναι συμμετρικές.
- Οι κατανομές της αδιάστατης μέσης συγκέντρωσης  $C/C_M$  ως προς την αδιάστατη απόσταση  $r/z$  από τον άξονα της φλέβας για κάθε πείραμα φαίνεται να ακολουθούν την κατανομή Gauss οπότε προσδιορίστηκε το πλάτος της κατανομής.
- Στις κατανομές της αδιάστατης RMS συγκέντρωσης  $C_{RMS}/C_M$  ως προς την αδιάστατη ακτινική απόσταση  $r/z$  από τον άξονα της φλέβας παρατηρούνται δύο μέγιστες τιμές περίπου 0.25 οι οποίες δεν παρουσιάζονται στον άξονα αλλά εκατέρωθεν αυτού. Οι τιμές αυτές έχουν καλή συμφωνία με εκείνες άλλων ερευνητών για ροές όπου κυριαρχεί η ορμή.
- Το πλάτος της κατανομής της συγκέντρωσης αυξάνει με την απόσταση  $z$  από την εκροή. Η σταθερά αναλογίας προέκυψε ίση με 0.125 και βρίσκεται σε καλή συμφωνία με αποτελέσματα άλλων ερευνητών.
- Η μέγιστη συγκέντρωση βρέθηκε να μειώνεται με την απόσταση από την εκροή ή ισοδύναμα η ελάχιστη αραιώση βρέθηκε να αυξάνει με την απόσταση  $z$ . Οι σταθερές της αδιάστατης μέγιστης (αξονικής) συγκέντρωσης κατά μήκος του άξονα της φλέβας και της ελάχιστης αραιώσης είναι 5.93 και 0.169

αντίστοιχα και παρουσιάζουν επίσης πολύ καλή συμφωνία με αυτές που αναφέρονται στη βιβλιογραφία.

## 6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Καπογιάννη Α. Ε. 2018 Πειραματική Διερεύνηση Διδιάστατων Τυρβώδων Φλεβών Αρνητικής Άνωσης, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Μήνος Π. 2019 Διδιάστατες Κατακόρυφες Φλέβες Αρνητικής Άνωσης Κ, Διπλωματική Εργασία, , Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Μίχας Σ. Ν. 2008 Πειραματική διερεύνηση οριζόντιων κυκλικών και μη αξονοσυμμετρικών ανωστικών φλεβών, σε ομογενή ακίνητο αποδέκτη, Διδακτορική Διατριβή, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.

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, Διδακτικές Σημειώσεις στα πλαίσια του μαθήματος «Περιβαλλοντική Υδραυλική» του ΔΠΜΣ Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, Ακ. Έτος 2016-2017.

Abdel-Rahman Al-Fahed and Chakroun., 1996 The near-field characteristics of circular jets at low Reynolds numbers. *Mechanics Research Communications*, 23(3), pp.313-324.

Abdel-Rahman A., 2010 A review of effects of initial and boundary conditions on turbulent jets. *WSEAS transactions on Fluid Mechanics*, 4(5), pp.257-275.

Borg, A., Bolinder J., and Fuchs L., 2001. Simultaneous velocity and concentration measurements in the near field of a turbulent low-pressure jet by digital particle image velocimetry–planar laser-induced fluorescence. *Experiments in fluids*, 31(2), pp.140-152.

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.

Dimotakis, Miake-Lye and Papantoniou, 1983 Structure and dynamics of round turbulent jets. *The Physics of fluids*, 26(11), pp.3185-3192.

Ferrier, Funk and Roberts, 1993 Application of optical techniques to the study of plumes A. J. in stratified fluids, in Elsevier *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, vol.20, no. 1-2, pp. 155-183.

Fischer H., List J., Koh C., Imberger J., Brooks N., 1979 Mixing in inland and coastal waters. Academic.

Hu H., Saga T., Kobayashi T. and Taniguchi N., 2002 Simultaneous velocity and concentration measurements of a turbulent jet mixing flow. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 972(1), pp.254-259. 56

- Lai, A.C. and Lee, J.H., 2012. Dynamic interaction of multiple buoyant jets. *Journal of fluid mechanics*, 708, pp.539-575.
- Lee, J.H.W., Chu, V.H., 2003. *Turbulent jets and plumes: a Lagrangian approach* (Vol. 1). Kluwer Academic Publishers.
- List EJ, Rodi W., 1982 *Turbulent buoyant jets and plumes*. In *Mechanics of Turbulent Buoyant Jets and Plumes* (pp. 1-68). Pergamon Press Oxford.
- Mistry, D. and Dawson, J., 2014 Experimental investigation of multi-scale entrainment processes of a turbulent jet. In *17th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*.
- Papanicolaou P. N, 1984 *Mass and Momentum Transport in a Turbulent Buoyant Vertical Axisymmetric Jet*, PhD Thesis, W. M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, Division of Engineering and Applied Science, California Institute of Technology, Pasadena, California.
- 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.
- Papakonstantis I. G., Christodoulou G. C. and PN Papanicolaou P. N., 2011a Inclined negatively buoyant jets 1: geometrical characteristics, *Journal of Hydraulic Research*, 49: 1, 3 – 12
- Papakonstantis I. G., Christodoulou G. C. and PN Papanicolaou P. N., 2011b Inclined negatively buoyant jets 2: concentration measurements. *Journal of Hydraulic Research* 49.1, 13-22.
- Papakonstantis, I.G. and Tsatsara, E.I., 2018. Trajectory Characteristics of Inclined Turbulent Dense Jets. *Environmental Processes*, 5(3), pp.539-554.
- Papakonstantis, I.G. and Tsatsara, E.I., 2019. Mixing Characteristics of Inclined Turbulent Dense Jets. *Environmental Processes*, 6(2), pp.525-541.
- Webster D.R., Roberts P. J. W. and Ra'ad I., 2001 Simultaneous DPTV/PLIF measurements of a turbulent jet. *Experiments in Fluids*, 30(1), pp.65-72.
- Zhang, Q. and Johari, H., 1996 Effects of acceleration on turbulent jets. *Physics of Fluids*, 8(8), pp.2185-2195.



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

### Κώδικας για τον διαχωρισμό των βίντεο σε επιμέρους στιγμιότυπα (frames)

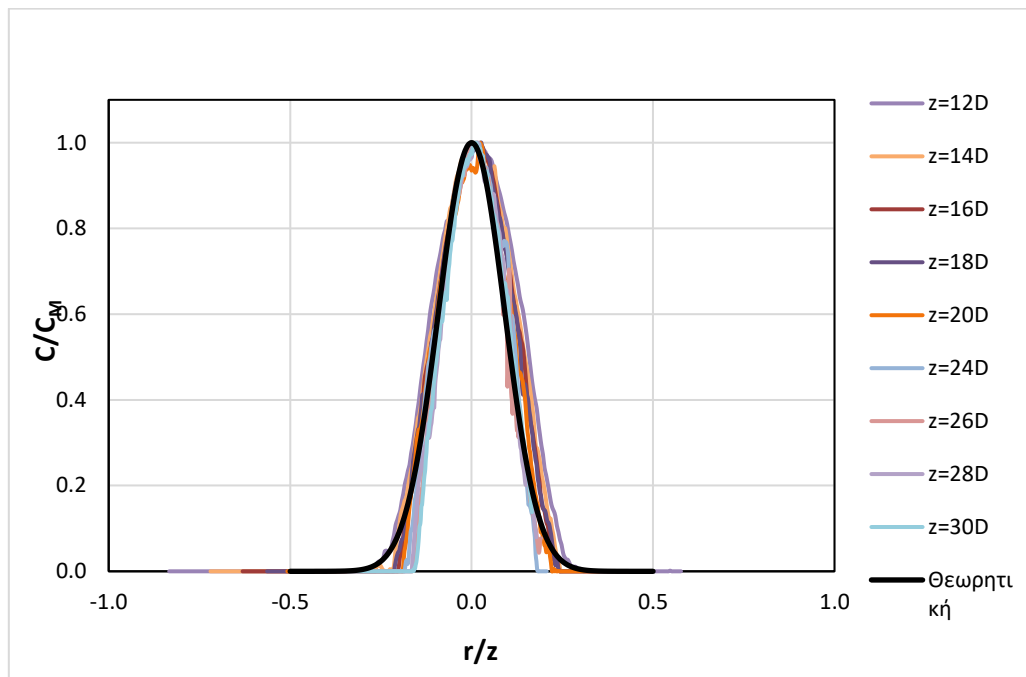
```
clc; clear all; format long;
VID=VideoReader('EXP016.MP4');
%Number of Frames, Duration of Video (sec), Frames Rate (Frames per secs), Video
Format (in RGB)
NoF=VID.NumFrames;          DRT=VID.Duration;          FpS=VID.FrameRate;
ViFo=VID.VideoFormat;
K=NoF;
for K=3000:3050
Frame=read(VID,K); %DF=double(Frame);
%save(['Output\Frames\F' num2str(K) '.mat'],'NoF','DRT','FpS','ViFo','K','Frame');
imwrite(Frame,['Output\Pictures\P' num2str(K) '.jpeg'],'JPEG');
[K NoF]
end
```

### Κώδικας για την δημιουργία του υποπίνακα του κόκκινου χρώματος για την μέση συγκέντρωση και την RMS συγκέντρωση

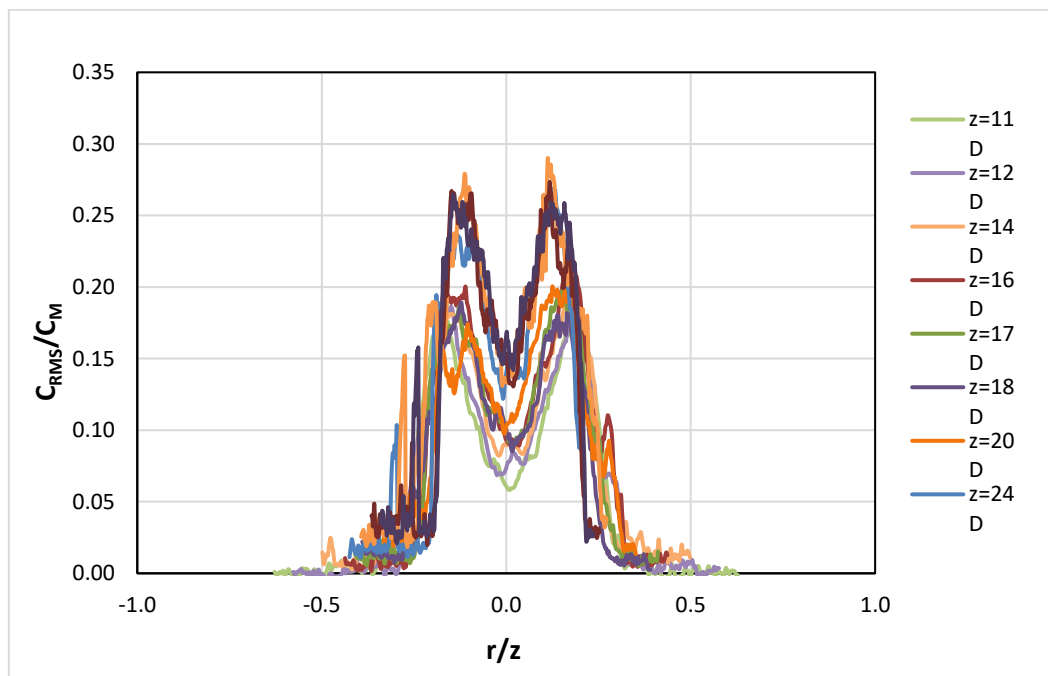
```
clc; clear; format long;
Dir='G:\final_exp\Output017\Frames';
Vid=017; TmFr=[4500 5500]; SpFr=[408 679 105 1205]; Sc=1/25; %cm/pixels
MR=NaN(SpFr(2)-SpFr(1)+1,SpFr(4)-SpFr(3)+1,TmFr(2)-TmFr(1)+1);      MG=MR;
MB=MR;
for T=TmFr(1):TmFr(2)
load([Dir '\F' num2str(T) '.mat']);
MR(:, :, T-TmFr(1)+1)=double(Frame(SpFr(1):SpFr(2),SpFr(3):SpFr(4),1))/255;MG(:, :, 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(['Results' num2str(Vid) '.mat'],'Mean','Stdev');
xlswrite(['Results' num2str(Vid) '.xlsx'],Mean(:, :, 1),'MeanR');
xlswrite(['Results' num2str(Vid) '.xlsx'],Stdev(:, :, 1),'StdvR');
```

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

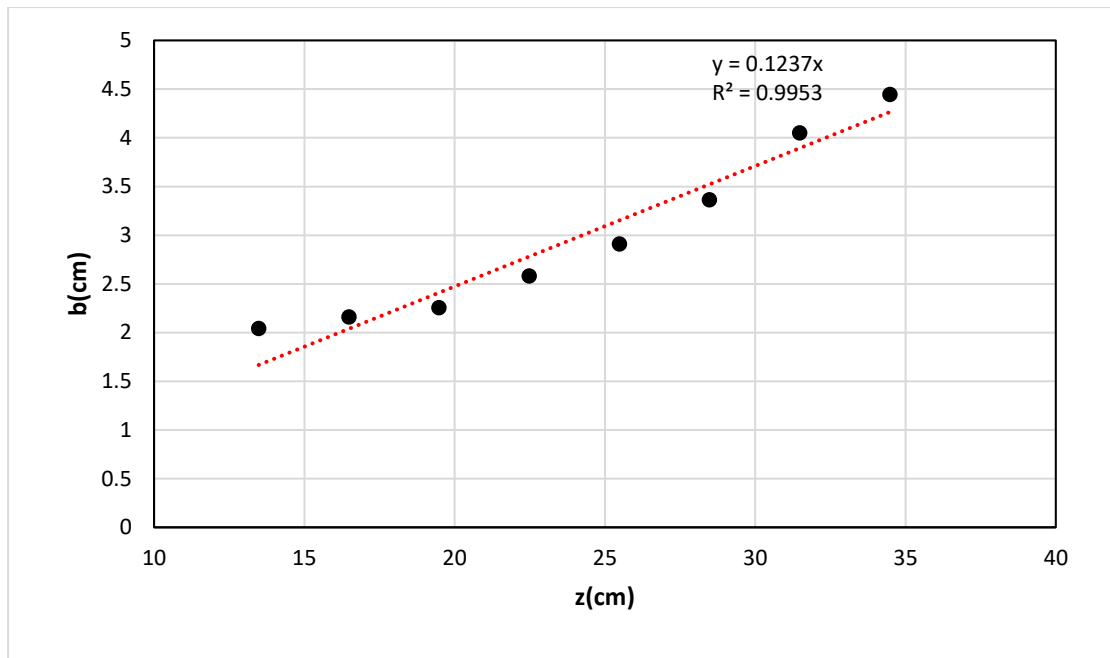
EXP002 D=0.75 cm Re=3869



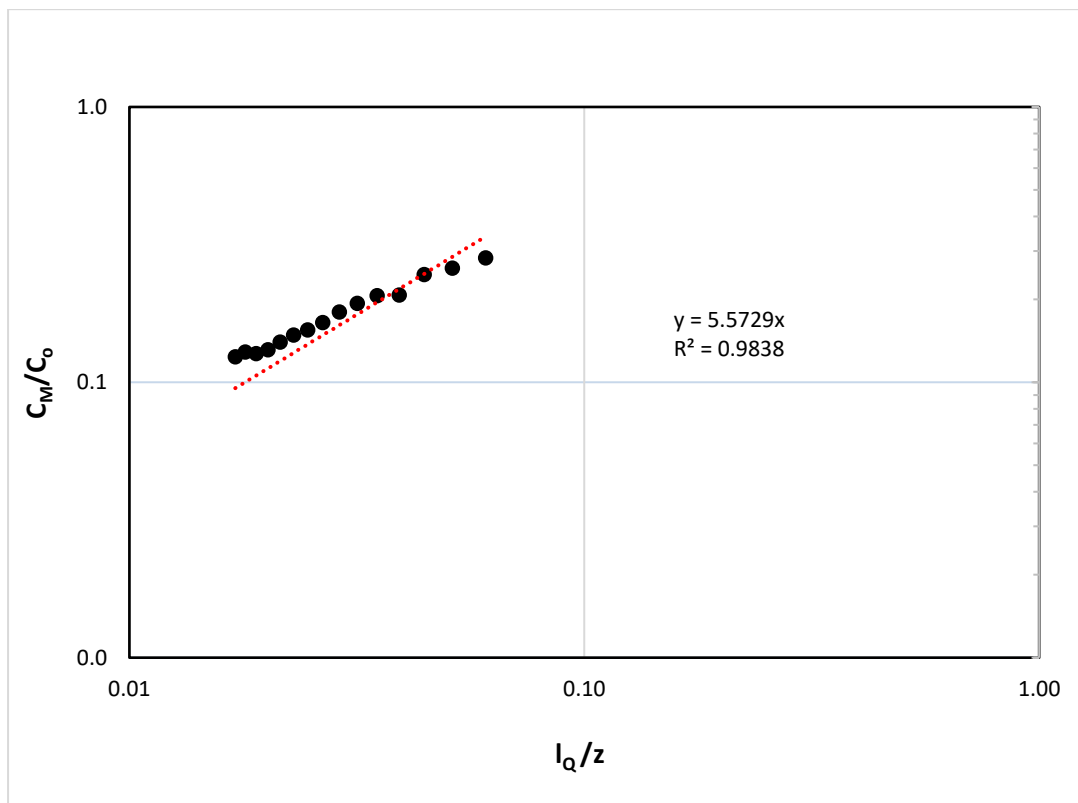
Σχήμα Β.1 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή στη ζώνη της αναπτυσσόμενης ροής για το πείραμα EXP002



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

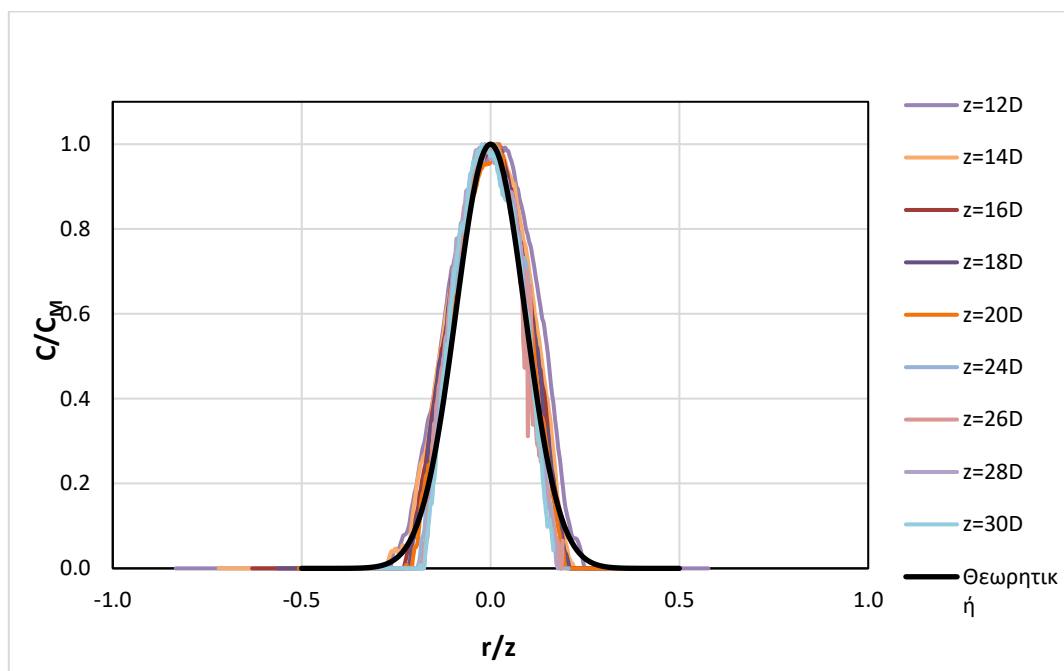


**Σχήμα Β.3** Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP002

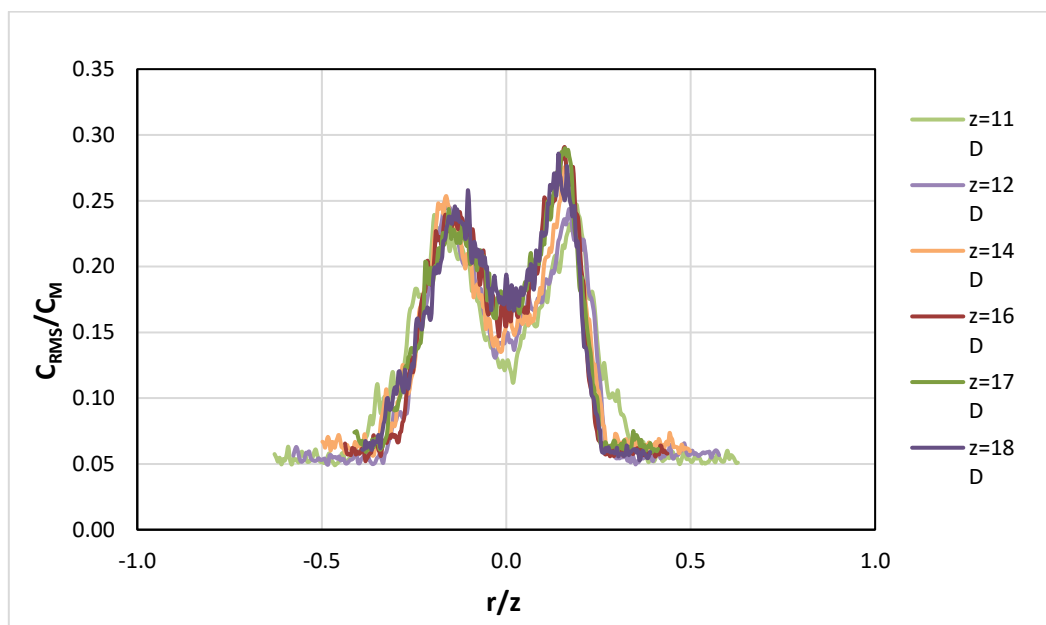


**Σχήμα Β.4** Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης  $C_M$  αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση  $C_0$  με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP002

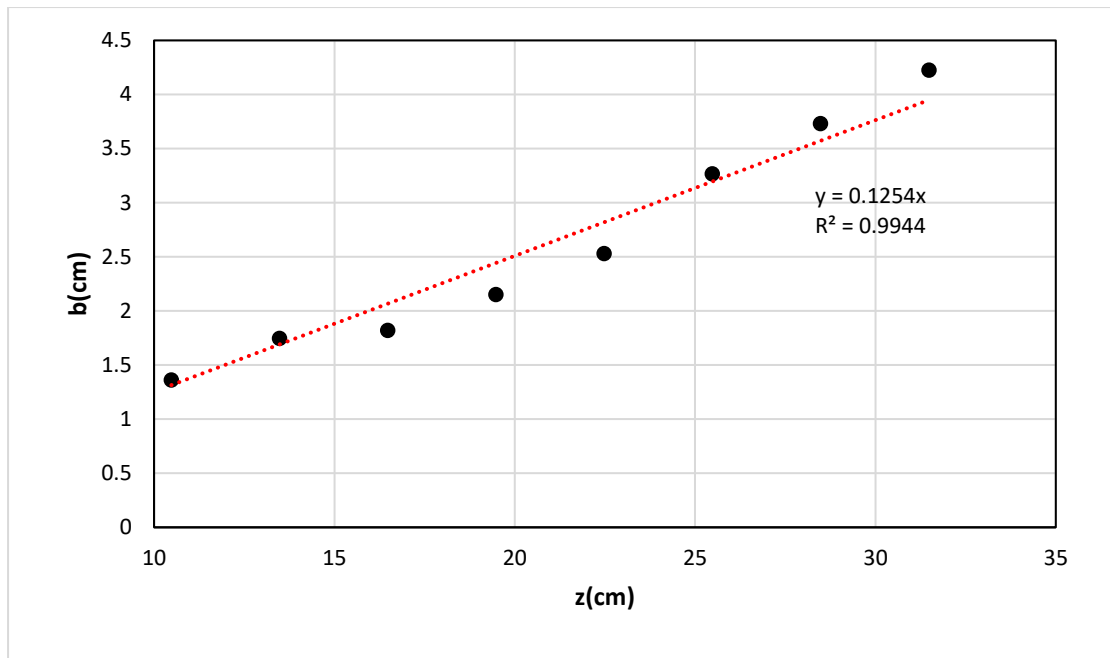
EXP003 D=0.75 cm Re=4921



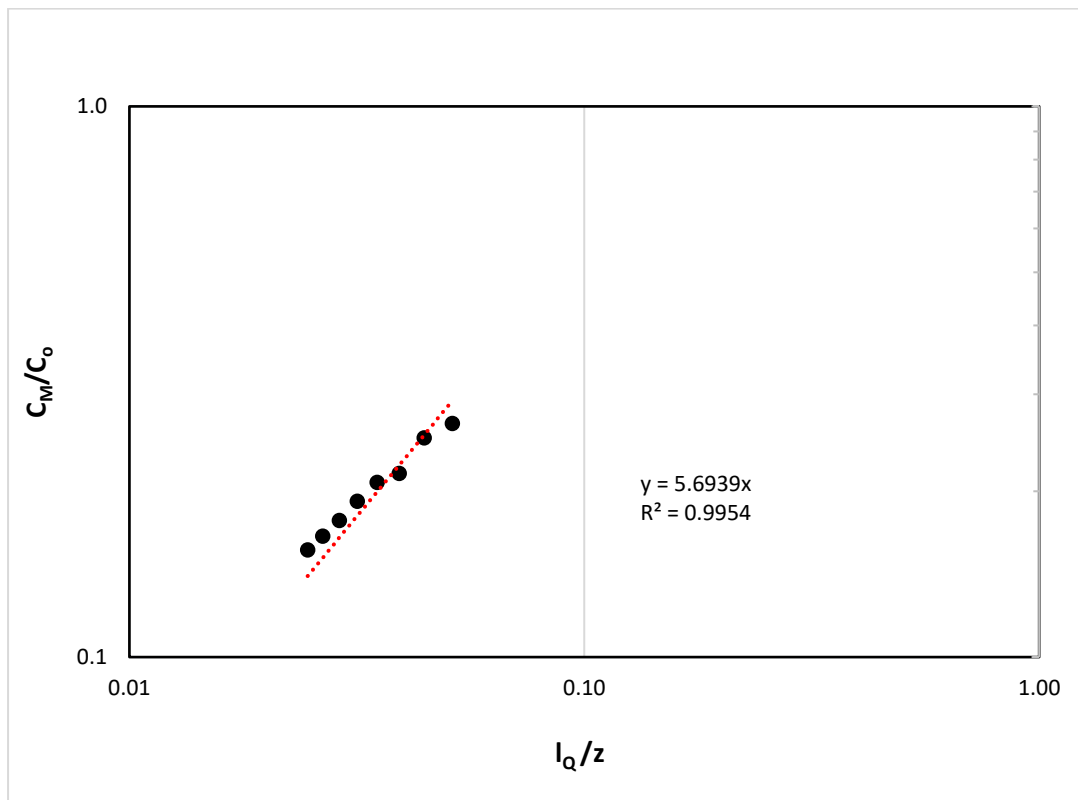
**Σχήμα Β.5** Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή στη ζώνη της αναπτυσσόμενης ροής για το πείραμα EXP003



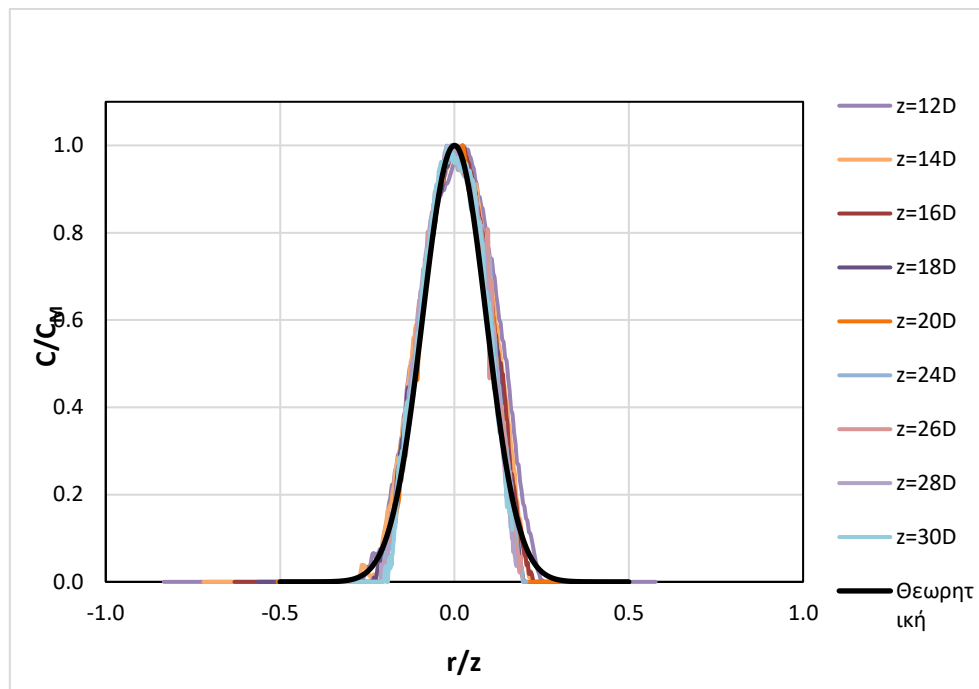
**Σχήμα Β.6** Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα EXP003



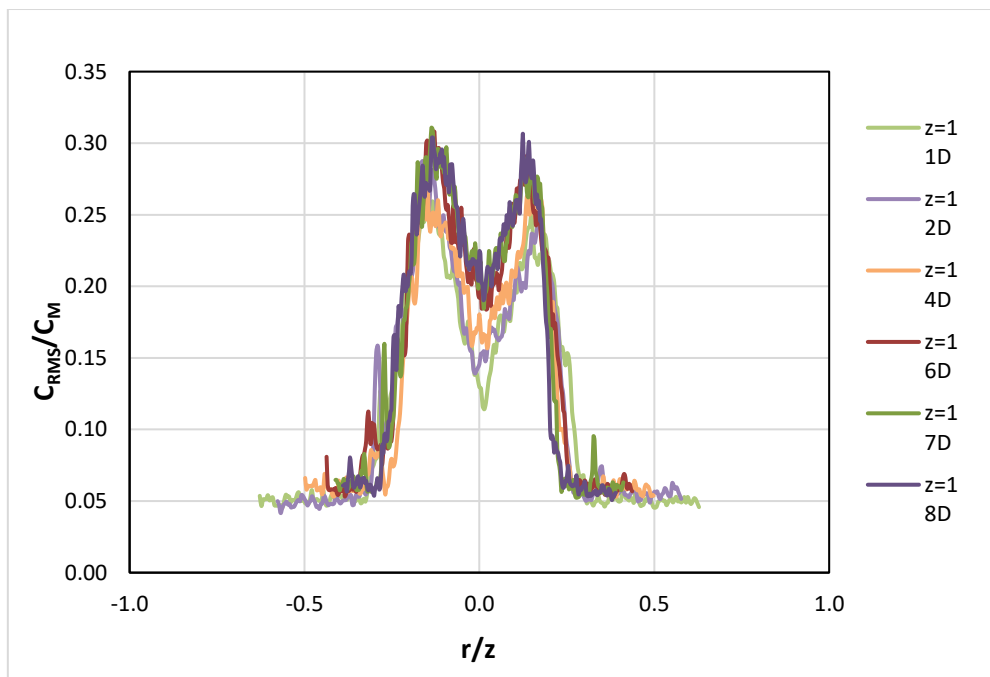
**Σχήμα Β.7** Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP003



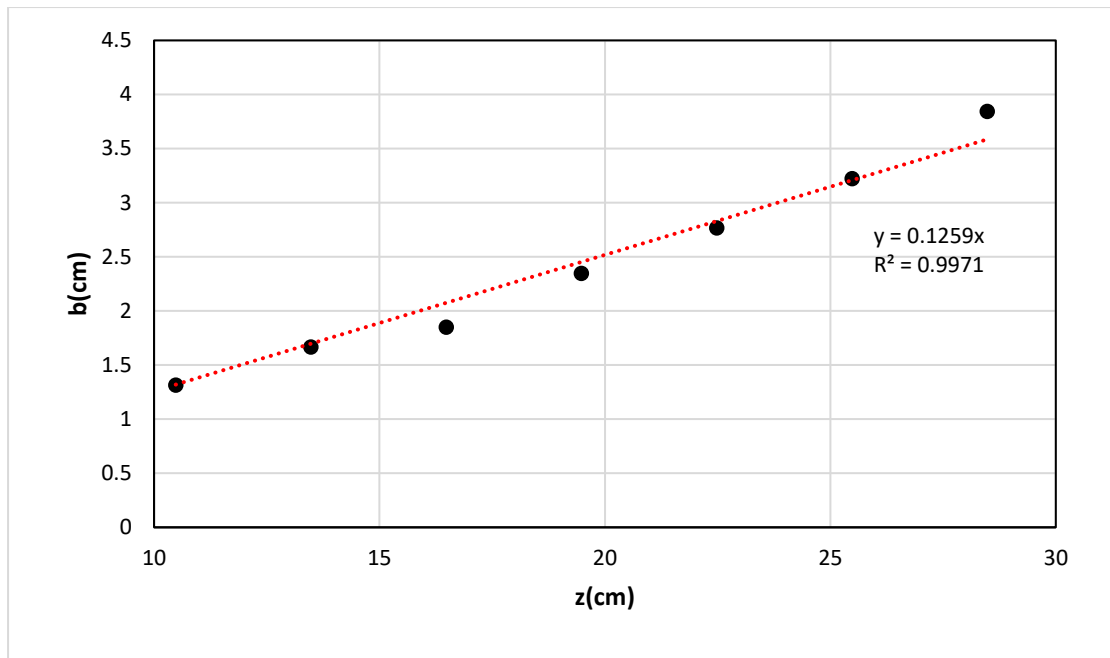
**Σχήμα Β.8** Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης  $C_M$  αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση  $C_0$  με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP003



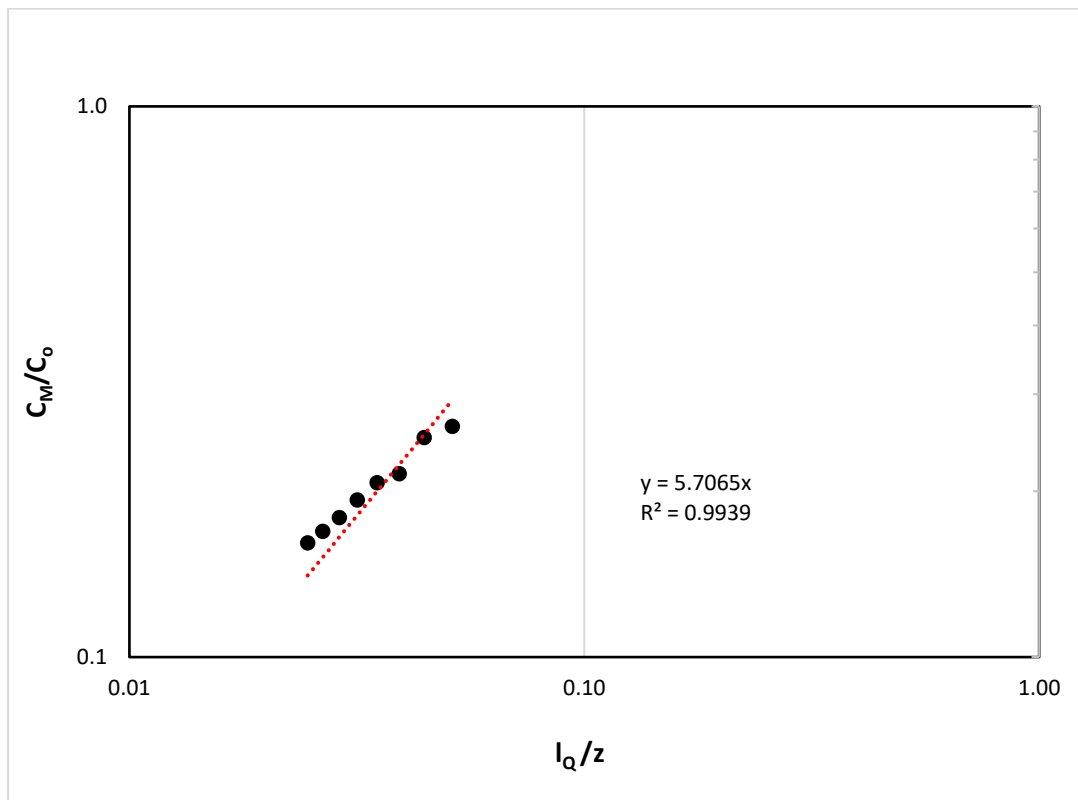
**Σχήμα Β.9** Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή στη ζώνη της αναπτυσσόμενης ροής για το πείραμα EXP004



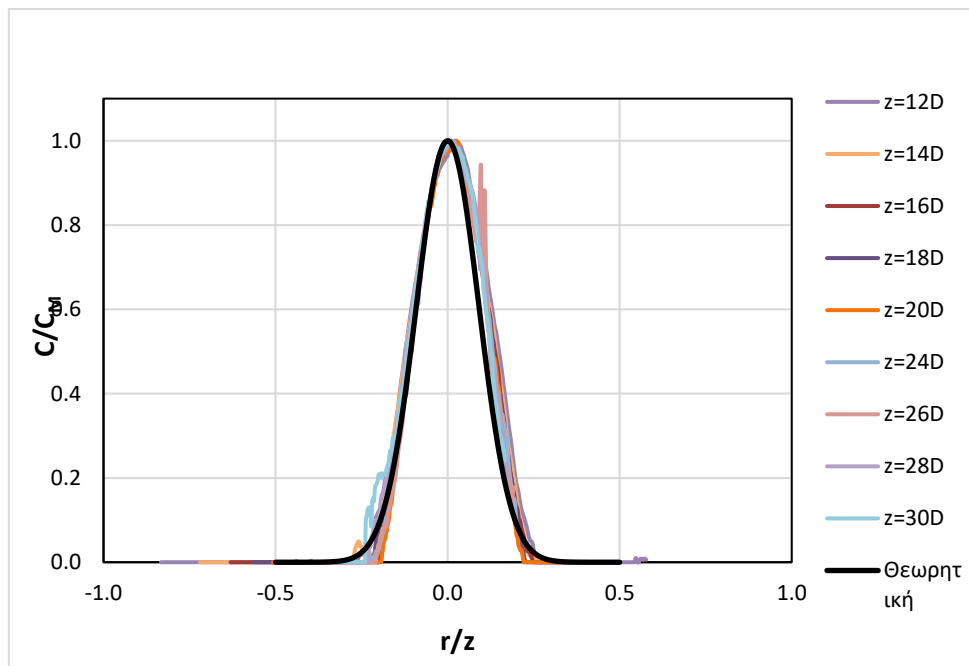
**Σχήμα Β.10** Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα EXP004



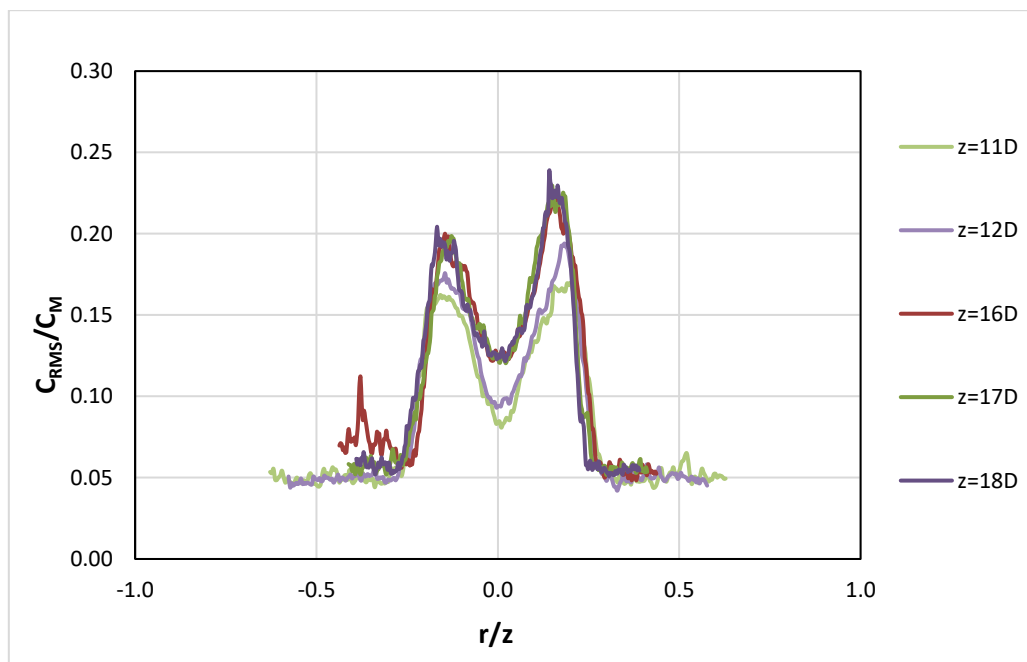
**Σχήμα Β.11** Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP004



**Σχήμα Β.12** Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης  $C_M$  αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση  $C_0$  με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP004

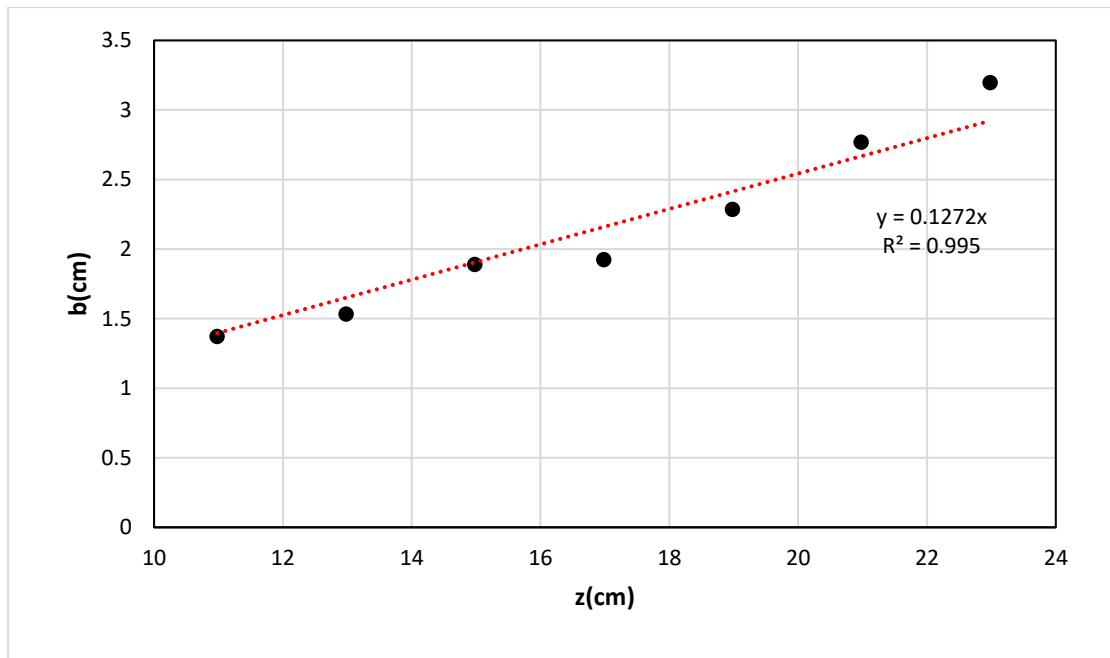


Σχήμα B.13 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή στη ζώνη της αναπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP005

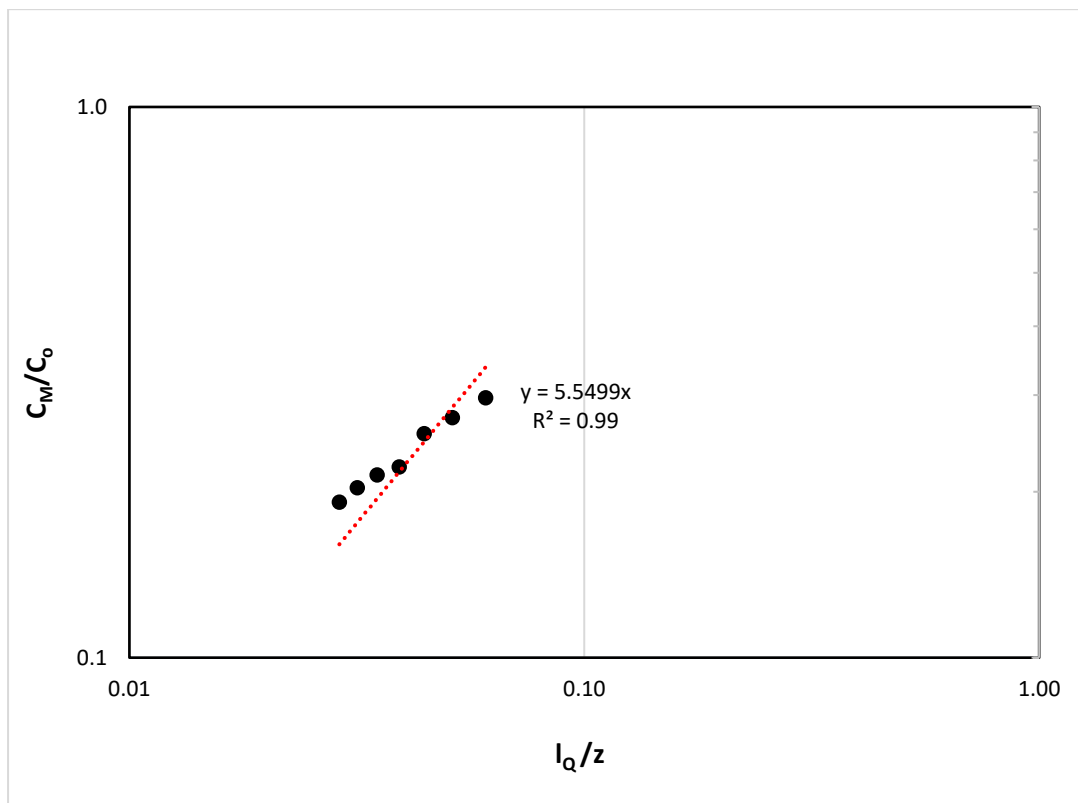


Σχήμα B.14 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή στη ζώνη της αναπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP005

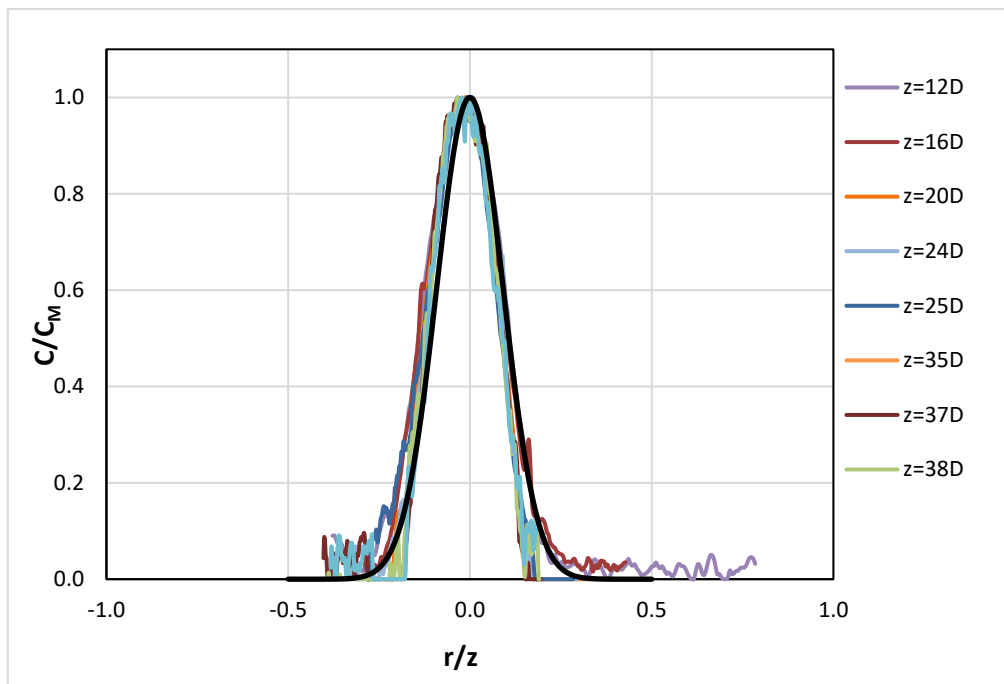




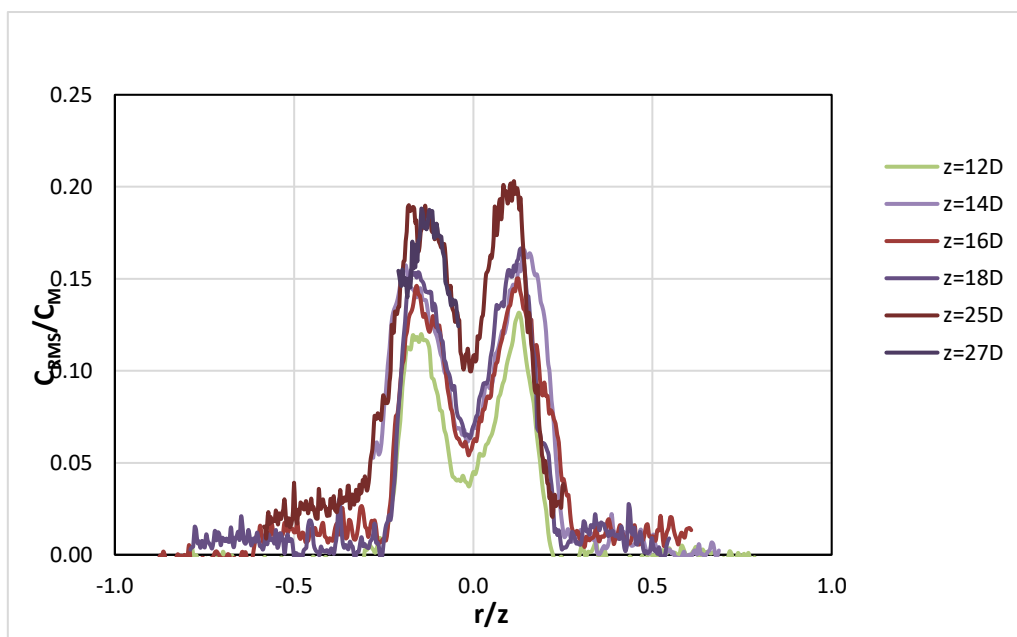
**Σχήμα Β.15** Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP005



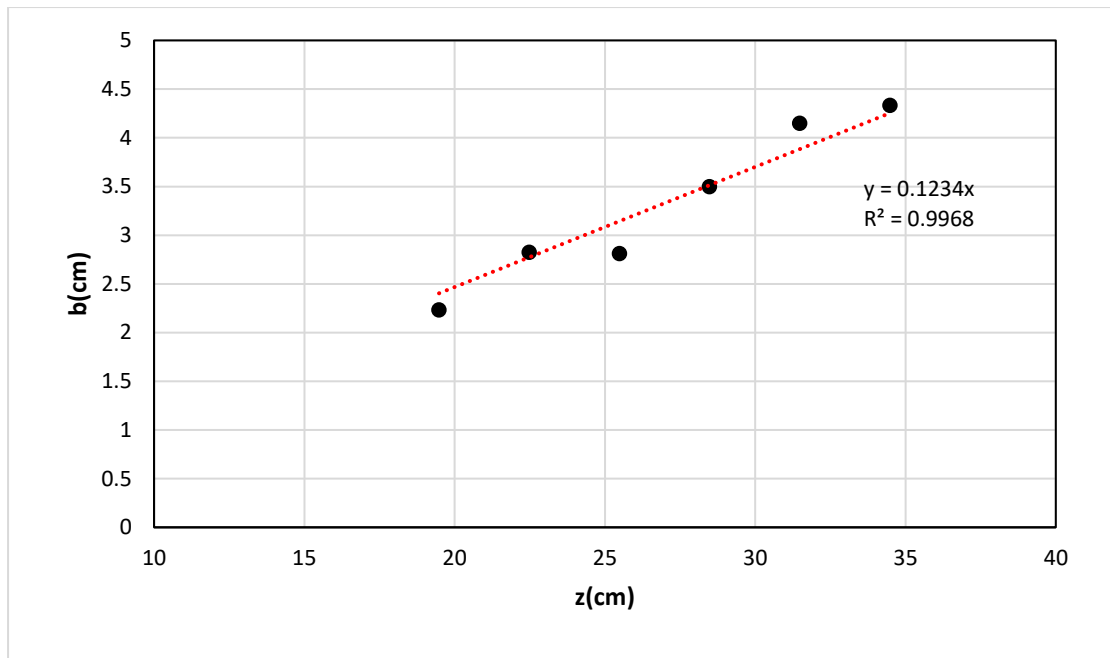
**Σχήμα Β.16** Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης  $C_M$  αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση  $C_0$  με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP005



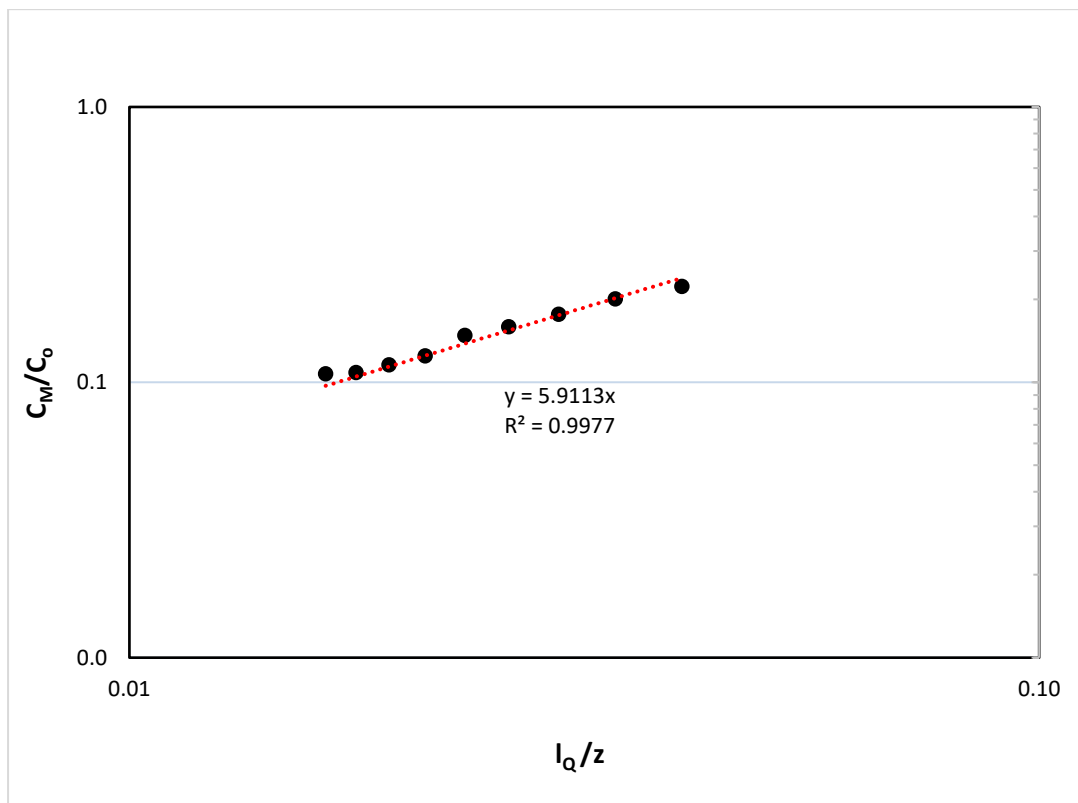
**Σχήμα Β.17** Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή στη ζώνη της αναπτυσσόμενης ροής για το πείραμα EXP006



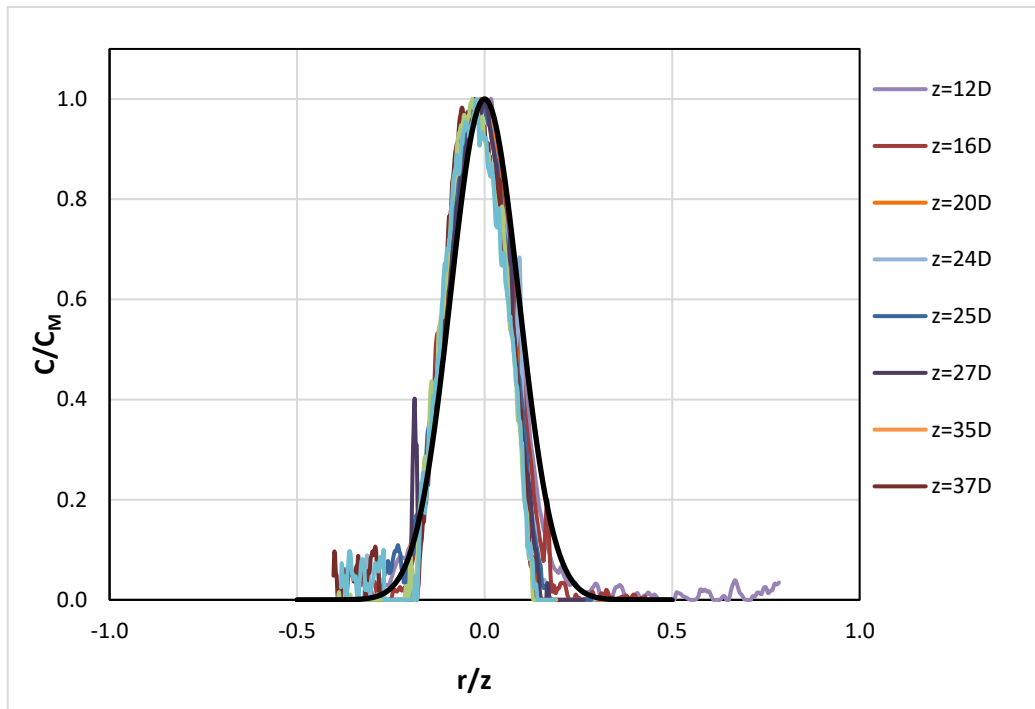
**Σχήμα Β.18** Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα EXP006



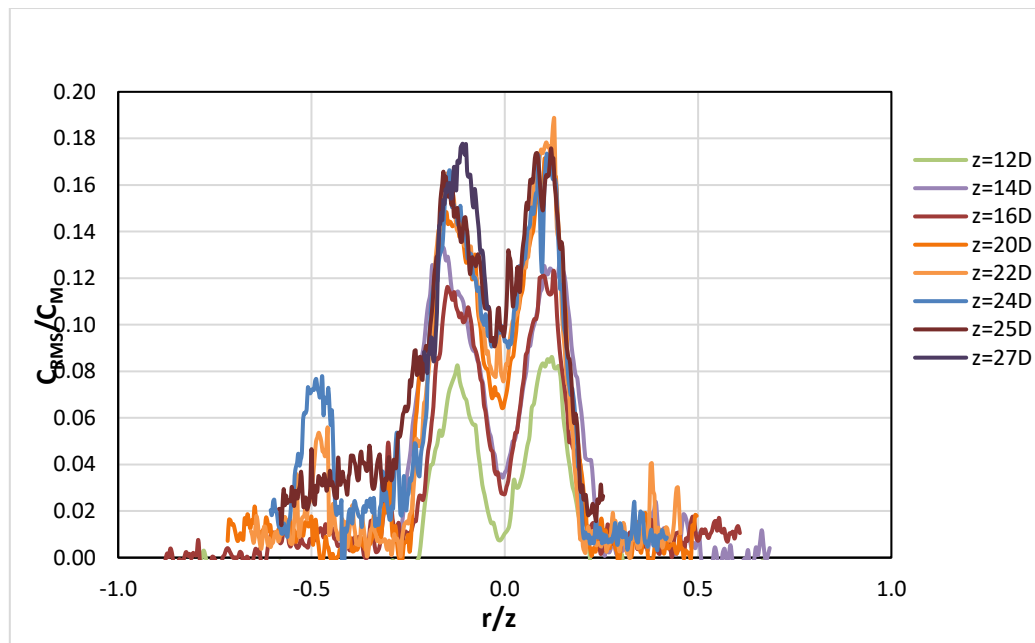
Σχήμα Β.19 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP006



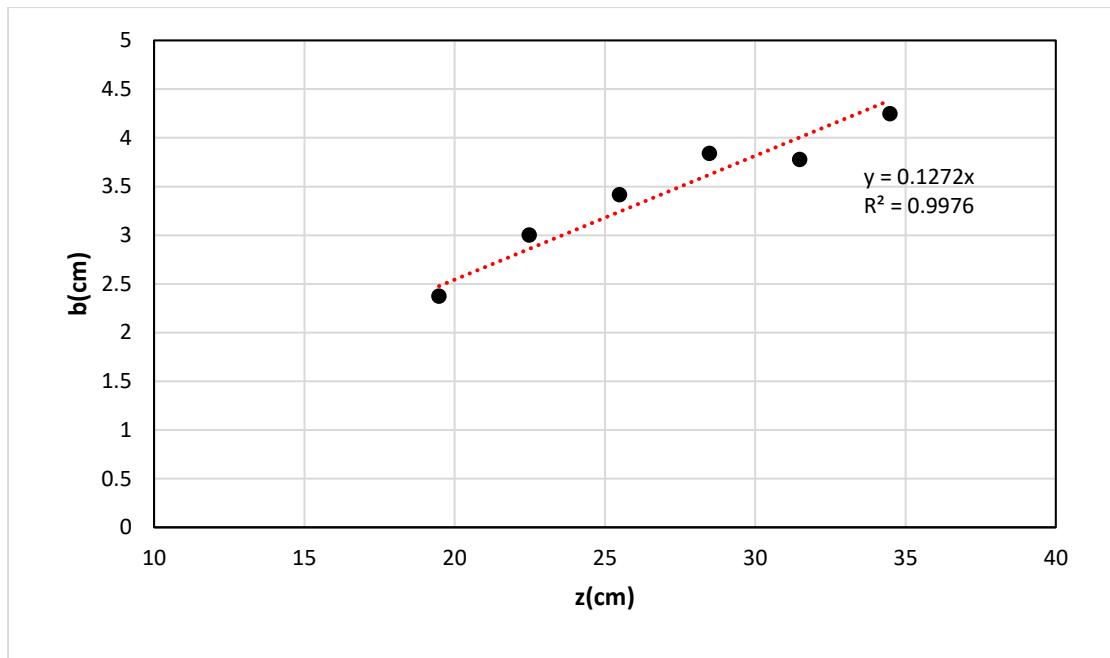
Σχήμα Β.20 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης  $C_M$  αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση  $C_0$  με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP006



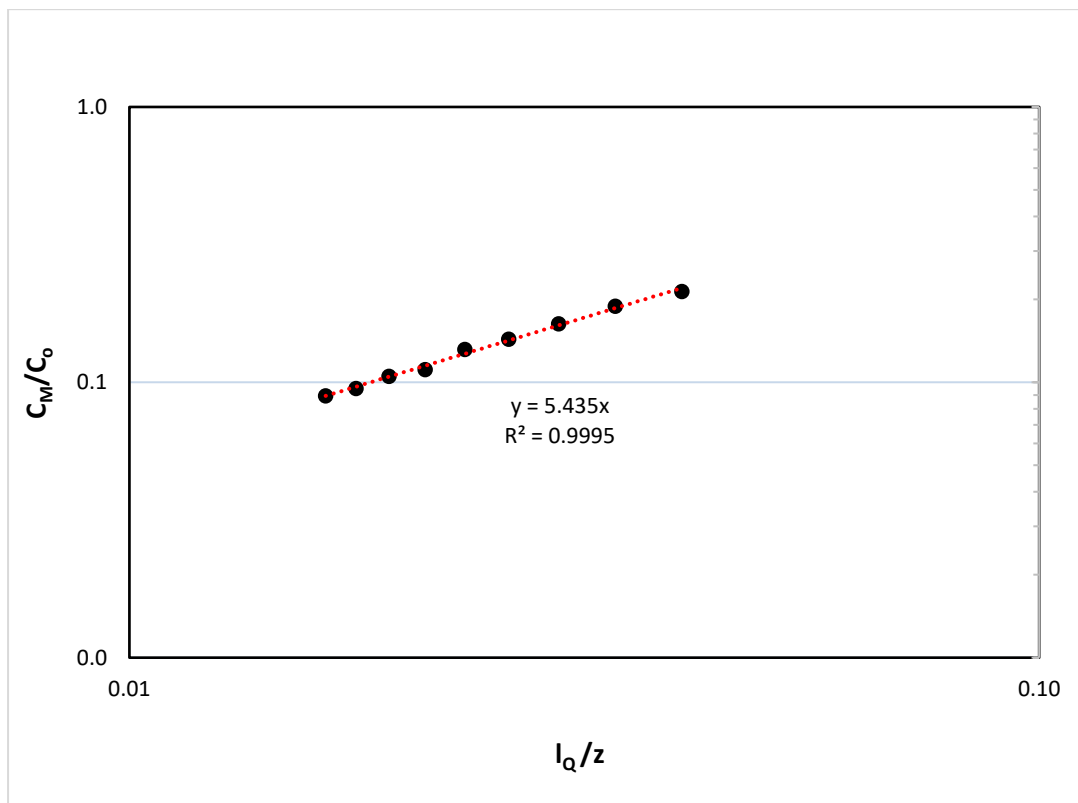
**Σχήμα Β.21** Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή στη ζώνη της αναπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP007



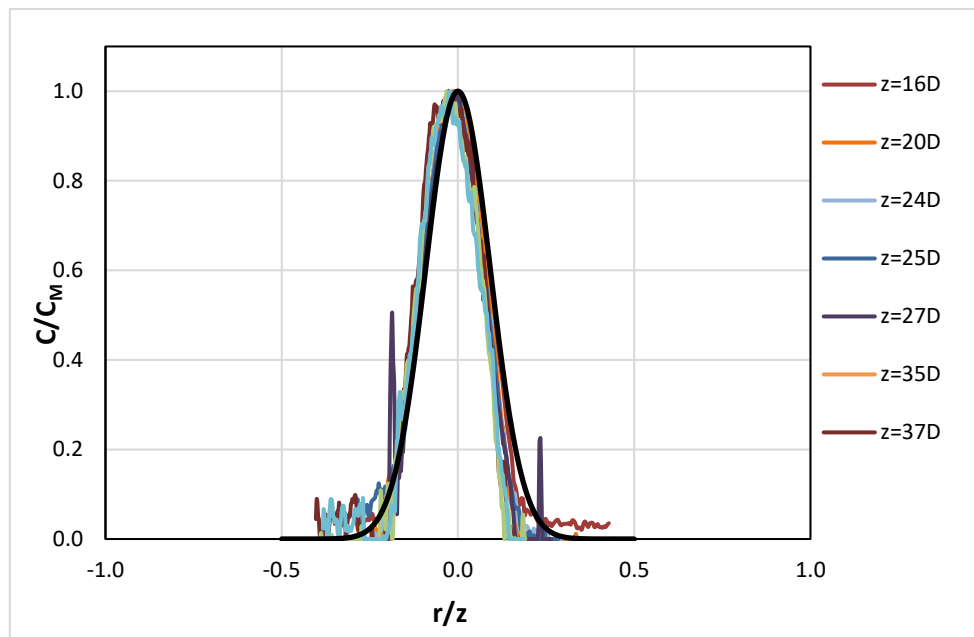
**Σχήμα Β.22** Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα EXP007



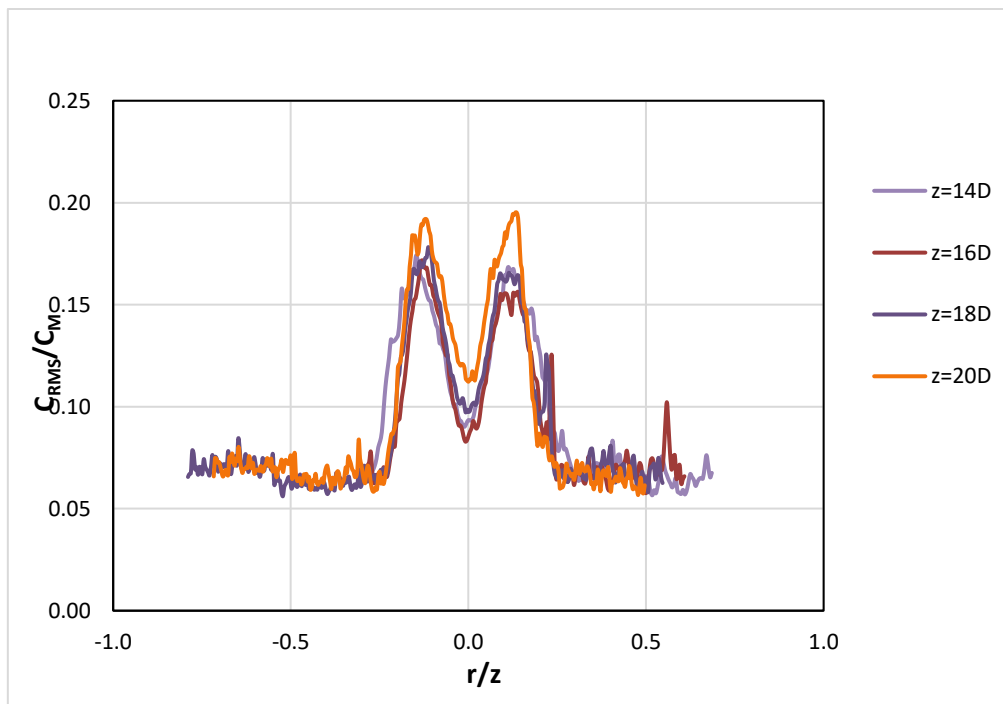
**Σχήμα Β.23** Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP007



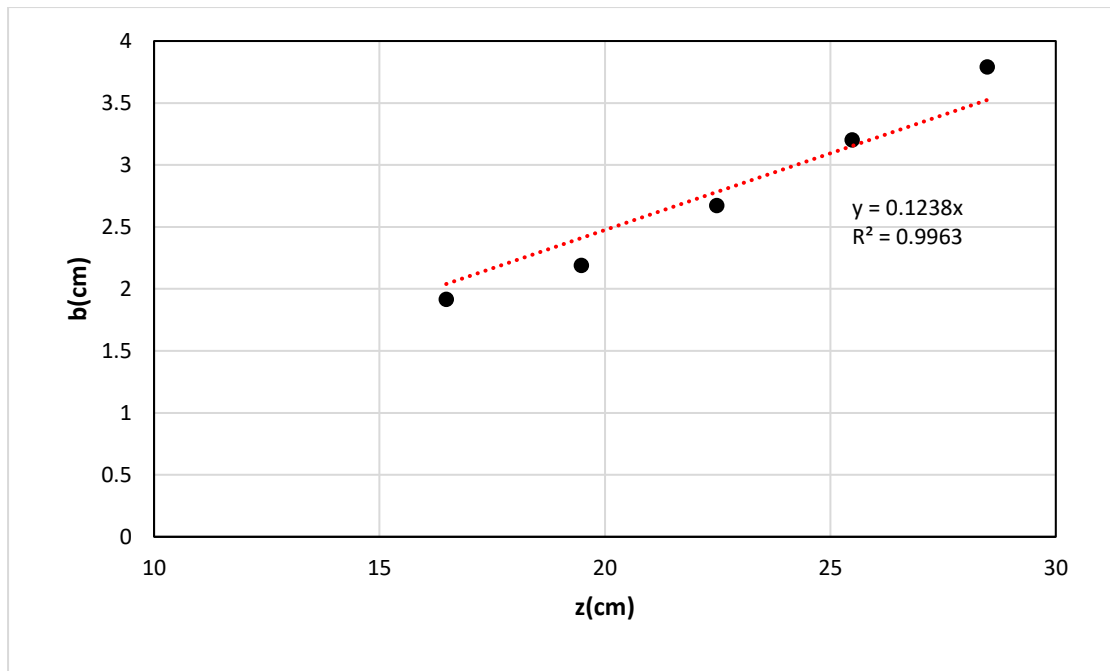
**Σχήμα Β.24** Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης  $C_M$  αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση  $C_0$  με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP007



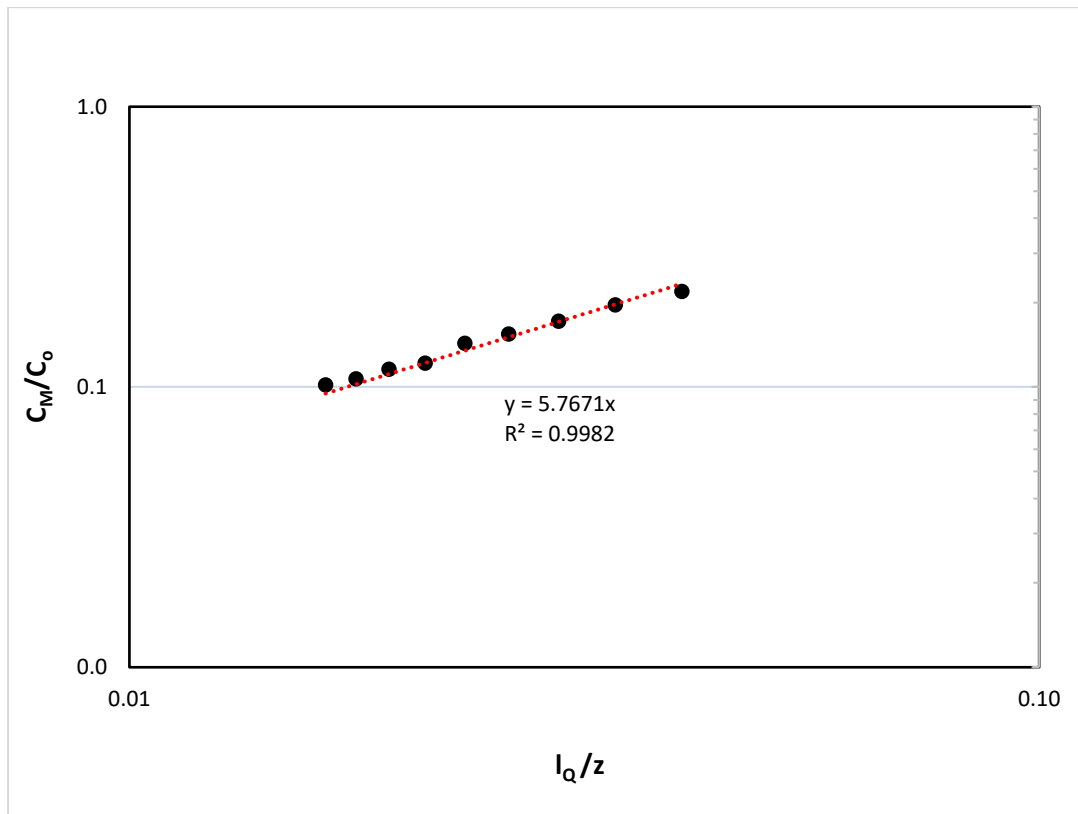
Σχήμα B.25 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή στη ζώνη της αναπτυσσόμενης ροής για το πείραμα EXP008



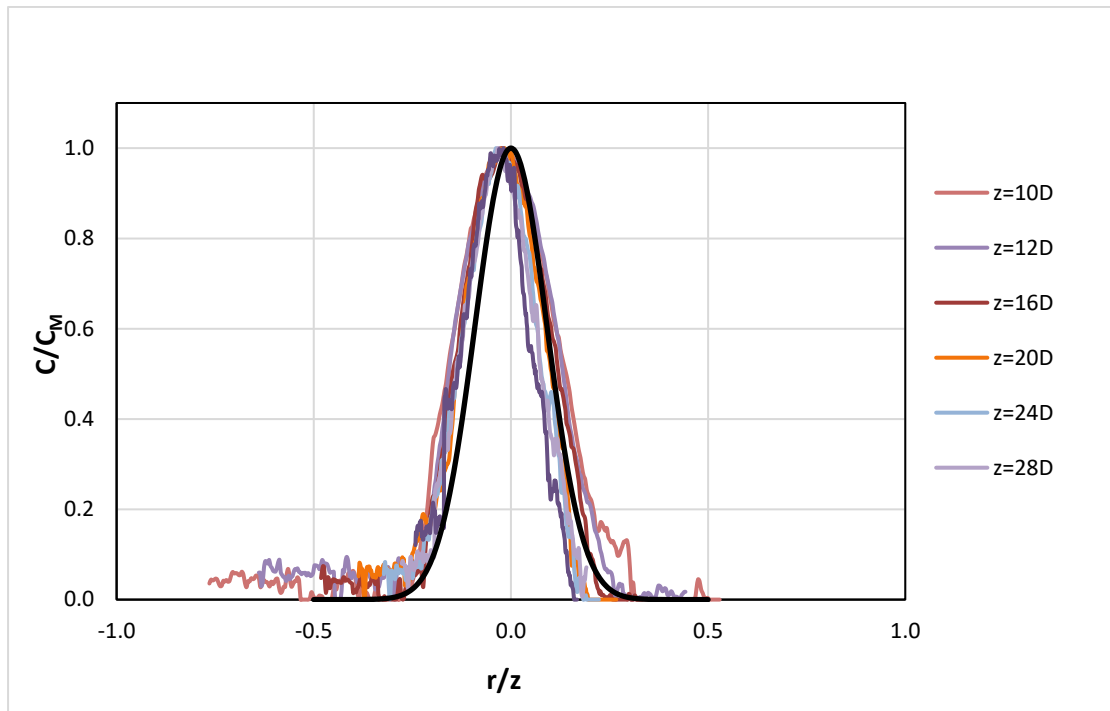
Σχήμα B.26 Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα EXP008



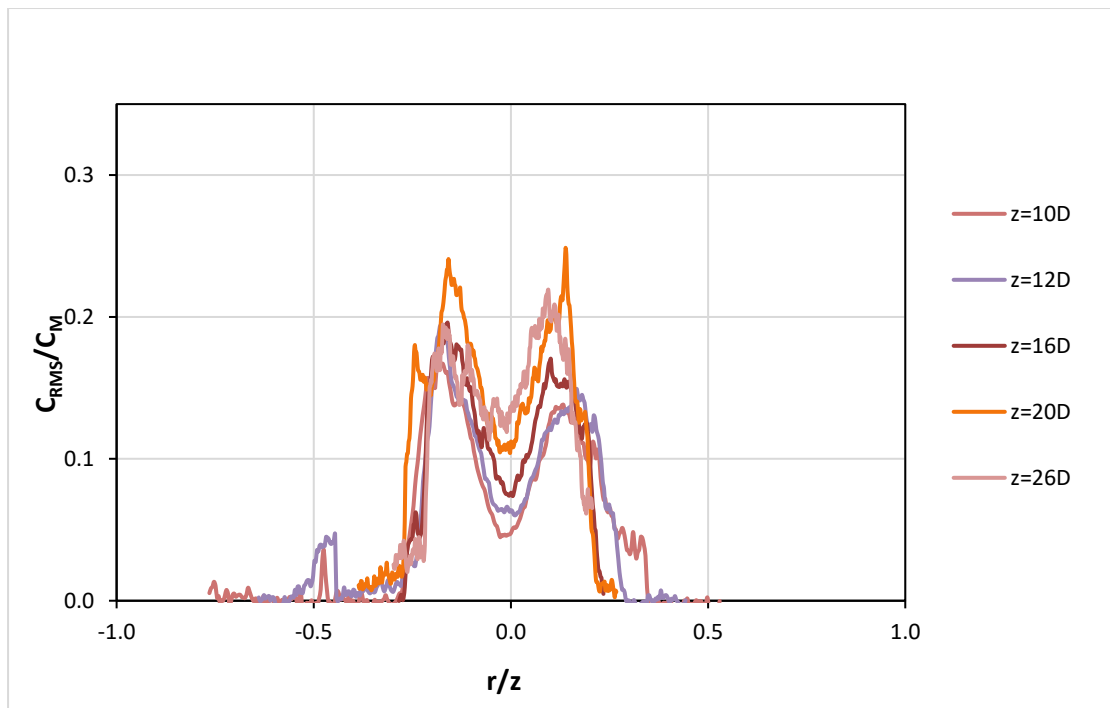
**Σχήμα Β.27** Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP008



**Σχήμα Β.28** Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης  $C_M$  αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση  $C_0$  με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP008

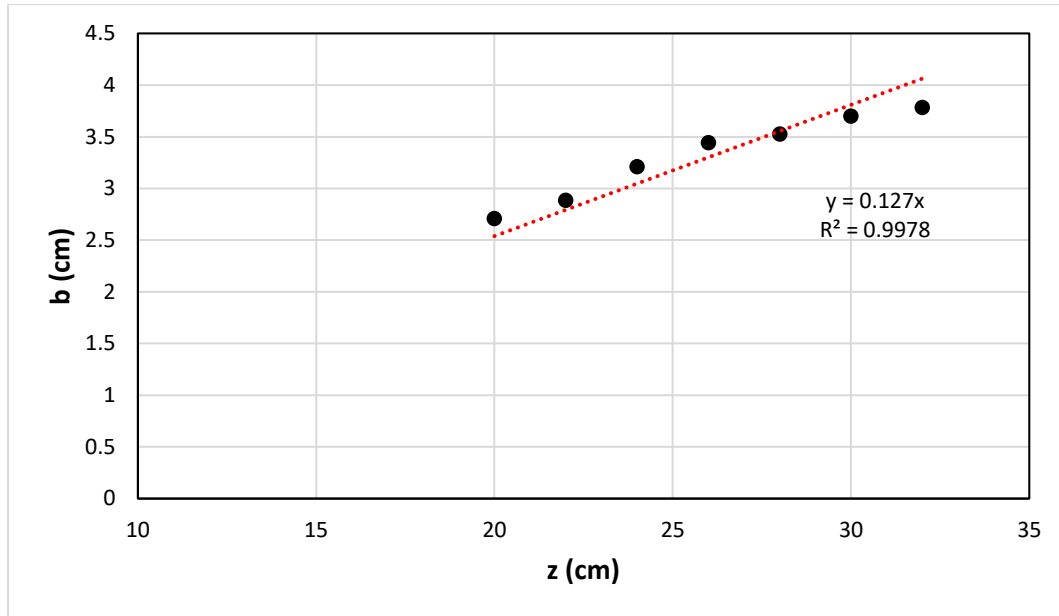


**Σχήμα B.29** Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή στη ζώνη της αναπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP009

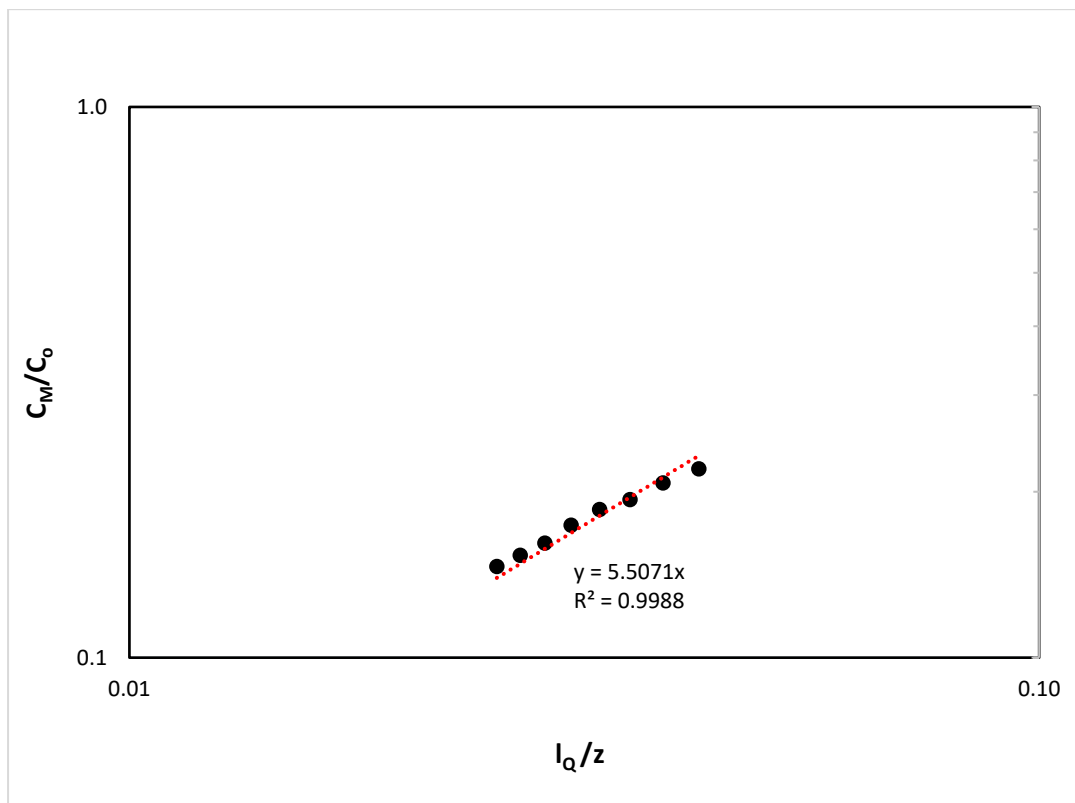


**Σχήμα B.30** Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα EXP009

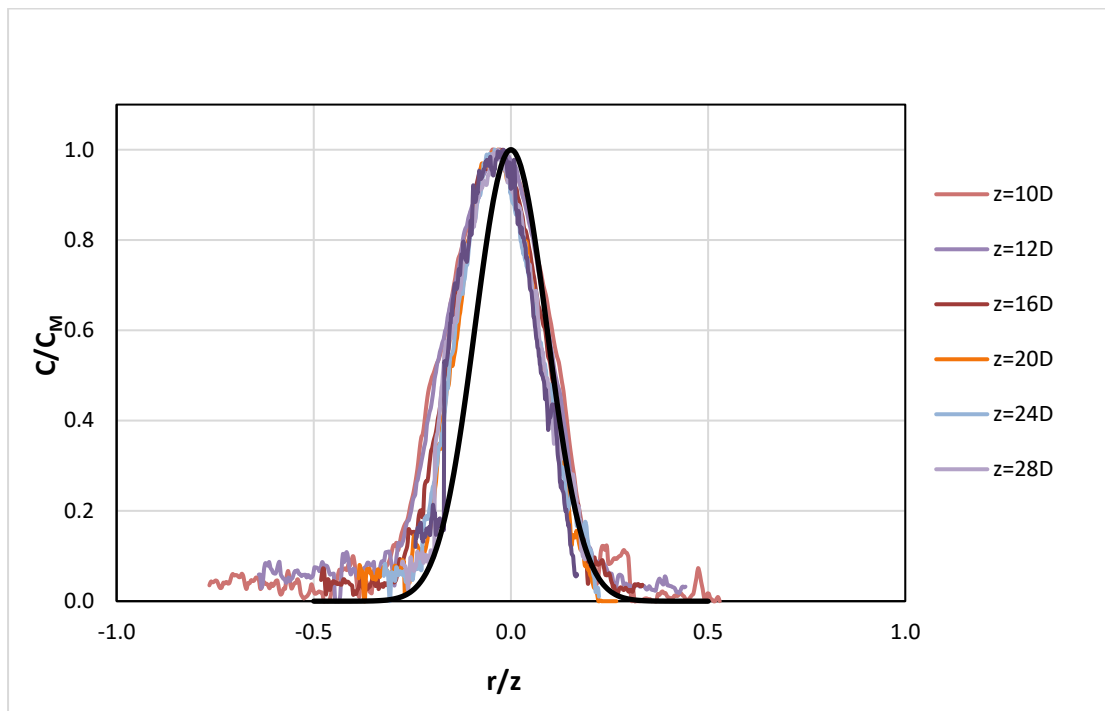




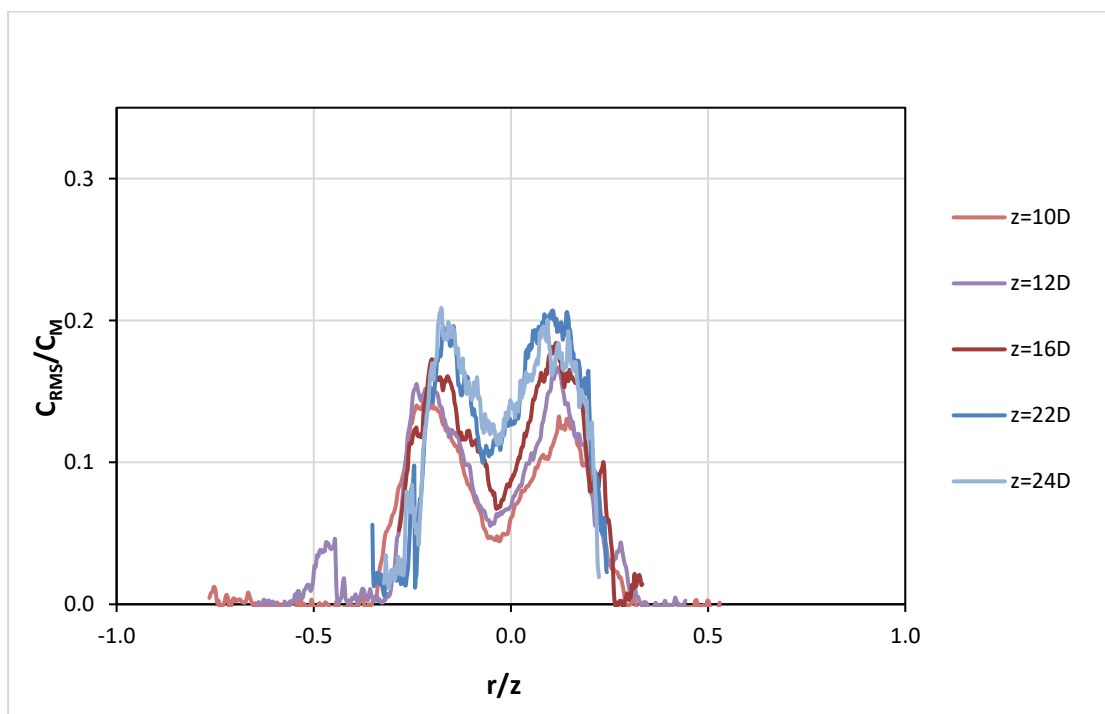
**Σχήμα B.31** Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP009



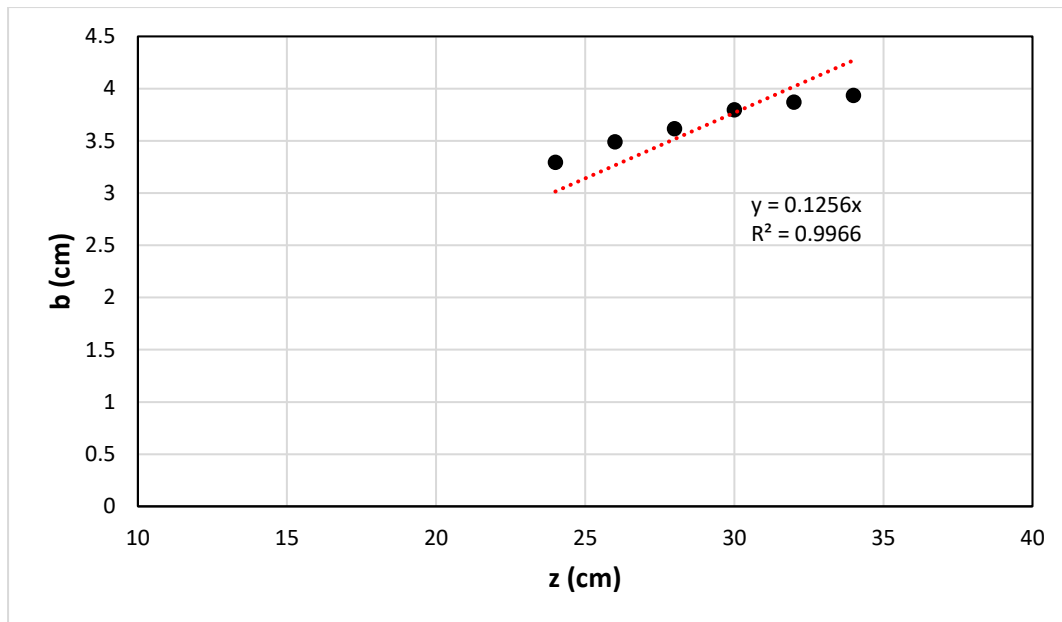
**Σχήμα B.32** Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης  $C_M$  αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση  $C_0$  με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP009



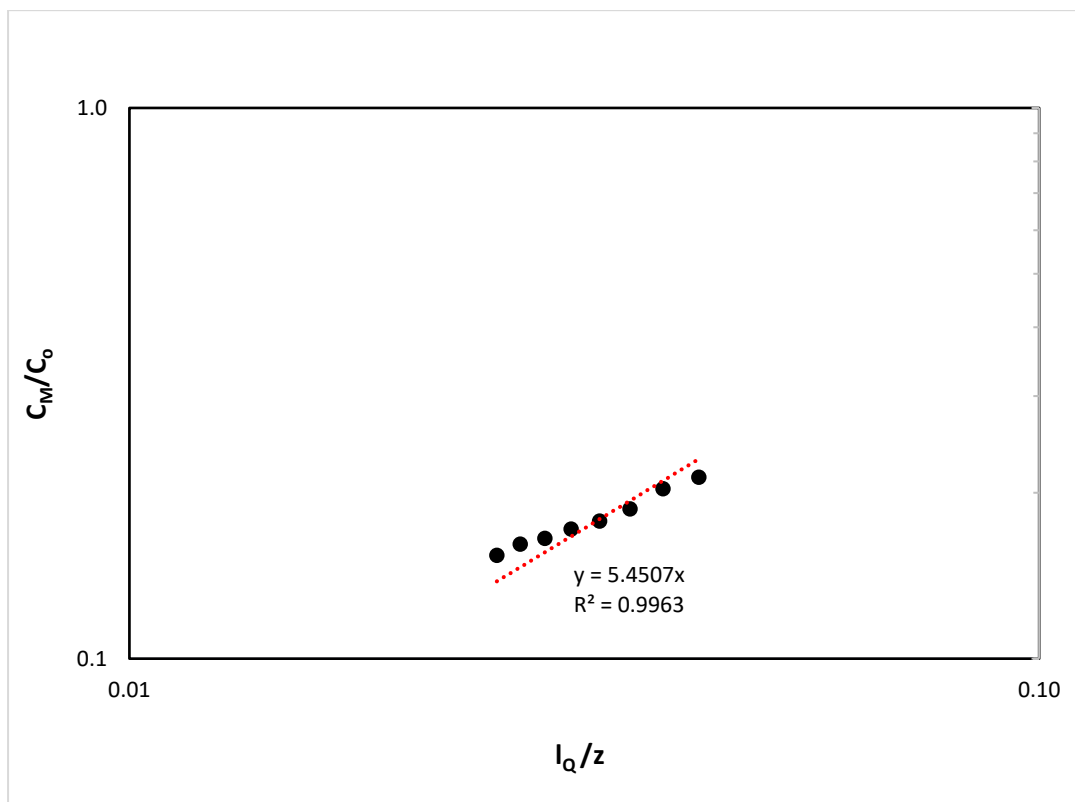
**Σχήμα B.33** Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή στη ζώνη της αναπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP010



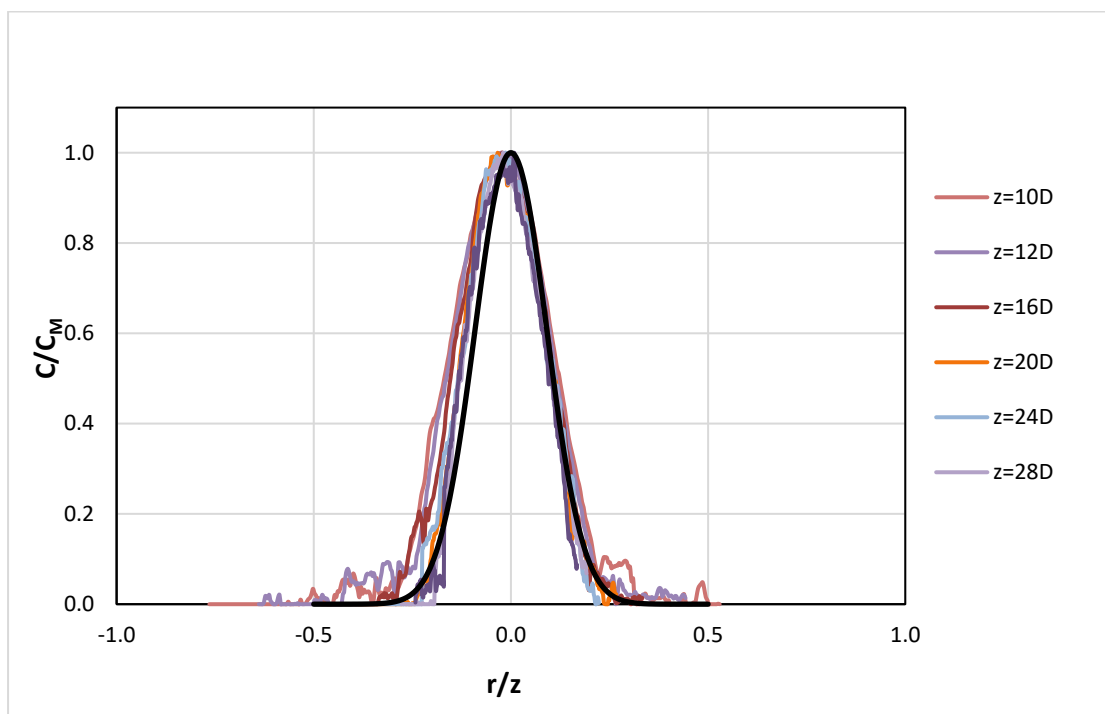
**Σχήμα B.34** Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα EXP010



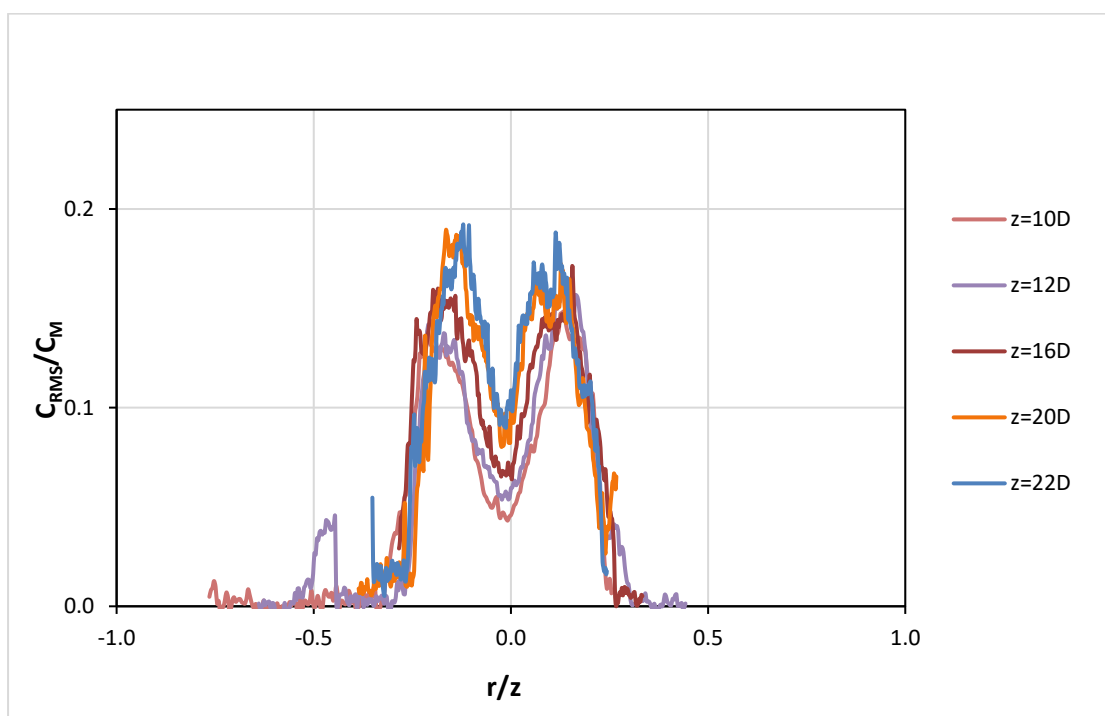
**Σχήμα Β.35** Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP010



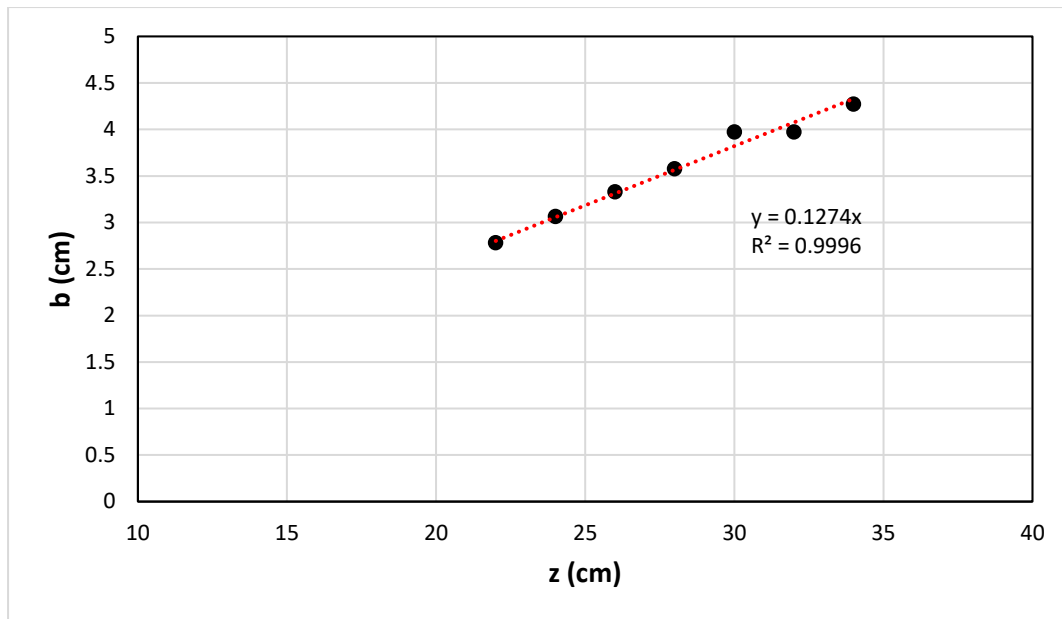
**Σχήμα Β.36** Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης  $C_M$  αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση  $C_0$  με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP010



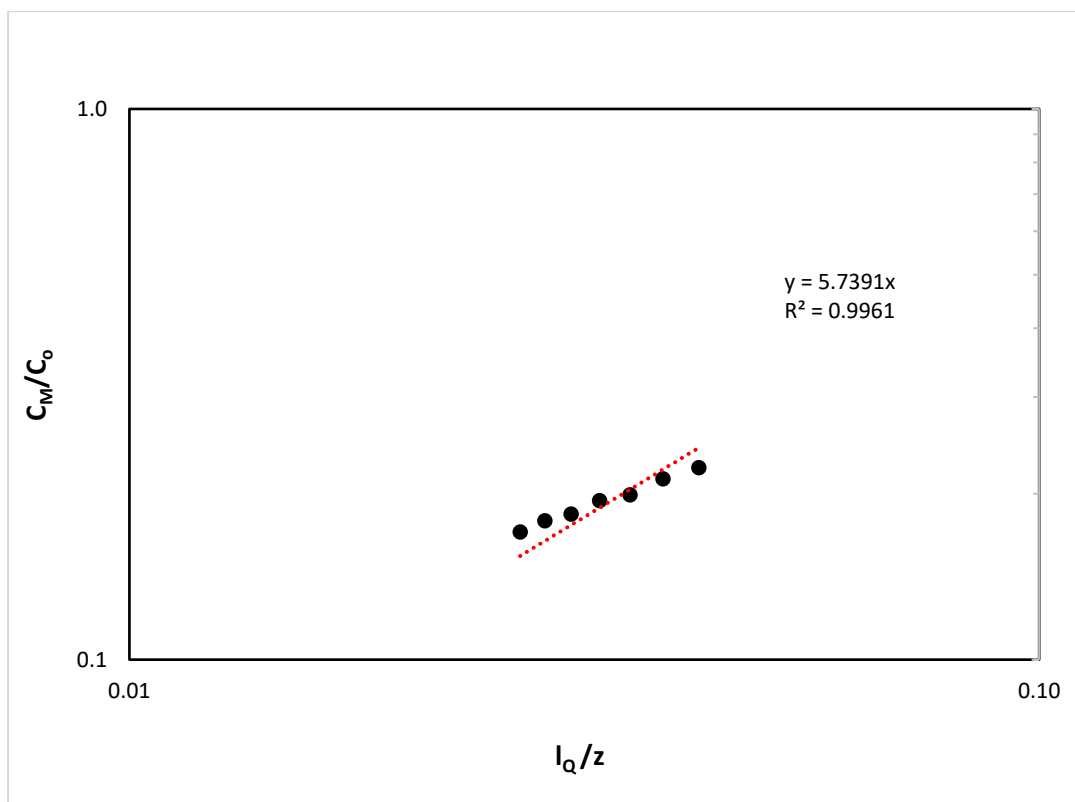
**Σχήμα B.37** Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή στη ζώνη της αναπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP011



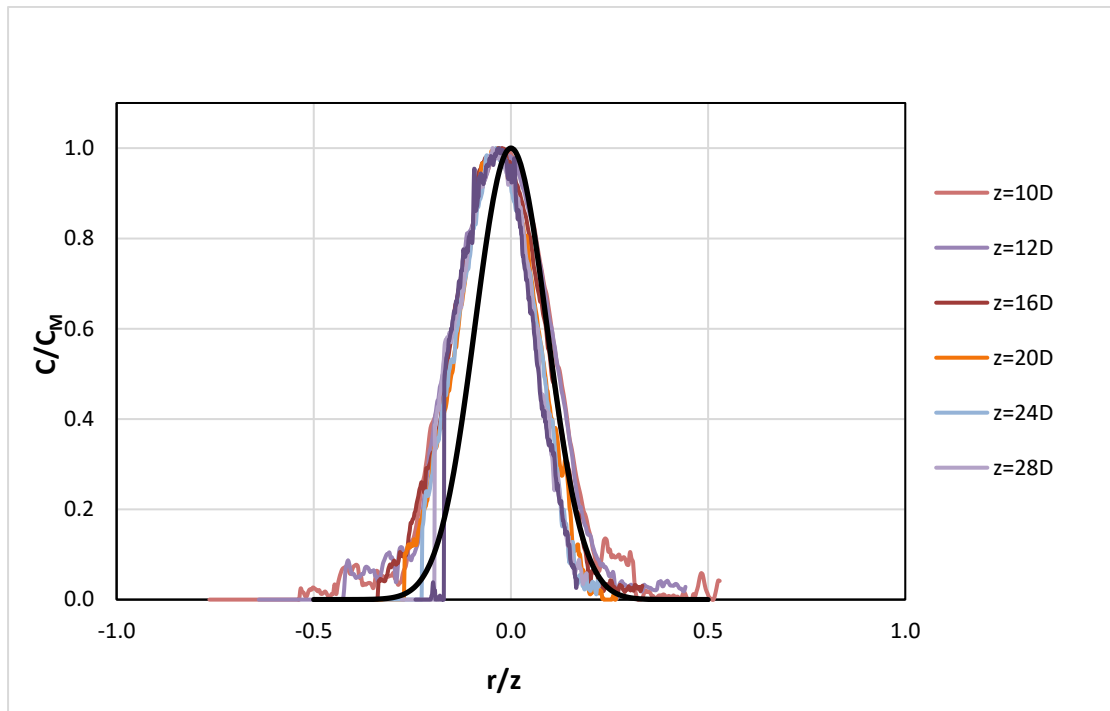
**Σχήμα B.38** Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα EXP011



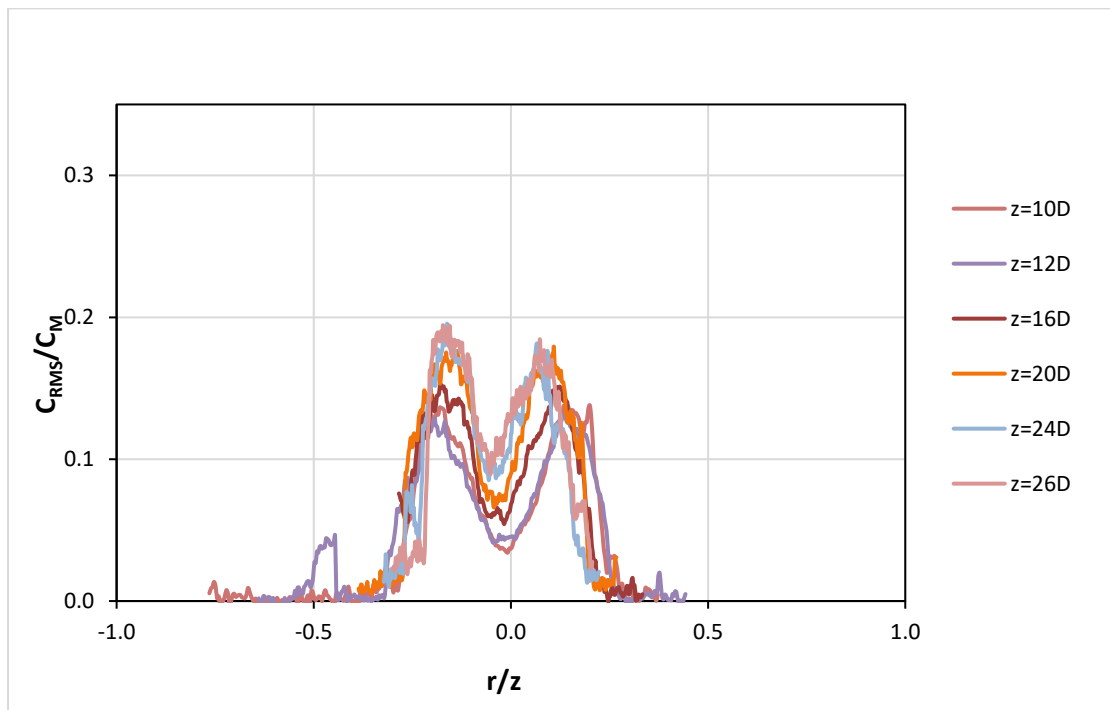
**Σχήμα Β.39** Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP011



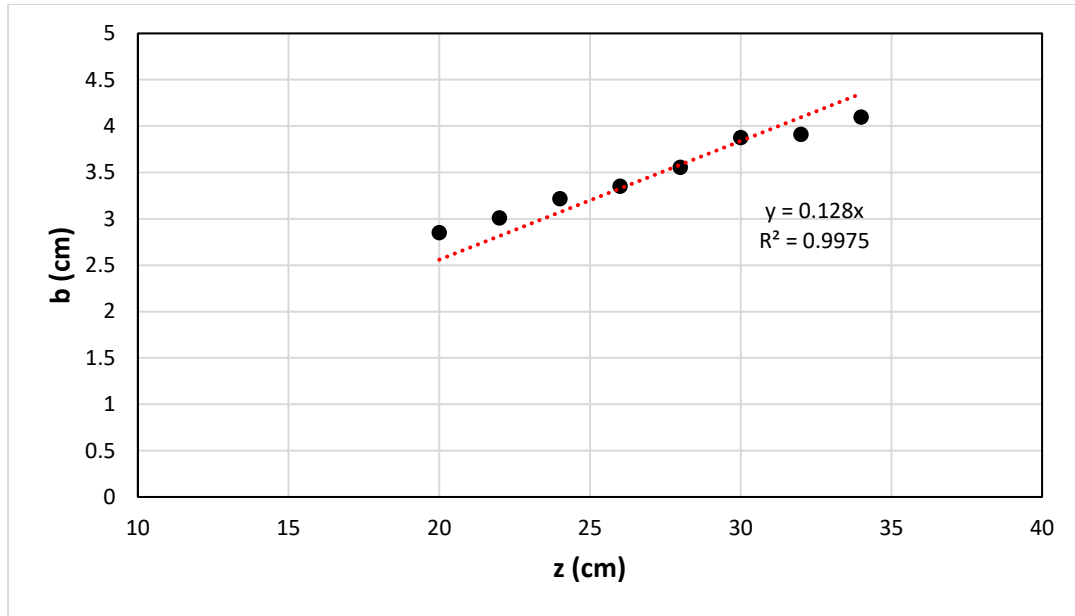
**Σχήμα Β.40** Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης  $C_M$  αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση  $C_0$  με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP011



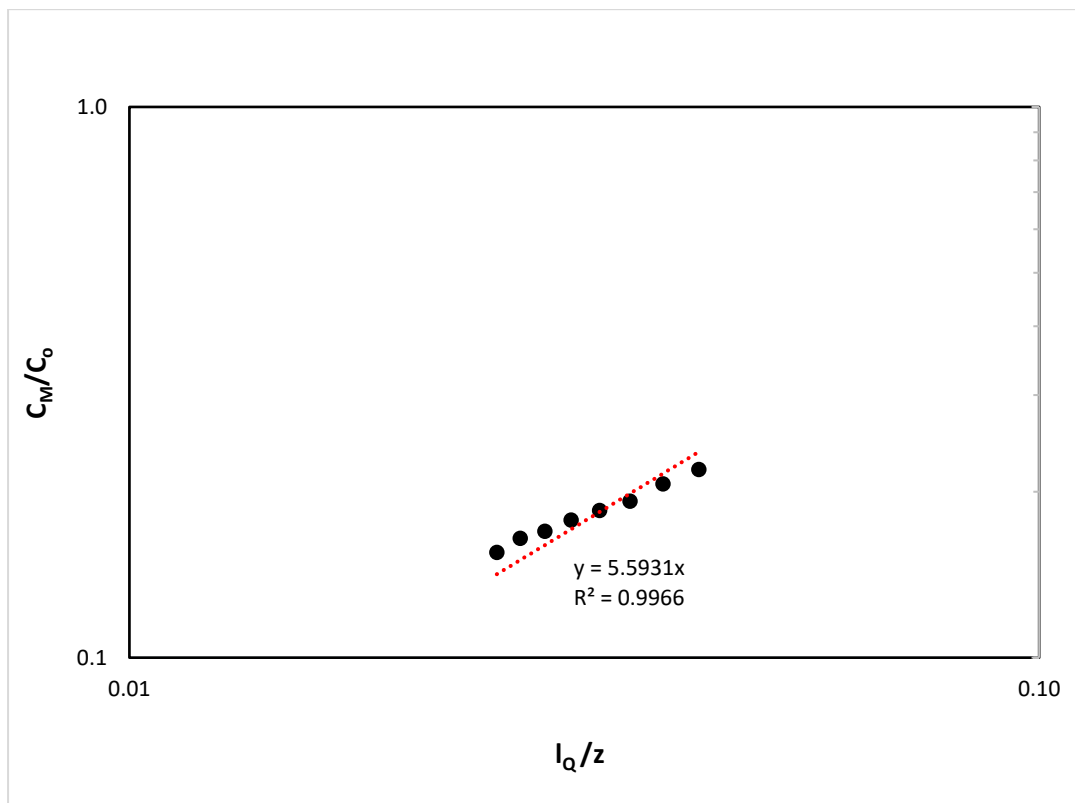
**Σχήμα B.41** Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή στη ζώνη της αναπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP012



**Σχήμα B.42** Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα EXP012



**Σχήμα Β.43** Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP012



**Σχήμα Β.44** Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης  $C_M$  αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση  $C_0$  με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP012