



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

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

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

Χρήστος Ριζεάκος

Επιβλέπων: Ηλίας Παπακωνσταντής, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2023

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας, κ. Ηλία Γ. Παπακωνσταντή, Επίκουρο Καθηγητή ΕΜΠ, για την συνεχή βοήθειά του από την επιλογή του θέματος μέχρι και την ολοκλήρωση της εργασίας. Η καθοδήγηση και η υποστήριξη του καθ' όλη τη διάρκειά της εργασίας ήταν καθοριστικές για την επιτυχή ολοκλήρωσή της.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Παναγιώτη Δημητριάδη, Διδάκτορα Μηχανικό ΕΜΠ, για την πολύ σημαντική συμβολή του, τόσο στην ανάπτυξη του κώδικα για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, όσο και στην διεξαγωγή των πειραμάτων. Η υπομονή που έδειξε στην επίλυση οποιουδήποτε προβλήματος προέκυπτε ήταν ιδιαίτερα σημαντική για την ορθή διεξαγωγή των πειραμάτων.

Τέλος, το πιο μεγάλο ευχαριστώ το οφείλω στην οικογένεια μου. Μόνο με την αδιάκοπη και απλόχερη στήριξη της θα ήταν δυνατή η εκπόνηση αυτής της εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνώνται πειραματικά ροές κατακόρυφων κυκλικών και ελλειπτικών τυρβωδών φλεβών σε ακίνητο αποδέκτη με ομοιόμορφη πυκνότητα. Επίσης πραγματοποιείται θεωρητική ανάλυση που περιλαμβάνει την παρουσίαση των κυριότερων θεωρητικών στοιχείων που αφορούν στην δυναμική των απλών φλεβών (jets), καθώς επίσης και την διατύπωση σχέσεων εκτίμησης χαρακτηριστικών της ροής των φλεβών με χρήση διαστατικής ανάλυσης.

Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 37 πειράματα απλών τυρβωδών υδάτινων φλεβών που περιλαμβάνουν οπτική καταγραφή της ροής και μετρήσεις συγκέντρωσης. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε πειραματική διάταξη του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Υδραυλικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, που περιλαμβάνει δεξαμενή διαστάσεων 1.00m x 0.80m x 0.70m. Συγκεκριμένα έγιναν 9 πειράματα για κυκλικές τυρβώδεις φλέβες και 28 για ελλειπτικές τυρβώδεις φλέβες. Για την παροχέτευση των φλεβών χρησιμοποιήθηκαν 2 κυκλικά στόμια διαμέτρων 1.5 cm και 0.5 cm και 2 ελλειπτικά στόμια με υδραυλικές διαμέτρους $D_h=1.265$ cm και 0.767 cm. Η παροχή κυμάνθηκε από 3.73 cm³/s έως 38.17 cm³/s και ο αριθμός Reynolds από 310 έως 8292.

Η δεξαμενή των πειραμάτων ήταν γεμάτη με νερό το οποίο ήταν ήρεμο και ομογενές με ίδια πυκνότητα και θερμοκρασία όπως αυτό της φλέβας. Οι φλέβες παροχετεύονταν κατακόρυφα προς τα πάνω μέσω των ειδικά διαμορφωμένων στομιών. Για την οπτικοποίηση της ροής (flow visualization) εφαρμόστηκε η τεχνική Laser Induced Fluorescence (LIF) και τα πειράματα βιντεοσκοπήθηκαν με βιντεοκάμερα υψηλής ευκρίνειας. Ως φθορίζουσα ουσία χρησιμοποιήθηκε η Ροδαμίνη 6G, μικρή ποσότητα της οποίας εισαγόταν στη φλέβα.

Από την επεξεργασία των βίντεο των πειραμάτων, μέσω του λογισμικού MatLab, και μετά από κατάλληλη βαθμονόμηση προέκυψαν η μέση εικόνα και η τυπική απόκλιση της ροής. Ύστερα από την εξαγωγή και την επεξεργασία τους σε υπολογιστικά φύλλα excel προέκυψαν σε αδιάστατη μορφή οι εγκάρσιες κατανομές της μέσης (χρονικά) συγκέντρωσης και της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή.

Με γνώμονα το γεγονός πως οι κατανομές της μέσης συγκέντρωσης ακολουθούν την κατανομή Gauss προσδιορίστηκε το πλάτος της κατανομής. Στην συνέχεια διαμορφώθηκαν τα διαγράμματα μεταβολής του πλάτους της φλέβας, της ελάχιστης αραίωσης καθώς και της μέγιστης συγκέντρωσης κατά μήκος του άξονα της φλέβας. Τέλος προσδιορίστηκαν οι εξισώσεις εκτίμησης των διάφορων χαρακτηριστικών, συγκρίθηκαν με την βιβλιογραφία και προέκυψε πολύ καλή συμφωνία.

ABSTRACT

In this thesis, vertical round and elliptical turbulent vertical jets in a calm and homogenous ambient are experimentally investigated. A theoretical analysis including the presentation of the main theoretical elements concerning the dynamics of jets, as well as the formulation of relationships for estimating the flow characteristics of the jets using dimensional analysis, is also presented.

A total of 37 experiments were carried out for the flow of turbulent water jets including flow visualization and concentration measurements. The experiments were conducted in an experimental apparatus of the Laboratory of Applied Hydraulics of the School of Civil Engineering of NTUA, which includes a tank of dimensions 1.00 m x 0.80 m x 0.70 m. Specifically, 9 experiments were performed on circular turbulent jets and 28 on elliptical turbulent jets. To discharge the jet, two circular nozzles with diameters 1.5 cm and 0.5 cm and two elliptical nozzles with hydraulic diameters $D_h=1.265$ cm and 0.757 cm were used. The flow rate was ranged from 3.73 cm³/s to 38.17 cm³/s, while the Reynolds number was ranged between 310 and 8292.

The water in the tank was calm and homogeneous with the same density and temperature as that of the jets. The jets were discharged into the tank vertically upwards through the specially designed orifices and their flow was visualized using the Laser Induced Fluorescence (LIF) technique while the experiments were recorded by means of a high definition camcorder. Rhodamine 6G was used as fluorescent dye.

From the processing of the experimental videos, using MatLab software, and after appropriate calibration, the mean and standard deviation of the flow were determined. After their extraction and processing in excel spreadsheets, the transverse distributions of the mean (time-averaged) concentration and the concentration turbulent intensity at various vertical distances from the outflow were obtained in dimensionless form.

Based on the fact that the distributions of the mean concentration follow the Gaussian distribution, the width of the distribution was determined. Then the plots of variation of the width of the jet, the minimum dilution as well as the maximum concentration along the axis of the jet were formed. Finally, the equations for determining the aforementioned characteristics were determined and comparison with results from the literature showed a very good agreement.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	1
1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	2
1.3 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	3
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	4
2.1 ΟΡΙΣΜΟΙ.....	4
2.2 ΑΠΛΗ ΤΥΡΒΩΔΗΣ ΦΛΕΒΑ	5
2.3 ΔΙΑΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΛΗΣ ΦΛΕΒΑΣ.....	8
2.4 ΠΛΟΥΜΙΟ.....	12
2.5 ΑΝΩΣΤΙΚΕΣ ΦΛΕΒΕΣ.....	12
2.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	14
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	18
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	18
3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ.....	18
3.2.1 Κύρια Δεξαμενή (Αποδέκτης)	19
3.2.2 Δευτερεύουσα Δεξαμενή.....	20
3.2.3 Διάλυμα Ροδαμίνης 6G.....	22
3.2.4 Βιντεοκάμερα	24
3.3 ΣΥΣΤΗΜΑ LIF (Laser Induced Fluorescence).....	25
3.4 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΠΑΡΟΧΟΜΕΤΡΟΥ.....	28
3.5 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΤΥΠΙΚΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.....	31
3.6 ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ.....	33
3.7 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ.....	35
4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	40
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	40
4.2 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΚΑΙ ΦΩΤΕΙΝΟΤΗΤΑΣ.....	40
4.3 ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΚΑΙ ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ.....	42
4.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΥΚΛΙΚΩΝ ΦΛΕΒΩΝ	45
4.4.1 Κατανομές Συγκέντρωσης.....	45
4.4.2 Πλάτος Συγκέντρωσης	48
4.4.3 Ένταση της Τύρβης.....	49
4.4.4 Μεταβολή Μέγιστης Συγκέντρωσης.....	50
4.4.5 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Κυκλικών Φλεβών.....	53
4.5 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΕΛΛΕΙΠΤΙΚΩΝ ΦΛΕΒΩΝ.....	56

4.5.1 Κατανομές Συγκέντρωσης.....	56
4.5.2 Πλάτος Συγκέντρωσης	59
4.5.3 Ένταση της Τύρβης.....	61
4.5.4 Μεταβολή Μέγιστης Συγκέντρωσης.....	64
4.5.5 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Ελλειπτικών Φλεβών.....	66
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	67
5.1 ΣΥΝΟΨΗ.....	67
5.2 ΚΥΡΙΟΤΕΡΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	67
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	69
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	72
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	88
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ.....	128

ΣΧΗΜΑΤΑ

Σχήμα 1.1 Τυρβώδεις φλέβες (Πηγή: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:A_smoke_plume_from_the_Dunbar_Cement_Works_chimney_-_geograph.org.uk_-_3765299.jpg)	1
Σχήμα 1.2 Έκρηξη του ηφαιστείου Ruiz (Πηγή: https://iugs-geoheritage.org/geoheritage_sites/nevado-del-ruiz-quaternary-volcanic-complex/)	2
Σχήμα 2.1 Τυρβώδης διάχυση απλής φλέβας (Πηγή: Παπανικολάου 2017)	5
Σχήμα 2.2 Τομογραφία απλής φλέβας με την τεχνική Laser Induced Fluorescence (LIF) (Πηγή: Παπανικολάου 2017)	6
Σχήμα 2.3 Σχηματική αναπαράσταση φλέβας και κατανομές συγκεντρώσεων (Πηγή: Abdel-Rahman 2010)	8
Σχήμα 2.4 Πλάτος απλής κυκλικής φλέβας όπως προέκυψε από μετρήσεις (Πηγή: Papanicolaou 1984).	10
Σχήμα 2.5 Ομοιόμορφες (Top-hat) κατανομές ταχύτητας σε απλή φλέβα. (Πηγή: Παπανικολάου 2017)(Στην παρούσα εργασία το w αντιστοιχεί σε U).....	11
Σχήμα 2.6 Πλούμιο από ακροφύσια (α) ορθογωνικής, (β) τριγωνικής και (γ) κυκλικής διατομής. Οι φωτογραφίες έχουν ληφθεί στο Εργαστήριο Υδρομηχανικής & Περιβαλλοντικής Τεχνικής, Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστημίου Θεσσαλίας από τον Σκανδάλη το 2005.	12
Σχήμα 3.1 Στόμια εκροής.....	18
Σχήμα 3.2 Κύρια Δεξαμενή – Αποδέκτης.....	19
Σχήμα 3.3 Υπερχειλιστής τύπου V-Notch.....	20
Σχήμα 3.4 Δευτερεύουσα Δεξαμενή.....	21
Σχήμα 3.5 Αεροσυμπιεστής.....	21
Σχήμα 3.6 Σύριγγες λήψης Ροδαμίνης – 6G.....	22
Σχήμα 3.7 Αποθηκευτικές συσκευασίες ροδαμίνης και θειώδους νατρίου.....	23
Σχήμα 3.8 Μεταλλικός αναδευτήρας	23
Σχήμα 3.9 Βιντεοκάμερα Panasonic HC-V770.....	24
Σχήμα 3.10 Τρίποδο τοποθέτησης κάμερας	24
Σχήμα 3.11 Συσκευή Laser και περιστρεφόμενα κάτοπτρα	26
Σχήμα 3.12 Τροφοδοτικά Laser και περιστρεφόμενου κατόπτρου.....	27
Σχήμα 3.13 Γυαλιά απορρόφησης ακτινοβολίας.....	27
Σχήμα 3.14 Παροχόμετρο πλωτήρα	28
Σχήμα 3.15 Ογκομετρικά δοχεία (250mL – 1000mL) (Πηγή: Σολωμού 2022)	29
Σχήμα 3.16 Διάγραμμα βαθμονόμησης παροχόμετρου	30
Σχήμα 3.17 Θέσεις τοποθέτησης κατακόρυφου χάρακα	33
Σχήμα 3.18 Φωτογραφία τη στιγμή που οι στρόβιλοι ρευστού που έχει ήδη παροχετευτεί εισέρχονται στη φλέβα.....	35
Σχήμα 3.19 Στρωμάτωση του αποδέκτη	36
Σχήμα 3.20 Είσοδος φυσαλίδων αέρα στην ροή.....	37

Σχήμα 3.21 Στιγμιότυπα από τη ροή ελλειπτικής φλέβας σε επίπεδο κατά τον κύριο άξονα για $t=109$ s, 139 s και 169 s αντίστοιχα, από αριστερά προς τα δεξιά (EXP20, $Re=2529$, $R_h=0.32$)	37
Σχήμα 3.22 Στιγμιότυπα από τη ροή ελλειπτικής φλέβας σε επίπεδο κατά τον δευτερεύοντα άξονα για $t=25$ s, 55 s και 85 s αντίστοιχα, από αριστερά προς τα δεξιά (EXP21, $Re=2529$, $R_h=0.32$)	38
Σχήμα 3.23 Στιγμιότυπο από τη ροή της φλέβας (α) για κυκλικό στόμιο με $D=1.5$ cm και $Re=198$ (β) για ελλειπτικό στόμιο με $R_h=0.32$ και $Re=310$ κατά τον κύριο άξονα και (γ) για ελλειπτικό στόμιο με $R_h=0.32$ και $Re=310$ κατά τον δευτερεύοντα άξονα	38
Σχήμα 3.24 Στιγμιότυπα ροής κυκλικές φλέβας για $t=40$ s, 70 s και 100 s από αριστερά προς τα δεξιά αντίστοιχα (EXP8, $Re=6628$, $D=0.5$ cm).....	39
Σχήμα 4.1 Υπό-εικόνες της μέσης συγκέντρωσης με βάση την ένταση φωτός για το (α) κόκκινο, (β) πράσινο και (γ) μπλε χρώμα (EXP2, $D=1.5$ cm και $Re=2279$).....	41
Σχήμα 4.2 Απεικόνιση της μέσης συγκέντρωσης πριν και μετά την επεξεργασία για το πείραμα EXP2 (Κυκλικό στόμιο διαμέτρου $D=1.5$ cm και $Re=2279$).....	44
Σχήμα 4.3 Απεικόνιση της RMS συγκέντρωσης πριν και μετά την επεξεργασία για το πείραμα EXP2 (Κυκλικό στόμιο διαμέτρου $D=1.5$ cm και $Re=2279$).....	44
Σχήμα 4.4 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 5 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη ανάπτυξης της ροής για το πείραμα EXP2	47
Σχήμα 4.5 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 10 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP2.....	47
Σχήμα 4.6 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP2 ($D=1.5$ cm)	49
Σχήμα 4.7 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 4 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP2	49
Σχήμα 4.8 Μεταβολή της αδιάστατης έντασης φωτεινότητας κατά μήκος του άξονα για το πείραμα EXP2.....	50
Σχήμα 4.9 Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή μετά την βαθμονόμηση για το πείραμα EXP2	51
Σχήμα 4.10 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP2	52
Σχήμα 4.11 Μεταβολή της ελάχιστης αραίωσης S με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP2.....	52
Σχήμα 4.12 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στη ζώνη της αναπτυγμένης ροής για το σύνολο των πειραμάτων.....	53
Σχήμα 4.13 Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο για το σύνολο των πειραμάτων	54
Σχήμα 4.14 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από το ακροφύσιο για το σύνολο των πειραμάτων	54

Σχήμα 4.15 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από το ακροφύσιο για το σύνολο των πειραμάτων	55
Σχήμα 4.16 Μεταβολή της ελάχιστης αραίωσης με την αδιάστατη απόσταση από το ακροφύσιο για το σύνολο των πειραμάτων	55
Σχήμα 4.17 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στη ζώνη της αναπτυγμένης ροής για το σύνολο των πειραμάτων κατά τον κύριο άξονα.....	57
Σχήμα 4.18 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στη ζώνη της αναπτυγμένης ροής για το σύνολο των πειραμάτων κατά τον δευτερεύοντα άξονα	57
Σχήμα 4.19 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 5 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη ανάπτυξης της ροής για το πείραμα EXP15 κατά τον δευτερεύοντα άξονα.....	58
Σχήμα 4.20 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 5 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη ανάπτυξης της ροής για το πείραμα EXP14 κατά τον κύριο άξονα.....	58
Σχήμα 4.21 Μεταβολή του πλάτους κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από το ακροφύσιο για το σύνολο των πειραμάτων με χρήση του ισοδύναμου b_c (από την εξ. 4.10) για κάθε Reynolds	59
Σχήμα 4.22 Μεταβολή του πλάτους κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από το ακροφύσιο για το σύνολο των πειραμάτων με fitting όλων των δεδομένων (ανεξαρτήτως άξονα).....	60
Σχήμα 4.23 Μεταβολή του πλάτους κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από το ακροφύσιο στον κύριο άξονα για το σύνολο των πειραμάτων	60
Σχήμα 4.24 Μεταβολή του πλάτους κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από το ακροφύσιο στον δευτερεύοντα άξονα για το σύνολο των πειραμάτων	61
Σχήμα 4.25 Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο για το σύνολο των πειραμάτων κατά τον κύριο άξονα.....	62
Σχήμα 4.26 Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο για το σύνολο των πειραμάτων κατά τον δευτερεύοντα άξονα.....	62
Σχήμα 4.27 Η κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της θερμοκρασίας κατά πλάτος της φλέβας σε ελλειπτικές φλέβες (Πηγή: Παπαντωνίου 2009).	63
Σχήμα 4.28 Αδιάστατες κατανομές της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων (Πηγή: Aleyasin et al 2017).....	63
Σχήμα 4.29 Μεταβολή της ελάχιστης αραίωσης με την αδιάστατη απόσταση από το ακροφύσιο για το σύνολο των πειραμάτων κατά τον κύριο άξονα.....	64
Σχήμα 4.30 Μεταβολή της ελάχιστης αραίωσης με την αδιάστατη απόσταση από το ακροφύσιο για το σύνολο των πειραμάτων κατά τον δευτερεύοντα άξονα.....	65
Σχήμα 4.31 Μεταβολή της ελάχιστης αραίωσης με την αδιάστατη απόσταση από το ακροφύσιο για το σύνολο των πειραμάτων	65
Σχήμα 4.32 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από το ακροφύσιο για το σύνολο των πειραμάτων	66

Σχήμα A.1 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 10 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP1	72
Σχήμα A.2 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 6 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP1	72
Σχήμα A.3 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP1	73
Σχήμα A.4 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP1	73
Σχήμα A.5 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 9 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP3.....	74
Σχήμα A.6 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 8 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP3	74
Σχήμα A.7 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP3.....	75
Σχήμα A.8 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP3	75
Σχήμα A.9 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 10 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP4.....	76
Σχήμα A.10 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 8 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP4.....	76
Σχήμα A.11 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP4.....	77
Σχήμα A.12 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP4	77
Σχήμα A.13 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 9 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP5.....	78
Σχήμα A.14 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 7 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP5.....	78
Σχήμα A.15 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP5.....	79
Σχήμα A.16 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP5	79

Σχήμα A.17 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 10 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP6.....	80
Σχήμα A.18 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 7 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP6.....	80
Σχήμα A.19 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP6.....	81
Σχήμα A.20 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP6	81
Σχήμα A.21 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 10 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP7.....	82
Σχήμα A.22 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 7 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP7.....	82
Σχήμα A.23 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP7.....	83
Σχήμα A.24 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP7	83
Σχήμα A.25 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 10 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP8.....	84
Σχήμα A.26 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 8 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP8.....	84
Σχήμα A.27 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP8.....	85
Σχήμα A.28 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP8	85
Σχήμα A.29 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 10 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP9.....	86
Σχήμα A.30 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 8 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP8.....	86
Σχήμα A.31 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP9.....	87
Σχήμα A.32 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP9	87

Σχήμα Β.1 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 10 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP14.....	88
Σχήμα Β.2 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 7 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP14.....	88
Σχήμα Β.3 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP14.....	89
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 EXP14.....	89
Σχήμα Β.5 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 10 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP15.....	90
Σχήμα Β.6 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 6 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP15.....	90
Σχήμα Β.7 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP15.....	91
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 EXP15.....	91
Σχήμα Β.9 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 10 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP16.....	92
Σχήμα Β.10 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 8 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP16.....	92
Σχήμα Β.11 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP16.....	93
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 EXP16.....	93
Σχήμα Β.13 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 10 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP17.....	94
Σχήμα Β.14 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 8 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP17.....	94
Σχήμα Β.15 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP17.....	95
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 EXP17.....	95
Σχήμα Β.17 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 10 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP18.....	96

Σχήμα B.18 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 7 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP18.....	96
Σχήμα B.19 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP18.....	97
Σχήμα B.20 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP18.....	97
Σχήμα B.21 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 10 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP19.....	98
Σχήμα B.22 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 6 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP19.....	98
Σχήμα B.23 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP19.....	99
Σχήμα B.24 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP19.....	99
Σχήμα B.25 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 10 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP20.....	100
Σχήμα B.26 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 8 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP20.....	100
Σχήμα B.27 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP20.....	101
Σχήμα B.28 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP20.....	101
Σχήμα B.29 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 10 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP21.....	102
Σχήμα B.30 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 6 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP21.....	102
Σχήμα B.31 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP21.....	103
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 EXP21.....	103
Σχήμα B.33 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 10 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP22.....	104
Σχήμα B.34 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 8 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP22.....	104

Σχήμα B.35 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP22.....	105
Σχήμα B.36 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP22.....	105
Σχήμα B.37 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 10 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP23.....	106
Σχήμα B.38 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 6 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP23.....	106
Σχήμα B.39 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP23.....	107
Σχήμα B.40 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP23.....	107
Σχήμα B.41 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 10 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP28.....	108
Σχήμα B.42 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 7 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP28.....	108
Σχήμα B.43 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP28.....	109
Σχήμα B.44 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP28.....	109
Σχήμα B.45 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 9 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP29.....	110
Σχήμα B.46 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 6 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP29.....	110
Σχήμα B.47 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP29.....	111
Σχήμα B.48 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP29.....	111
Σχήμα B.49 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 9 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP30.....	112
Σχήμα B.50 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 6 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP30.....	112
Σχήμα B.51 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP30.....	113

Σχήμα B.52 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP30.....	113
Σχήμα B.53 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 9 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP31	114
Σχήμα B.54 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 7 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP31	114
Σχήμα B.55 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP31	115
Σχήμα B. 56 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP31.....	115
Σχήμα B.57 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 9 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP32	116
Σχήμα B.58 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 6 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP32	116
Σχήμα B.59 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP32	117
Σχήμα B.60 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP32.....	117
Σχήμα B.61 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 9 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP33	118
Σχήμα B.62 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 8 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP33	118
Σχήμα B.63 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP33	119
Σχήμα B.64 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP33.....	119
Σχήμα B.65 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 9 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP34	120
Σχήμα B.66 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 6 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP34.....	120
Σχήμα B.67 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP34	121
Σχήμα B.68 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP34.....	121

Σχήμα B.69 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 9 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP35.....	122
Σχήμα B.70 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 8 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP35.....	122
Σχήμα B.71 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP35.....	123
Σχήμα B. 72 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP35.....	123
Σχήμα B.73 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 9 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP36.....	124
Σχήμα B.74 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 6 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP36.....	124
Σχήμα B.75 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP36.....	125
Σχήμα B.76 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP36.....	125
Σχήμα B.77 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 9 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP37.....	126
Σχήμα B.78 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 8 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP37.....	126
Σχήμα B.79 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP37.....	127
Σχήμα B.80 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP37.....	127

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 2.1 Σταθερές εξισώσεων απλής φλέβας	11
Πίνακας 2.2 Ορισμοί βασικών παραμέτρων	13
Πίνακας 3.1 Μετρήσεις και υπολογισμοί βαθμονόμησης παροχόμετρου (Γκούτης 2023)	30
Πίνακας 3.2 Αρχικές συνθήκες πειραμάτων για κυκλικό στόμιο με $D=1.50$ cm.....	34
Πίνακας 3.3 Αρχικές συνθήκες πειραμάτων για κυκλικό στόμιο με $D=0.50$ cm.....	34
Πίνακας 3.4 Αρχικές συνθήκες πειραμάτων για ελλειπτικό στόμιο με $R_h=0.32$ cm	34
Πίνακας 3.5 Αρχικές συνθήκες πειραμάτων για ελλειπτικό στόμιο με $R_h=0.19$ cm	34
Πίνακας 4.1 Υπολογισμοί σχετικά με την αύξηση του διαλύματος της ροδαμίνης του αποδέκτη	43
Πίνακας 4.2 Σταθερές εξισώσεων πλάτους, ελάχιστης αραίωσης και μέγιστης συγκέντρωσης απλής κυκλικής φλέβας.....	56
Πίνακας 4.3 Σταθερές εξισώσεων πλάτους, ελάχιστης αραίωσης και μέγιστης συγκέντρωσης απλής ελλειπτικής φλέβας.....	66

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

A: εμβαδόν διατομής ακροφυσίου

b: πλάτος κατανομής μέσης χρονικά ταχύτητας

b_c: Πλάτος κατανομής μέσης χρονικά συγκέντρωσης

b_{c,major}: Πλάτος κατανομής μέσης χρονικά συγκέντρωσης στον κύριο άξονα της ελλειπτικής διατομής

b_{c,minor}: Πλάτος κατανομής μέσης χρονικά συγκέντρωσης στον δευτερεύοντα άξονα της ελλειπτικής διατομής

B: ειδική άνωση

C₀: 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

D_h: υδραυλική διάμετρος ακροφυσίου παροχέτευσης φλέβας

R_h: υδραυλική ακτίνα ακροφυσίου παροχέτευσης φλέβας

F₀: αρχικός πυκνομετρικός αριθμός Froude

g: επιτάχυνση της βαρύτητας

g'₀: αρχική φαινόμενη επιτάχυνση της βαρύτητας

l_M: χαρακτηριστικό μήκος ανωστικής φλέβας

l_Q: χαρακτηριστικό μήκος απλής φλέβας

M: αρχική ειδική ορμή m τοπική ειδική ορμή

m: τοπική ειδική ορμή

Q: αρχική παροχή r ακτινική απόσταση σε κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων

Re: αριθμός Reynolds

Ri: αριθμός Richardson

RMS: τετραγωνική ρίζα μέσης τιμής των τετραγώνων των διακυμάνσεων

S: μέση αραίωση

t: χρόνος

U₀: αρχική ταχύτητα φλέβας

U_m: η μέγιστη ταχύτητα στον άξονα της φλέβας

U: ταχύτητα κατά τη διεύθυνση του άξονα της φλέβας

z: κατακόρυφος άξονας της φλέβας

v: κινηματική συνεκτικότητα

μ: τοπική ογκομετρική παροχή

ρ: πυκνότητα υγρού

ρ₀: αρχική πυκνότητα φλέβας

ρ_α: πυκνότητα αποδέκτη

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Πολλές πόλεις διοχετεύουν λύματα τους (πολλές φορές παλαιότερα και ανεπεξέργαστα) σε υδάτινους αποδέκτες, όπως στη θάλασσα ή σε κάποιο ποταμό μέσω υποβρύχιου αγωγού. Σε πολλές περιπτώσεις αέριοι ρύποι αφήνονται στον αέρα μέσω μεγάλων καμινάδων. Οι ροές που δημιουργούνται μπορεί να είναι ή τυρβώδεις φλέβες ή πλούμια ή ανωστικές φλέβες, ανάλογα με τα δυναμικά χαρακτηριστικά τους. Σε κάθε περίπτωση τα απόβλητα επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό το περιβάλλον και επομένως την ανθρώπινη δραστηριότητα. Έτσι κρίνεται ιδιαίτερα σημαντικός ο σχεδιασμός των συστημάτων διάθεσης των αποβλήτων και η μελέτη των ροών που σχηματίζονται.



Σχήμα 1.1 Τυρβώδεις φλέβες

(Πηγή:https://commons.wikimedia.org/wiki/File:A_smoke_plume_from_the_Dunbar_Cement_Works_chimney_-_geograph.org.uk_-_3765299.jpg)

Φυσικά οι τυρβώδεις φλέβες (jets) δεν εμφανίζονται μόνο από ανθρωπογενείς παράγοντες αλλά συναντώνται και στη φύση. Υπάρχουν πολλά παραδείγματα

φλεβών στη φύση. Επίγειες ή υποθαλάσσιες εκρήξεις ηφαιστείων και πυρκαγιές είναι κάποια από αυτά. Γι' αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντική η καλή κατανόηση της συμπεριφοράς τους. Σε αυτό συντελεί η διεξαγωγή πειραμάτων, καθώς τα δεδομένα που εξάγονται μας βοηθούν να κατασκευάσουμε σχέσεις μεταξύ των κύριων χαρακτηριστικών της ροής αλλά ακόμα και να επαληθεύσουμε τα ήδη υπάρχοντα αριθμητικά μοντέλα.



Σχήμα 1.2 Έκρηξη του ηφαιστείου Ruiz

(Πηγή: https://iugs-geoheritage.org/geoheritage_sites/nevado-del-ruiz-quaternary-volcanic-complex/)

1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την πειραματική μελέτη απλών τυρβωδών φλεβών που παροχετεύονται από κυκλικό και ελλειπτικό στόμιο σε ομογενή υδάτινο αποδέκτη και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων. Πραγματοποιούνται 37 πειράματα, 4 με 7 για κάθε προσαρμοζόμενη διατομή που χρησιμοποιήθηκε, με την τεχνική PLIF (Planar Laser Induced Fluorescence). Ακολουθώντας αυτή τη μέθοδο, όπου το πείραμα καθ' όλη την διάρκειά του βιντεοσκοπείται, προστίθεται Ροδαμίνη 6G (φθορίζουσα ουσία) στη φλέβα, η οποία διεγείρεται από δισδιάστατο "φύλλο" laser στον άξονα της και έτσι επιτυγχάνεται η οπτικοποίηση της ροής.

Η ένταση του φωτός στη φλέβα σχετίζεται άμεσα με την συγκέντρωσή της ροδαμίνης. Η επεξεργασία των βίντεο γίνεται αρχικά μέσω προγράμματος στο MATLAB, όπου εξάγονται τα στιγμιότυπα (frames) και στη συνέχεια στο

Microsoft excel. Με αυτόν τον τρόπο εξάγονται αποτελέσματα για την κατανομή της συγκέντρωσης και της έντασης της τύρβης στη φλέβα, την μέγιστη συγκέντρωση ή αραιώση και το πλάτος της κατανομής της συγκέντρωσης. Τα δεδομένα τελικά αδιαστατοποιούνται και συγκρίνονται μεταξύ τους για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Τέλος μορφώνονται τα σχετικά διαγράμματα στα οποία παρατίθενται τα αποτελέσματα κάθε πειράματος για μέγιστη δυνατή εποπτεία.

1.3 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από τέσσερα κεφάλαια και δύο παραρτήματα. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται κάποια γενικά εισαγωγικά στοιχεία σχετικά με το θέμα της εργασίας και τη διάρθρωση της.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται η θεωρία των φλεβών και παρατίθενται κάποιοι σημαντικοί ορισμοί. Δίνεται ιδιαίτερη σημασία στην θεωρία των απλών τυρβωδών φλεβών. Επίσης γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση παλαιότερων εργασιών πάνω στο ίδιο αντικείμενο.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η πειραματική διάταξη, ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε, η προεργασία των πειραμάτων και οι αρχικές τους συνθήκες καθώς επίσης και η διαδικασία με τις δυσκολίες που προέκυψαν.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όλων των πειραμάτων και τα σχολιάζονται

Στο πέμπτο κεφάλαιο συνοψίζονται τα τελικά συμπεράσματα και στο έκτο δίνεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε.

Τέλος στα τρία παραρτήματα παρουσιάζονται, με την ακόλουθη σειρά, τα διαγράμματα με τα αποτελέσματα των κυκλικών φλεβών, των ελλειπτικών φλεβών και οι χρησιμοποιούμενοι κώδικες προγραμματισμού.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 ΟΡΙΣΜΟΙ

Τυρβώδεις εκτοξευόμενες φλέβες ονομάζονται οι δέσμες ρευστού προερχόμενες από ένα ακροφύσιο, οπή ή σωλήνα ανεξαρτήτου γεωμετρίας που διαχέονται σε ομοειδές ή μη ρευστό. Επίσης ανήκουν στην κατηγορία των ελεύθερων διατμητικών ροών (Παπανικολάου 2017).

Οι τυρβώδεις εκτοξευόμενες φλέβες χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της ροής τους. Αυτές είναι οι εξής (Παπακωνσταντής 2009):

1. Απλή φλέβα ή φλέβα (jet) είναι η εκροή ρευστού από ένα στόμιο μέσα σε ρευστό της ίδιας πυκνότητας. Χαρακτηρίζεται από μηδενική διαφορά πυκνότητας και ορμή στην εκροή.
2. Πλούμιο (plume) ονομάζεται η ροή που προκαλείται από την πηγή δυναμικής ενέργειας που παρέχει στο ρευστό θετική ή αρνητική άνωση ως προς το περιβάλλον ρευστό. Το πλούμιο δεν έχει ορμή αλλά χαρακτηρίζεται αποκλειστικά από διαφορά πυκνότητας.
3. Ανωστική φλέβα (buoyant jet) είναι η ροή η οποία χαρακτηρίζεται και από διαφορά πυκνότητας αλλά και από αρχική ορμή. Δηλαδή συμπεριλαμβάνει ως οριακές περιπτώσεις τις άλλες δύο.

Η ρευστοδυναμική συμπεριφορά των φλεβών επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες από τους οποίους οι πιο σημαντικοί είναι οι εξής (Παπακωνσταντής 2009):

1. Οι παράμετροι της φλέβας, δηλαδή η αρχική ταχύτητα εκροής στο στόμιο παροχέτευσης, η διαφορά πυκνότητας του αποδέκτη και του ρέοντος ρευστού και η ένταση της τύρβης.
2. Οι παράμετροι του περιβάλλοντος ρευστού. Κάποιοι από αυτούς είναι το επίπεδο τύρβης του αποδέκτη, η στρωμάτωση ως προς την πυκνότητα και η ύπαρξη ή όχι κίνησης.
3. Οι γεωμετρικοί παράγοντες, όπως το σχήμα του στομίου εκροής, η γωνία παροχέτευσης της φλέβας ως προς το οριζόντιο επίπεδο και η γειτνίαση με στερεά όρια ή άλλες φλέβες.

Υπάρχουν δύο περιπτώσεις σχετικά με το είδος των ροών. Η ροή μπορεί να είναι είτε στρωτή (laminar flow) είτε τυρβώδης (turbulent flow) ανάλογα με τον αριθμό Reynolds. Ο αριθμός Reynolds για κυκλικό στόμιο υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$Re = \frac{U_0 \cdot D}{\nu}$$

όπου U_0 είναι η ταχύτητα εκροής, D είναι η διάμετρος του στομίου εκροής και ν η κινηματική συνεκτικότητα. Ενώ για οποιαδήποτε άλλη γεωμετρία η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$Re = \frac{U_0 \cdot 4 \cdot R_h}{\nu}$$

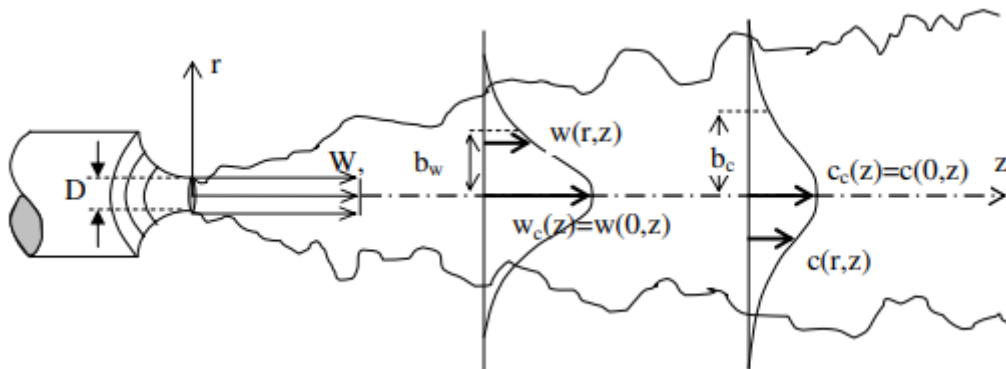
όπου R_h είναι η υδραυλική ακτίνα της διατομής με $R_h=A/P$, A είναι η υγρή διατομή και P η βρεχόμενη περιμέτρος.

Έχει βρεθεί πως σε κυκλικές φλέβες για $Re < 2000$ η ροή είναι στρωτή, για $Re > 2000$ η ροή είναι συνήθως τυρβώδης (Κωτσοβίνος & Αγγελίδης 2008) και για $Re > 4000$ η ροή είναι πλήρως τυρβώδης (Fischer et al. 1979).

Η μελέτη στην παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην ανάλυση απλών τυρβωδών φλεβών διαφόρων στομίων σε ακίνητο και ομογενή αποδέκτη ίδιας πυκνότητας με το υγρό της φλέβας.

2.2 ΑΠΛΗ ΤΥΡΒΩΔΗΣ ΦΛΕΒΑ

Θεωρούμε μία φλέβα ρευστού, βυθισμένη, με πυκνότητα ρ και ογκομετρική παροχή Q η οποία διαχέεται σε ομοειδές ακίνητο ρευστό. Η φλέβα εξέρχεται από ειδική οπή και έχει πυκνότητα ίδια με αυτή του αποδέκτη. Αφού λοιπόν δεν υπάρχει διαφορά στις πυκνότητες η φλέβα έχει μόνο ορμή. Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται η μορφή και η ανάπτυξη της στο ομοειδές ρευστό.



Σχήμα 2.1 Τυρβώδης διάχυση απλής φλέβας (Πηγή: Παπανικολάου 2017)

Οι κύριες παράμετροι στην εκροή της φλέβας ορίζονται παρακάτω (Fischer et al. 1979, Κωτσοβίνος & Αγγελίδης 2008, Παπακωνσταντής 2009, Παπανικολάου 2017):

Κατά την έξοδο η αρχική ορμή της φλέβας είναι:

$$\rho \cdot M = \rho \cdot Q \cdot U_0 \quad (2.1)$$

όπου M είναι η κινηματική ή ειδική ορμή, Q η αρχική ογκομετρική παροχή και U_0 η μέση ταχύτητα του ρευστού κατά την εκροή.

Ορίζουμε ως κινηματική ή ειδική ορμή (specific momentum flux) την ορμή ανά μονάδα μάζας κινούμενου ρευστού που εκφράζεται από την σχέση:

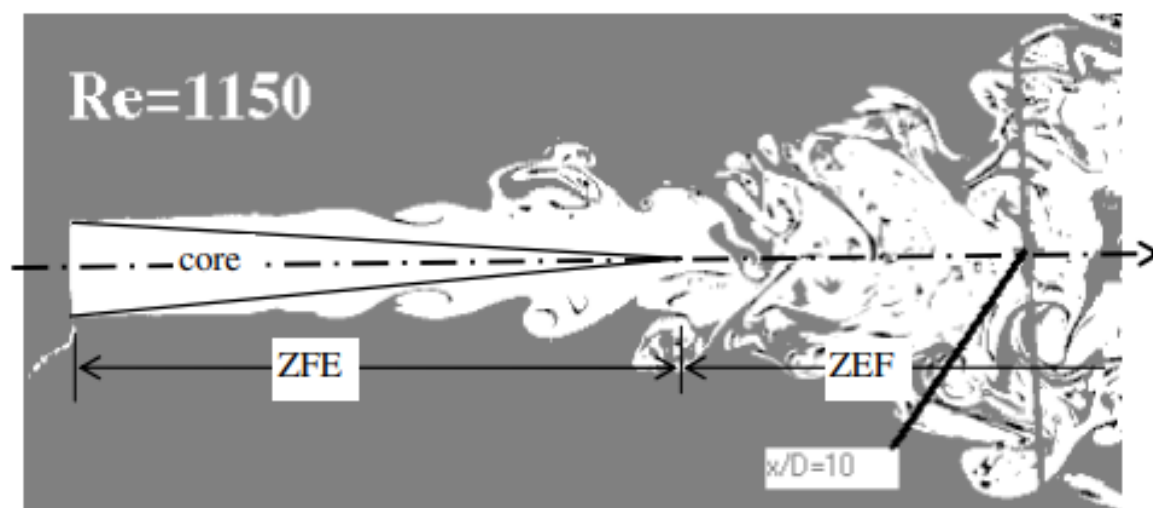
$$M = Q \cdot U_0 \quad (2.2)$$

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

$$Q = A \cdot U_0 \quad (2.3)$$

όπου A είναι η επιφάνεια της διατομής του στομίου. Στην περίπτωση των κυκλικών φλεβών με στόμιο διαμέτρου D η αρχική ογκομετρική παροχή (Q) στην έξοδο είναι:

$$Q = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot U_0 \quad (2.4)$$



Σχήμα 2.2 Τομογραφία απλής φλέβας με την τεχνική Laser Induced Fluorescence (LIF) (Πηγή: Παπανικολάου 2017)

Όπως διαπιστώνεται στο παραπάνω σχήμα η φλέβα από την εκροή και μέχρι κάποιο συγκεκριμένο σημείο παρουσιάζει στρωτή ροή. Από αυτό το σημείο και ύστερα αρχίζουν να εμφανίζονται δακτυλιοειδείς στρόβιλοι (vortex rings) και η ροή μετατρέπεται σταδιακά σε τυρβώδη. Αυτοί οι στρόβιλοι δημιουργούνται λόγω της επαφής με τον αποδέκτη. Σύμφωνα με τους Fisher et al. (1979) και Παπανικολάου (2017), αυτή η αλλαγή της ροής γίνεται σε μία απόσταση περίπου έξι με δέκα διαμέτρους ($6D-10D$) από το στόμιο. Η περιοχή $0 < 6D-10D$ ονομάζεται ζώνη ανάπτυξης της ροής (Zone of Flow Establishment ή για συντομία Z.F.E). Το κωνικό κομμάτι της περιοχής αυτής, όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 2.2, έχει συγκέντρωση σταθερή και ίδια με την αρχική και

ταχύτητα ίση με την ταχύτητα εξόδου U_0 . Έχει βρεθεί πως το μήκος του πυρήνα εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds. Αυτό που θεωρείται συχνά στην βιβλιογραφία είναι πως για $Re \geq 2000$ ο πυρήνας εκτείνεται σε μία απόσταση 5D-6D. Η περιοχή 6D-10D ονομάζεται μεταβατική, ενώ σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 10D η περιοχή ονομάζεται ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής (Zone of Established Flow η για συντομία Z.E.F.).

Στην περιοχή της τυρβώδους ροής, σε απόσταση $z > 10D$ η μέση ταχύτητα U και συγκέντρωση C εκφράζονται με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$U = U(z, r) \text{ ή } U = U_M \cdot f(z, r) \quad (2.5)$$

όπου z είναι η κατακόρυφη απόσταση από το ακροφύσιο, r η ακτινική απόσταση από τον άξονα της φλέβας, $U_M = U_M(z)$ η μέγιστη τιμή της ταχύτητας στον άξονα και είναι συνάρτηση μόνο της απόστασης z από την πηγή και $f(z, r)$ μία συνάρτηση κατανομής όπου $f(z, 0) = 1$ (Παπανικολάου 2017). Ομοίως για την συγκέντρωση:

$$C = C(z, r) \text{ ή } C = C_M \cdot f(z, r) \quad (2.6)$$

όπου C_M η μέγιστη τιμή της συγκέντρωσης στον άξονα και όπως και η U_M είναι συνάρτηση μόνο της απόστασης z .

Έχει αποδειχτεί από μετρήσεις πως οι κατανομές $f(z, r)$ για τη μέση χρονικά ταχύτητα και συγκέντρωση παρουσιάζουν αυτοομοιότητα και ακολουθούν την κατανομή Gauss. Επομένως οι σχέσεις (2.5) και (2.6) γίνονται:

$$U = U_M \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{b^2}\right) \quad (2.7)$$

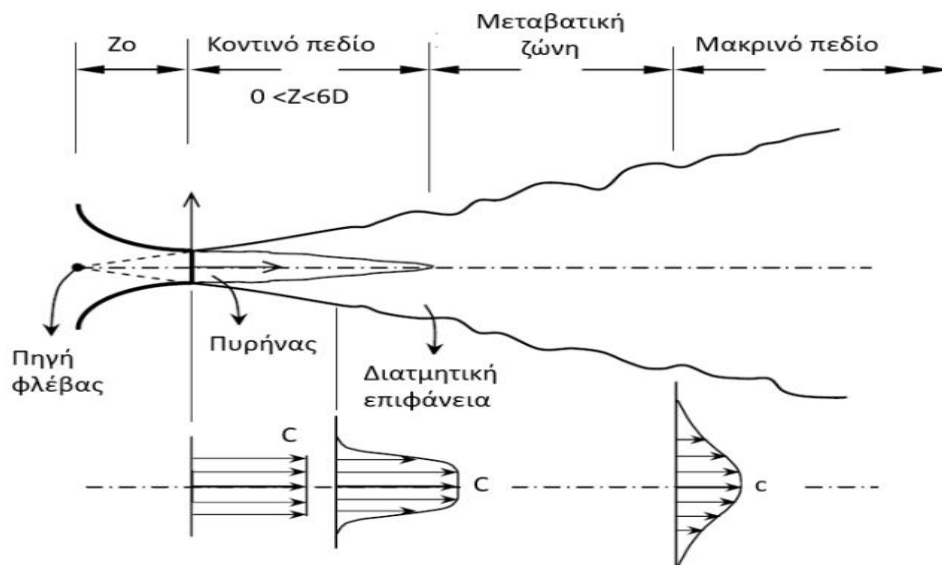
και

$$C = C_M \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{b_c^2}\right) \quad (2.8)$$

όπου b είναι η τιμή του r όπου η ταχύτητα γίνεται ίση με $e^{-1} \cdot U_M$ και b_c η τιμή του r όπου η συγκέντρωση γίνεται $e^{-1} \cdot C_M$. Ο λόγος b_c προς b συμβολίζεται συνήθως με λ και είναι ίσος με:

$$\lambda = \frac{b_c}{b} = 1.19 \quad (2.9)$$

Συμπεραίνουμε λοιπόν πως το πλάτος του προφίλ της συγκέντρωσης είναι μεγαλύτερο από εκείνο της ταχύτητας καθώς $\lambda \geq 1$. Συχνά αντί για 1.19 χρησιμοποιούμε $\lambda = 1.20$ (Παπακωνσταντής 2009).



Σχήμα 2.3 Σχηματική αναπαράσταση φλέβας και κατανομές συγκεντρώσεων (Πηγή: Abdel-Rahman 2010)

Θεωρώντας ένα επίπεδο σε απόσταση z και κάθετο στον άξονα της φλέβας οι εξισώσεις υπολογισμού της ειδικής ορμής και της ογκομετρικής παροχής είναι:

$$m(z) = \int_A U^2 \cdot dA \quad (2.10)$$

και

$$\mu(z) = \int_A U \cdot dA \quad (2.11)$$

όπου A είναι η επιφάνεια που καλύπτει η κινούμενη μάζα του ρευστού πάνω στο εγκάρσιο επίπεδο στον άξονα (Παπανικολάου 2017).

2.3 ΔΙΑΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΛΗΣ ΦΛΕΒΑΣ

Στην πειραματική υδραυλική ένα από τα κύρια εργαλεία που χρησιμοποιούνται είναι η διαστατική ανάλυση (dimensional analysis). Μέσω αυτής κατασκευάζονται και παίρνουν μορφή οι εξισώσεις που διέπουν ένα φαινόμενο. Αυτό επιτυγχάνεται καθώς χρησιμοποιεί κατά κύριο λόγο την αρχή της ομοιογένειας των διαστάσεων στα δύο μέλη μιας εξίσωσης. Η μόνη προϋπόθεση για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι η γνώση των σχετικών μεταβλητών που υπεισέρχονται στο φαινόμενο και φυσικά και των διαστάσεών τους. Η διαστατική ανάλυση όμως δεν μπορεί να προσδιορίσει με ακρίβεια την συσχέτιση των μεταβλητών και για αυτό προχωρεί σε μερική λύση του

προβλήματος. Η λύση ολοκληρώνεται όταν η διαστατική ανάλυση συνοδεύεται με πειραματικά δεδομένα (Παπακωνσταντής 2009).

Κάνοντας την παραδοχή πως η ροή δεν επηρεάζεται από δυνάμεις βαρύτητας καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως η αρχική ορμή της φλέβας M παραμένει αμετάβλητη ανεξάρτητα με την απόσταση από την έξοδο αυτής. Έτσι κάνοντας χρήση διαστατικής ανάλυσης και έχοντας ως δεδομένα την ταχύτητα εξόδου U_0 , την αρχική συγκέντρωση C_0 και την διάμετρο D του στομίου μπορεί να υπολογιστεί η διασπορά, η ανάπτυξη και το πεδίο των ταχυτήτων και συγκεντρώσεων της φλέβας. Από τα αρχικά χαρακτηριστικά της φλέβας M και Q ορίζεται η χαρακτηριστική κλίμακα μήκους:

$$l_Q = \frac{Q}{\sqrt{M}} = \frac{Q}{\sqrt{Q \cdot U}} = \frac{\sqrt{A \cdot U}}{\sqrt{U}} = \sqrt{A} \quad (2.12)$$

όπου A είναι η επιφάνεια της διατομής του στομίου (nozzle). Κατά μήκος της φλέβας, όλες οι ιδιότητές της μπορούν να εκφραστούν ως συνάρτηση της απόστασης z/D ή z/l_Q (Παπανικολάου 2017).

Χρησιμοποιώντας λοιπόν ως σημείο αναφοράς τον λόγο z/l_Q μπορούμε να προσδιορίσουμε τι επηρεάζει την ροή. Για $z/l_Q=1$ η παροχή από την συμπαράσυρση του περιβάλλοντος ρευστού είναι περίπου ίση με την αρχική παροχή Q . Για πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις ($z/l_Q \gg 1$) η παροχή από τη συμπαράσυρση είναι πολύ μεγαλύτερη από την αρχική και για αυτό μπορεί να αμεληθεί, σε αντίθεση με την αρχική ορμή M . Αντίθετα σε αποστάσεις πολύ κοντά στο στόμιο εκροής ($z/l_Q \ll 1$) η γεωμετρία του στομίου εκροής και η αρχική παροχή είναι οι πλέον σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ροή (Παπακωνσταντής 2009).

Οι βασικές διαστάσεις που διέπουν την ροή της απλής φλέβας είναι τρεις:

1. Η Μάζα [M]
2. Το Μήκος [L]
3. Ο Χρόνος [T]

ενώ οι μεταβλητές που υπεισέρχονται στην ροή είναι οι ακόλουθες 5:

- | | | |
|---|--------|---------------------|
| 1. Η Ταχύτητα..... | U | [L/T] |
| 2. Η Παροχή..... | Q | [L ³ /T] |
| 3. Το κινηματικό ιξώδες..... | ν | [L ² /T] |
| 4. Η απόσταση..... | z | [L] |
| 5. Η πυκνότητα (ίδια για φλέβα και αποδέκτη)..... | ρ | [M/L ³] |

Καθιστώντας σαφές πως b είναι το πλάτος της φλέβας που καθορίζεται από το προφίλ της μέσης ταχύτητας και b_c το πλάτος που καθορίζεται από τη συγκέντρωση προχωράμε στη διαστατική ανάλυση του πλάτους b . Αμελώντας

την πυκνότητα ρ , το πλάτος b της φλέβας είναι της μορφής $b=f(z,M,Q)$. Κάνοντας χρήση του θεωρήματος Buckingham η αλλιώς θεώρημα Π προκύπτουν δύο μονώνυμα τα οποία είναι τα εξής:

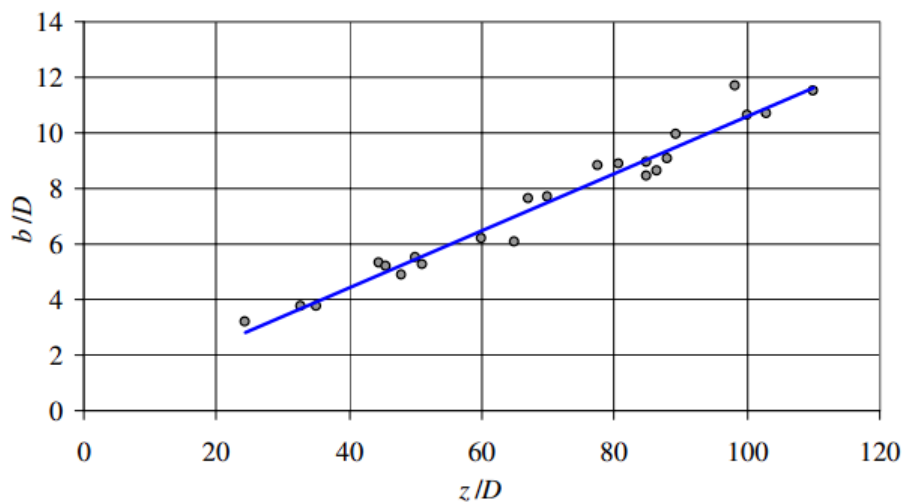
$$\frac{b}{l_Q} = f\left(\frac{z}{l_Q}\right) \quad \text{ή} \quad \frac{b}{D} = f\left(\frac{z}{D}\right) \quad (2.13)$$

και δεδομένου ότι βρισκόμαστε σε περιοχή όπου $(z/l_Q \gg 1)$, δηλαδή στην ζώνη ανεπτυγμένης ροής, η αρχική παροχή Q μπορεί να αμεληθεί και άρα $b \sim z$ ή:

$$\frac{b}{l_Q} = a_1 \cdot \frac{z}{l_Q} \quad \text{ή} \quad \frac{b}{D} = a_1 \cdot \frac{z}{D} \quad (2.14)$$

όπου το a_1 είναι σταθερά (Παπανικολάου 2017).

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται καθαρά πως η μεταβολή του πλάτους κατανομής ταχύτητας της φλέβας b είναι ανάλογη με την απόσταση z από το ακροφύσιο, κάτι το οποίο επαληθεύει τη σχέση (2.14). Από το σχήμα αυτό συμπεραίνεται πως η σταθερά a_1 ισούται με 0.107 καθώς χρησιμοποιώντας το Microsoft Excel προκύπτει η σχέση $y = 0.107x$



Σχήμα 2.4 Πλάτος απλής κυκλικής φλέβας όπως προέκυψε από μετρήσεις (Πηγή: Papanicolaou 1984).

Ελάχιστη αραίωση S ονομάζουμε τον λόγο C_0/C_M , δηλαδή την αρχική συγκέντρωση της φλέβας προς την μέγιστη συγκέντρωση στον άξονα της σε κάποια απόσταση z από το σημείο εκροής. Η μέγιστη συγκέντρωση γράφεται ως $C_M(z)=C_M(z,M,Q,Y)$, όπου $Y=Q \cdot C_0$ είναι η παροχή μάζας της διαλυμένης ουσίας την οποία θεωρούμε συντηρητική. Έτσι μέσω διαστατικής ανάλυσης και αγνοώντας κατά τα γνωστά για z/l_Q την αρχική παροχή και τη πυκνότητα προκύπτει πως (Παπανικολάου 2017):

$$S = \frac{C_0}{C_M} = a_2 \cdot \frac{z}{l_Q} \quad (2.15)$$

,όπου το a_2 είναι σταθερά

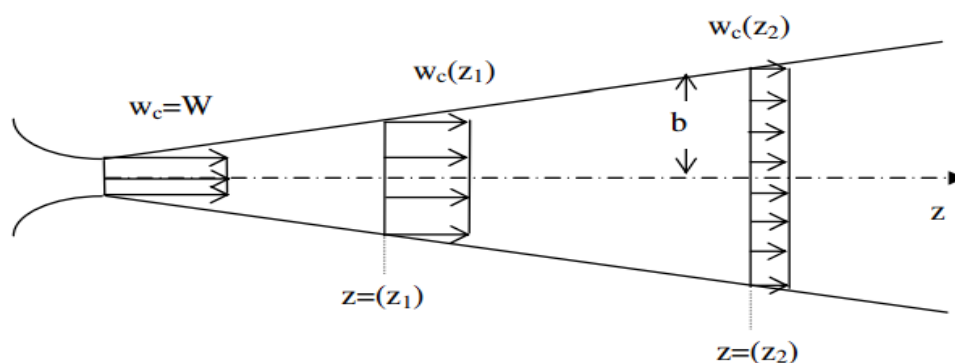
Με την ίδια λογική προκύπτουν άλλες δύο σχέσεις. Η μία συνδέει την αρχική ταχύτητα U_0 και την μέγιστη ταχύτητα στον άξονα της φλέβας U_M με τον λόγο z/l_Q :

$$\frac{U_0}{U_M} = a_3 \cdot \frac{z}{l_Q} \quad (2.16)$$

Ενώ η άλλη συνδέει τη μέση αραίωση μ/Q (μ η παροχή σε απόσταση z από το στόμιο και Q η αρχική παροχή) με τον λόγο z/l_Q :

$$\frac{\mu}{Q} = a_4 \cdot \frac{z}{l_Q} \quad (2.17)$$

όπου τα a_3 και a_4 είναι σταθερές.



Σχήμα 2.5 Ομοιόμορφες (Top-hat) κατανομές ταχύτητας σε απλή φλέβα.
(Πηγή: Παπανικολάου 2017)(Στην παρούσα εργασία το w αντιστοιχεί σε U)

Εδώ πρέπει να σημειωθεί πως διάφοροι ερευνητές έχουν υπολογίσει διαφορετικές τιμές για τις σταθερές α_1 , α_2 , α_3 και α_4 . Για αυτόν τον λόγο παρουσιάζεται ο παρακάτω πίνακας που περιέχει οργανωμένες τις σχέσεις:

Πίνακας 2.1 Σταθερές εξισώσεων απλής φλέβας

	Fischer et al. (1979)	Papanicolaou (1984)	Lee & Chu (2003)
$b = \alpha_1 \cdot z$	$0.107z$	$0.109z$	$0.114z$
$b_c = \alpha_1 \cdot z$	$0.127z$	$0.126z$	$0.125z$
$\frac{C_0}{C_M} = a_2 \cdot \frac{z}{l_Q}$	$\frac{C_0}{C_M} = 0.179^* \cdot \frac{z}{l_Q}$	$\frac{C_0}{C_M} = 0.165 \cdot \frac{z}{l_Q}$	$\frac{C_0}{C_M} = 0.168 \cdot \frac{z}{l_Q}$
$\frac{C_M}{C_0} = a_3 \cdot \frac{l_Q}{z}$	$\frac{C_M}{C_0} = 5.60 \cdot \frac{l_Q}{z}$	$\frac{C_M}{C_0} = 6.06 \cdot \frac{l_Q}{z}$	$\frac{C_M}{C_0} = 5.94 \cdot \frac{l_Q}{z}$
$\frac{\mu}{Q} = a_4 \cdot \frac{z}{l_Q}$	$\frac{\mu}{Q} = 0.25 \cdot \frac{z}{l_Q}$	$\frac{\mu}{Q} = 0.252 \cdot \frac{z}{l_Q}$	$\frac{\mu}{Q} = 0.29 \cdot \frac{z}{l_Q}$

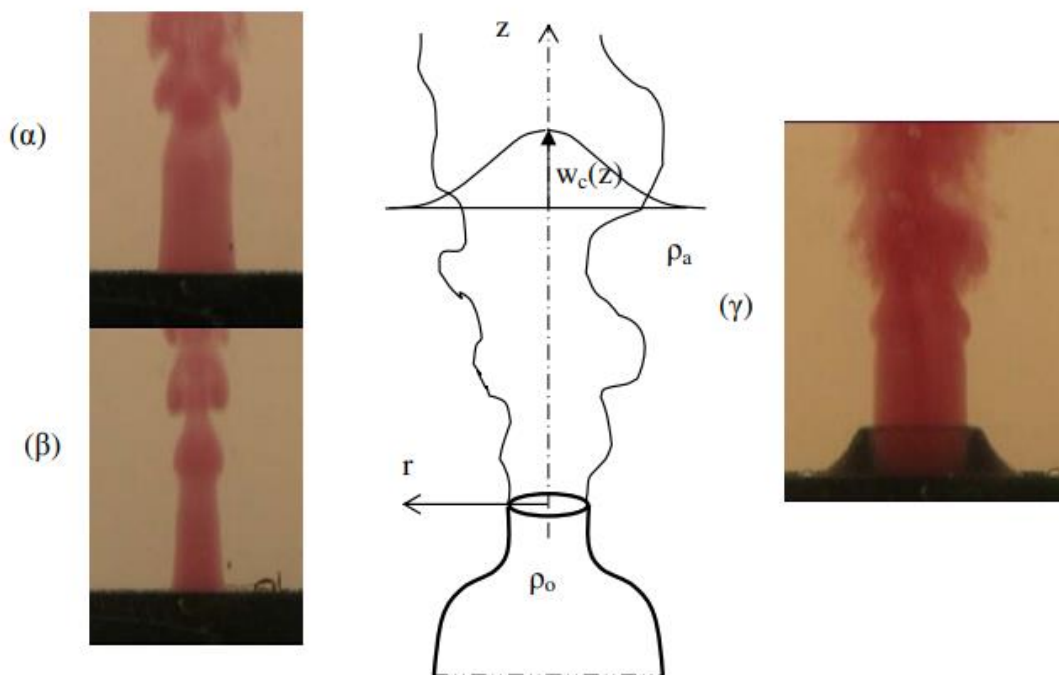
* Η τιμή προκύπτει ως ο αντίστροφος του 5.60.

2.4 ΠΛΟΥΜΙΟ

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, η απλή ανωστική φλέβα ή πλούμιο παράγεται από μια πηγή άνωσης χωρίς αρχική ορμή (ποσότητα κίνησης). Επομένως όλες οι μεταβλητές της ροής που προκύπτουν είναι συναρτήσεις μονάχα της άνωσης, του κινηματικού ιξώδους και της απόστασης από την πηγή. Ορίζουμε σαν κινηματική ή ειδική άνωση (specific buoyancy flux) στην "πηγή" την ανά μονάδα μάζας ρέοντος ρευστού άνωση και περιγράφεται με την ακόλουθη εξίσωση:

$$B = \frac{\rho_\alpha - \rho_0}{\rho_\alpha} \cdot g \cdot Q = g'_0 \cdot Q \quad 2.18$$

όπου ρ_α είναι η πυκνότητα του ακίνητου αποδέκτη, ρ_0 η αρχική πυκνότητα της φλέβας ($\rho_0 < \rho_\alpha$) και Q η ογκομετρική παροχή. Η παράμετρος g'_0 ονομάζεται φαινομενική επιτάχυνση της βαρύτητας. Η ειδική άνωση έχει διαστάσεις L^4/T^3 για εκροή από κυκλικό στόμιο (Παπανικολάου 2017).



Σχήμα 2.6 Πλούμιο από ακροφύσια (α) ορθογωνικής, (β) τριγωνικής και (γ) κυκλικής διατομής. Οι φωτογραφίες έχουν ληφθεί στο Εργαστήριο Υδρομηχανικής & Περιβαλλοντικής Τεχνικής, Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστημίου Θεσσαλίας από τον Σκανδάλη το 2005.

2.5 ΑΝΩΣΤΙΚΕΣ ΦΛΕΒΕΣ

Όπως προαναφέρθηκε και στην Ενότητα 2.1, ανωστική φλέβα (buoyant jet) είναι η ροή η οποία χαρακτηρίζεται και από διαφορά πυκνότητας αλλά και από

αρχική ορμή. Δηλαδή συμπεριλαμβάνει ως οριακές περιπτώσεις τις άλλες δύο. Κοντά στο στόμιο εξόδου συμπεριφέρονται ως απλές φλέβες ενώ σε μεγαλύτερες αποστάσεις συμπεριφέρονται ως πλούμια. Για αυτόν τον λόγο η ανάλυση τους πραγματοποιείται σύμφωνα με τις παρατηρήσεις και τα ευρήματα που έχουν προκύψει στις ροές αυτές (Fischer et al. 1979).

Πίνακας 2.2 Ορισμοί βασικών παραμέτρων

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

Χρησιμοποιώντας διαστατική ανάλυση σε φλέβα με κυκλικό επιστόμιο, εκτός από την κλίμακα μήκους l_Q που εξαρτάται από την ογκομετρική παροχή Q και την ειδική ορμή M , προκύπτει μία ακόμα κλίμακα μήκους η οποία εξαρτάται από την ειδική ορμή M και την ειδική άνωση B . Την συμβολίζουμε με l_M και την εκφράζουμε με την παρακάτω εξίσωση:

$$l_M = \frac{M^{\frac{3}{4}}}{B^{\frac{1}{2}}} \quad (2.19)$$

Στην ανωστική φλέβα διακρίνουμε τρεις περιοχές:

1. Περιοχή $z/l_M \ll 1$. Εδώ η φλέβα συμπεριφέρεται όπως η απλή (jet regime)
2. Περιοχή $z/l_M \sim 1$. Αυτή η περιοχή ονομάζεται ενδιάμεση η μεταβατική (buoyant jet ή forced plume)
3. Περιοχή $z/l_M \gg 1$. Σε αυτήν την περιοχή η φλέβα συμπεριφέρεται όπως τα πλούμια (plume regime)

Στην συνέχεια ορίζεται ο αριθμός Richardson ως ο λόγος l_Q/l_M . Η αναλογία αυτή εκφράζει τον λόγο των αδρανειακών δυνάμεων προς τις ανωστικές δυνάμεις. Για τις κυκλικές φλέβες ο αριθμός αυτός εκφράζεται ως εξής: (Fisher et al. 1979, Παπακωνσταντής 2009, Παπακωνσταντής 2017)

$$R_i = \frac{l_Q}{l_M} = \frac{\frac{Q}{\sqrt{M}}}{\frac{M^{\frac{3}{4}}}{\sqrt{B}}} = \frac{Q \cdot B^{\frac{1}{4}}}{M^{\frac{5}{4}}} \quad (2.20)$$

Πολύ συχνά χρησιμοποιείται και ο πυκνομετρικός αριθμός Froude:

$$F_0 = \frac{U_0}{\sqrt{g \cdot \frac{|\rho_\alpha - \rho_0|}{\rho_\alpha} \cdot D}} = \frac{U_0}{g'_0 \cdot D} \quad (2.21)$$

όπου κατά τα γνωστά U_0 είναι η αρχική ταχύτητα της φλέβας, g'_0 η φαινομενική επιτάχυνση της βαρύτητας και D η διάμετρος του στομίου παροχέτευσης.

Οι δύο αυτοί αριθμοί στις κυκλικές φλέβες συνδέονται με την ακόλουθη σχέση:

$$R_i = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{\frac{1}{4}} \cdot \frac{1}{F_0} \quad (2.22)$$

2.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Οι ροές των φλεβών, ανεξαρτήτως κατηγορίας, αποτελούν αντικείμενο μελέτης επιστημόνων και ερευνητών για σχεδόν εκατό χρόνια, από τα μέσα του 20^{ου} αιώνα περίπου. Αυτό συμβαίνει καθώς η μελέτη τους αποτελεί αντικείμενο ενδιαφέροντος τόσο σε πειραματικό όσο και σε θεωρητικό επίπεδο. Το εκτεταμένο επιστημονικό υλικό που έχει παραχθεί τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πειραματικό επίπεδο έχει βοηθήσει την επιστημονική κοινότητα να προσεγγίσει πολλαπλούς τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας δίνοντας λύσεις σε σύνθετα προβλήματα.

Ανά τα χρόνια κύριο ζητούμενο των περισσότερων εργασιών ήταν η μελέτη της ροής των απλών τυρβωδών φλεβών, των πλουμιών και συνεπώς και των ανωστικών φλεβών θετικής άνωσης. Σημαντικά στοιχεία πάνω στο συγκεκριμένο αντικείμενο υπάρχουν στα συγγράμματα των Fischer et al. (1979), Rodi (1980), Lee and Chu (2003).

Φυσικά οι επιστημονικές μελέτες δεν σταματούν εκεί, καθώς δεν είναι λίγες αυτές που έχουν ως αντικείμενο τις φλέβες αρνητικής άνωσης, δηλαδή τις φλέβες όπου η συνισταμένη βάρους και άνωσης είναι αντίρροπη της αρχικής ορμής. Για κατακόρυφη παροχέτευση της φλέβας χαρακτηριστικές είναι οι πειραματικές εργασίες Turner (1966), Baines et al. (1990), Zhang and Baddour (1998), Papanicolaou & Kokkalis (2008). Επιπλέον τα τελευταία χρόνια έχουν παρουσιαστεί εργασίες που αφορούν τις φλέβες αρνητικής άνωσης που παροχετεύονται υπό γωνία (π.χ. Papanicolaou et al. 2008, Παπακωνσταντής 2009, Papakonstantis et al. 2011a,b, Papakonstantis & Tsatsara 2018, 2019, Papakonstantis & Christodoulou 2020, Papakonstantis & Mylonakou 2021).

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά κάποιες από τις σημαντικότερες μελέτες που πραγματοποιούνται τις απλές τυρβώδεις φλέβες που παροχετεύονται τόσο από κυκλικά όσο και από ελλειπτικά στόμια.

Οι Dimotakis et al. (1983), μέσω της μεθόδου LIF, διεξήγαγαν πειράματα με σκοπό την διερεύνηση της δομής και των δυναμικών συνθηκών κυκλικών κατακόρυφων τυρβωδών φλεβών. Η φθορίζουσα ουσία που χρησιμοποιήθηκε ήταν η Ροδαμίνη Β και όπως και στη παρούσα διπλωματική εργασία λήφθηκαν φωτογραφίες και βίντεο της ροής. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως στην περιοχή του μακρινού πεδίου της φλέβας (far-field region) κυριαρχούν στρόβιλοι μεγάλης κλίμακας, οι οποίοι είναι αξονοσυμμετρικοί ή ελικοειδείς για μεγάλο χρονικό διάστημα. Επίσης βρέθηκε πως η εισαγωγή και η ανάμειξη του εκτοξευόμενου ρευστού με τον αποδέκτη έχει άμεση σχέση με την κινηματική αυτών των δομών.

Οι Papanicolaou & List (1988) χρησιμοποίησαν τις μεθόδους LIF και LDA (Laser-Doppler anemometry) ταυτόχρονα για να υπολογίσουν τις συνιστώσες της ταχύτητας (αξονική και ακτινική) και τη συγκέντρωση κατακόρυφης, κυκλικής ανωστικής φλέβας. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως οι νόμοι της ασυμπτωτικής μείωσης της ταχύτητας και της συγκέντρωσης επαληθεύονται πειραματικά τόσο στις φλέβες όσο και στα πλούμια. Επίσης φάνηκε πως οι τιμές της εγκάρσιας κατανομής της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης για απλές φλέβες σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις όπου $z/l_M < 1$ βρίσκονται κοντά στο 0.25.

Σκοπός της μελέτης των Abdel-Rahman et al. (1996) ήταν η διερεύνηση της επίδρασης του αριθμού Reynolds στη ροή κοντά στο στόμιο εξόδου (near-field region) στις κυκλικές τυρβώδεις φλέβες αέρα. Οι μετρήσεις έγιναν με τη μέθοδο LDA (laser-Doppler anemometry) και προέκυψαν δεδομένα για τη μέση ταχύτητα, την ένταση τύρβης, το συντελεστή λοξότητας, τους συντελεστές επιπεδότητας και το φάσμα τύρβης. Για διαφορετικούς αρχικούς αριθμούς Reynolds με εύρος από 1400 έως 20000, έγιναν μετρήσεις από την έξοδο του ακροφυσίου μέχρι και 10 διαμέτρους προς τα κατάντη. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως ο αριθμός Reynolds έχει μεγάλη επίδραση στη συμπεριφορά των φλεβών στο κοντινό πεδίο, αφού μειώνοντας τον η ταχύτητα στον άξονα της φλέβας ελαττώνεται γρηγορότερα.

Οι Webster et al. (2001) χρησιμοποιώντας ταυτόχρονα τις μεθόδους PLIF και DPTV (Digital Particle Tracking Velocimetry) διερεύνησαν την κατανομή της ταχύτητας και της συγκέντρωσης για κυκλικές τυρβώδεις φλέβες στην ανεπτυγμένη ζώνη κρατώντας σταθερό τον αριθμό Reynolds ($Re=3000$). Οι μετρήσεις έδειξαν πως τόσο το προφίλ της ταχύτητας όσο και της συγκέντρωσης παρουσιάζουν αυτοομοιότητα. Επίσης τα αποτελέσματα συμφωνούν με παλαιότερες μετρήσεις και επομένως κατέληξαν στο συμπέρασμα πως το σύστημα που χρησιμοποιήθηκε είναι αξιόπιστο.

Χρησιμοποιώντας ταυτόχρονα τις τεχνικές PLIF και PIV (Particle Image Velocimetry) σε κυκλική τυρβώδη φλέβα που παροχετεύεται από στόμιο

διαμέτρου $D=0.30$ cm, οι Hu et al. (2002) μέτρησαν τις κατανομές της ταχύτητας και της συγκέντρωσης στη ζώνη ανάπτυξης της ροής. Για $Re=6000$ υπολογίστηκε το ύψος του πυρήνα ίσος με 4 διαμέτρους.

Η εργασία των Mistry & Dawson (2014) πραγματεύεται την συμπαράσυρση μιας τυρβώδους κυκλικής φλέβας. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα με τις τεχνικές LIF και PIV και προσδιορίστηκαν τα προφίλ της ταχύτητας και της συγκέντρωσης μακριά από την εκροή ($z=50D$). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν επιβεβαίωσαν για ακόμα μία φορά την υπάρχουσα βιβλιογραφία που υπάρχει για τις τυρβώδεις εκτοξευόμενες φλέβες.

Η εργασία των Hussain and Husain (1989) αφορά τις απλές τυρβώδεις φλέβες που εκτοξεύονται από ελλειπτικό στόμιο. Οι ελλειπτικές φλέβες είναι αρκετά διαφορετικές από τις εκτενώς μελετημένες κυκλικές λόγω κυρίως του γεγονότος ότι οι στρόβιλοι που δημιουργούνται έχουν πολύπλοκη τρισδιάστατη παραμόρφωση. Τέτοια παραμόρφωση μπορεί να μεταβάλει ουσιαστικά τη συμπαράσυρση και άλλα φαινόμενα στροβιλισμού, υποδηλώνοντας έτσι προτίμηση για το ελλειπτικό σχήμα σε πολλές εφαρμογές φλεβών.

Οι Mi & Nathan (2010) σύγκριναν 9 διαφορετικές φλέβες από 9 διαφορετικά στόμια με αναλογίες πλευρών (AR) από 1 (κύκλος) έως 2.5 (ισοσκελές τρίγωνο) που παροχετεύονταν σε περιβάλλον ακίνητου αέρα. Τα στόμια είχαν ουσιαστικά ίσου εμβαδού επιφάνειες και ο αριθμός Reynolds διατηρήθηκε σταθερός και ίσος με 15000. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η απώλεια της αξονοσυμμετρίας της φλέβας στην έξοδο γενικά προκαλεί την ταχύτερη μείωση της μέσης ταχύτητας και την αύξηση της κυμαινόμενης έντασης στη ζώνη ανάπτυξης της ροής, υποδεικνύοντας έτσι τον αυξημένο συνολικό ρυθμό συμπαράσυρσης. Αντίθετα, στη περιοχή της ανεπτυγμένης ροής, φάνηκε πως η γεωμετρία του στομίου δεν επηρεάζει τον ρυθμό ασυμπτωτικής μείωσης της ταχύτητας του άξονα.

Οι Hashiehbaf & Romano (2013) χρησιμοποιώντας την τεχνική PIV, διερεύνησαν την επιρροή της γεωμετρίας των ακροφυσίων, καθώς επίσης και του αριθμού Reynolds στη ροή των φλεβών. Ο αριθμός Reynolds κυμάνθηκε από 8000 μέχρι 35000 για την επίτευξη τυρβώδους ροής. Για χαμηλό Re κοντά στις 8000 φάνηκε πως υπάρχουν δύο κατηγορίες στομίων ανάλογα με τη συμπεριφορά της φλέβας. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν αυτά που είναι πιο κοντά στα αξονοσυμμετρικά (κυκλικά, τριγωνικά, τετραγωνικά), ενώ στη δεύτερη ανήκουν τα πιο επιμήκη ακροφύσια (ορθογωνικά, ελλειπτικά). Ο λόγος για τη διαφορετική συμπεριφορά της δεύτερης κατηγορίας συνδέεται με το φαινόμενο της αλλαγής αξόνων (axis-switching), που προκύπτει από τον διαφορετικό ρυθμό ανάπτυξης του πλάτους στον κάθε άξονα. Αντίθετα για μεγάλο Reynolds και στη ζώνη ανεπτυγμένης ροής δεν φαίνεται να παρουσιάζονται διαφορές ανάμεσα στις δύο κατηγορίες.

Για να μελετηθεί η επίδραση του αριθμού Reynolds στο κοντινό και ενδιάμεσο πεδίο κυκλικών και ελλειπτικών φλεβών με λόγο πλευρών 2 και 3. Οι Aleyasin, Tachie, Kourriyanon και Err (2015) πραγματοποίησαν 4 πειράματα για κάθε διατομή, για $Re=2500, 4300, 8500$ και 17000 . Τα αποτελέσματα δείχνουν διαφορετικά χαρακτηριστικά στο κύριο και στο δευτερεύον άξονα των ελλείψεων συμπεριλαμβανομένου του ρυθμού διασποράς. Επίσης, μια αύξηση του αριθμού Reynolds οδηγεί σε στενότερη φλέβα στη ζώνη ανάπτυξης της ροής. Οι θέσεις των σημείων αλλαγής αξόνων και των δύο ελλειπτικών ακροφυσίων είναι σχεδόν ανεξάρτητα από τον αριθμό Reynolds όχι μόνο για το ημιπλάτος της ταχύτητας αλλά και για τα άλλα πλάτη ταχύτητας. Αντίθετα φαίνεται πως η θέση εναλλαγής του άξονα είναι συνάρτηση του λόγου διαστάσεων (AR).

Οι Aleyasin, Fathi, Tachie και Kourriyanon (2017) σύγκριναν τροποποιημένα ακροφύσια (ακροφύσια με απότομη γραμμική συστολή) έτσι ώστε να εξεταστεί η επίδραση της γεωμετρίας τους στα χαρακτηριστικά ανάμειξης και στα φαινόμενα τυρβώδους διάχυσης στη ζώνη ανάπτυξης της ροής. Εξετάστηκαν κυκλικές, τετραγωνικές, τριγωνικές και ελλειπτικές διατομές με $AR=2$ και $Re=10000$. Παρατηρήθηκε ότι μικρότερους πυρήνες έχουν οι μη κυκλικές φλέβες. Επίσης φάνηκε πως ο ρυθμός εξάπλωσης και τα επίπεδα της τύρβης είναι υψηλότερα στις φλέβες που εκρέουν από ελλειπτικά και ορθογώνια ακροφύσια, υποδηλώνοντας έτσι ενισχυμένη ανάμειξη των φλεβών αυτών.

Σε αυτή την μελέτη, οι ερευνητές Aleyasin και Tachie (2017) εξέτασαν την επιρροή 8 διαφορετικών στομιών με λόγο διαστάσεων 2 στη ζώνη ανάπτυξης της ροής μέσω της τεχνικής PIV. Οι φλέβες παράχθηκαν από ακροφύσια που μπορούν να θεωρηθούν ενδιάμεσα στα πιο ευρέως μελετημένα ακροφύσια ομαλής και απότομης συστολής. Παρατηρήθηκε ότι τα μήκη των πυρήνων και οι ρυθμοί αύξησης της τύρβης στον άξονα των φλεβών είναι συγκρίσιμα με αυτά των στομιών απότομης συστολής. Τέλος φάνηκε πως οι φλέβες που προέρχονται από ελλειπτικά και ορθογώνια ακροφύσια έχουν την καλύτερη απόδοση ανάμειξης.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Όπως προαναφέρθηκε στην Ενότητα 2.3, η διαστατική ανάλυση πρέπει να συνδυαστεί με πειραματικά αποτελέσματα ώστε να γίνει επαλήθευση των συσχετίσεων που προέκυψαν και να προσδιοριστούν οι σταθερές αναλογίας. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής λοιπόν, η διεξαγωγή των πειραμάτων πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής του Τομέα Υδατικών Πόρων της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από τα παρακάτω τμήματα:

1. Κύρια δεξαμενή – αποδέκτης
2. Δευτερεύουσα δεξαμενή για προετοιμασία και τροφοδοσία της φλέβας
3. Στόμια διαφορετικής γεωμετρίας (κυκλικά, ελλειπτικά και ορθογωνικά)
4. Κάμερα βιντεοσκόπησης
5. Συσκευή δημιουργίας φύλλου laser
6. Λοιπά βοηθητικά όργανα



Σχήμα 3.1 Στόμια εκροής

Στις παρακάτω ενότητες περιγράφεται αναλυτικά ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων.

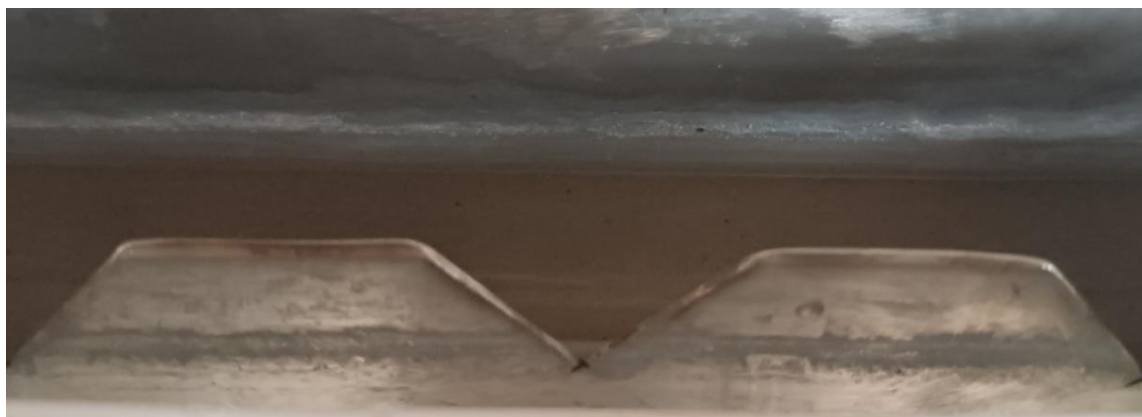
3.2.1 ΚΥΡΙΑ ΔΕΞΑΜΕΝΗ (ΑΠΟΔΕΚΤΗΣ)

Η κύρια δεξαμενή αποτελεί τον αποθηκευτικό χώρο του ομογενούς περιβάλλοντος ρευστού μέσα στο οποίο γίνεται η παροχέτευση των φλεβών. Θα πρέπει να σημειωθεί πως η δεξαμενή αυτή χρησιμοποιήθηκε από διάφορους ερευνητές (π.χ. Μίχας 2008, Dimitriadis 2017 Σολωμού 2022, Γκούτης 2023). Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.1, είναι μία υάλινη ορθογωνική δεξαμενή διαστάσεων 100 cm x 80 cm x 70 cm, δηλαδή όγκου 560 λίτρων και βρίσκεται υπερυψωμένη 80 cm πάνω από το δάπεδο του εργαστηρίου. Είναι στερεωμένη πάνω σε οριζόντια μεταλλική βάση η οποία εδράζεται σε τέσσερα μεταλλικά στηρίγματα. Τα τοιχώματα της δεξαμενής είναι φτιαγμένα από διάφανο plexiglass πάχους 12.5 mm, έτσι ώστε να αντέχει τις μεγάλες υδροστατικές πιέσεις που αναπτύσσονται στο κατώτερο τμήμα της όταν είναι γεμάτη με νερό. Στον πυθμένα της βρίσκονται δύο οπές. Η μία οπή, διαμέτρου 5 cm, βρίσκεται στο κέντρο και από αυτήν εισέρχεται σωλήνας πάνω στον οποίο προσαρμόζονται τα στόμια εξόδου των φλεβών, ενώ η άλλη διαμέτρου 2.5 cm βρίσκεται στην άκρη και χρησιμοποιείται για την εκκένωση του νερού. Οι πλαϊνές έδρες της δεξαμενής, πέραν της μπροστινής από την οποία παρατηρείται η ροή, είναι καλυμμένες με μαύρο χαρτόνι. Στη δεξιά πλευρά υπάρχει μία σχισμή (που δεν καλύπτεται με χαρτόνι) για να μπορεί να περνάει το Laser. Το χαρτόνι τοποθετήθηκε για να αποφευχθούν οι αντανακλάσεις επί των υάλινων τοιχωμάτων, καθώς αυτό θα επηρέαζε σημαντικά τα αποτελέσματα του πειράματος. Για τον ίδιο λόγο η διεξαγωγή των πειραμάτων πραγματοποιείται σε χώρο που περιβάλλεται από μαύρες κουρτίνες.



Σχήμα 3.2 Κύρια Δεξαμενή – Αποδέκτης

Περιμετρικά στο πάνω μέρος της δεξαμενής βρίσκεται μεταλλικό ορθογωνικό κανάλι με υπερχειλιστή τύπου V-Notch που αποτελείται από διαδοχικά V ίσων διαστάσεων, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.3. Ο σκοπός του είναι η συλλογή των υδάτων όταν αυτά υπερβαίνουν την ανώτατη στάθμη και την ελεγχόμενη μεταφορά τους εκτός δεξαμενής.



Σχήμα 3.3 Υπερχειλιστής τύπου V-Notch

3.2.2 ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΑ ΔΕΞΑΜΕΝΗ

Δίπλα στην κύρια δεξαμενή βρίσκεται η δευτερεύουσα δεξαμενή, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 3.4. Σκοπός της είναι η προετοιμασία του διαλύματος της φλέβας που παροχετεύεται στη συνέχεια στην κύρια δεξαμενή. Το διάλυμα αποτελείται από νερό, ροδαμίνη 6G και μικρή ποσότητα θειώδους νατρίου (Na_2SO_3). Το υλικό κατασκευής της είναι ο ανοξείδωτος χάλυβας και είναι κυλινδρικού σχήματος με όγκο 40 λίτρα. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, εξωτερικά της βρίσκεται σωλήνας ανακυκλοφορίας ο οποίος μεταφέρει υγρό από κάτω προς τα πάνω με την βοήθεια αντλίας που βρίσκεται τοποθετημένη στο κατώτερο τμήμα του για την ομογενοποίηση του διαλύματος της φλέβας. Στο πάνω μέρος της δεξαμενής υπάρχουν δύο οπές. Η αριστερή αποσκοπεί στην απομάκρυνση του αέρα, ενώ από την δεξιά εισάγεται το νερό. Ο μπλε σωλήνας στην κορυφή της δεξαμενής τη συνδέει με ειδικό αεροσυμπιεστή (Σχήμα 3.5) που λειτουργεί αυτόματα για να διατηρείται μία σταθερή πίεση 2-2.5 atm μετά την πλήρωση της με νερό, ώστε να εξασφαλίζεται σταθερή παροχή τροφοδοσίας της φλέβας. Στο κάτω μέρος της βρίσκεται ο σωλήνας που συνδέει τις δύο δεξαμενές με σκοπό τη παροχέτευση του διαλύματος.



Σχήμα 3.4 Δευτερεύουσα Δεξαμενή



Σχήμα 3.5 Αεροσυμπιεστής

3.2.3 ΔΙΑΛΥΜΑ ΡΟΔΑΜΙΝΗΣ 6G

Προσθέτοντας 1g ροδαμίνης 6G σε ένα λίτρο νερό δημιουργήθηκε διάλυμα με συγκέντρωση $C=1$ g/L. Το διάλυμα αυτό φυλασσόταν μέσα σε δοχείο (Σχήμα 3.7) σε μέρος σκιερό έτσι ώστε να αποφευχθεί η αλλοίωσή του. Στην δευτερεύουσα δεξαμενή, σε κάθε πείραμα, εισαγόταν 2 mL του διαλύματος Ροδαμίνης από την ίδια οπή από την οποία εισαγόταν το νερό με σκοπό την δημιουργία διαλύματος φλέβας με συγκέντρωση Ροδαμίνης 50 $\mu\text{g/L}$. Από την άλλη μεριά στην κύρια δεξαμενή προστίθονταν 0.28 mL από το διάλυμα Ροδαμίνης για να επιτευχθεί συγκέντρωση 0.5 $\mu\text{g/l}$. Αυτή η μικρή συγκέντρωση είναι απαραίτητη στον αποδέκτη, καθώς επιδιώκεται η δημιουργία ενός πολύ ασθενούς φθορισμού που διευκολύνει την επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Το διάλυμα της ροδαμίνης εξάγεται από το αποθηκευτικό δοχείο και εισάγεται στις δύο δεξαμενές με ειδικές σύριγγες (Σχήμα 3.6), οι οποίες είναι διαφορετικές μεταξύ τους. Αυτό έγινε για να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια στην εισαγωγή της ροδαμίνης, καθώς στις δεξαμενές έπρεπε να εισαχθεί διαφορετικής τάξης μεγέθους ποσότητα.

Επίσης, επειδή το νερό του εργαστηρίου περιέχει χλώριο, το οποίο είναι ένα στοιχείο που εξουδετερώνει την ροδαμίνη αφαιρώντας της έτσι την ιδιότητα του φθορισμού της φλέβας, κρίνεται απαραίτητη η προσθήκη μικρής ποσότητας θειώδους νατρίου (Na_2SO_3) (Σχήμα 3.7) στην κύρια δεξαμενή αλλά και στην δευτερεύουσα ώστε να δεσμευτεί το ελεύθερο χλώριο.

Η ανάμειξη στην κύρια δεξαμενή σε αντίθεση με την δευτερεύουσα δεν γίνεται αυτόματα, αλλά χειροκίνητα με την βοήθεια ενός μεταλλικού αναδευτήρα (Σχήμα 3.8). Η διαδικασία της ανάμειξης διαρκεί τουλάχιστον ένα λεπτό.



Σχήμα 3.6 Σύριγγες λήψης Ροδαμίνης – 6G



Σχήμα 3.7 Αποθηκευτικές συσκευασίες ροδαμίνης και θειώδους νατρίου



Σχήμα 3.8 Μεταλλικός αναδευτήρας

3.2.4 ΒΙΝΤΕΟΚΑΜΕΡΑ

Ένα από τα κύρια εργαλεία της μεθόδου LIF αποτελεί η βιντεοκάμερα, αφού είναι απαραίτητη η βιντεοσκόπηση της ροής για την επεξεργασία των δεδομένων αργότερα. Για την καταγραφή των πειραμάτων λοιπόν χρησιμοποιήθηκε η κάμερα Panasonic Full HD HC-V770 (Σχήμα 3.9). Η συγκεκριμένη κάμερα καταγράφει με ρυθμό 50 (fps) frames per second και είναι FULL HD με ανάλυση 1920 x 1080 pixels.



Σχήμα 3.9 Βιντεοκάμερα Panasonic HC-V770

Η κάμερα τοποθετείται σε ειδικό τρίποδο (Σχήμα 3.10) σε απόσταση 76 cm από την κύρια δεξαμενή για την πλήρη και όσο τον δυνατόν καλύτερη κάλυψη του πειράματος. Περιστρέφεται 90° ως προς το οριζόντιο επίπεδο σε συγκεκριμένο ύψος και κλειδώνεται εκεί έτσι ώστε να αποφευχθούν σφάλματα κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Τέτοια σφάλματα μπορεί να προκύπτουν από λανθασμένο υπολογισμό του λόγου cm/pixel, δηλαδή της κλίμακας της εικόνας.



Σχήμα 3.10 Τρίποδο τοποθέτησης κάμερας

3.3 ΣΥΣΤΗΜΑ LIF (LASER INDUCED FLUORESCENCE)

Το Laser Induced Fluorescence (LIF) είναι μια τεχνική οπτικής μέτρησης που βασίζεται στον φθορισμό που εκπέμπεται από χημικό δείκτη που διεγείρεται από ακτινοβολία λέιζερ (Papanicolaou & List 1988). Όταν δημιουργείται επίπεδο φύλλο Laser τότε η τεχνική αναφέρεται συχνά ως Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF). Ουσιαστικά ένα διδιάστατο φύλλο φωτός λέιζερ περνά μέσα από ένα πεδίο ροής και ο επακόλουθος φθορισμός καταγράφεται σε μια ψηφιακή κάμερα. Με την κατάλληλη επεξεργασία εικόνας επιτρέπεται η εξαγωγή δεδομένων συγκέντρωσης πάνω στο επίπεδο του άξονα της ροής.

Φθορισμός είναι το φωτοχημικό φαινόμενο της εκπομπής φωτός (ακτινοβολίας), από μια ουσία που έχει απορροφήσει φως ή ακτινοβολία διαφορετικού μήκους κύματος. Στην παρούσα διπλωματική εργασία η φθορίζουσα ουσία που επιλέχθηκε είναι η ροδαμίνη 6G. Στις περισσότερες περιπτώσεις η ακτινοβολία που εκπέμπει η ουσία έχει μεγαλύτερο μήκος κύματος και επομένως, χαμηλότερη ενέργεια από αυτήν που απορροφά.

Για τη ροδαμίνη 6G συγκεκριμένα ισχύει ότι κατά την διέγερσή της με ακτινοβολία μήκους κύματος 532 nm (πράσινο) αυτή εκπέμπει ακτινοβολία μήκους κύματος 556 nm (κίτρινο) (Dimitriadis 2017).

Ένα τυπικό σύστημα PLIF, πέραν της κύριας και δευτερεύουσας δεξαμενής που περιέχουν το ομογενές ρευστό και το διάλυμα της ροδαμίνης αντίστοιχα, περιλαμβάνει τα εξής:

1. Μία πηγή εκπομπής ακτινοβολίας τύπου Laser
2. Μια σειρά κατόπτρων σε περιστροφή για την μετατροπή της ακτίνας σε επίπεδο φύλλο Laser
3. Μια κάμερα για την λήψη των αποτελεσμάτων

Η πηγή ακτινοβολίας Laser εκπέμπει μονοχρωματική ακτινοβολία, δηλαδή ακτινοβολία σταθερού μήκους κύματος, στα περιστρεφόμενα κάτοπτρα. Από εκεί η ακτινοβολία αντανακλάται προς διάφορες κατευθύνσεις και επειδή η συχνότητα περιστροφής των κατόπτρων είναι μεγάλη δημιουργείται ένα ενιαίο επίπεδο. Το φύλλο Laser περνά μέσα από την σχισμή στο πλάι της κύριας δεξαμενής και έτεμνε την φλέβα που εξερχόταν από το στόμιο εκροής. Στην συνέχεια η ροδαμίνη που περιέχεται στην φλέβα διεγείρονταν και εξέπεμπε ακτινοβολία μεγαλύτερου μήκους κύματος. Έχει βρεθεί πως για μικρές συγκεντρώσεις ροδαμίνης, δηλαδή μέχρι 50 µg/L, η σχέση μεταξύ συγκέντρωσης και έντασης ακτινοβολίας είναι γραμμική (Ferrier et al. 1993).

Το σύστημα Laser που χρησιμοποιήθηκε κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Το μπλε ορθογωνικό κουτί που διακρίνεται

πάνω στο τρίποδο είναι η συσκευή παραγωγής ακτινών Laser και μέσα στον κυκλικό δίσκο στην κορυφή βρίσκονται τα περιστρεφόμενα κάτοπτρα.



Σχήμα 3.11 Συσκευή Laser και περιστρεφόμενα κάτοπτρα

Η συσκευή εκπομπής ακτινοβολίας Laser αυτή είναι τύπου DPSS (Diode Pumped Solid State) και εκπέμπει σταθερή ακτίνα ισχύος 1W. Η μετατροπή της ακτίνας Laser σε επίπεδο φύλλο, γίνεται με το πολυγωνικό περιστροφικό κάτοπτρο του σχήματος, το οποίο διαθέτει 24 έδρες και περιστρέφεται με συχνότητα 20 kHz. Είναι απαραίτητη αυτή η μεγάλη συχνότητα για τη δημιουργία ενός επίπεδου φύλλου Laser, αναλογιζόμενος κανείς και την μεγάλη ταχύτητα του κλείστρου της βιντεοκάμερας (50 fps). Εδώ πρέπει να σημειωθεί πως το φύλλο Laser δεν είναι ακριβώς δισδιάστατο (επίπεδο), αλλά είναι πάχους 1 mm. Η λειτουργία της συσκευής εκπομπής ακτινοβολίας Laser όπως επίσης και του κατόπτρου επιτυγχάνεται μέσω τριών τροφοδοτικών (Σχήμα 3.12).



Σχήμα 3.12 Τροφοδοτικά Laser και περιστρεφόμενου κατόπτρου

Το τρίποδο στο οποίο βρίσκονται το Laser και το κάτοπτρο τοποθετείται έτσι ώστε το φύλλο Laser να χτυπάει κάθετα το πλαϊνό τοίχωμα της κύριας δεξαμενής, να περνάει από τη σχισμή που βρίσκεται εκεί και να κόβει το στόμιο εκροής της φλέβας στον άξονα του. Η κάμερα βρίσκεται σε μία απόσταση στην οποία καταγράφεται όλο το πεδίο ροής της φλέβας.

Η ακτίνα Laser, λόγω υψηλής ισχύος, είναι επικίνδυνη για τα μάτια. Για αυτόν τον λόγο κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν ειδικά γυαλιά απορρόφησης ακτινοβολίας (Σχήμα 3.13). Τα γυαλιά αυτά προστατεύουν όχι μόνο από την ίδια την ακτίνα, αλλά και από τις αντανακλάσεις της.



Σχήμα 3.13 Γυαλιά απορρόφησης ακτινοβολίας

3.4 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΠΑΡΟΧΟΜΕΤΡΟΥ

Στο εξωτερικό του τοιχώματος της κύριας δεξαμενής βρίσκεται το ειδικό παροχόμετρο πλωτήρα (Σχήμα 3.14). Σκοπός του είναι ο έλεγχος και η ρύθμιση της διερχόμενης παροχής από τη δευτερεύουσα στην κύρια δεξαμενή. Το εύρος μετρήσεων είναι από 10 έως 160 L/h και η παροχή ρυθμίζεται μέσω δικλείδας που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα κάτω δεξιά



Σχήμα 3.14 Παροχόμετρο πλωτήρα

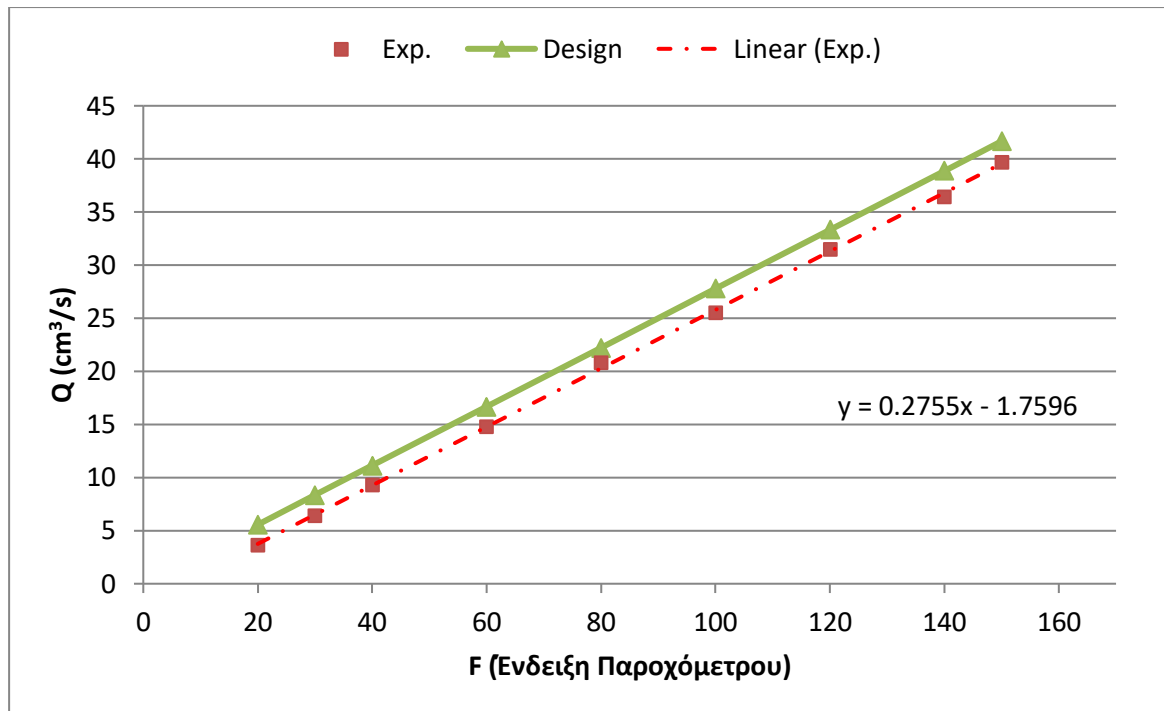
Η βαθμονόμηση του παροχόμετρου είναι μία διαδικασία που κρίνεται απαραίτητη για την επίτευξη μεγάλης ακρίβειας στις μετρήσεις. Η βαθμονόμηση είναι ουσιαστικά η αντιστοίχιση των ενδείξεων κάποιου οργάνου με τις πραγματικές τιμές. Με το πέρασμα του χρόνου, οι τιμές των οργάνων και στη συγκεκριμένη περίπτωση της παροχής, είτε λόγω φθοράς είτε για κάποιον άλλο παράγοντα διαφέρουν από τις προτεινόμενες του κατασκευαστή. Επομένως καταφεύγουμε στην βαθμονόμηση για την καλύτερη προσέγγιση των

πραγματικών τιμών. Για την εκτέλεση λοιπόν της διαδικασίας αυτής έγιναν δοκιμές. Για διαφορετική παροχή κάθε φορά πληρώθηκε ειδικό δοχείο με νερό για συγκεκριμένο χρόνο, ο οποίος μετρήθηκε με χρονόμετρο. Στη συνέχεια μετρήθηκε ο όγκος του νερού με τη χρήση ογκομετρικών σωλήνων (Σχήμα 3.15) και με γνωστό το χρόνο υπολογίστηκε η πραγματική παροχή.

Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε 9 φορές, δηλαδή για 9 διαφορετικές παροχές. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις αλλά και από τη σχέση που έχει δοθεί από τον κατασκευαστή για τη σύνδεση των ενδείξεων F με την πραγματική παροχή (Design) δίνονται στον Πίνακα 3.1 και παρουσιάζονται γραφικά στο Σχήμα 3.16. Η συσχέτιση ενδείξεων και μετρήσεων προέκυψε γραμμική με μεγάλη ακρίβεια και προσδιορίστηκε η εξίσωσή της που χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της παροχής της φλέβας.



Σχήμα 3.15 Ογκομετρικά δοχεία (250mL – 1000mL)
(Πηγή: Σολωμού 2022)



Σχήμα 3.16 Διάγραμμα βαθμονόμησης παροχόμετρου

Πίνακας 3.1 Μετρήσεις και υπολογισμοί βαθμονόμησης παροχόμετρου (Γκούτης 2023)

Ενδείξεις Παροχόμετρου	Design	Exp.
F(L/h)	Q' (cm ³ /s)	Q (cm ³ /s)
20	5.6	3.6
30	8.3	6.4
40	11.1	9.3
60	16.7	14.8
80	22.2	20.8
100	27.8	25.5
120	33.3	31.5
140	38.9	36.4
150	41.7	39.7

Όπως φαίνεται λοιπόν και στο Σχήμα 3.16, η σχέση που ενώνει τις ενδείξεις του παροχόμετρου F με την πραγματική παροχή Q' είναι η εξής:

$$Q' = 0.2755 \cdot F - 1.7596 \quad (3.1)$$

όπου F σε L/h και Q' σε cm³/s.

3.5 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΤΥΠΙΚΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εκτέλεση των πειραμάτων ήταν η ίδια για όλα τα στόμια, τόσο για τα κυκλικά όσο και για τα ελλειπτικά. Επειδή το αντικείμενο της μελέτης είναι η διερεύνηση απλών τυρβωδών φλεβών, οι συνθήκες των πυκνοτήτων και των θερμοκρασιών στις δεξαμενές σε όλα τα πειράματα παρέμειναν σταθερές και ίσες μεταξύ τους. Σε αυτή την ενότητα λοιπόν περιγράφονται συνοπτικά τα βήματα για την διεξαγωγή ενός τυπικού πειράματος. Αυτά είναι τα εξής:

1. Αρχικά τοποθετείται το στόμιο εκροής που θα πραγματοποιηθούν τα πειράματα για διάφορες παροχές. Όπως σημειώθηκε και νωρίτερα χρησιμοποιήθηκαν 4 στόμια, δύο κυκλικά και δύο ελλειπτικά. Στα ελλειπτικά πραγματοποιήθηκαν δύο φορές τα πειράματα, τοποθετώντας το φύλλο Laser μία φορά κατά τον κύριο άξονα της έλλειψης και μία κατά τον δευτερεύοντα άξονα.
2. Το δεύτερο στάδιο είναι η πλήρωση των δεξαμενών με νερό. Και στις δύο δεξαμενές παροχετεύεται νερό από την ίδια πηγή, το δίκτυο του εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Υδραυλικής. Η δευτερεύουσα δεξαμενή έχει χωρητικότητα 40 L, ενώ η κύρια 560 L.
3. Ταυτόχρονα συλλέγεται ποσότητα ροδαμίνης 6G και θειώδους νατρίου με σκοπό την εισαγωγή τους στις δεξαμενές μετά την πλήρωσή τους.
4. Στην συνέχεια προστίθεται εμπειρικά μικρή ποσότητα θειώδους νατρίου (Na_2SO_3) στις δεξαμενές με σκοπό την εξουδετέρωση του χλωρίου που βρίσκεται στο νερό του εργαστηρίου. Λόγω του διαφορετικού όγκου των δεξαμενών, στην κύρια δεξαμενή προστίθεται λίγο μεγαλύτερη ποσότητα από ότι στην δευτερεύουσα.
5. Έπειτα, από την ποσότητα ροδαμίνης συγκέντρωσης $C=1 \text{ g/L}$ που έχει εξαχθεί από την αποθηκευτική συσκευασία, συλλέγονται με τις σύριγγες λήψης οι ποσότητες που θα εισαχθούν στις δεξαμενές.

Στην δευτερεύουσα δεξαμενή εισάγονται 2 mL διαλύματος με σκοπό να προκύψει τελικό διάλυμα ροδαμίνης συγκέντρωσης $C=50 \text{ μg/L}$.

Στην κύρια δεξαμενή εισάγονται 0.28 mL διαλύματος. Έτσι προκύπτει τελικό διάλυμα ροδαμίνης στην κύρια δεξαμενή συγκέντρωσης $C=0.5 \text{ μg/L}$.

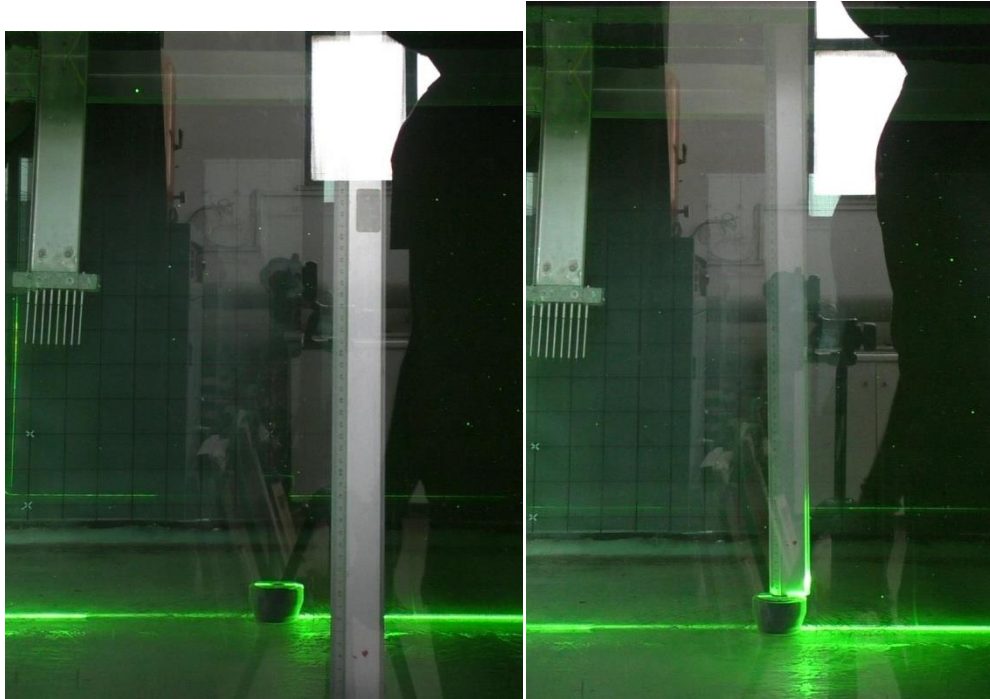
6. Αφού λοιπόν εισαχθούν οι απαραίτητες ποσότητες ροδαμίνης και θειώδους νατρίου στις δεξαμενές, είναι αναγκαίο να ανακατευτούν καλά έτσι ώστε τα διαλύματα να γίνουν ομογενή.

Η διεργασία αυτή στην δευτερεύουσα δεξαμενή γίνεται με ειδικό σύστημα ανακυκλοφορίας που βρίσκεται εξωτερικά της και φαίνεται στα αριστερά στο Σχήμα 3.4.

Αντίθετα στην κύρια δεξαμενή η ανάδευση γίνεται μηχανικά με τον μεταλλικό αναδευτήρα του Σχήματος 3.6. Αφού γίνει η ανάδευση αναμένουμε περίπου 20 λεπτά έτσι ώστε να βρεθεί το διάλυμα όσο πιο κοντά γίνεται στην κατάσταση ηρεμίας.

7. Μετά την ανάδευση και μέχρι να φτάσει το διάλυμα της κύριας δεξαμενής σε ηρεμία τοποθετείται το τρίποδο πάνω στο οποίο βρίσκεται η κάμερα σε κατάλληλη θέση (76 cm από την κύρια δεξαμενή), έτσι ώστε να βιντεοσκοπείται όλο το πεδίο ροής της φλέβας. Η κάμερα δεν πρέπει να τοποθετείται πολύ κοντά στην δεξαμενή για να αποφευχθούν αλλοιώσεις στα βίντεο.
8. Αφού περάσει ένα εύλογο χρονικό διάστημα απενεργοποιείται η αντλία ανακυκλοφορίας της δευτερεύουσας δεξαμενής και απομονώνεται. Έπειτα ενεργοποιείται ο αεροσυμπιεστής (Σχήμα 3.5). Μετά από λίγη ώρα η πίεση στη δεξαμενή θα έχει φτάσει στα επιθυμητά επίπεδα.
9. Στην συνέχεια ενεργοποιείται η συσκευή εκπομπής ακτινοβολίας Laser και το περιστροφικό κάτοπτρο. Ελέγχεται εάν το φύλλο Laser που δημιουργείται ανήκει στο κατακόρυφο επίπεδο και προσπίπτει στον άξονα του ακροφυσίου. Θέλει ιδιαίτερη προσοχή αυτή η διαδικασία για δύο λόγους. Πρώτον για λόγους ασφαλείας, αφού η υψηλή ένταση της ακτινοβολίας μπορεί να είναι επικίνδυνη για τα μάτια και δεύτερον εάν το φύλλο Laser δεν τέμνει το στόμιο στον άξονα του δεν θα φωτίζεται όλη η ροή της φλέβας και επομένως δεν θα προκύψουν σωστά αποτελέσματα.
10. Για ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια στη βιντεοσκόπηση, σε αυτό το σημείο βυθίζεται χάρακας μέσα στη δεξαμενή. Ο χάρακας βυθίζεται δύο φορές, μία εφαπτομενικά στο μπροστινό γυαλί της δεξαμενής και μία φορά ακριβώς πάνω από το στόμιο. Στις δύο αυτές περιπτώσεις υπολογίζεται η κλίμακα της εικόνας, δηλαδή η αναλογία εκατοστό ανά pixel. Αυτή που χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς για την εύρεση της κλίμακας των αποστάσεων είναι της δεύτερης περίπτωσης. Με συνδυασμό όμως των δύο θέσεων που βυθίζεται ο χάρακας μπορεί να βρεθεί η σχέση που

συνδέει την αναλογία cm/pixel μίας βιντεοκάμερας συναρτήσει της απόστασης στο νερό.



Σχήμα 3.17 Θέσεις τοποθέτησης κατακόρυφου χάρακα

11. Ρυθμίζεται η παροχή με την οποία θα διεξαχθεί το πείραμα μέσω του ειδικού παροχόμετρου που βρίσκεται στο πλάι της κύριας δεξαμενής (Σχήμα 3.14).
12. Η βιντεοσκόπηση κάθε πειράματος διαρκεί περίπου δύο με δυόμισι λεπτά και ξεκινάει μόνο όταν η φλέβα έχει αναπτυχθεί πλήρως. Από αυτόν τον χρόνο επιλέγεται καθαρός χρόνος ένα λεπτό βίντεο που θα χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή των δεδομένων.
13. Τέλος σταματάει η βιντεοσκόπηση και ρυθμίζεται η παροχή που θα χρησιμοποιηθεί στο επόμενο πείραμα μέσω ειδικής δικλείδας που βρίσκεται πάνω στο παροχόμετρο.

3.6 ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Στην διπλωματική αυτή εργασία πραγματοποιήθηκαν συνολικά 37 πειράματα με την μέθοδο PLIF. Τα στόμια που επιλέχθηκαν αποτελούνται από δύο κυκλικά με διαμέτρους $D=0.5$ και 1.5 cm και δύο ελλειπτικά με υδραυλικές ακτίνες $R_h=0.32$ και 0.19 cm. Οι παροχές κυμάνθηκαν από 3.72 έως 38.7 cm^3/s ενώ οι αριθμοί Reynolds από 310 έως 8292.

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται ομαδοποιημένα τα αρχικά δεδομένα των πειραμάτων:

Πίνακας 3.2 Αρχικές συνθήκες πειραμάτων για κυκλικό στόμιο με $D=1.50$ cm

Exp.	D(cm)	F(L/min)	Q (cm ³ /s)	U (cm/s)	T(°C)	M (cm ⁴ /s ²)	v (cm ² /s)	Re	l ₀ (cm)
1	1.50	85.00	21.64	12.25	19.70	265.03	0.01011	1816	1.329
2	1.50	105.00	27.15	15.36	19.70	417.17	0.01011	2279	1.329
3	1.50	130.00	34.04	19.26	19.70	655.66	0.01011	2857	1.329
4	1.50	150.00	39.55	22.38	19.70	885.10	0.01011	3319	1.329

Πίνακας 3.3 Αρχικές συνθήκες πειραμάτων για κυκλικό στόμιο με $D=0.50$ cm

Exp.	D(cm)	F(L/min)	Q (cm ³ /s)	U (cm/s)	T(°C)	M (cm ⁴ /s ²)	v (cm ² /s)	Re	l ₀ (cm)
5	0.50	40.00	9.24	47.08	19.70	435.18	0.01011	2327	0.443
6	0.50	61.00	15.03	76.54	19.70	1150.40	0.01011	3784	0.443
7	0.50	82.00	20.81	106.01	19.70	2206.55	0.01011	5240	0.443
8	0.50	102.00	26.32	134.07	19.70	3529.40	0.01011	6628	0.443
9	0.50	126.00	32.94	167.75	19.70	5525.01	0.01011	8292	0.443

Πίνακας 3.4 Αρχικές συνθήκες πειραμάτων για ελλειπτικό στόμιο με $R_h=0.32$ cm

Exp.	R _h (cm)	F(L/min)	Q (cm ³ /s)	U (cm/s)	T(°C)	M (cm ⁴ /s ²)	v (cm ² /s)	Re	l ₀ (cm)
10 & 11	0.32	20.00	3.73	2.44	19.70	9.11	0.01011	310	1.237
12 & 13	0.32	40.00	9.24	6.04	19.70	55.82	0.01011	767	1.237
14 & 15	0.32	60.00	14.75	9.64	19.70	142.20	0.01011	1224	1.237
16 & 17	0.32	80.00	20.26	13.24	19.70	268.24	0.01011	1681	1.237
18 & 19	0.32	100.00	25.77	16.84	19.70	433.95	0.01011	2138	1.237
20 & 21	0.32	120.00	31.28	20.44	19.70	639.32	0.01011	2595	1.237
22 & 23	0.32	140.00	36.79	24.04	19.70	884.36	0.01011	3052	1.237

Πίνακας 3.5 Αρχικές συνθήκες πειραμάτων για ελλειπτικό στόμιο με $R_h=0.19$ cm

α/α	R _h (cm)	F(L/min)	Q (cm ³ /s)	U (cm/s)	T(°C)	M (cm ⁴ /s ²)	v (cm ² /s)	Re	l ₀ (cm)
24 & 25	0.19	20.00	3.73	6.45	19.70	24.09	0.01011	514	0.761
26 & 27	0.19	40.00	9.24	15.97	19.70	147.65	0.01011	1272	0.761
28 & 29	0.19	60.00	14.75	25.49	19.70	376.14	0.01011	2030	0.761
30 & 31	0.19	80.00	20.26	35.02	19.70	709.56	0.01011	2788	0.761
32 & 33	0.19	100.00	25.77	44.54	19.70	1147.90	0.01011	3545	0.761
34	0.19	120.00	31.28	54.06	19.70	1691.16	0.01011	4303	0.761
35	0.19	125.00	32.66	56.44	19.70	1843.37	0.01011	4493	0.761
36	0.19	140.00	36.79	63.58	19.70	2339.35	0.01011	5061	0.761
37	0.19	145.00	38.17	65.96	19.70	2517.80	0.01011	5251	0.761

Πρέπει να σημειωθεί πως για τα ελλειπτικά στόμια έγιναν πειράματα και στους δύο άξονες. Για το στόμιο με $R_h=0.32$ cm για την ίδια παροχή (ίδια ένδειξη F) έγιναν δύο πειράματα κατά μήκος αλλά και εγκάρσια.

Αντίθετα για το ελλειπτικό στόμιο με $R_h=0.19$ cm κοινές είναι οι ενδείξεις F από 20 μέχρι 100 L/min. Τα πειράματα για F=125 και 145 L/min έγιναν με το στόμιο στραμμένο εγκάρσια, δηλαδή με το φύλλο laser να περνάει από τον μικρό άξονα του ακροφυσίου, ενώ τα πειράματα για F=120 και 140 L/min έγιναν με το στόμιο στραμμένο κατά 90° συγκριτικά με την προηγούμενη περίπτωση.

3.7 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ

Νωρίτερα αναφέρθηκε πως ο τυπικός χρόνος βιντεοσκόπησης των πειραμάτων είναι δύο με δυόμιση λεπτά εκ των οποίων χρησιμοποιείται το ένα λεπτό. Αυτό συμβαίνει καθώς για μεγαλύτερους χρόνους, το υγρό της φλέβας συμπαρασύρει υγρό που έχει παροχετευτεί νωρίτερα. Αυτό αλλοιώνει τα χαρακτηριστικά της φλέβας όπως επίσης και τα αποτελέσματα και συνεπώς πρέπει να αποφευχθεί. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι στρόβιλοι ρευστού που έχει παροχετευτεί την στιγμή που υπεισέρχονται στη ροή.



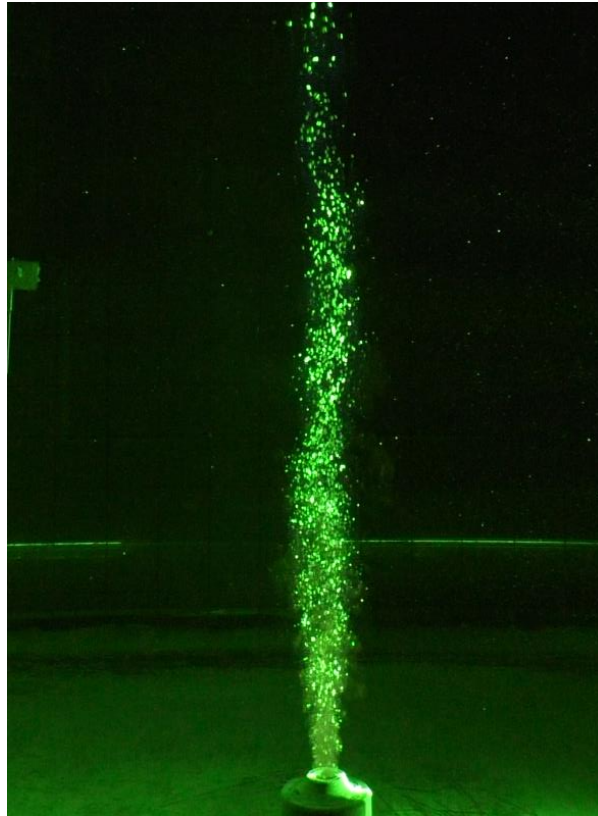
Σχήμα 3.18 Φωτογραφία τη στιγμή που οι στρόβιλοι ρευστού που έχει ήδη παροχετευτεί εισέρχονται στη φλέβα

Στο Σχήμα 3.19 φαίνεται έντονα το φαινόμενο της στρωμάτωσης, δηλαδή η δημιουργία στρώσης ρευστού στην επιφάνεια, η οποία όσο περνάει ο χρόνος θα μεγαλώνει καθ' ύψος. Η στρωμάτωση οδηγεί σε επανασυμπαράσυρση στη φλέβα του ήδη αραιωμένου υγρού οπότε το στάδιο αυτό δεν πρέπει να ληφθεί υπόψη στα αποτελέσματα.



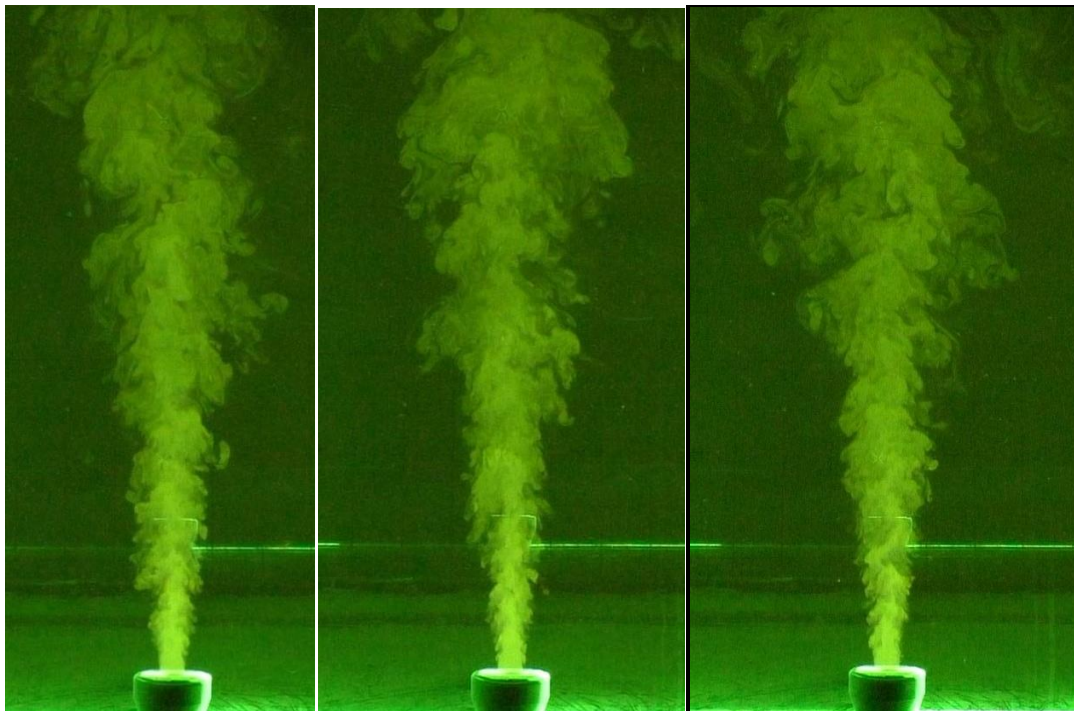
Σχήμα 3.19 Στρωμάτωση του αποδέκτη

Όπως σημειώθηκε και στην Ενότητα 3.6, η βιντεοσκόπηση ξεκινάει αφού η φλέβα έχει αναπτυχθεί πλήρως. Υπάρχει όμως άλλος ένας παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη για να ξεκινήσει το βίντεο. Υπάρχει περίπτωση στην αρχή του πειράματος αλλά και σε κάποια άλλη χρονική στιγμή μαζί με τη φλέβα να εξέλθουν από το στόμιο παροχέτευσης φυσαλίδες αέρα (Σχήμα 3.20). Ο αέρας αυτός προέρχεται από τον αεροσυμπιεστή. Ο αεροσυμπιεστής ορισμένες φορές τίθεται αυτόματα σε λειτουργία για να καλύψει τις απώλειες της πίεσης και επομένως μπορεί να εισέλθει αέρας στην ροή με τη μορφή φυσαλίδων. Ο αέρας αυτός επηρεάζει άμεσα τα χαρακτηριστικά της ροής. Επιπλέον αυξάνεται η φωτεινότητα και μεταβάλλεται η ορμή του ρευστού με αποτέλεσμα να αλλοιώνονται σε πολύ μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα. Κάτι τέτοιο μπορεί να οδηγήσει στη απόρριψη του πειράματος.

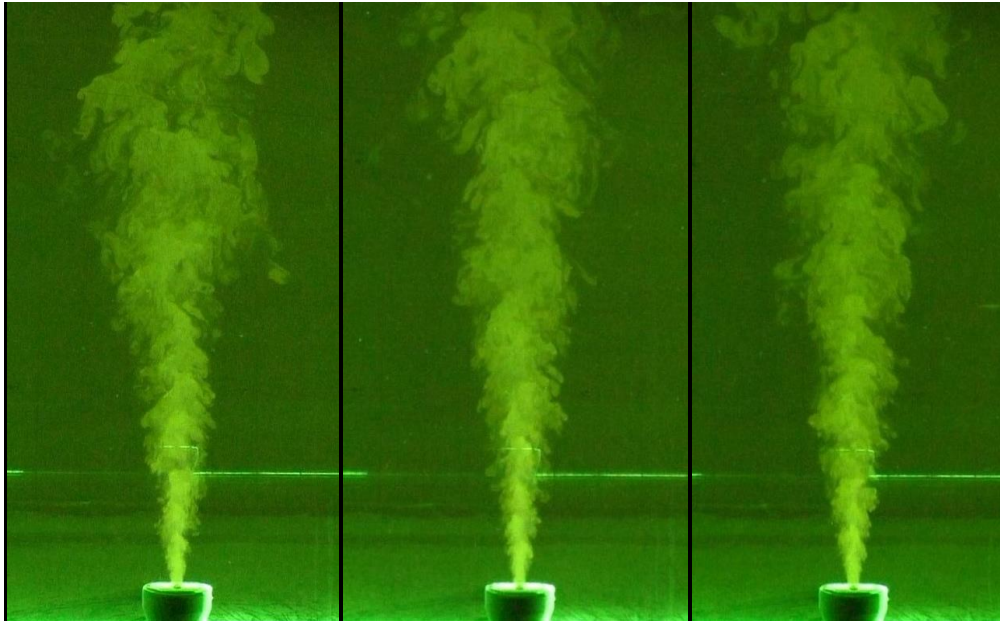


Σχήμα 3.20 Είσοδος φυσαλίδων αέρα στην ροή

Στην συνέχεια φαίνονται κάποιες χαρακτηριστικές εικόνες από τα πειράματα πριν από την επεξεργασία:

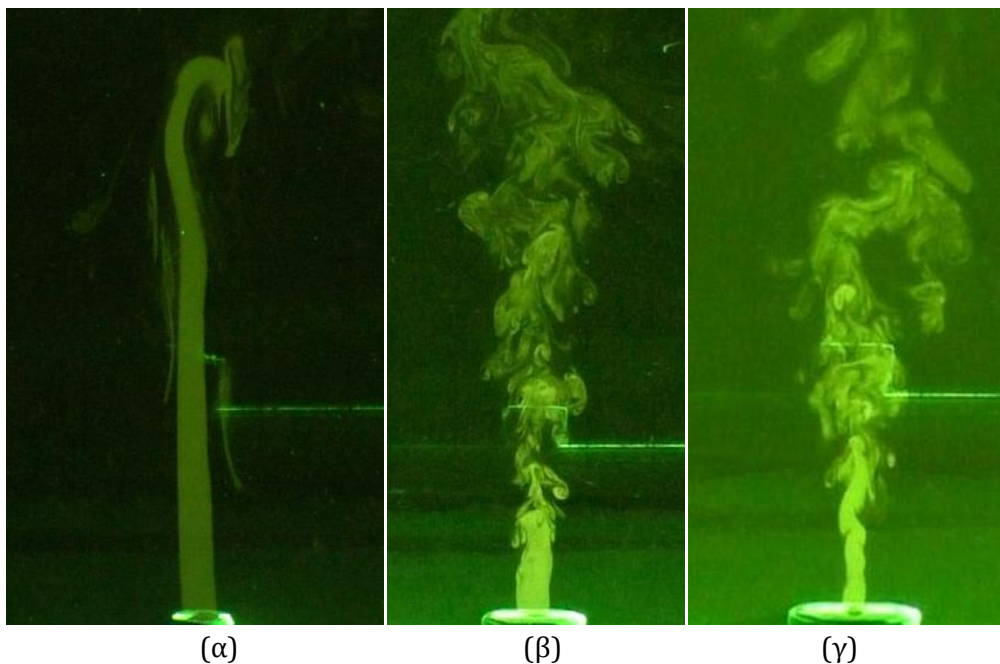


Σχήμα 3.21 Στιγμιότυπα από τη ροή ελλειπτικής φλέβας σε επίπεδο κατά τον κύριο άξονα για $t=109$ s, 139 s και 169 s αντίστοιχα, από αριστερά προς τα δεξιά (EXP20, $Re=2529$, $R_h=0.32$)



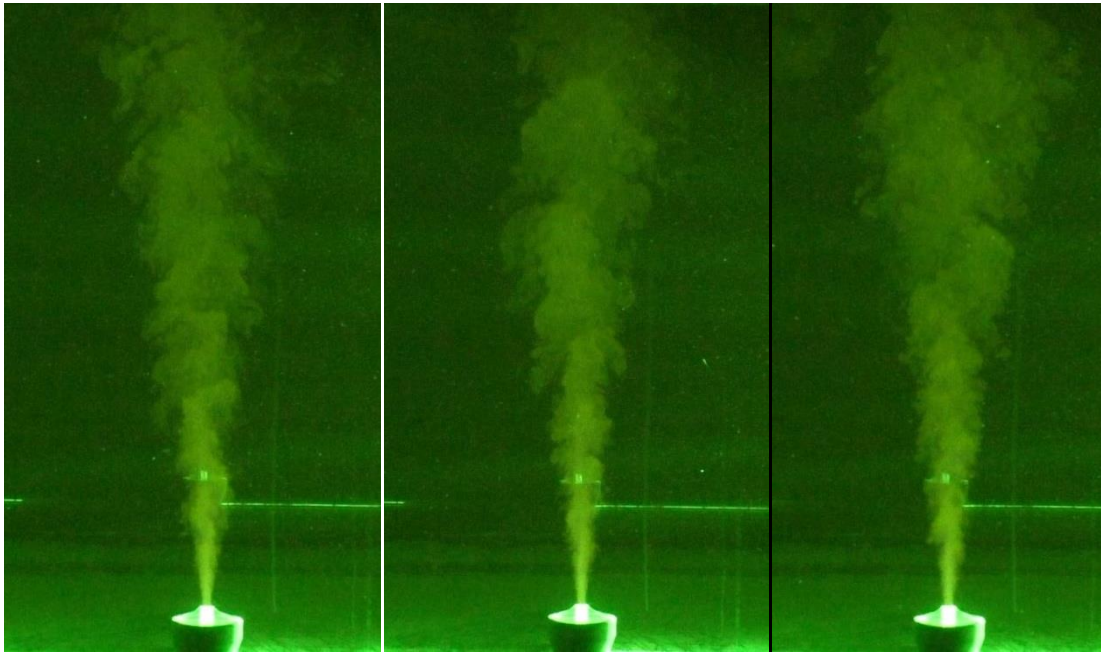
Σχήμα 3.22 Στιγμιότυπα από τη ροή ελλειπτικής φλέβας σε επίπεδο κατά τον δευτερεύοντα άξονα για $t=25$ s, 55 s και 85 s αντίστοιχα, από αριστερά προς τα δεξιά (EXP21, $Re=2529$, $R_h=0.32$)

Στα παραπάνω σχήματα μπορούν να διακριθούν, πέραν από την εξέλιξη των φλεβών στον χρόνο και οι διαφορές, τουλάχιστον στη περιοχή κοντά στην εκροή, κατά τη διεύθυνση των δύο αξόνων του ίδιου ελλειπτικού στομίου για συγκεκριμένη παροχή. Όπως φαίνεται λοιπόν το πλάτος της φλέβας κατά τον μικρό άξονα του στομίου είναι πολύ μικρότερο από ότι κατά τον μεγαλύτερο άξονα.



Σχήμα 3.23 Στιγμιότυπο από τη ροή της φλέβας (α) για κυκλικό στόμιο με $D=1.5$ cm και $Re=198$ (β) για ελλειπτικό στόμιο με $R_h=0.32$ και $Re=310$ κατά τον κύριο άξονα και (γ) για ελλειπτικό στόμιο με $R_h=0.32$ και $Re=310$ κατά τον δευτερεύοντα άξονα.

Στο Σχήμα 3.23, λόγω των πολύ μικρών αριθμών Reynolds, διακρίνονται ξεκάθαρα οι πυρήνες και για τους δύο άξονες του ελλειπτικού στομίου. Όσον αφορά το κυκλικό στόμιο λόγω της μεγάλης διαμέτρου και του πολύ μικρού αριθμού Reynolds η ροή αντί για τυρβώδης είναι στρωτή σε όλο το μήκος της. Εδώ βέβαια πρέπει να σημειωθεί πως τα πειράματα με χαμηλό αριθμό Reynolds έγιναν για οπτικούς λόγους και δεν χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς καθώς η ροή δεν ήταν τυρβώδης.



Σχήμα 3.24 Στιγμιότυπα ροής κυκλικές φλέβας για $t=40$ s, 70 s και 100 s από αριστερά προς τα δεξιά αντίστοιχα (EXP8, $Re=6628$, $D=0.5$ cm)

4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Μετά το πέρας των πειραμάτων, γινόταν μεταφορά των βίντεο σε κατάλληλο προγραμματιστικό περιβάλλον (MatLab) με σκοπό τον χωρισμό των βίντεο σε frames. Στην συνέχεια από τα frames, μέσω συνάρτησης στο MatLab, παράγεται η μέση χρονικά εικόνα των εντάσεων φωτός η οποία εισάγεται σε υπολογιστικά φύλλα excel. Από τη συσχέτιση έντασης φωτός και συγκέντρωσης υπολογίζονται οι κατανομές της μέσης χρονικά συγκέντρωσης καθώς και της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης στο πεδίο ροής της φλέβας συναρτήσει της ακτινικής απόστασης $r(m)$. Συγκεκριμένα οι κατανομές της μέσης χρονικά συγκέντρωσης καθώς και της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης υπολογίστηκαν σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις $z(m)$ από το ακροφύσιο και αδιαστατοποιήθηκαν με τη μέγιστη συγκέντρωση C_M που μετρήθηκε σε αυτές τις αποστάσεις. Επίσης υπολογίστηκε ο λόγος της συγκέντρωσης στον άξονα ως προς την αρχική συγκέντρωση στην πηγή C_M/C_0 συναρτήσει του αδιάστατου μήκους z/l_0 . Έπειτα κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα του πλάτους της φλέβας κατά μήκος του άξονα της.

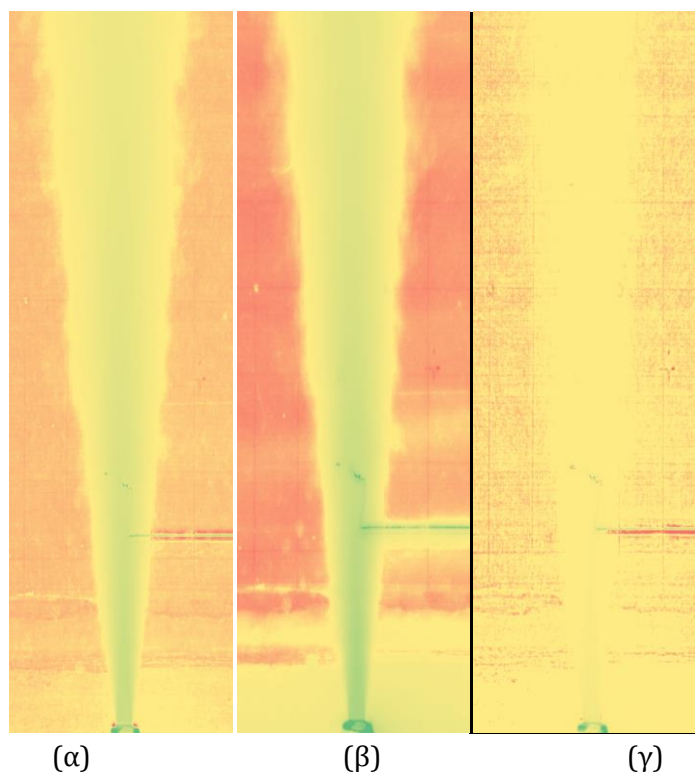
4.2 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΚΑΙ ΦΩΤΕΙΝΟΤΗΤΑΣ

Σκοπός της μεθόδου PLIF είναι ο υπολογισμός των συγκεντρώσεων σε όλο το πεδίο της ροής της φλέβας. Αυτό μπορεί να γίνει μόνο μέσα από το συσχετισμό της φωτεινότητας με την συγκέντρωση. Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα στην Ενότητα 3.3, οι Ferrier et al. (1993) έχουν βρει πως για μικρές συγκεντρώσεις ροδαμίνης, δηλαδή μέχρι $50 \mu\text{g/L}$, η σχέση μεταξύ συγκέντρωσης και έντασης ακτινοβολίας είναι γραμμική. Με δεδομένα την συγκέντρωση στο στόμιο εξόδου ($50 \mu\text{g/L}$) και το πεδίο φωτεινότητων που προέκυψε ύστερα από την επεξεργασία των frames στα υπολογιστικά φύλλα excel γίνεται η βαθμονόμηση.

Το χρωματικό μοντέλο RGB είναι ο τρόπος με τον οποίο πολλές ψηφιακές μηχανές, ψηφιακές κάμερες και φωτογραφικές μηχανές απεικονίζουν τα χρώματα μιας εικόνας. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί τα βασικά χρώματα του κόκκινου, του πράσινου και του μπλε με διαφορετικά ποσοστά και εντάσεις με σκοπό τη δημιουργία σωστών χρωματικών αποχρώσεων για την καλύτερη απεικόνιση φωτογραφιών και βίντεο. Επίσης οι συνιστώσες R, G και B (κόκκινο, πράσινο και μπλε αντίστοιχα) μπορούν να πάρουν τιμές από το 0 μέχρι το 255. Επομένως φαίνεται πως κάθε εικόνα αποτελείται από τρεις υπό-εικόνες, μία για κάθε βασικό χρώμα.

Στη διδακτορική του διατριβή, ο Dimitriadis (2017) αναφέρει πως η χρήση της κόκκινης υπό-εικόνας ενδείκνυται έναντι των άλλων υπό-εικόνων ή ακόμα και της συνολικής εικόνας για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης της ροδαμίνης 6G. Όπως προαναφέρθηκε στην Ενότητα 3.3 η ροδαμίνη 6G διεγείρεται με ακτινοβολία μήκους κύματος 532 nm, δηλαδή πράσινου χρώματος και εκπέμπει ακτινοβολία μήκους κύματος 556 nm, δηλαδή κίτρινου χρώματος. Το κίτρινο χρώμα αποτελείται από τα δύο βασικά χρώματα, το κόκκινο και το πράσινο, επομένως οι συνιστώσες αυτές είναι εκείνες που θα κυριαρχούν έναντι της μπλε. Παρόλο που η ένταση του πράσινου χρώματος είναι αρκετά πιο ισχυρή από ότι αυτή του κόκκινου, χρησιμοποιείται η κόκκινη συνιστώσα καθώς εξασφαλίζει πολύ καλύτερη μείωση των αντανάκλασεων. Αυτό βρέθηκε μετά από σύγκριση των υπό-εικόνων, αφού κατασκευάστηκαν και οι τρεις σε περιβάλλον MatLab και οπτικοποιήθηκαν σε περιβάλλον excel (Dimitriadis 2017).

Οι υπό-εικόνες αυτές δημιουργήθηκαν και για την χρονικά μέση τιμή της συγκέντρωσης και για την ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης (αδιάστατη RMS συγκέντρωση). Η κάμερα που χρησιμοποιήθηκε βιντεοσκοπεί με 50 fps και αφού ο χρόνος της βιντεοσκόπησης κάθε πειράματος είναι ένα λεπτό, οι υπό-εικόνες δημιουργήθηκαν με τη χρήση 3000 frames. Η χρήση περισσότερων θα οδηγούσε σε πιο ακριβή αποτελέσματα όμως θα αύξανε τον υπολογιστικό φόρτο σε πολύ υψηλά επίπεδα κάτι που έπρεπε να αποφευχθεί. Παρόλα αυτά τα 3000 frames κρίνονται απολύτως ικανοποιητικά.



Σχήμα 4.1 Υπό-εικόνες της μέσης συγκέντρωσης με βάση την ένταση φωτός για το (α) κόκκινο, (β) πράσινο και (γ) μπλε χρώμα (EXP2, D=1.5 cm και Re=2279)

4.3 ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΚΑΙ ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ

Θεωρώντας πως σε ένα συγκεκριμένο σημείο λαμβάνονται N τιμές της στιγμιαίας συγκέντρωσης c_i του υγρού της φλέβας τότε ισχύει (Παπακωνσταντής 2009):

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

όπου \bar{c} είναι η μέση χρονικά συγκέντρωση και c'_i η τυρβώδης διακύμανση της συγκέντρωσης της φλέβας. Η μέση χρονικά συγκέντρωση ορίζεται ως η αριθμητική μέση τιμή των στιγμιαίων τιμών c_i για πλήθος τιμών N . Αναλυτικά:

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

Ως RMS (Root Mean Square) τιμή των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης ορίζεται η τετραγωνική ρίζα της μέσης χρονικά τιμής των τετραγώνων των διακυμάνσεων της συγκέντρωσης. Η τιμή αυτή περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

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

Όπως αναφέρθηκε και στις Ενότητες 3.2.3 και 3.6, στην κύρια δεξαμενή (αποδέκτη) προστίθεται μία μικρή ποσότητα ροδαμίνης, η οποία αναμιγνύεται με τον μεταλλικό αναδευτήρα του Σχήματος 3.6 για να απλωθεί ομοιόμορφα σε όλο το πεδίο, με σκοπό την απορρόφηση των αντανάκλασεων. Αυτή η μικρή ποσότητα ορίζεται ως συγκέντρωση αποδέκτη c_a και πρέπει να αφαιρεθεί από τη συγκέντρωση για να βρεθεί η καθαρή μέση χρονικά συγκέντρωση σε οποιοδήποτε σημείο. Επομένως οι σχέσεις 4.2 και 4.3 γίνονται:

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

$$\sqrt{c'^2} = \sqrt{(c - c_a)^2} = c_{RMS} \quad (4.5)$$

όπου c_a είναι η συγκέντρωση αποδέκτη (ambient) λόγω της προϋπάρχουσας ποσότητας ροδαμίνης στον αποδέκτη. Σημειώνεται ότι πρακτικά είναι αδύνατον να είναι τελείως ακίνητος ο αποδέκτης και σε συνδυασμό με τον θόρυβο της μεθόδου προϋπήρχε μια πολύ μικρή RMS συγκέντρωση στον αποδέκτη.

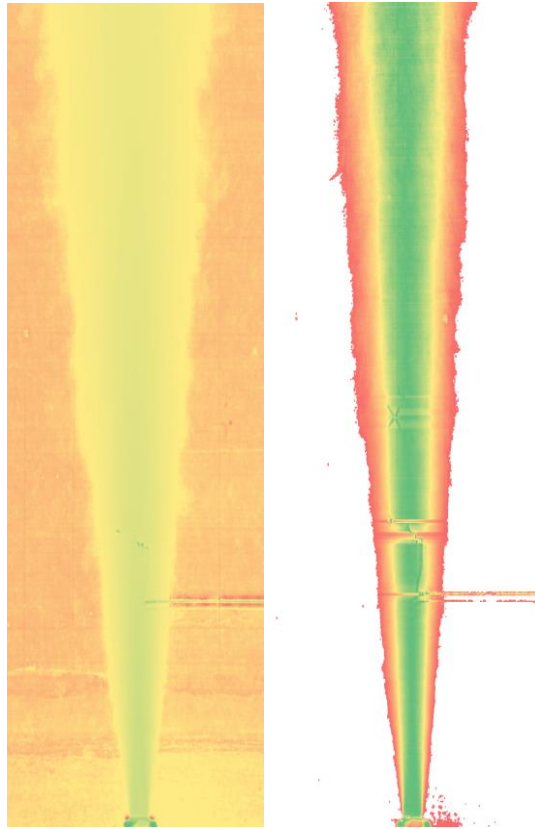
Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας διερευνήθηκε το κατά πόσο αυξάνεται η συγκέντρωση αποδέκτη c_a κατά την διάρκεια των πειραμάτων. Η

ποσότητα της ροδαμίνης που εισήχθηκε στον αποδέκτη στην αρχή του πειράματος είναι 0.28 mL με αποτέλεσμα να προκύψει διάλυμα με συγκέντρωση 0.5 $\mu\text{g/L}$. Οι υπολογισμοί έγιναν για τα πειράματα του κυκλικού στομίου με $D=1.5\text{ cm}$ και φαίνονται στον Πίνακα 4.1. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως υπάρχει μία αύξηση της συγκέντρωσης της τάξης του 1 $\mu\text{g/L}$, το οποίο πρακτικά είναι ακόμα μικρότερο καθώς λόγω της ορμής, αρκετή από αυτή την ποσότητα της ροδαμίνης ανέρχεται στη επιφάνεια και υπερχειλίζει. Συνεπώς δεν θεωρείται σημαντική αυτή η αύξηση και η τιμή του ambient c_a παραμένει σταθερή στους υπολογισμούς. Παρόλα αυτά σε περίπτωση διεξαγωγής περισσότερων διαδοχικών πειραμάτων η συγκέντρωση του αποδέκτη θα είναι ακόμα μεγαλύτερη και επομένως παραπάνω διερεύνηση της τιμής c_a ίσως είναι απαραίτητη.

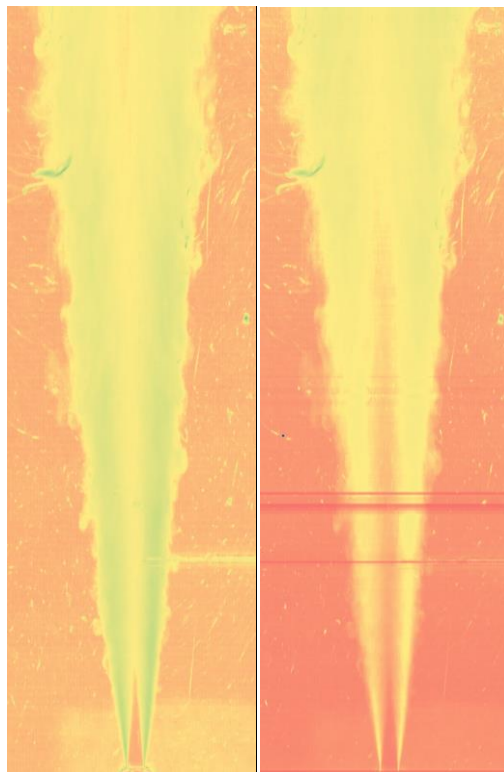
Πίνακας 4.1 Υπολογισμοί σχετικά με την αύξηση του διαλύματος της ροδαμίνης του αποδέκτη

EXP	Ενδείξεις F (L/h)	Q (cm^3/s)	Χρόνος (sec)	Όγκος Νερού(L)	Συνολικός Όγκος Νερού (L)	Ροδαμίνη (mg)	Τελική Συγκέντρωση ($\mu\text{g/L}$)
1	85	21.6413	100	2.16413	12.23802	0.611901	1.592680357
2	105	27.1513	100	2.71513			
3	130	34.0388	100	3.40388			
4	150	39.5488	100	3.95488			

Η αφαίρεση των τιμών c_a γίνεται τόσο στις μέσες όσο και στις RMS συγκεντρώσεις σε όλο το φάσμα της φλέβας και πραγματοποιείται σε περιβάλλον excel. Στην συνέχεια οι καινούριες συγκεντρώσεις που προέκυψαν διαιρέθηκαν με τη μέγιστη μέση συγκέντρωση στον άξονα με σκοπό την αδιαστατοποίησή τους. Έτσι προέκυψαν οι λόγοι C/C_M και C_{RMS}/C_M , οι οποίοι οπτικοποιούνται στα παρακάτω σχήματα.



Σχήμα 4.2 Απεικόνιση της μέσης συγκέντρωσης πριν και μετά την επεξεργασία για το πείραμα EXP2 (Κυκλικό στόμιο διαμέτρου $D=1.5\text{ cm}$ και $Re=2279$)



Σχήμα 4.3 Απεικόνιση της RMS συγκέντρωσης πριν και μετά την επεξεργασία για το πείραμα EXP2 (Κυκλικό στόμιο διαμέτρου $D=1.5\text{ cm}$ και $Re=2279$)

Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται η τυπική μορφή της ροής για την μέση τιμή της συγκέντρωσης πριν και ύστερα από την επεξεργασία. Κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας αφαιρέθηκε η συγκέντρωση του αποδέκτη από τη συγκέντρωση σε όλο το πλάτος και το μήκος της φλέβας και στη συνέχεια αδιαστατοποιήθηκε κατάλληλα με τη μέγιστη συγκέντρωση. Η μέγιστη συγκέντρωση όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα εντοπίζεται στον άξονα της φλέβας.

Στο Σχήμα 4.3 φαίνεται αντίστοιχα η μεταβολή της RMS συγκέντρωσης της ροής πριν και ύστερα από την επεξεργασία. Η στρατηγική που ακολουθήθηκε είναι η ίδια όπως την προηγούμενη περίπτωση. Επίσης πρέπει να σημειωθεί πως στις απεικονίσεις της RMS συγκέντρωσης διακρίνεται ξεκάθαρα και με πολύ καλή ευκρίνεια η κωνική μορφή του πυρήνα της φλέβας.

Στα παραπάνω σχήματα διακρίνονται ορισμένα σημεία στα οποία υπάρχουν παράλληλες γραμμές με διαφορετικό χρώμα από αυτό που θα περίμενε κανείς. Αυτές οι περιοχές είναι προβληματικές και η ύπαρξη τους οφείλεται στις αντανakλάσεις της ακτίνας Laser. Οι περιοχές αυτές λοιπόν δεν πρέπει να ληφθούν υπόψη στους υπολογισμούς καθώς θα προκύψουν εσφαλμένα αποτελέσματα. Για αυτό τον λόγο αγνοήθηκαν κατά την επεξεργασία και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

4.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΥΚΛΙΚΩΝ ΦΛΕΒΩΝ

Στις παρακάτω ενότητες παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το πείραμα EXP2, δηλαδή για κυκλικό στόμιο διαμέτρου $D=1.5$ cm και $Re=2279$, μέσω αδιάστατων κυρίως διαγραμμάτων. Οποιαδήποτε αυξομείωση των διαγραμμάτων οφείλεται σε αντανakλάσεις από την ακτίνα Laser ή από στίγματα που εμφανίζονται στο τζάμι.

4.4.1 ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ

Αρχικά μορφώθηκαν δύο διαγράμματα των κατανομών των συγκεντρώσεων, ένα στη ζώνη ανάπτυξης ροής και ένα στη ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής. Οι συγκεντρώσεις αδιαστατοποιήθηκαν ως προς την μέγιστη συγκέντρωση C_m , η οποία εντοπίζεται στον άξονα και παρίσταται γραφικά συναρτήσεως της ακτινικής απόστασης r διαιρεμένη με την κατακόρυφη απόσταση από το ακροφύσιο z . Έχοντας ως δεδομένα λοιπόν τις τιμές των συγκεντρώσεων που προέκυψαν μετά την επεξεργασία προέκυψαν οι κατανομές που παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.4 και 4.5. Στο Σχήμα 4.5 μάλιστα προστέθηκε και η κατανομή Gauss για λόγους σύγκρισης με την αναμενόμενη θεωρητικά μορφή.

Υπενθυμίζεται πως η εξίσωση που περιγράφει την κατανομή Gauss προκύπτει εύκολα από τη σχέση (2.8) και είναι η εξής:

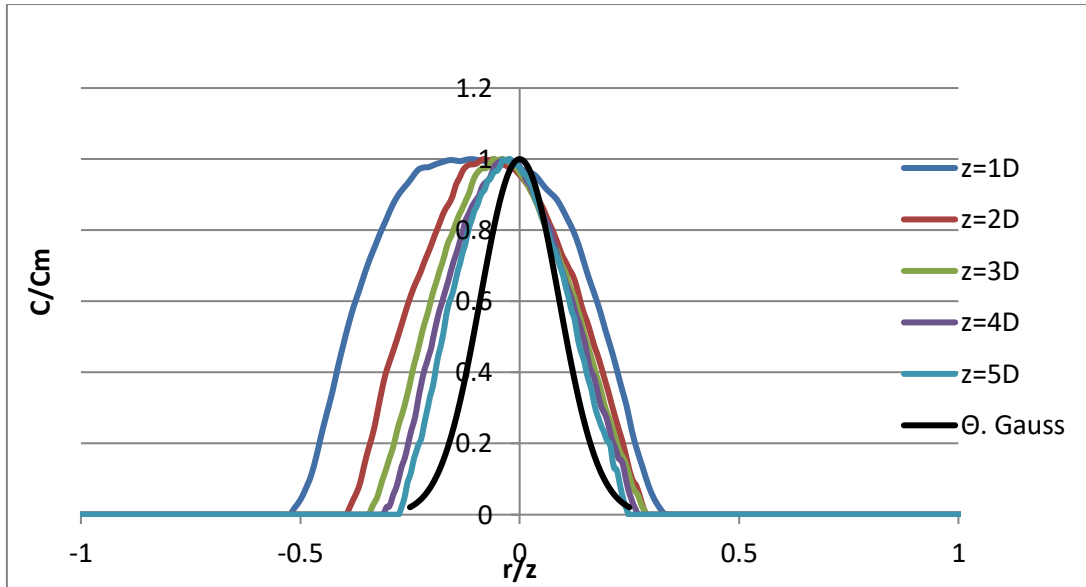
$$\frac{C}{C_M} = e^{-\left(\frac{r}{b_c}\right)^2} \quad (4.6)$$

Η παραπάνω σχέση, χρησιμοποιώντας ως δεδομένο τον συντελεστή 0.126 που έχει δοθεί από τον Papanicolaou (1984) για την μεταβολή του πλάτους συγκέντρωσης b_c συναρτήσει της κατακόρυφης απόστασης z , γίνεται:

$$\frac{C}{C_M} = e^{-\left(\frac{r}{b_c}\right)^2} = e^{-\left(\frac{r}{0,126 \cdot z}\right)^2} = e^{-\left(\frac{r/z}{0,126}\right)^2} \quad (4.7)$$

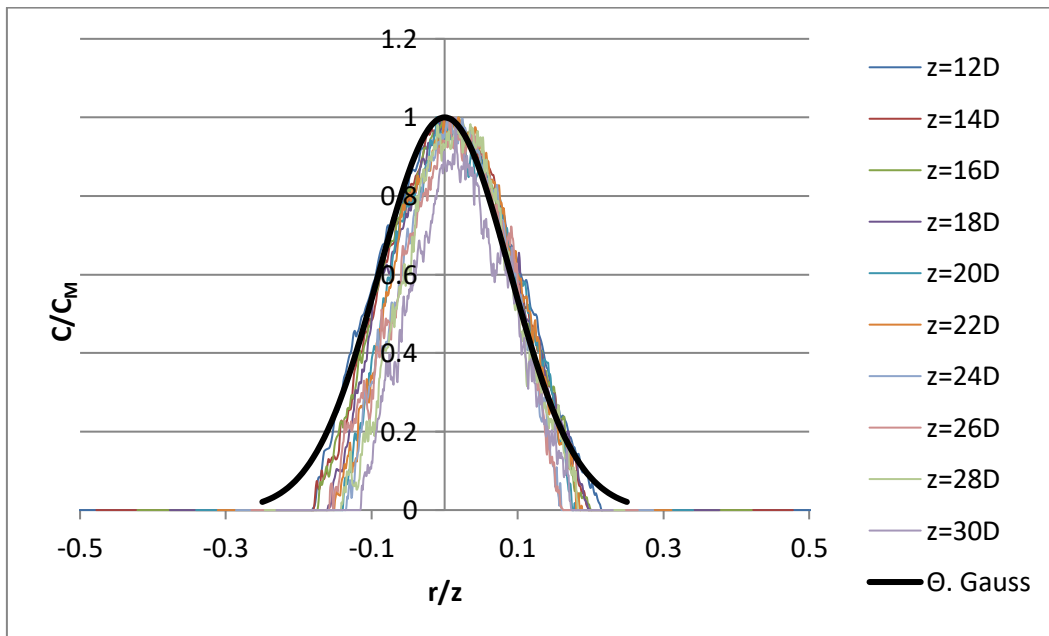
Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι κατανομές στη ζώνη ανάπτυξης της ροής σε 5 διαφορετικές αποστάσεις από την εκροή. Οι κατανομές αυτές παρουσιάζουν ένα εύρος με ομοιόμορφη συγκέντρωση που μειώνεται καθώς απομακρυνόμαστε από την εκροή. Βέβαια παρατηρείται μία ελαφριά τάση των σειρών του διαγράμματος προς τα αριστερά η οποία μπορεί να οφείλεται σε απομείωση της ισχύος της ακτινοβολίας καθώς αυτή διέρχεται μέσα από τη φλέβα. Επιπλέον φαίνεται πως κοντά στο ακροφύσιο οι κατανομές των συγκεντρώσεων δεν ακολουθούν την κατανομή Gauss, καθώς η ροή αρχικά μπορεί να είναι στρωτή. Για μεγαλύτερους αριθμούς Reynolds η ροή γίνεται πιο γρήγορα τυρβώδης και άρα οι κατανομές των συγκεντρώσεων ξεκινούν να ακολουθούν την κατανομή Gauss σε μικρότερες αποστάσεις από το στόμιο εξόδου.

Κατά την είσοδο των ακτινών Laser εντός δεξαμενής με νερό συναντάται πολύ μεγαλύτερη απομείωση ενέργειας σε σχέση με αυτή που συναντάται στον αέρα (Ferrier et al. 1993). Συνεπώς μία τόσο μικρή απόκλιση από τις αναμενόμενες θεωρητικές τιμές είναι δικαιολογημένη. Βέβαια, όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, κάτι τέτοιο θα μπορούσε να οφείλεται και στις αντανάκλασεις από το φύλλο Laser καθώς επίσης και από άλλους παράγοντες, όπως η μη τέλεια ηρεμία του ομογενούς ρευστού στον αποδέκτη.



Σχήμα 4.4 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 5 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη ανάπτυξης της ροής για το πείραμα EXP2

Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζονται 10 κατανομές της μέσης συγκέντρωσης στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής. Όπως φαίνεται οι κατανομές αυτές ακολουθούν σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό την κατανομή Gauss. Επιβεβαιώνεται λοιπόν η θεωρία και αποδεικνύεται για ακόμα μία φορά πως οι κατανομές των συγκεντρώσεων παρουσιάζουν αυτομοιότητα (self-similarity) (Papanicolaou & List 1988).



Σχήμα 4.5 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 10 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP2

Όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.4 και 4.5 οι τιμές των κατανομών δεν υπερβαίνουν την τιμή ένα. Αυτό είναι απόλυτα λογικό καθώς η μέγιστη τιμή της αδιαστατοποιημένης συγκέντρωσης συναντάται στον άξονα. Συνεπώς γίνεται της μορφής C_M/C_M και ισούται με ένα. Επίσης, παρόλο που φαίνεται ξεκάθαρα πως οι κατανομές ακολουθούν την θεωρητική Gauss, παρατηρείται πως σε μεγαλύτερες αποστάσεις οι κατανομές εκτείνονται σε μικρότερο εύρος r/z , δηλαδή συγκλίνουν προς το μηδέν.

4.4.2 ΠΛΑΤΟΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ

Έχοντας λοιπόν ως δεδομένο πως οι κατανομές της μέσης χρονικά συγκέντρωσης ακολουθούν τη κατανομή Gauss μπορεί να προσδιοριστεί το πλάτος συγκέντρωσης της φλέβας b_c . Υπενθυμίζεται πως το πλάτος b_c είναι η τιμή του r όπου η συγκέντρωση γίνεται $e^{-1} \cdot C_M$.

Λογαριθμίζοντας την σχέση 4.6 προκύπτει η παρακάτω:

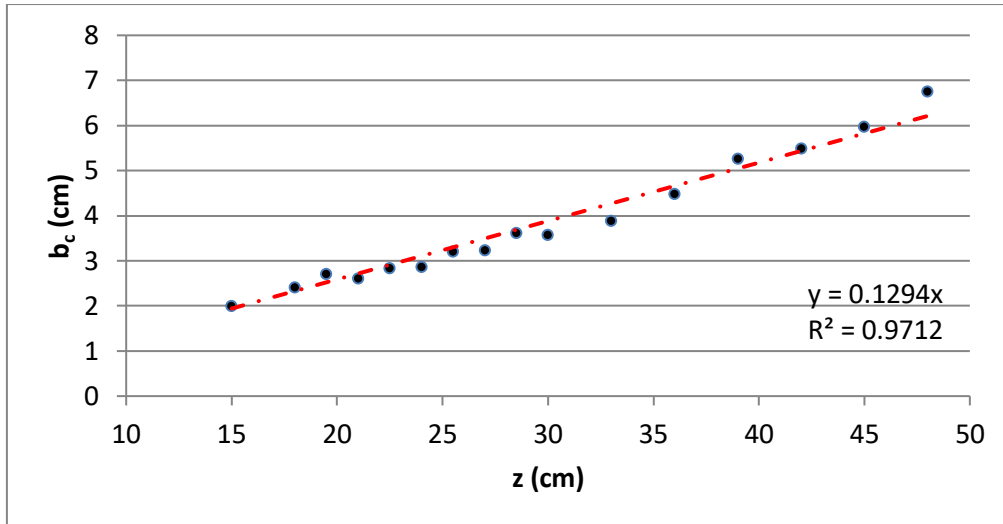
$$\ln\left(\frac{C}{C_M}\right) = -\left(\frac{r}{b_c}\right)^2 = -\frac{1}{b_c^2} \cdot r^2 \quad (4.8)$$

Η παραπάνω εξίσωση είναι της μορφής $y = \alpha \cdot x$, όπου το y είναι το $\ln\left(\frac{C}{C_M}\right)$, το x είναι το r^2 και το α το $-\frac{1}{b_c^2}$. Συνεπώς το πλάτος συγκέντρωσης b_c μπορεί να οριστεί ως:

$$b_c = \sqrt{\frac{-1}{\alpha}} \quad (4.9)$$

Δηλαδή για τον προσδιορισμό του πλάτους b_c πραγματοποιείται γραμμική συσχέτιση του πρώτου μέλους της εξίσωσης 4.8 και των τιμών r^2 (οι ακτινικές αποστάσεις υψωμένες στο τετράγωνο). Χρησιμοποιώντας την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων προσδιορίζεται η ποσότητα $-b_c^2$ και στη συνέχεια το πλάτος b_c . Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται για όλα τα πειράματα με σκοπό την εξαγωγή γενικών συμπερασμάτων.

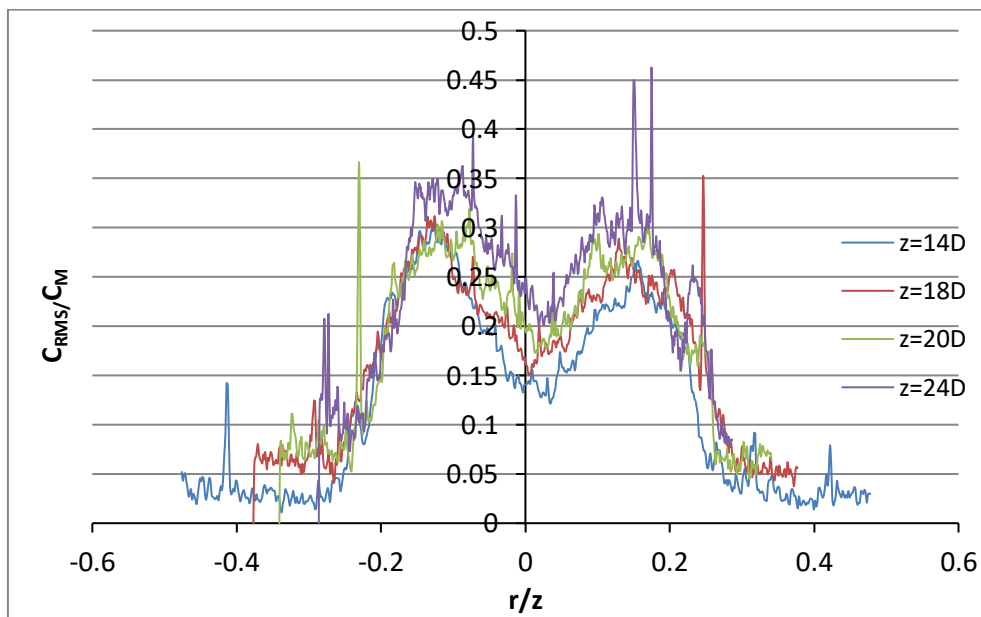
Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η μεταβολή του πλάτους b_c της κατανομής της συγκέντρωσης για το πείραμα EXP2. Πρέπει να σημειωθεί πως η γραμμική σχέση που συνδέει το b_c με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή z ισχύει μόνο για την ζώνη ανεπτυγμένης ροής. Για αυτόν τον λόγο επιλέχθηκαν αποστάσεις z οι οποίες ικανοποιούν αυτό το κριτήριο.



Σχήμα 4.6 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP2 ($D=1.5$ cm)

4.4.3 ΈΝΤΑΣΗ ΤΗΣ ΤΥΡΒΗΣ

Όσον αφορά την συγκέντρωση RMS πραγματοποιείται η διαδικασία που περιγράφηκε στην Ενότητα 4.3. Γίνεται αδιαστατοποίηση της με την μέγιστη μέση συγκέντρωση στον άξονα C_M καθώς επίσης και αδιαστατοποίηση της ακτινικής απόστασης r με την κατακόρυφη απόσταση z . Έτσι μορφώνονται σε διαγράμματα ο λόγος C_{RMS}/C_M συναρτήσει του r/z . Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται οι κατανομές της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε τέσσερις διαφορετικές αποστάσεις από το ακροφύσιο για το πείραμα EXP2.

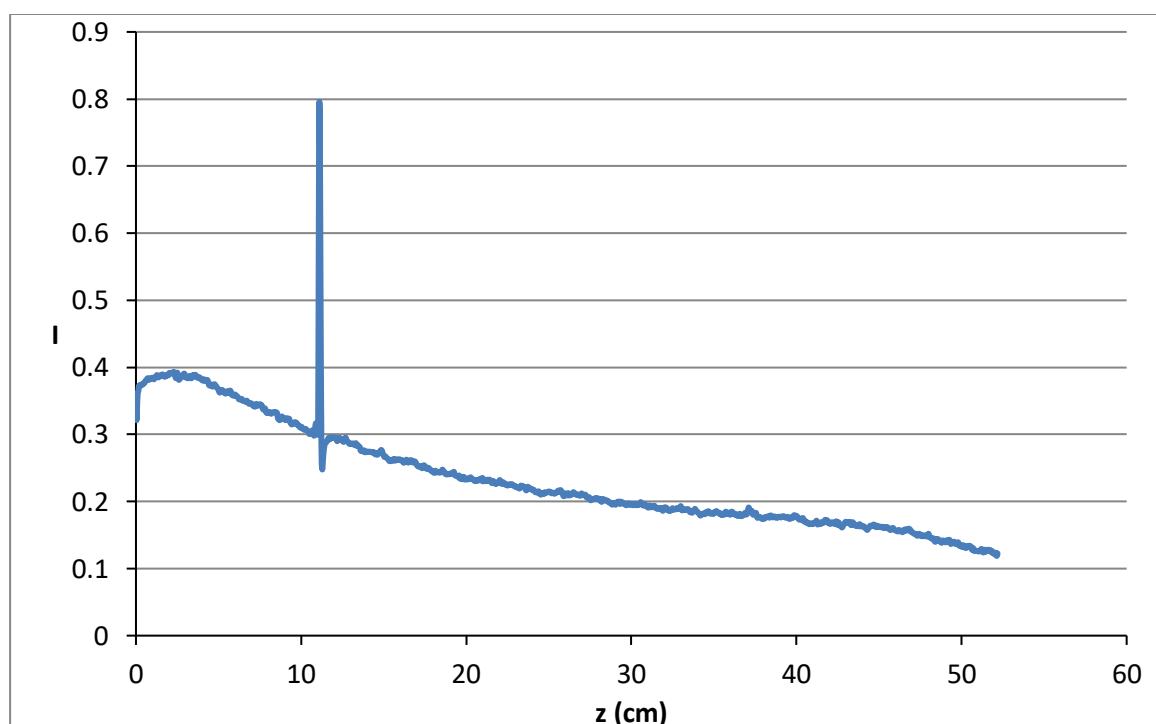


Σχήμα 4.7 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 4 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP2

Στο παραπάνω σχήμα δεν παρατηρείται η μέγιστη τιμή στον άξονα όπως στις κατανομές της μέσης συγκέντρωσης. Αντίθετα παρατηρείται πως στις κατανομές της RMS συγκέντρωσης υπάρχουν δύο τοπικά μέγιστα εκατέρωθεν του άξονα. Ιδανικά θα έπρεπε τα τοπικά αυτά μέγιστα να είναι ίσα μεταξύ τους και επομένως ολικά.

4.4.4 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ

Η τιμή της C_0 προκύπτει ως η μέγιστη φωτεινότητα που εντοπίζεται στον άξονα της φλέβας. Συνεπώς για την εύρεση της έπρεπε αρχικά να προσδιοριστεί ο άξονας της φλέβας και στη συνέχεια να μορφωθεί το διάγραμμα της έντασης της φωτεινότητας I με την κατακόρυφη απόσταση z . Η τιμή της C_0 αντιστοιχεί στο ολικό μέγιστο της κατανομής. Βέβαια πρέπει να σημειωθεί πως η πραγματική τιμή της C_0 είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από το ολικό μέγιστο. Αυτό συμβαίνει λόγω των απορροφήσεων της ενέργειας της ακτίνας Laser.

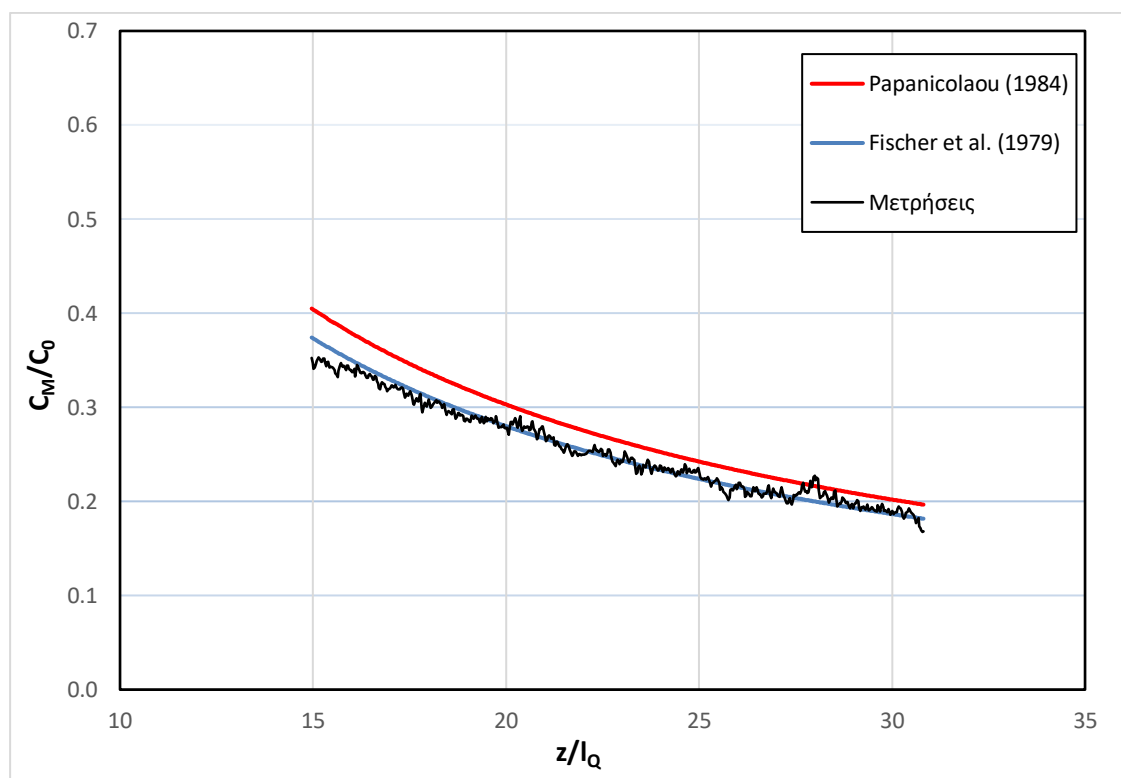


Σχήμα 4.8 Μεταβολή της αδιάστατης έντασης φωτεινότητας κατά μήκος του άξονα για το πείραμα EXP2

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, η φωτεινότητα αυξάνεται αρχικά μέχρι το ολικό μέγιστο, το οποίο στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι 0.39 και στη συνέχεια μειώνεται σε όλο το μήκος της φλέβας. Παρατηρείται επίσης πως σε κάποιο σημείο υφίσταται μία πολύ απότομη αύξηση της φωτεινότητας. Η τιμή αυτή δεν θεωρείται το ολικό μέγιστο παρόλο που είναι η μεγαλύτερη τιμή που συναντάται. Αυτό συμβαίνει διότι η τιμή αυτή δεν αντιστοιχεί σε φωτεινότητα

από τον φθορισμό της ουσίας, αλλά από αντανάκλασεις και επομένως παραλείπεται.

Η μέγιστη συγκέντρωση στον άξονα C_M αδιαστατοποιείται με την αρχική συγκέντρωση C_0 και παρίσταται γραφικά συναρτήσει της αδιάστατης κατακόρυφης απόστασης από το ακροφύσιο z/l_0 . Στο Σχήμα 4.9 παρουσιάζεται η κατανομή της μέγιστης συγκέντρωσης στον άξονα, μετά την αφαίρεση της συγκέντρωσης του αποδέκτη. Παράλληλα παρουσιάζονται και οι κατανομές από τα αποτελέσματα των Papanicolaou (1984) και Fischer et al. (1979) με σκοπό την σύγκριση τους.

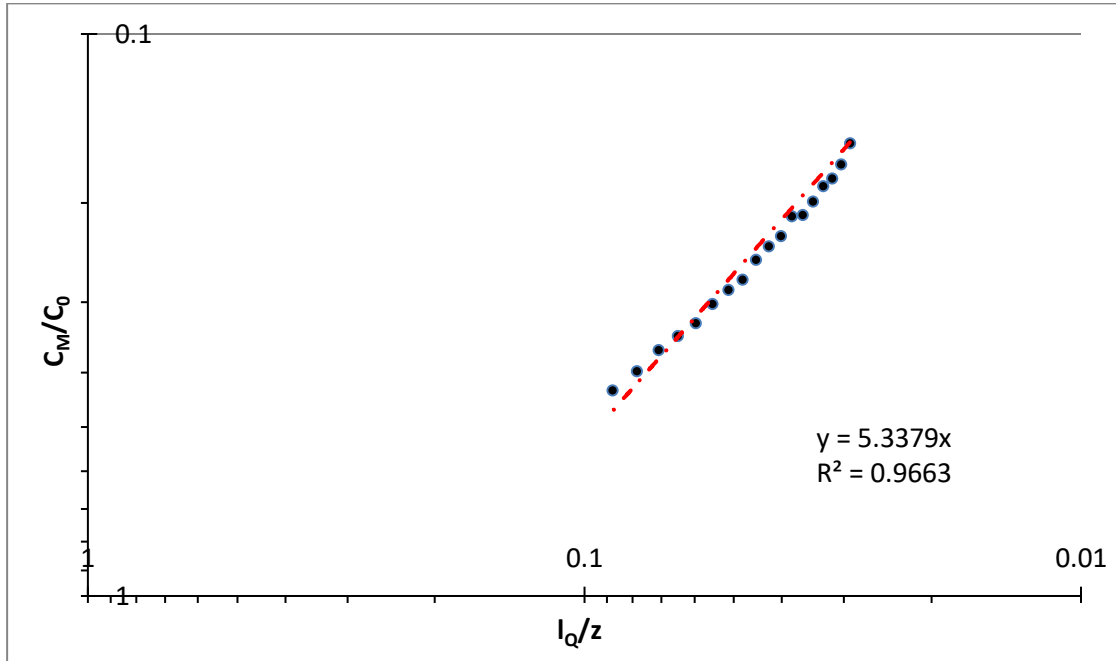


Σχήμα 4.9 Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή μετά την βαθμονόμηση για το πείραμα EXP2

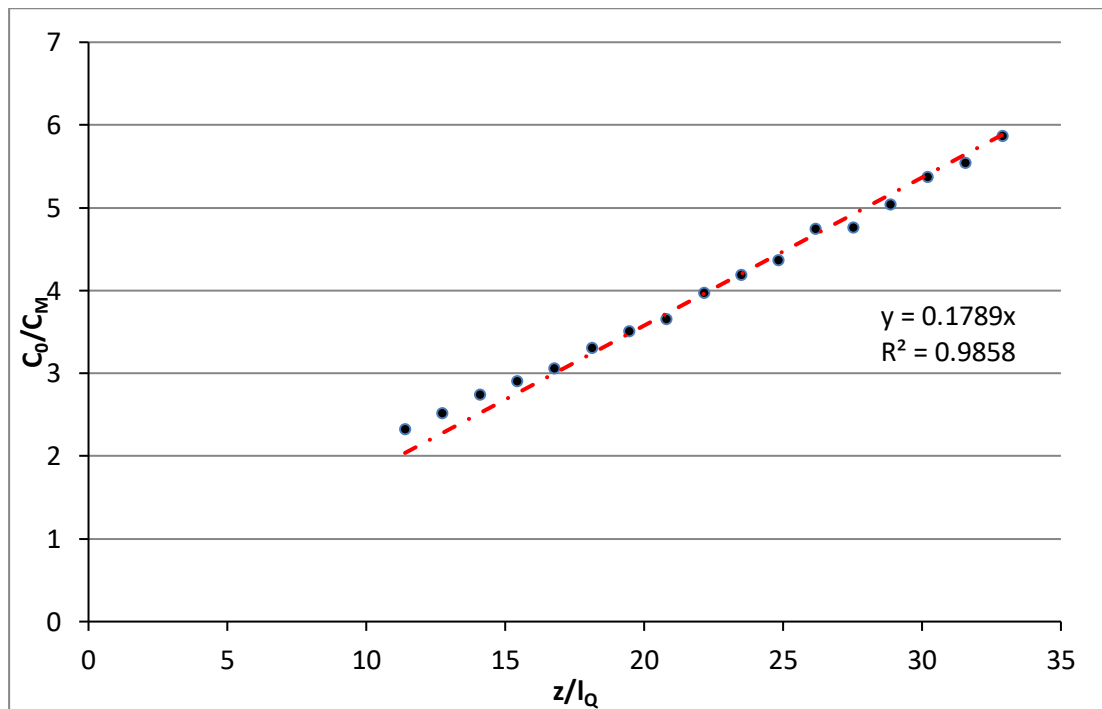
Τα αποτελέσματα του πειράματος φαίνεται να ταιριάζουν πολύ καλά με τα προϋπάρχοντα αποτελέσματα. Αυτό δείχνει πως η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε με επιτυχία και πως οι μετρήσεις που έγιναν είναι αξιόπιστες. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιήθηκε για όλα τα πειράματα με σκοπό τον έλεγχο των μετρήσεων.

Στα Σχήματα 4.10 και 4.11 παρουσιάζονται η μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης στον άξονα C_M αδιαστατοποιημένη με την αρχική συγκέντρωση στην εκροή και το αντίστροφο της συναρτήσει των αδιάστατων αποστάσεων l_0/z και z/l_0 αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν επιβεβαιώνουν την θεωρία και αποδεικνύουν πως η μέγιστη συγκέντρωση στον άξονα της φλέβας αυξάνεται γραμμικά όσο αυξάνεται ο λόγος l_0/z . Η σταθερά που προέκυψε από

τις μετρήσεις για τη μέγιστη συγκέντρωση είναι 5.34 και προσεγγίζει σταθερές από παλαιότερες έρευνες (Πίνακας 2.1). Πρέπει να σημειωθεί πως ο λόγος C_0/C_M εκφράζει την ελάχιστη αραιώση που συμβολίζεται με S και αυξάνεται με την αδιάστατη απόσταση z/l_0 .



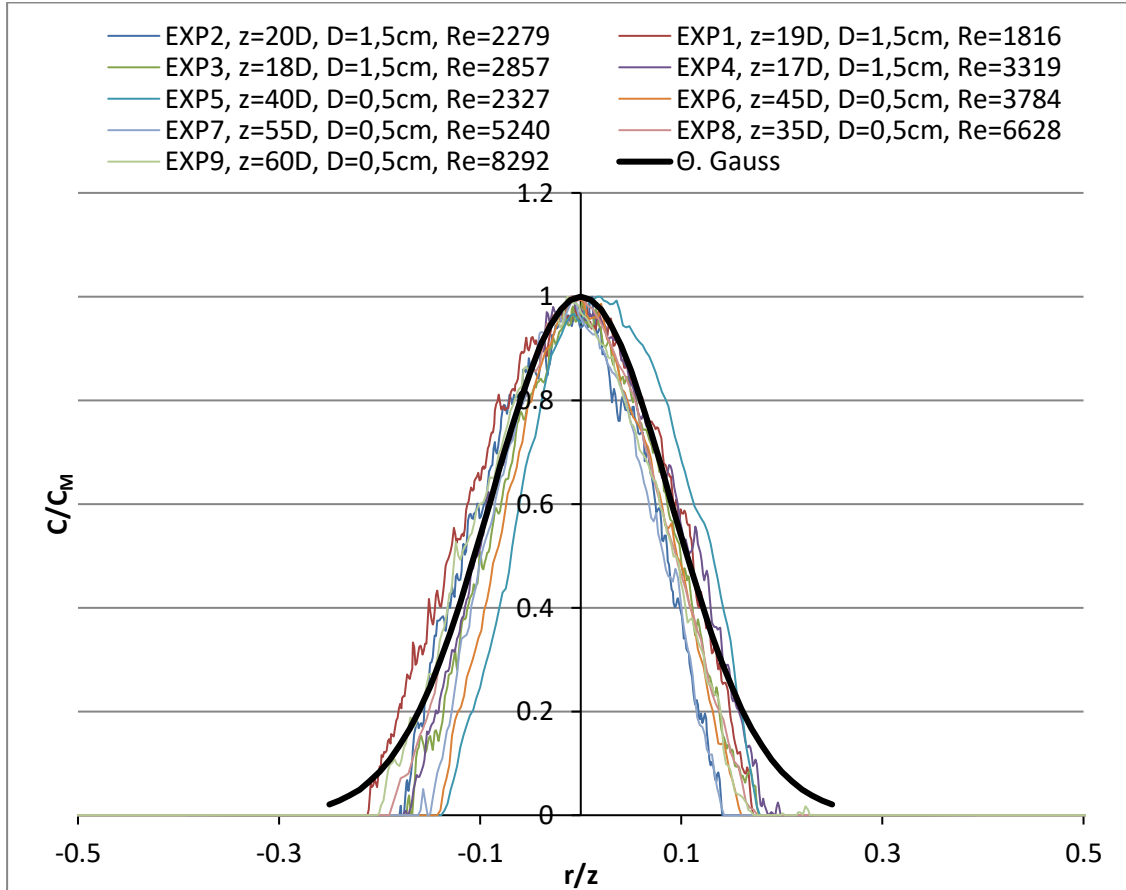
Σχήμα 4.10 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP2



Σχήμα 4.11 Μεταβολή της ελάχιστης αραιώσης S με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP2

4.4.5 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΥΚΛΙΚΩΝ ΦΛΕΒΩΝ

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το σύνολο των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν για τις φλέβες που παροχετεύονται από κυκλικά στόμια. Οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν σχετικά με τις αδιαστατοποιήσεις είναι οι ίδιες με τις προηγούμενες ενότητες.

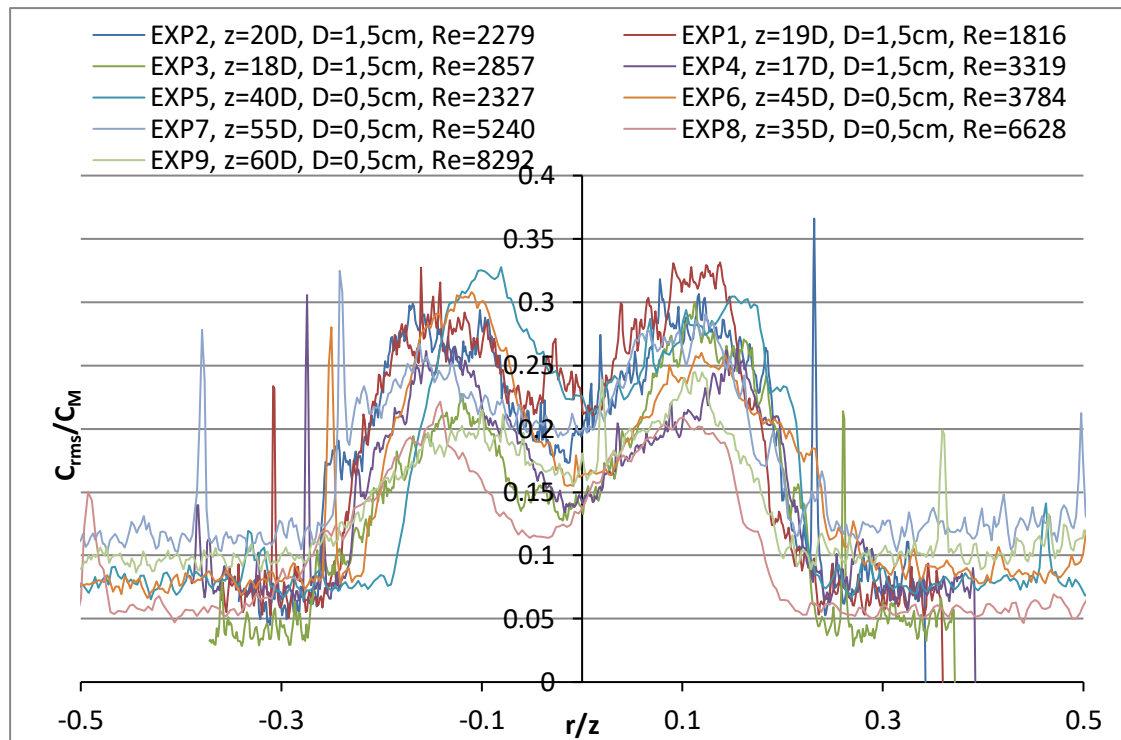


Σχήμα 4.12 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στη ζώνη της αναπτυγμένης ροής για το σύνολο των πειραμάτων

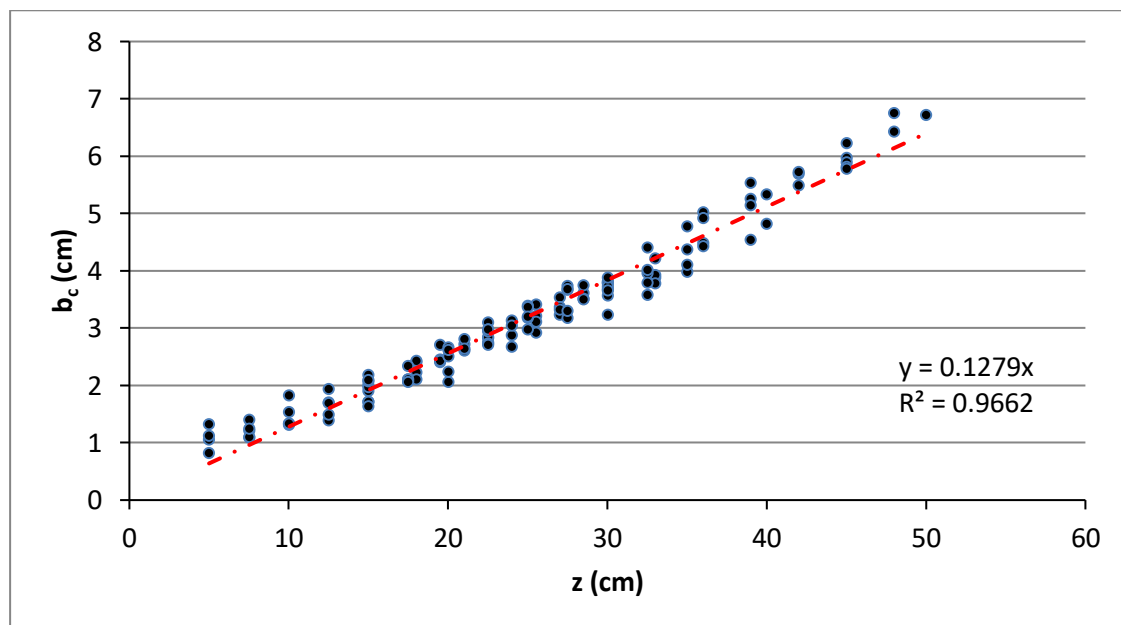
Οι κατανομές των μέσων συγκεντρώσεων φαίνεται να ακολουθούν την κατανομή Gauss και συνεπώς επαληθεύεται η υπάρχουσα θεωρία. Για τη γραφική παράσταση της κατανομής Gauss το b που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτό που προτάθηκε από τους Fisher et al. (1979), δηλαδή $b_c/z=0.127$.

Όσον αφορά τις κατανομές της RMS συγκέντρωσης φαίνεται πως τα ολικά μέγιστα που βρίσκονται εκατέρωθεν του εγκάρσιου άξονα εμφανίζονται σε αποστάσεις $r/z=0.13$ και οι μέσες τιμές τους είναι 0.25. Οι τιμές αυτές, μολονότι είναι μεγαλύτερες, δεν αποκλίνουν σημαντικά από εκείνες που προτάθηκαν από τον Papanicolaou (1987). Η διακύμανση που παρατηρείται βέβαια μεταξύ των κατανομών δεν είναι αμελητέα και μπορεί να οφείλεται σε απομείωση της

έντασης, σε μικροσφάλματα των οργάνων μέτρησης είτε σε απορρόφηση της ροδαμίνης.



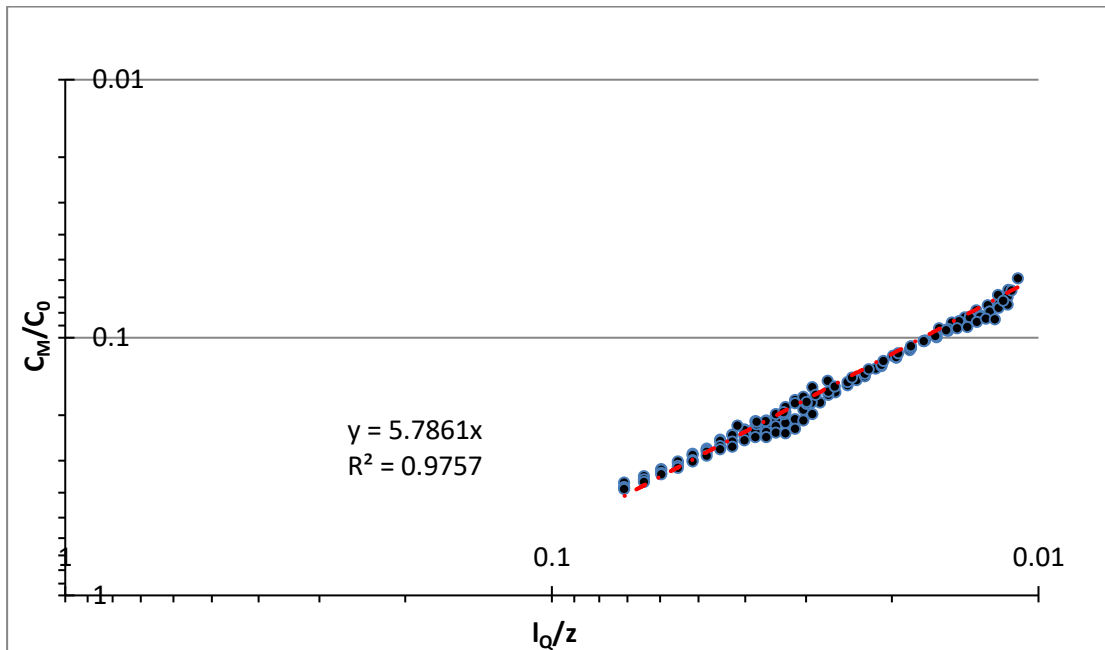
Σχήμα 4.13 Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο για το σύνολο των πειραμάτων



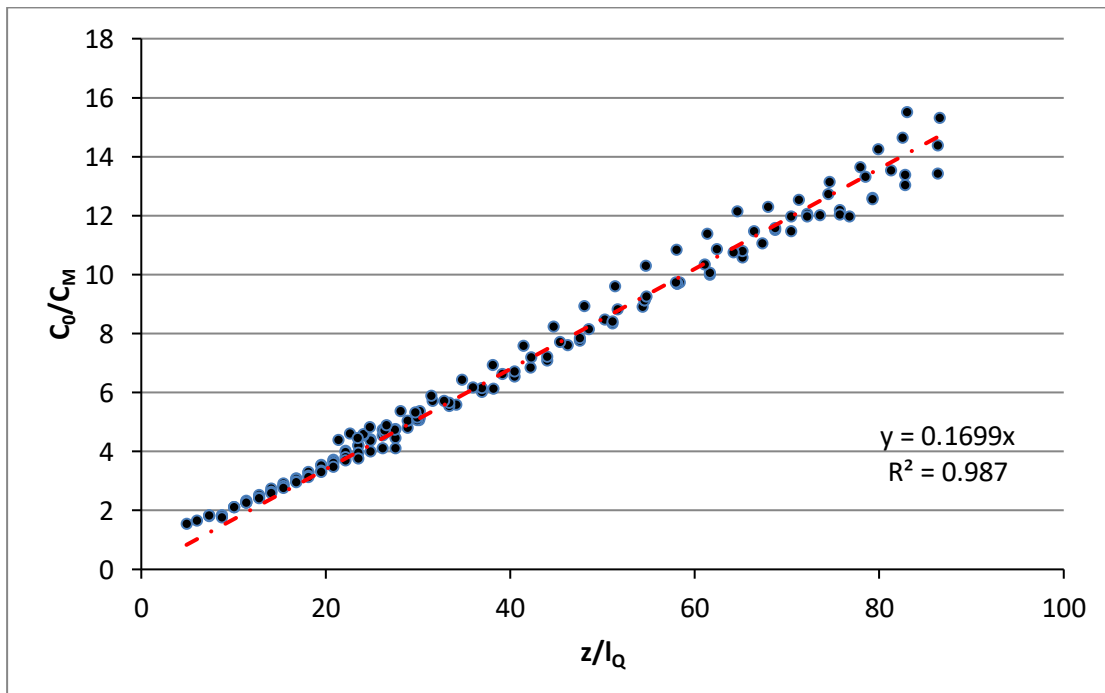
Σχήμα 4.14 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από το ακροφύσιο για το σύνολο των πειραμάτων

Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι μεταβολές της μέγιστης συγκέντρωσης και της ελάχιστης αραιώσης. Οι συντελεστές αναλογίας τους θα έπρεπε ιδανικά

να προκύψουν αντίστροφοι, όμως αυτό δεν γίνεται να επιτευχθεί λόγω του τρόπου με τον οποίο υπολογίζονται αυτά τα μεγέθη. Παρόλα αυτά οι διαφορές είναι πολύ μικρές και επομένως κρίνεται πως δεν υπάρχει σφάλμα. Οι τιμές που υπολογίστηκαν ταιριάζουν ικανοποιητικά με εκείνες που προτείνονται στην βιβλιογραφία.



Σχήμα 4.15 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από το ακροφύσιο για το σύνολο των πειραμάτων



Σχήμα 4.16 Μεταβολή της ελάχιστης αραιώσης με την αδιάστατη απόσταση από το ακροφύσιο για το σύνολο των πειραμάτων

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι σταθερές που προέκυψαν για το πλάτος b_c , την αραίωση S και τη μέγιστη συγκέντρωση στην παρούσα διπλωματική εργασία και συγκρίνονται με εκείνες της βιβλιογραφίας. Όπως φαίνεται οι τιμές που προέκυψαν συμφωνούν ικανοποιητικά με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας (π.χ. Σολωμού 2022).

Πίνακας 4.2 Σταθερές εξισώσεων πλάτους, ελάχιστης αραίωσης και μέγιστης συγκέντρωσης απλής κυκλικής φλέβας

Παρούσα εργασία	Fischer et al. (1979)	Papanicolaou (1984)	Lee & Chu (2003)
$b_c = 0,128 \cdot z$	$b_c = 0.127 \cdot z$	$b_c = 0.126 \cdot z$	$b_c = 0.125 \cdot z$
$\frac{C_0}{C_M} = 0,170 \cdot \frac{z}{l_Q}$	$\frac{C_0}{C_M} = 0.179^* \cdot \frac{z}{l_Q}$	$\frac{C_0}{C_M} = 0.165 \cdot \frac{z}{l_Q}$	$\frac{C_0}{C_M} = 0.168 \cdot \frac{z}{l_Q}$
$\frac{C_M}{C_0} = 5,79 \cdot \frac{l_Q}{z}$	$\frac{C_M}{C_0} = 5.60 \cdot \frac{l_Q}{z}$	$\frac{C_M}{C_0} = 6.06 \cdot \frac{l_Q}{z}$	$\frac{C_M}{C_0} = 5.94 \cdot \frac{l_Q}{z}$

* Η τιμή προκύπτει ως ο αντίστροφος του 5.60.

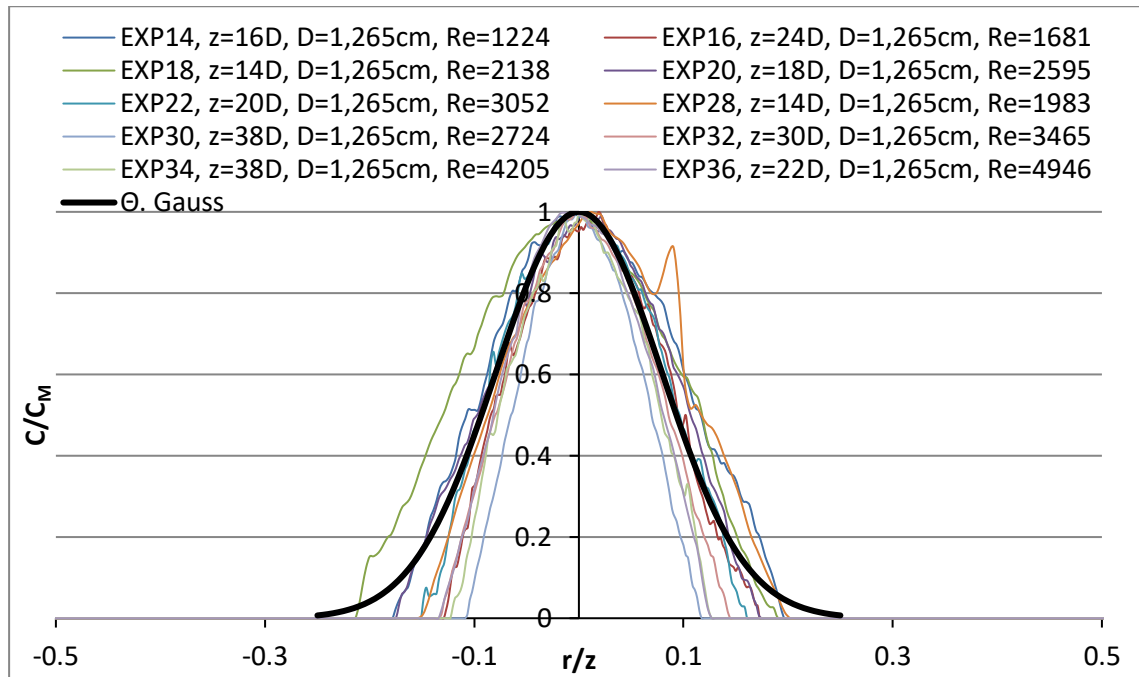
4.5 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΕΛΛΕΙΠΤΙΚΩΝ ΦΛΕΒΩΝ

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται τα ομαδοποιημένα αποτελέσματα των φλεβών που προέρχονται από τα ελλειπτικά στόμια. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά την επεξεργασία και παρουσίαση των αποτελεσμάτων είναι σχεδόν ίδια με αυτή των φλεβών κυκλικού στομίου. Η διαφορά είναι πως έγιναν δύο φορές, μία για τον κάθε άξονα. Τα διαγράμματα που κατασκευάστηκαν από το κάθε πείραμα ξεχωριστά παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β.

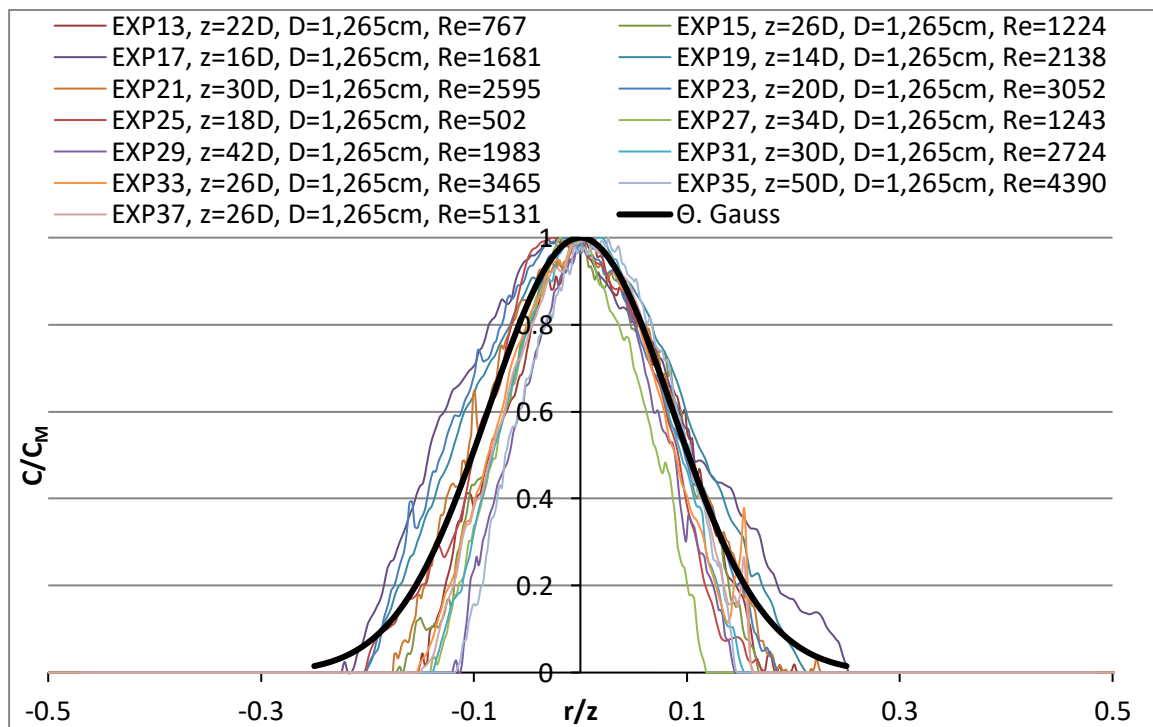
4.5.1 ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ

Για την διερεύνηση των κατανομών των συγκεντρώσεων μορφώθηκαν τα παρακάτω σχήματα που περιέχουν τις αντίστοιχες κατανομές από σχεδόν όλα τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στις ελλειπτικές φλέβες ξεχωριστά για τον κύριο και τον δευτερεύον άξονα. Παραλήφθηκαν τα πειράματα με πολύ χαμηλό Reynolds καθώς η ροή δεν ήταν εντελώς τυρβώδης και συνεπώς δεν εξήχθησαν τα αναμενόμενα αποτελέσματα για τις τυρβώδεις φλέβες. Στα σχήματα αυτά μαζί με τις κατανομές των συγκεντρώσεων προστέθηκε και η κατανομή Gauss με σκοπό να φανεί γραφικά κατά πόσο συμπίπτουν οι κατανομές που προέκυψαν από το πείραμα με τις θεωρητικές κατανομές. Φυσικά εδώ οι κατανομές Gauss μορφώθηκαν με διαφορετικούς συντελεστές b_c/z τόσο μεταξύ τους όσο και με τον αντίστοιχο των κυκλικών φλεβών έτσι ώστε να ταιριάζουν στις κατανομές των συγκεντρώσεων. Στο Σχήμα 4.17, όπου παρουσιάζονται οι κατανομές στον κύριο άξονα, η κατανομή Gauss φαίνεται να ταιριάζει καλύτερα για $b_c/z=0.112$, ενώ στο 4.18 που φαίνονται οι κατανομές του δευτερεύοντα άξονα φαίνεται να ταιριάζει καλύτερα για $b_c/z=0.122$. Αυτές οι τιμές επιβεβαιώνονται στην συνέχεια κατά την διερεύνηση του πλάτους

κατανομής της συγκέντρωσης. Υπενθυμίζεται πως στις κυκλικές φλέβες είχε χρησιμοποιηθεί η τιμή 0.127 που είναι η τιμή που προτάθηκε από τους Fisher et al. (1979).

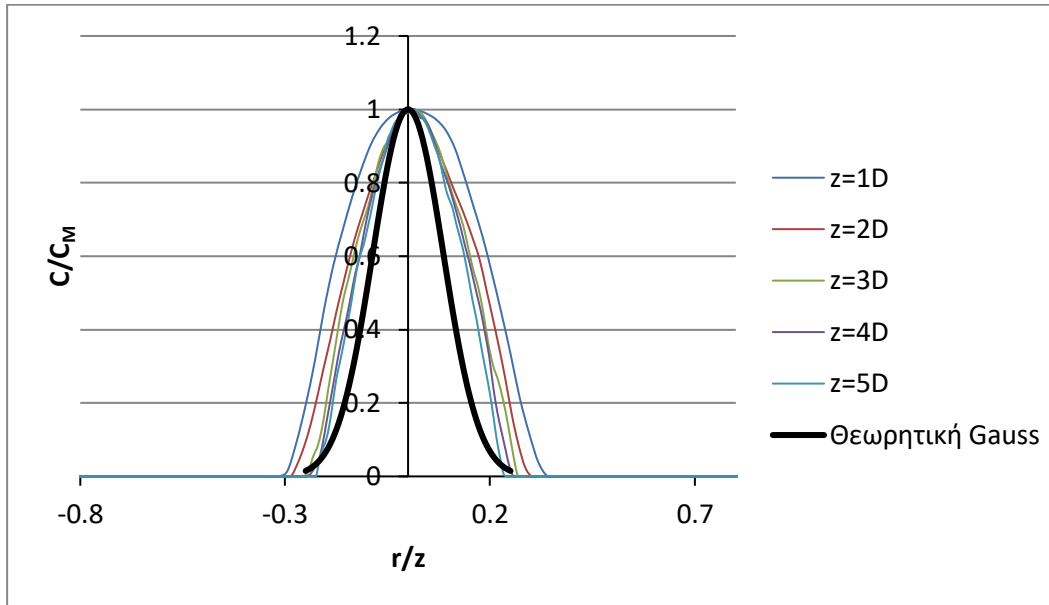


Σχήμα 4.17 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στη ζώνη της αναπτυγμένης ροής για το σύνολο των πειραμάτων κατά τον κύριο άξονα

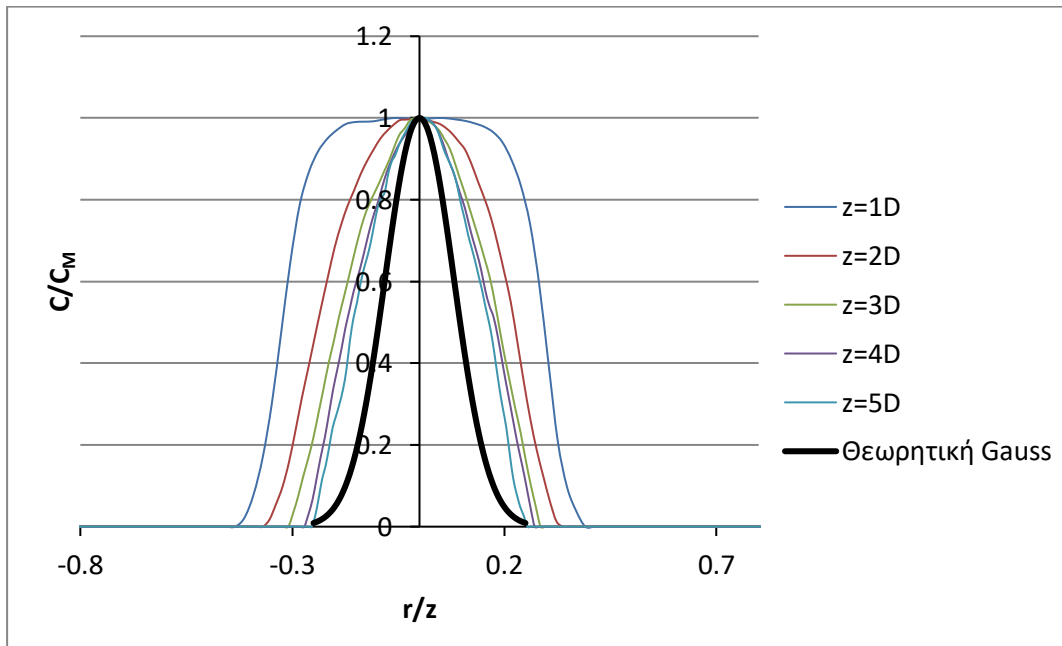


Σχήμα 4.18 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στη ζώνη της αναπτυγμένης ροής για το σύνολο των πειραμάτων κατά τον δευτερεύοντα άξονα

Όπως διαπιστώνεται λοιπόν οι κατανομές των συγκεντρώσεων ακολουθούν την κατανομή Gauss σε όλο το μήκος της ζώνης ανεπτυγμένης ροής ($z > 10-12D$). Όσον αφορά την ζώνη ανάπτυξης της ροής, παρόλο που και στους δύο άξονες δεν ακολουθείται κατευθείαν η κατανομή Gauss, παρατηρείται πως οι κατανομές του δευτερεύοντα άξονα συγκλίνουν πολύ πιο γρήγορα από αυτές του κύριου (Σχήματα 4.19 και 4.20).



Σχήμα 4.19 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 5 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη ανάπτυξης της ροής για το πείραμα EXP15 κατά τον δευτερεύοντα άξονα



Σχήμα 4.20 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 5 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη ανάπτυξης της ροής για το πείραμα EXP14 κατά τον κύριο άξονα

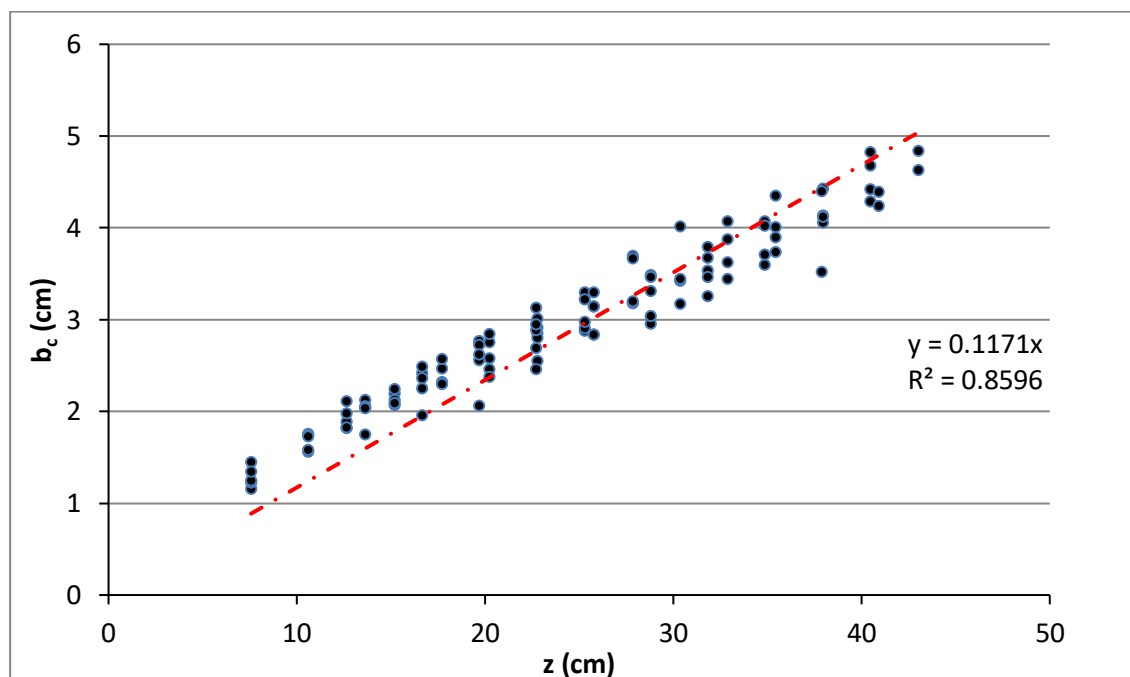
4.5.2 ΠΛΑΤΟΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ

Για τον υπολογισμό του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης χρησιμοποιήθηκαν τα πλάτη που υπολογίσθηκαν για τον κάθε άξονα, $b_{c,major}$ και $b_{c,minor}$. Τα μεγέθη αυτά συνδέονται με την παρακάτω εξίσωση υπολογίζοντας έτσι το γεωμετρικό μέσο τους:

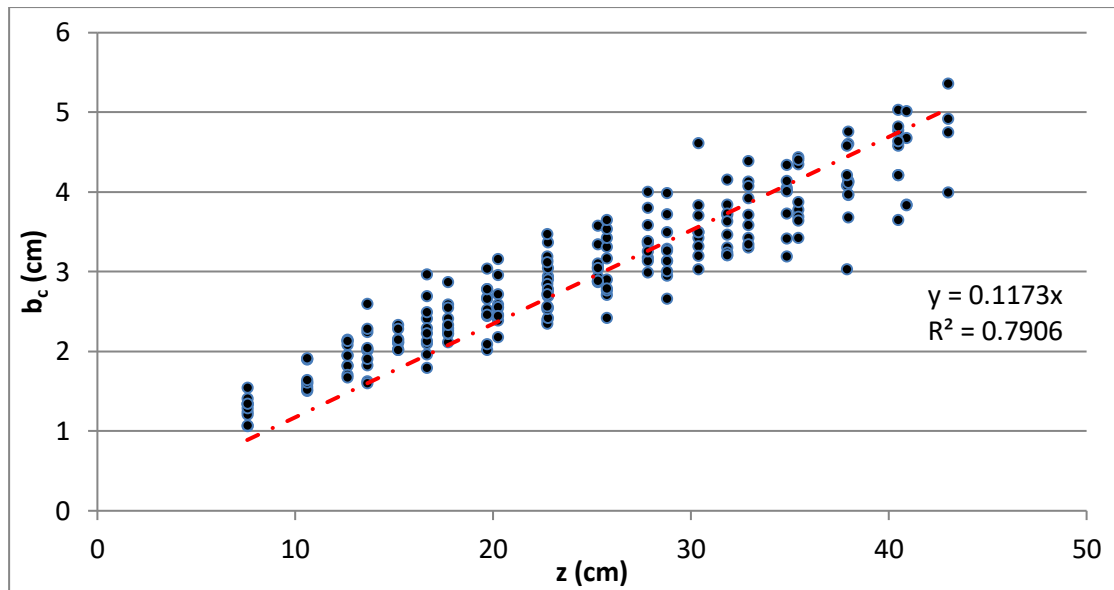
$$b_c = \sqrt{b_{c,major} \cdot b_{c,minor}} \quad (4.10)$$

όπου $b_{c,major}$ και $b_{c,minor}$ είναι τα πλάτη των κατανομών της συγκέντρωσης στον κύριο και στον δευτερεύον άξονα του ελλειπτικού στομίου αντίστοιχα (Hussain and Husain 1989).

Η εφαρμογή της παραπάνω σχέσης προϋποθέτει πανομοιότητες αρχικές συνθήκες των πειραμάτων που διεξήχθησαν στους δύο άξονες. Εκτός του υπολογισμού του b_c με τον προαναφερθέντα τρόπο, το πλάτος υπολογίστηκε ξανά κάνοντας fitting σε κοινό διάγραμμα για όλα τα πλάτη (σε κύριο και δευτερεύοντα άξονα) από όλα τα πειράματα που διεξήχθησαν.

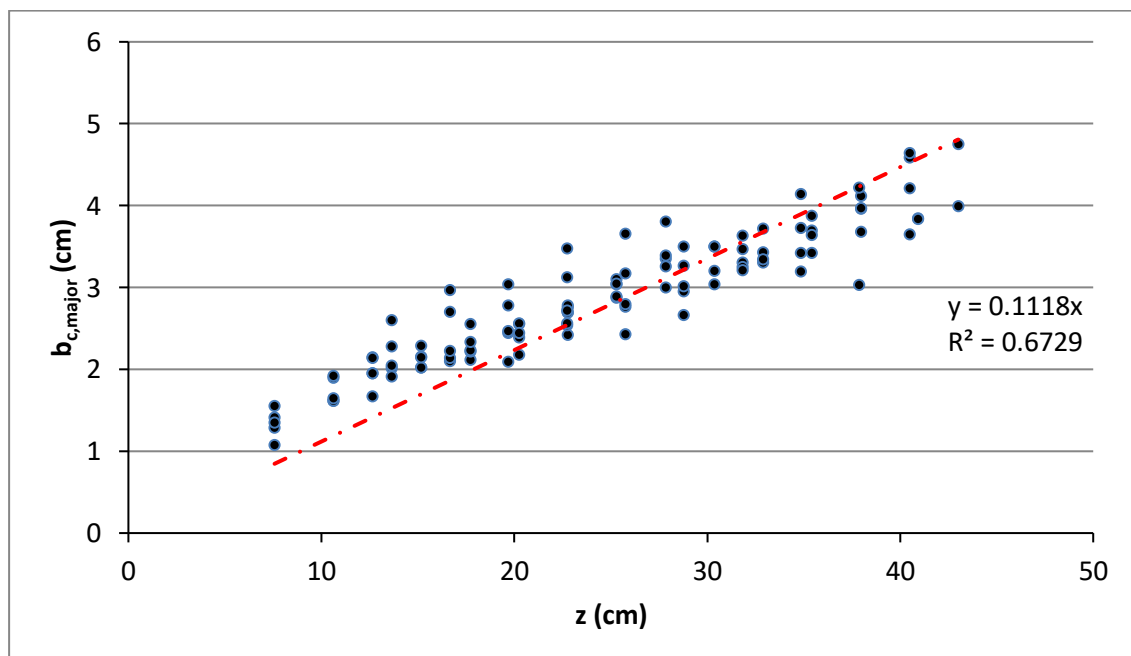


Σχήμα 4.21 Μεταβολή του πλάτους κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από το ακροφύσιο για το σύνολο των πειραμάτων με χρήση του ισοδύναμου b_c (από την εξ. 4.10) για κάθε Reynolds

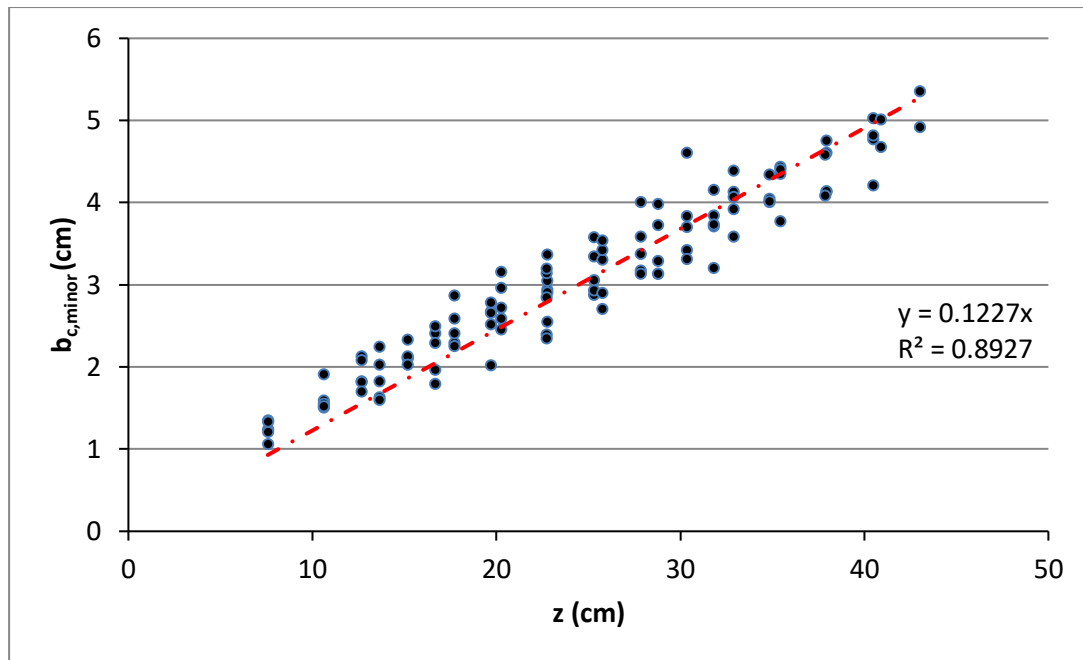


Σχήμα 4.22 Μεταβολή του πλάτους κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από το ακροφύσιο για το σύνολο των πειραμάτων με fitting όλων των δεδομένων (ανεξαρτήτως άξονα)

Όπως διαπιστώνεται από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει περίπου το ίδιο b_c/z . Τα αποτελέσματα δείχνουν πως το πλάτος κατανομής της συγκέντρωσης των ελλειπτικών φλεβών $b_c/z=0.117$ είναι ελαφρώς μικρότερο από το αντίστοιχο των κυκλικών $b_c/z=0.126$. Φυσικά όμως πρέπει να σημειωθεί πως λόγω της ασυμμετρίας του ελλειπτικού στομίου το πλάτος στον κύριο (major) άξονα διαφέρει από το αντίστοιχο του δευτερεύοντα (minor).



Σχήμα 4.23 Μεταβολή του πλάτους κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από το ακροφύσιο στον κύριο άξονα για το σύνολο των πειραμάτων

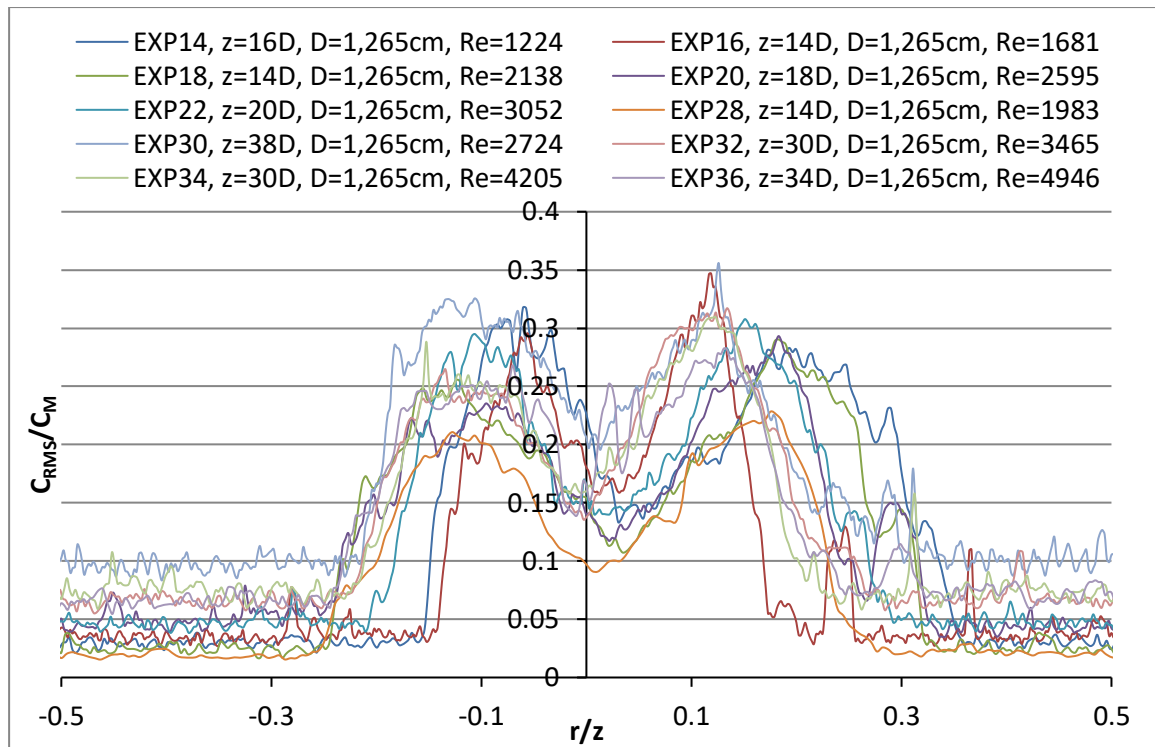


Σχήμα 4.24 Μεταβολή του πλάτους κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από το ακροφύσιο στον δευτερεύοντα άξονα για το σύνολο των πειραμάτων

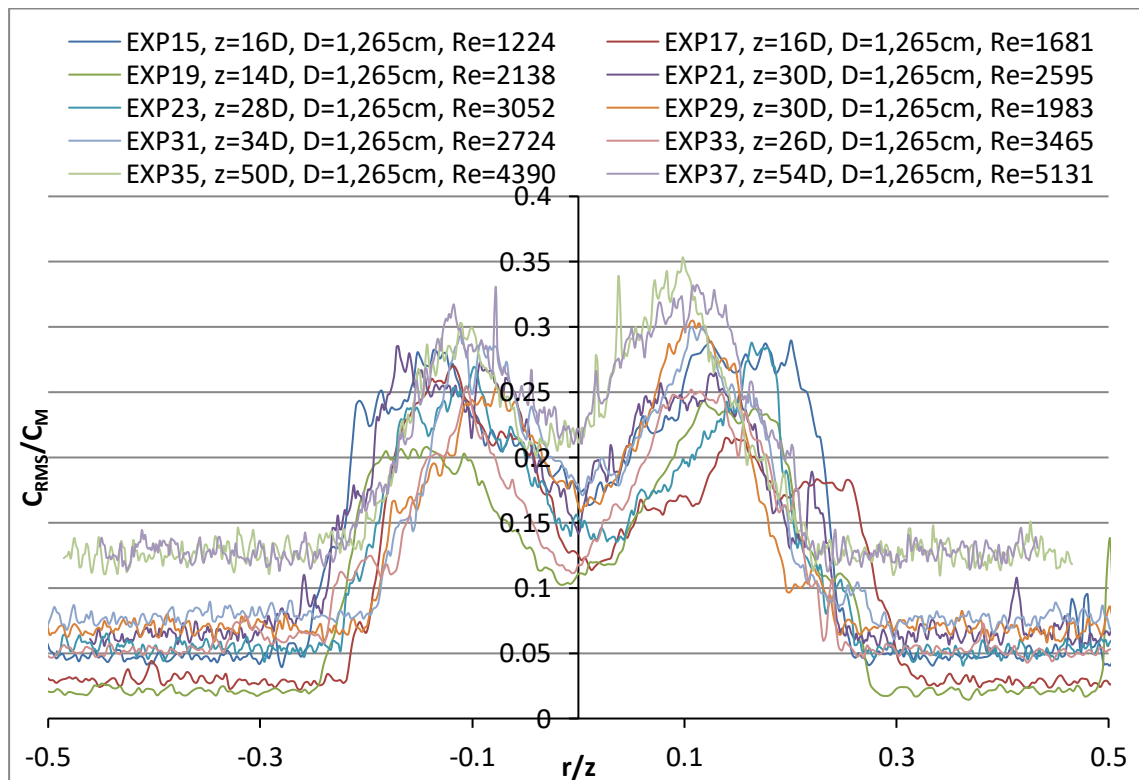
Από τα αποτελέσματα προκύπτει πως το πλάτος κατανομής της συγκέντρωσης στον δευτερεύοντα άξονα είναι μεγαλύτερο από αυτό στον κύριο. Αυτό οδηγεί σε φαινόμενα αλλαγής αξόνων, γνωστά στην βιβλιογραφία ως axis-switching. Δηλαδή, λόγω της διαφοράς στον ρυθμό ανάπτυξης του πλάτους στον κάθε άξονα, το πλάτος του δευτερεύοντα άξονα ξεπερνάει σε κάποιο σημείο αυτό του κύριου και επομένως γίνεται αυτός ο κύριος άξονας. Ουσιαστικά λοιπόν γίνεται εναλλαγή των αξόνων. Αυτά τα φαινόμενα έχουν επιβεβαιωθεί ότι συμβαίνουν στις ελλειπτικές φλέβες αρκετές φορές στην βιβλιογραφία (Mi & Nathan 2009, Aleyasin et al. 2015).

4.5.3 ΈΝΤΑΣΗ ΤΗΣ ΤΥΡΒΗΣ

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την διερεύνηση της έντασης της τύρβης, δηλαδή την RMS συγκέντρωση, στις ελλειπτικές φλέβες είναι η ίδια που ακολουθήθηκε στις κυκλικές. Με κατάλληλες αδιαστατοποιήσεις λοιπόν της απόστασης z και της συγκέντρωσης C_{RMS} , δημιουργήθηκαν τα παρακάτω διαγράμματα που περιλαμβάνουν κατανομές της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης από το σύνολο των πειραμάτων. Όπως ήταν αναμενόμενο η μορφή των κατανομών αυτών είναι η ίδια με την αντίστοιχη των πειραμάτων που διεξήχθησαν για τις κυκλικές φλέβες. Τα τοπικά μέγιστα παρατηρούνται εκατέρωθεν του άξονα και παίρνουν τιμές από 0.2 μέχρι 0.3 ανάλογα με την απόσταση από το ακροφύσιο. Επίσης δεν φαίνεται να υπάρχουν μεγάλες διαφορές στις κατανομές ανεξαρτήτως άξονα. Τα μέγιστα εμφανίζονται κατά μέσο όρο στις ίδιες θέσεις που εμφανίζονταν και στις κυκλικές φλέβες.

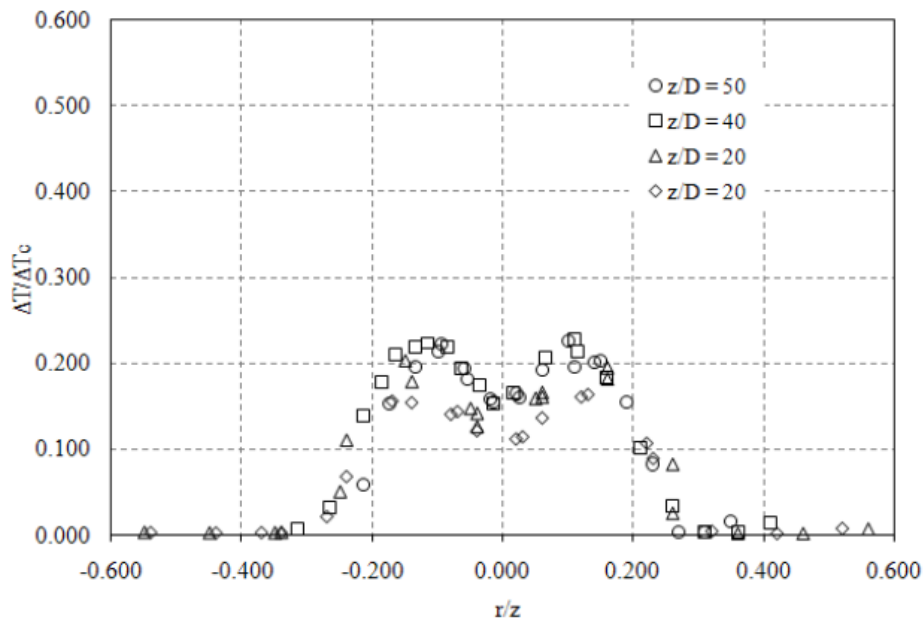


Σχήμα 4.25 Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο για το σύνολο των πειραμάτων κατά τον κύριο άξονα

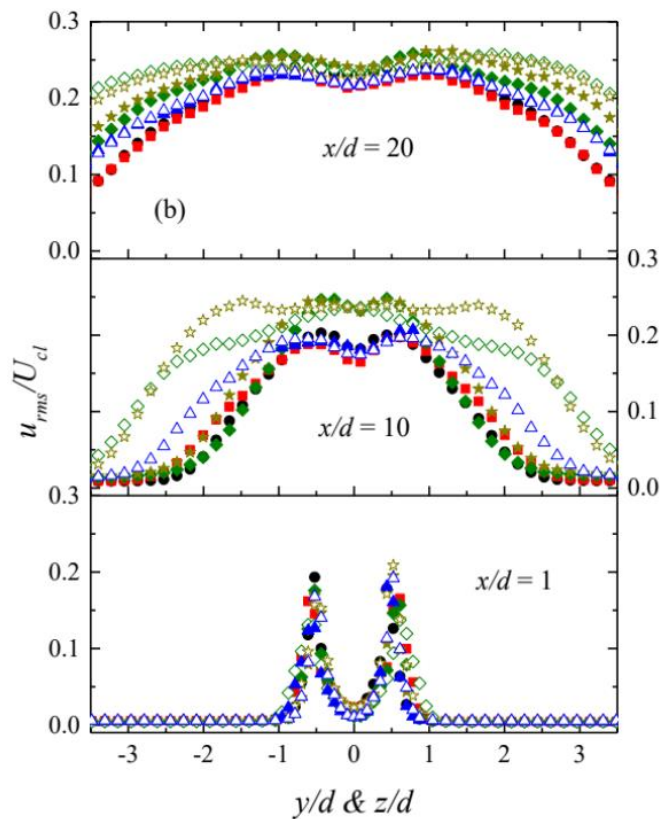


Σχήμα 4.26 Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο για το σύνολο των πειραμάτων κατά τον δευτερεύοντα άξονα

Οι τιμές αυτές φαίνεται να είναι ελαφρώς μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες που υπολόγισαν οι Παπαντωνίου (2009) και Aleyasin et al. (2017).



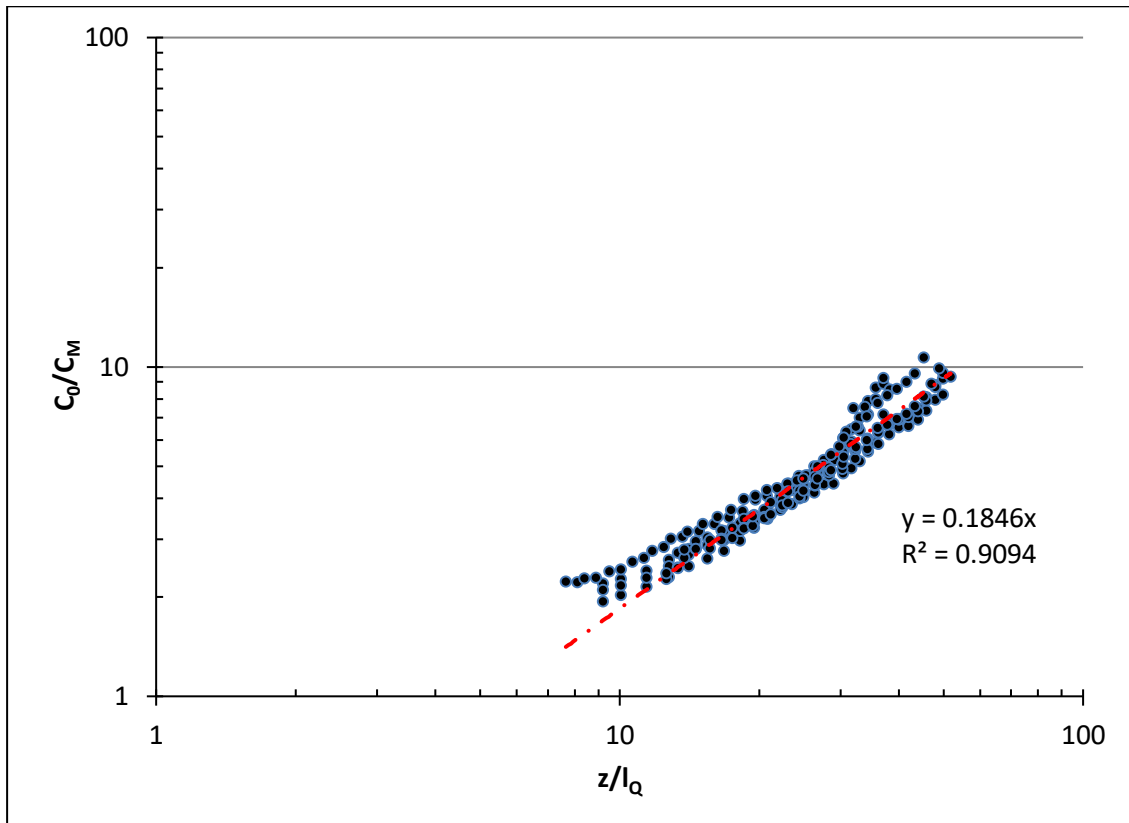
Σχήμα 4.27 Η κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της θερμοκρασίας κατά πλάτος της φλέβας σε ελλειπτικές φλέβες (Πηγή: Παπαντωνίου 2009).



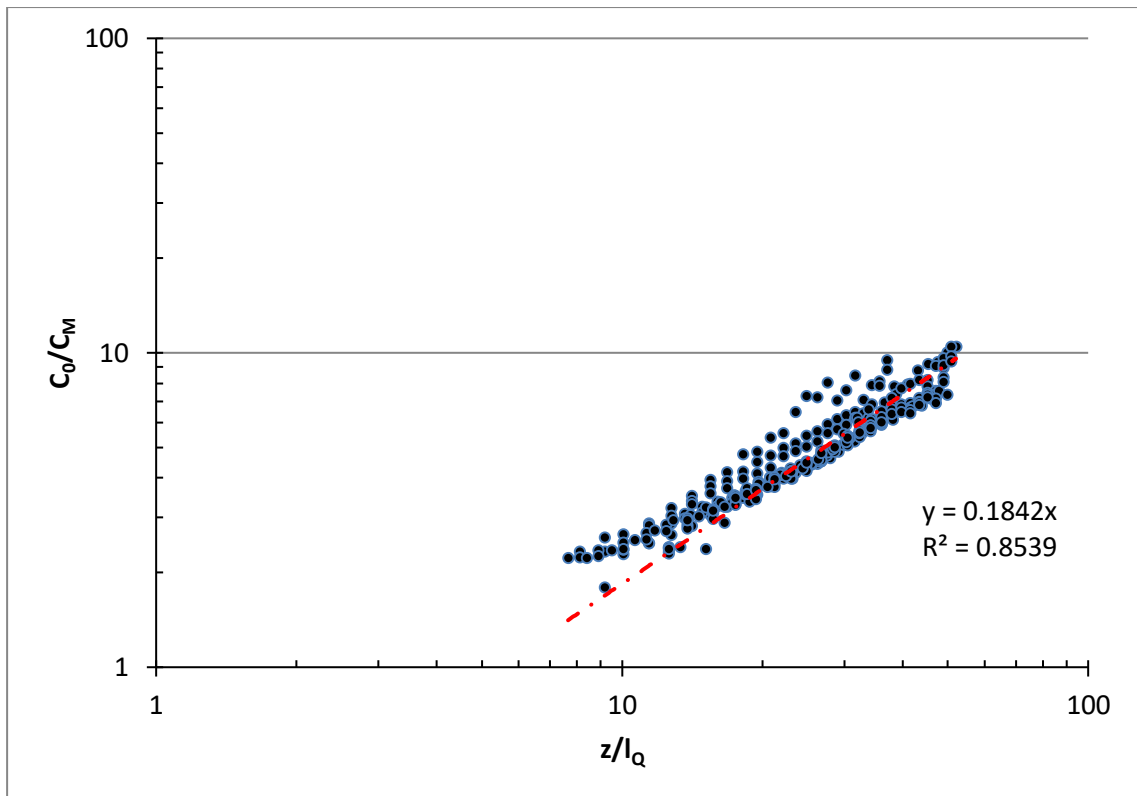
Σχήμα 4.28 Αδιάστατες κατανομές της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων (Πηγή: Aleyasin et al 2017).

4.5.4 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ

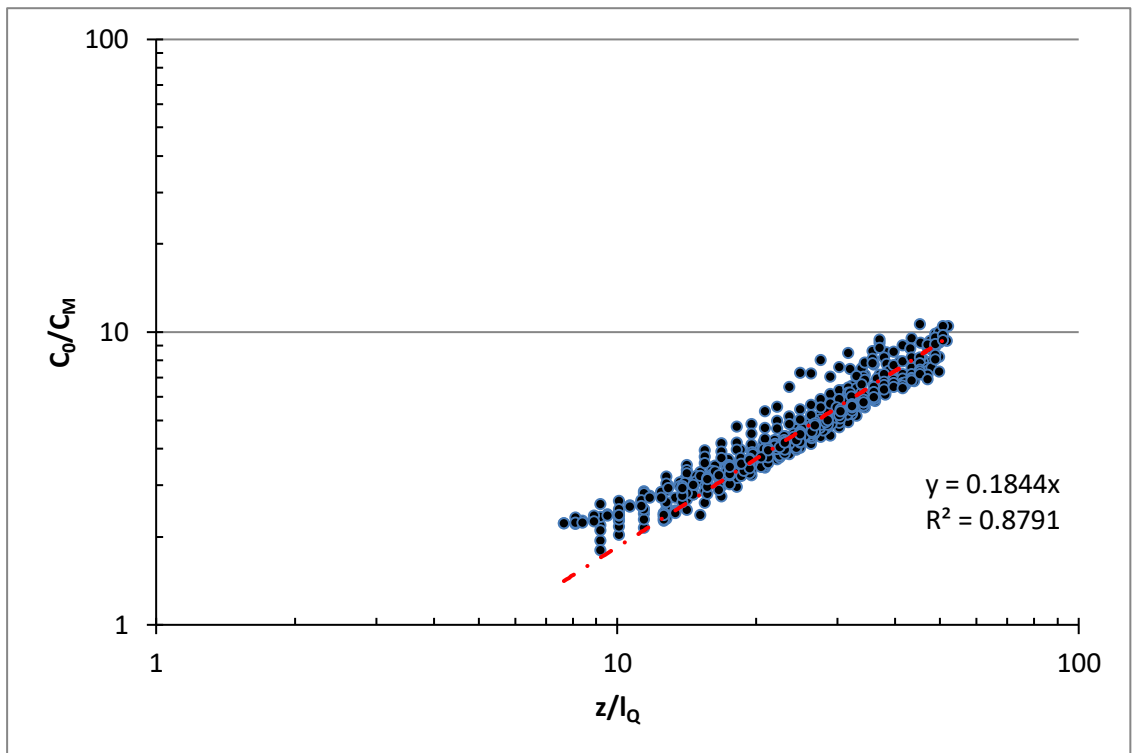
Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται οι μεταβολές της μέγιστης συγκέντρωσης στον άξονα C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση στην εκροή C_0 και της ελάχιστης αραίωσης S συναρτήσει των αδιάστατων αποστάσεων l_0/z και z/l_0 αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν δείχνουν πως η ελάχιστη αραίωση S στις φλέβες που προέρχονται από ελλειπτικό στόμιο είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη των κυκλικών φλεβών. Συγκεκριμένα οι συντελεστές της αραίωσης που προέκυψαν στην παρούσα εργασία στον άξονα της φλέβας από τις μετρήσεις κατά τον κύριο και τον δευτερεύοντα άξονα των ελλειπτικών φλεβών χωριστά, από τις μετρήσεις όλων των ελλειπτικών φλεβών και από τις μετρήσεις των κυκλικών είναι 0.1846, 0.1842, 0.1844 και 0.172 αντίστοιχα. Είναι απόλυτα λογικό η ελάχιστη (αξονική) αραίωση από τα πειράματα κατά τους δύο άξονες να είναι πρακτικά η ίδια, καθώς το κέντρο του ακροφυσίου αποτελεί και το κοινό κέντρο των αξόνων.



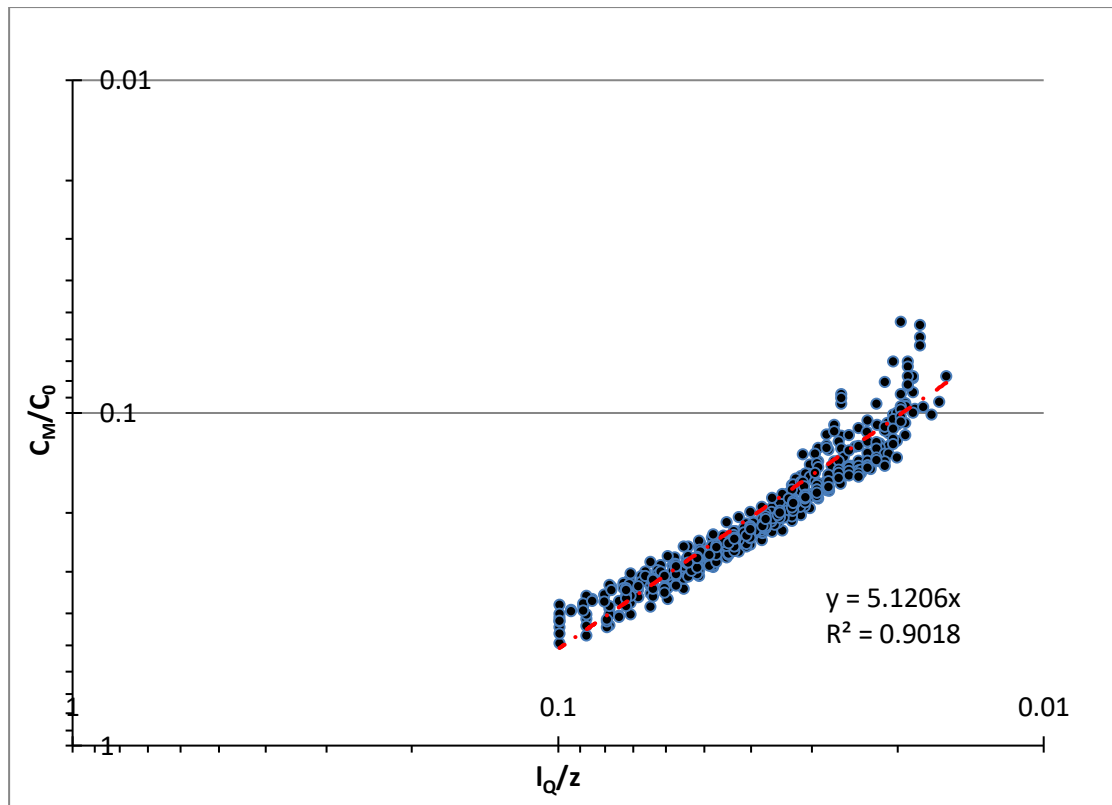
Σχήμα 4.29 Μεταβολή της ελάχιστης αραίωσης με την αδιάστατη απόσταση από το ακροφύσιο για το σύνολο των πειραμάτων κατά τον κύριο άξονα



Σχήμα 4.30 Μεταβολή της ελάχιστης αραιώσης με την αδιάστατη απόσταση από το ακροφύσιο για το σύνολο των πειραμάτων κατά τον δευτερεύοντα άξονα



Σχήμα 4.31 Μεταβολή της ελάχιστης αραιώσης με την αδιάστατη απόσταση από το ακροφύσιο για το σύνολο των πειραμάτων



Σχήμα 4.32 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από το ακροφύσιο για το σύνολο των πειραμάτων

4.5.5 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΛΛΕΙΠΤΙΚΩΝ ΦΛΕΒΩΝ

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι σταθερές που προέκυψαν για το πλάτος b_c , την ελάχιστη αραιώση S και τη μέγιστη συγκέντρωση από αυτήν την διπλωματική εργασία και συγκρίνονται με σταθερές που έχουν δοθεί σε προηγούμενη εργασία.

Πίνακας 4.3 Σταθερές εξισώσεων πλάτους, ελάχιστης αραιώσης και μέγιστης συγκέντρωσης απλής ελλειπτικής φλέβας

Παρούσα εργασία	Παπαντωνίου (2009)
$b_c = 0.117 \cdot z$	$b_T = 0.138 \cdot z$
$\frac{C_0}{C_M} = 0.184 \cdot \frac{z}{l_Q}$	$\frac{C_0}{C_M} = 0.207 \cdot \frac{z}{l_Q}$
$\frac{C_M}{C_0} = 5.12 \cdot \frac{l_Q}{z}$	$\frac{C_M}{C_0} = 4.83^* \cdot \frac{l_Q}{z}$

* Η τιμή προκύπτει ως ο αντίστροφος του 0.207.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 ΣΥΝΟΨΗ

Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 37 πειράματα σε πειραματική διάταξη του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Υδραυλικής του ΕΜΠ με σκοπό την διερεύνηση της ροής κυκλικών και ελλειπτικών τυρβωδών φλεβών. Με την τεχνική Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF) επιτεύχθηκε η οπτικοποίηση των πειραμάτων με ταυτόχρονη εξαγωγή εικόνων του πεδίου ροής. Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την διεξαγωγή των πειραμάτων και την ανάλυση των αποτελεσμάτων συνοψίζονται στη συνέχεια.

Πίνακας 5.1 Ομαδοποιημένες σταθερές πλάτους συγκέντρωσης, ελάχιστης αραίωσης και μέγιστης συγκέντρωσης για κυκλικές και ελλειπτικές απλές τυρβώδεις φλέβες

Κυκλικές φλέβες	Ελλειπτικές φλέβες
$b_c = 0.128 \cdot z$	$b_c = 0.117 \cdot z$
$\frac{C_0}{C_M} = 0.170 \cdot \frac{z}{l_Q}$	$\frac{C_0}{C_M} = 0.184 \cdot \frac{z}{l_Q}$
$\frac{C_M}{C_0} = 5.79 \cdot \frac{l_Q}{z}$	$\frac{C_M}{C_0} = 5.12 \cdot \frac{l_Q}{z}$

5.2 ΚΥΡΙΟΤΕΡΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τη διεξαγωγή και την επεξεργασία των 9 πειραμάτων που αφορούσαν τις απλές τυρβώδεις κυκλικές φλέβες και των 28 πειραμάτων που αφορούσαν τις απλές τυρβώδεις ελλειπτικές φλέβες εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα:

1. Η μέθοδος PLIF παρέχει πολύ μεγάλη ακρίβεια στις μετρήσεις σε όλο το εύρος της φλέβας. Παρόλα αυτά θέλει ιδιαίτερη προσοχή, καθώς η αποφυγή μικροσφαλμάτων λόγω αντανάκλασεων είναι απαραίτητη και συνεχής.
2. Οι κατανομές της αδιάστατης μέσης συγκέντρωσης τόσο στις κυκλικές όσο και στις ελλειπτικές φλέβες ως προς την αδιάστατη απόσταση r/z ακολουθούν την κατανομή Gauss.
3. Το πλάτος κατανομής της συγκέντρωσης b_c αυξάνεται γραμμικά με την απόσταση z από το ακροφύσιο με σταθερές αναλογίας 0.128 και 0.117 για τις κυκλικές και τις ελλειπτικές φλέβες αντίστοιχα.
4. Τα πλάτη κατανομής της συγκέντρωσης κατά τους δύο άξονες των ελλειπτικών φλεβών διαφέρουν μεταξύ τους. Οι σταθερές αναλογίας που προέκυψαν είναι 0.112 και 0.122 για τον κύριο και τον δευτερεύοντα άξονα αντίστοιχα. Αυτό συνεπάγεται ταχύτερη αύξηση του πλάτους στον

δευτερεύοντα άξονα, κάτι το οποίο οδηγεί σε φαινόμενα εναλλαγής των αξόνων (axis-switching).

5. Οι κατανομές της αδιάστατης RMS συγκέντρωσης (ένταση τύρβης) στις ελλειπτικές φλέβες παρουσιάζουν δύο ολικά μέγιστα εκατέρωθεν του άξονα με τιμές που κυμαίνονται κατά μέσο όρο από 0.25 μέχρι 0.30. Δεν διακρίνονται διαφορές με τις κυκλικές φλέβες ενώ οι τιμές είναι ελάχιστα υψηλότερες από τις αντίστοιχες της βιβλιογραφίας.
6. Τόσο οι εγκάρσιες κατανομές της μέσης συγκέντρωσης C/C_M όσο και οι εγκάρσιες κατανομές της RMS συγκέντρωσης C_{RMS}/C_M είναι συμμετρικές ως προς τον κατακόρυφο άξονα.
7. Η ελάχιστη αραίωση $S=C_0/C_M$ βρέθηκε να αυξάνεται με την απόσταση από το ακροφύσιο ή ισοδύναμα η μέγιστη συγκέντρωση C_M/C_0 βρέθηκε να μειώνεται με την απόσταση και μάλιστα γραμμικά. Οι σταθερές της ελάχιστης αραίωσης και της μέγιστης συγκέντρωσης που προέκυψαν για τις κυκλικές φλέβες είναι 0.170 και 5.79 αντίστοιχα, ενώ για τις ελλειπτικές 0.184 και 5.12. Από αυτό συμπεραίνεται πως οι ελλειπτικές φλέβες έχουν μεγαλύτερη αραίωση από τις κυκλικές παρόλο που οι διαφορές μεταξύ τους είναι μικρές. Οι τιμές αυτές παρουσιάζουν καλή συμφωνία με τιμές που παρουσιάζονται στην βιβλιογραφία.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Διεθνής βιβλιογραφία

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.

Aleyasin S. S., Fathi N., Tachie M. F. and Koupriyanov M., 2017, PIV Measurements in the Near and Intermediate Field Regions of Jets Issuing from Eight Different Nozzle Geometries, Department of Mechanical Engineering, University of Manitoba, Winnipeg, Canada

Aleyasin S. S., Tachie M. F., Koupriyanov M. and Epp T., 2015, Low Reynolds Number effects on jets issuing from round and elliptic orifices, 1University of Manitoba, Winnipeg, MB, Canada

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.

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

F. Hussain & H. S. Husain, 1989, Elliptic jets. Part 1. Characteristics of unexcited and excited jets, Department of Mechanical Engineering, University of Houston, Houston, USA

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

Lee, J. H. W. and Chu, V. H., 2003, Turbulent jets and plumes: a Lagrangian approach (Vol. 1). Kluwer Academic Publishers.

Mi & G. J. Nathan, 2009, Statistical Properties of Turbulent Free Jets Issuing from Nine Differently-Shaped Nozzles, Centre for Energy Technology and School of Mechanical Engineering, University of Adelaide, Adelaide, Australia

Papakonstantis I. G. and Tsatsara E. I., 2018, Trajectory Characteristics of Inclined Turbulent Dense Jets. Environ. Proces., 5(3), 539-554.

Papakonstantis I. G. and Tsatsara E. I., 2019, Mixing Characteristics of Inclined Turbulent Dense Jets. Environ. Proces. 6(2), 525-541.

Papakonstantis I. G. and Mylonakou E. L., 2021, Flow Visualization Experiments of Inclined Slot Jets with Negative Buoyancy, Environ. Proces. 8, 1549 – 1565.

Papakonstantis I. G., Christodoulou G. C. and Papanicolaou P.N., 2011a, Inclined negatively buoyant jets 1: geometrical characteristics. *J. Hydraul. Res.* 49(1), 3-12.

Papakonstantis I. G., Christodoulou G. C. and Papanicolaou P.N., 2011b, Inclined negatively buoyant jets 2: concentration measurements. *J. Hydraul. Res.* 49(1), 3-12.

Papakonstantis I. G. and Christodoulou G. C., 2020, Simplified Modelling of Inclined Turbulent Dense Jets, *Fluids* 2020

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.

Papanicolaou P. N., Papakonstantis I. G. and Christodoulou G. C., 2008, On the entrainment coefficient in negatively buoyant jets.

Ελληνική Βιβλιογραφία

Γκούτης Κ., 2023, Μετρήσεις με την τεχνική Laser Induced Fluorescence (LIF) σε κατακόρυφες κυκλικές τυρβώδεις ανωστικές φλέβες, Διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Κωτσοβίνος, Ν. Ε. & Αγγελίδης, Π. Β., 2008, Υδραυλική Περιβάλλοντος, Τόμος Ι, Εκδόσεις Σπανίδη, Ξάνθη.

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.

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

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.

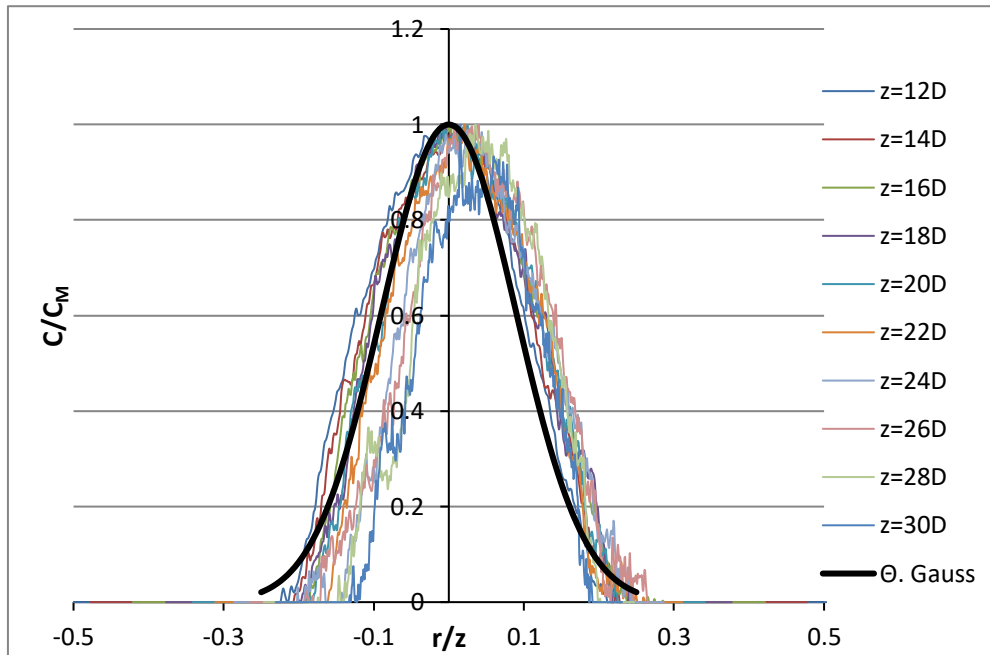
Παπαντωνίου Σ. Ι., 2009, Πειραματική εφαρμογή σε τυρβώδη ανωστική εκτοξευόμενη φλέβα, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

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

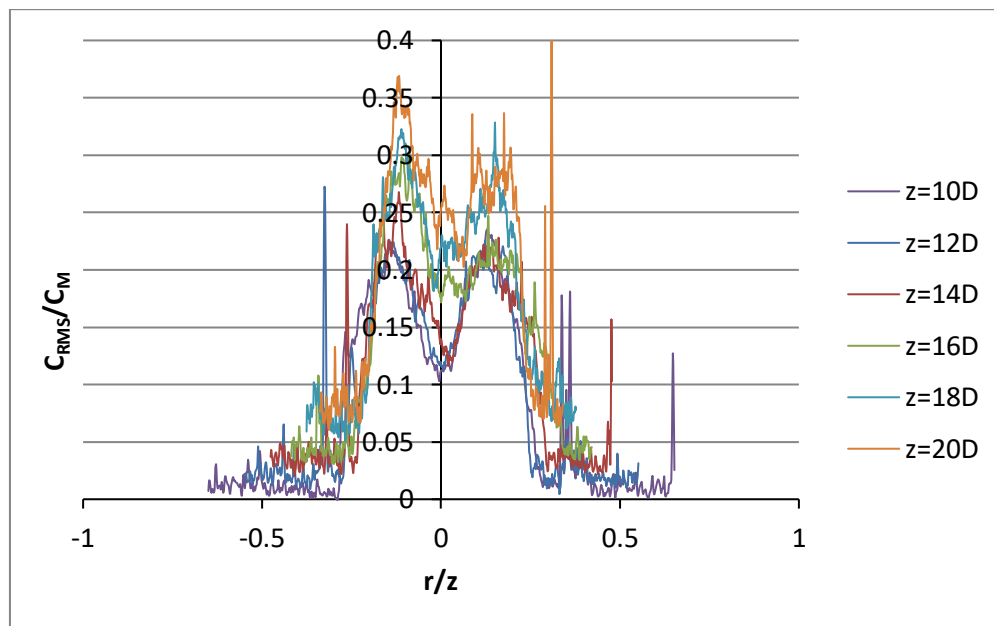
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Πρέπει να σημειωθεί πως όπου αναφέρεται στα σχήματα Θ .Gauss εννοείται η κατανομή Gauss με $b_c/z=0.127$.

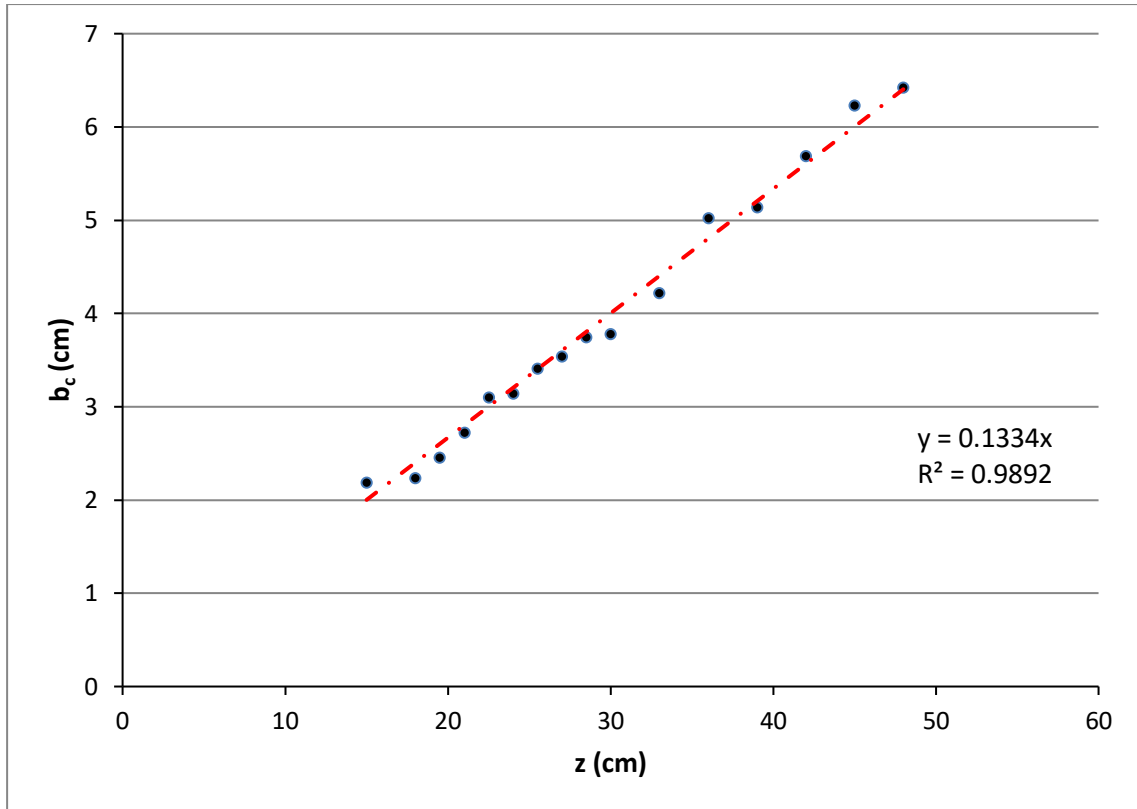
EXP1 ($D=1.5$ cm & $Re=1816$)



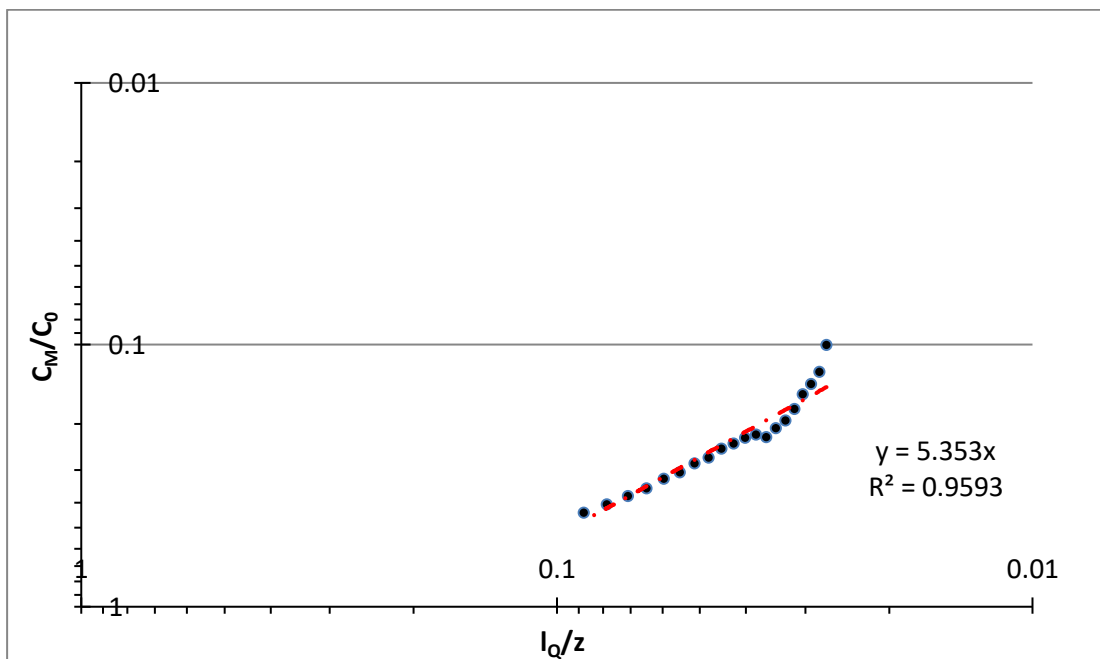
Σχήμα Α.1 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 10 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP1



Σχήμα Α.2 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 6 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP1

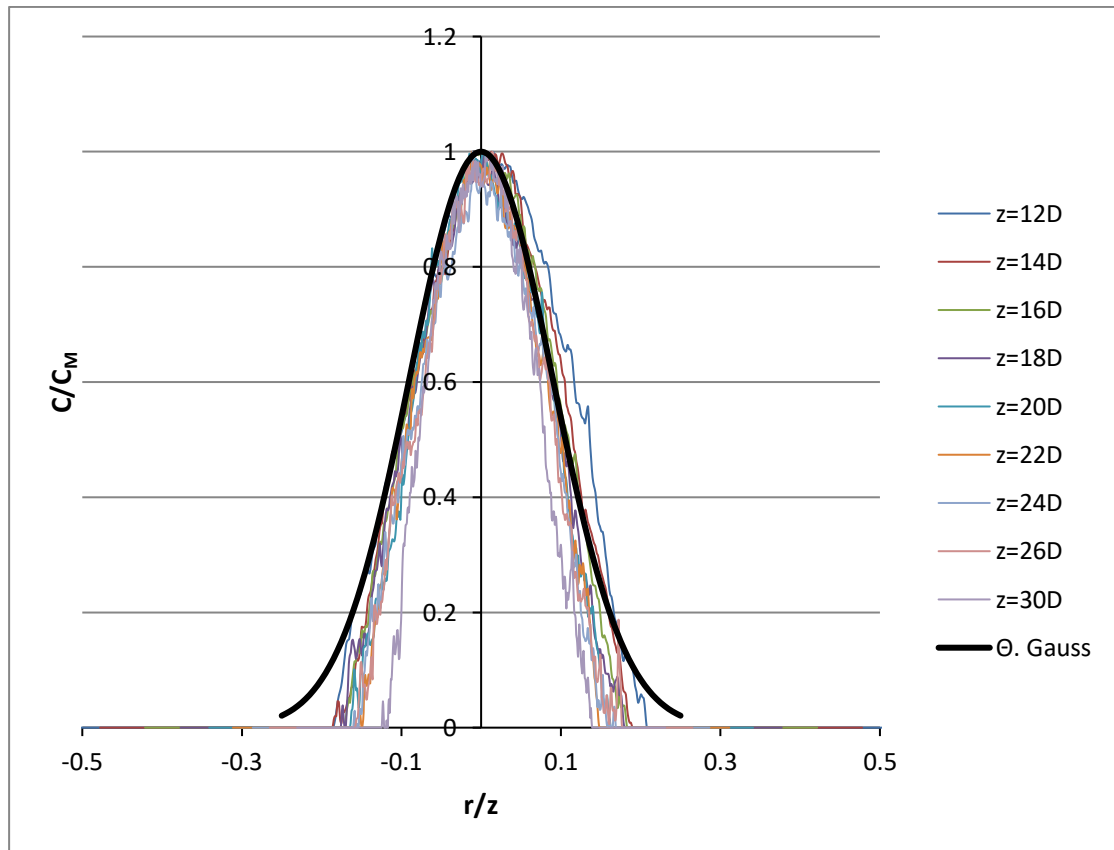


Σχήμα A.3 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP1

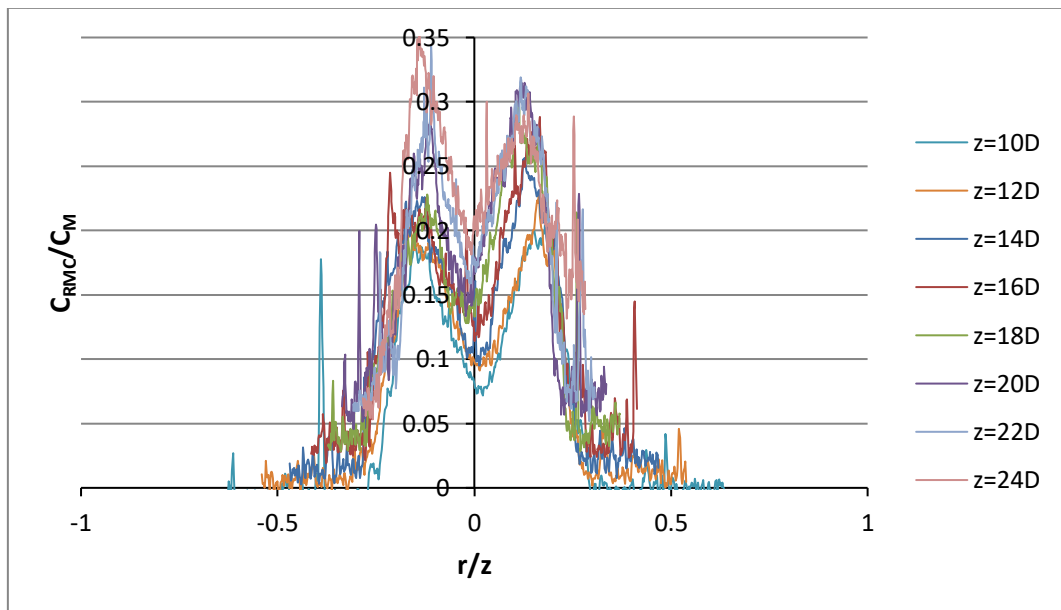


Σχήμα A.4 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP1

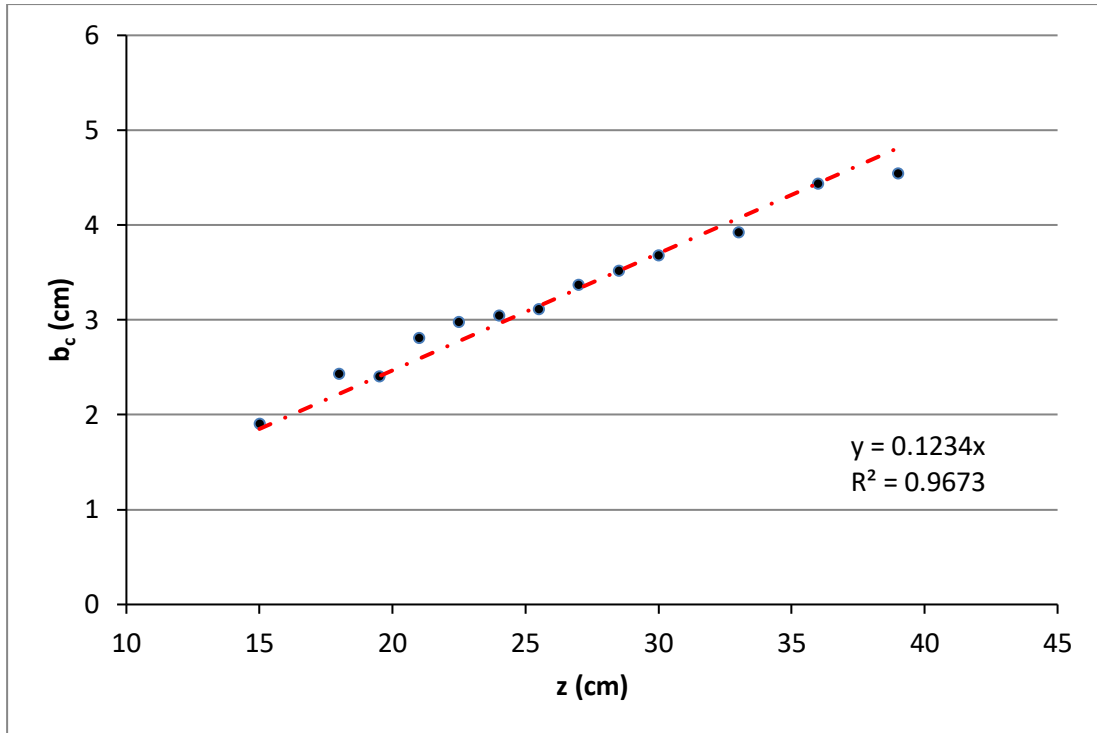
EXP3 (D=1.5 cm & Re=2857)



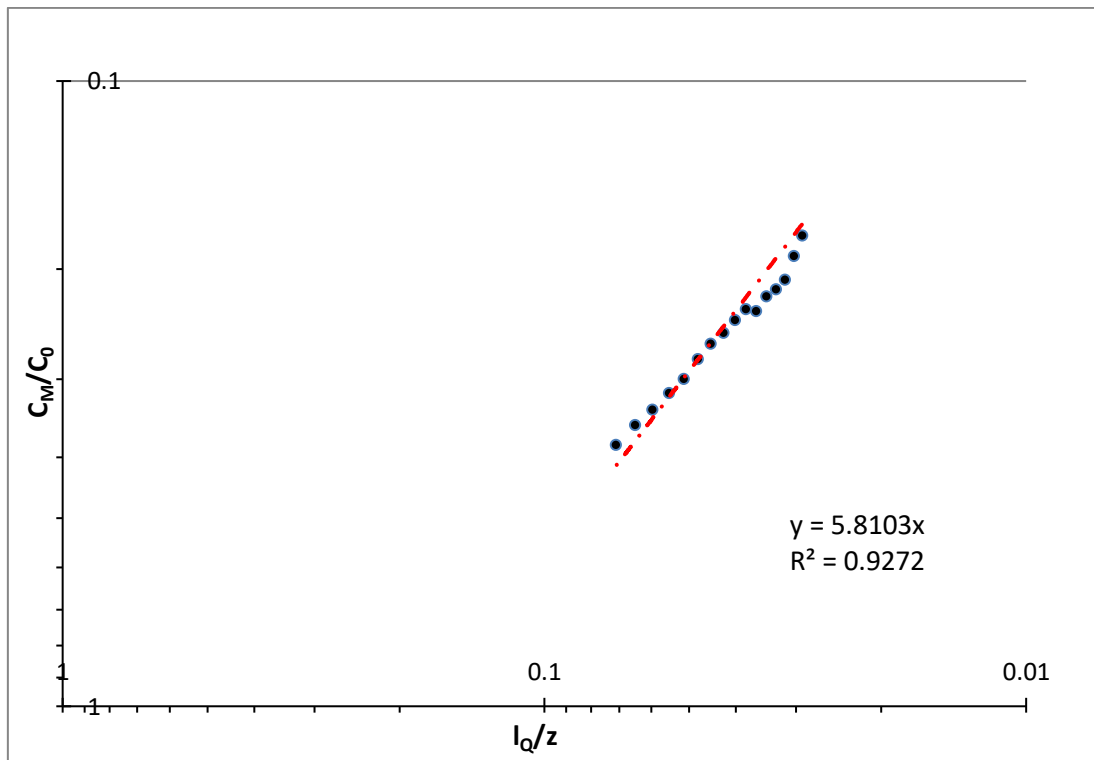
Σχήμα A.5 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 9 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP3



Σχήμα A.6 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 8 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP3

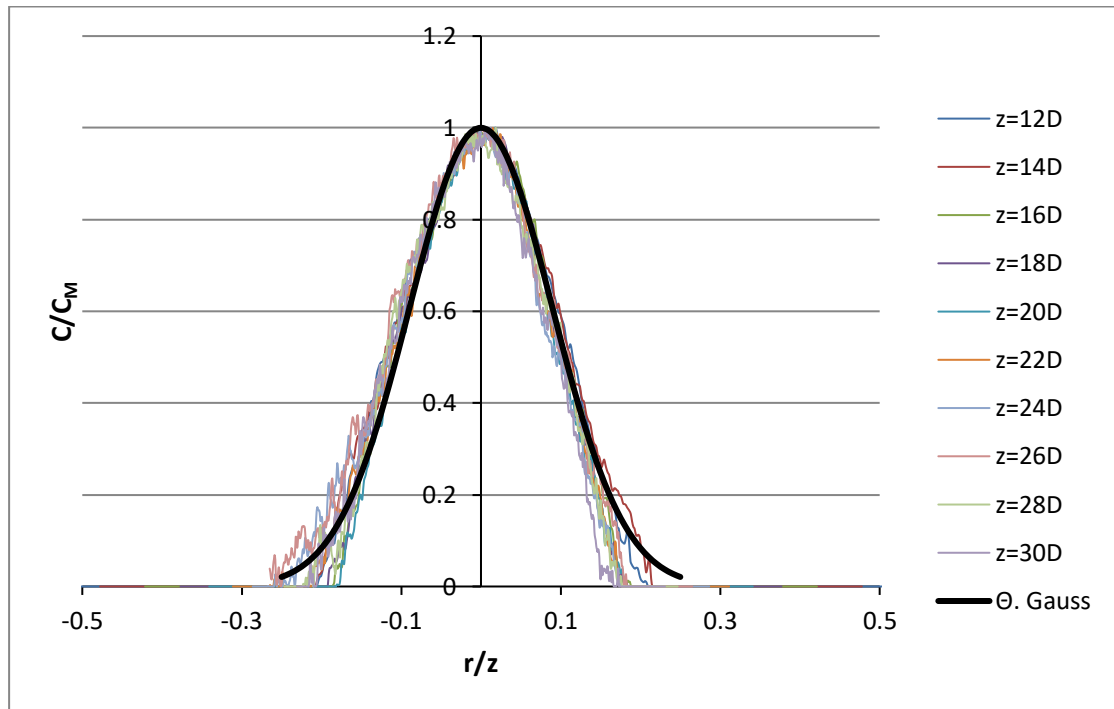


Σχήμα A.7 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP3

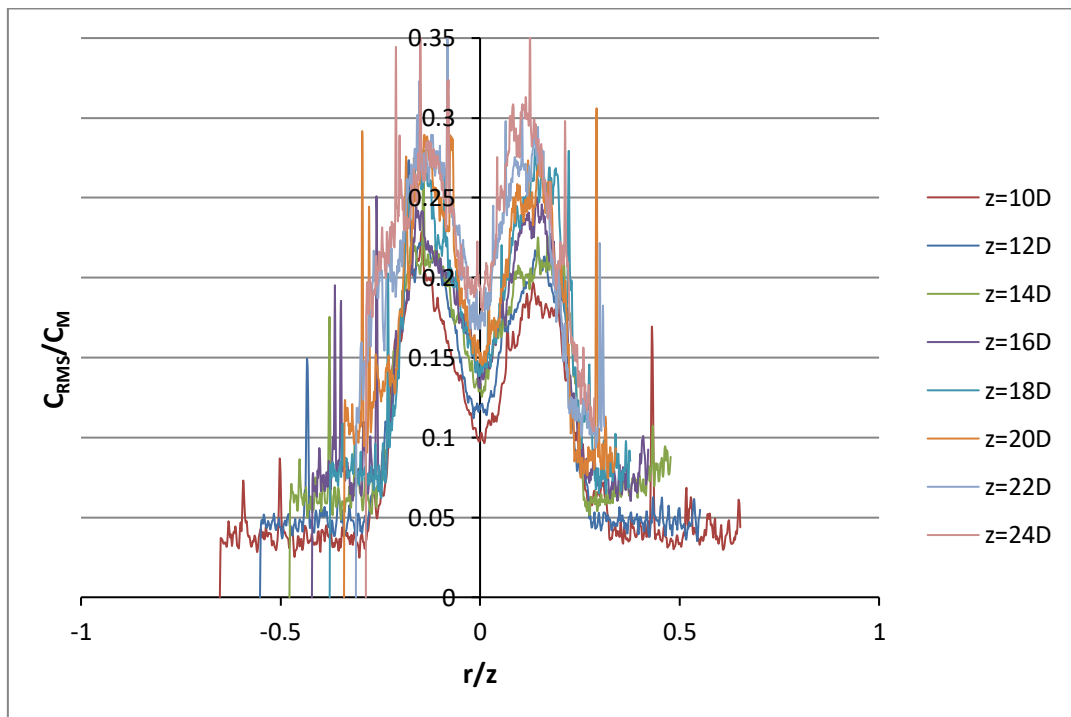


Σχήμα A.8 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP3

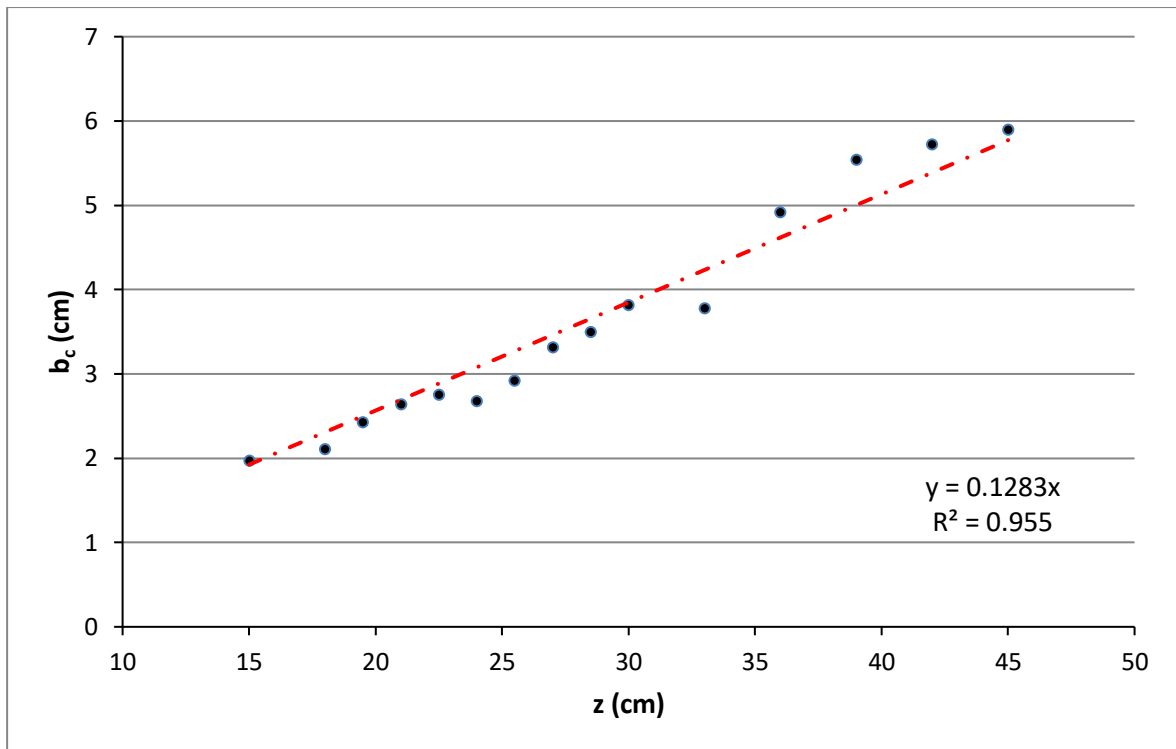
EXP4 (D=1.5 cm & Re=3319)



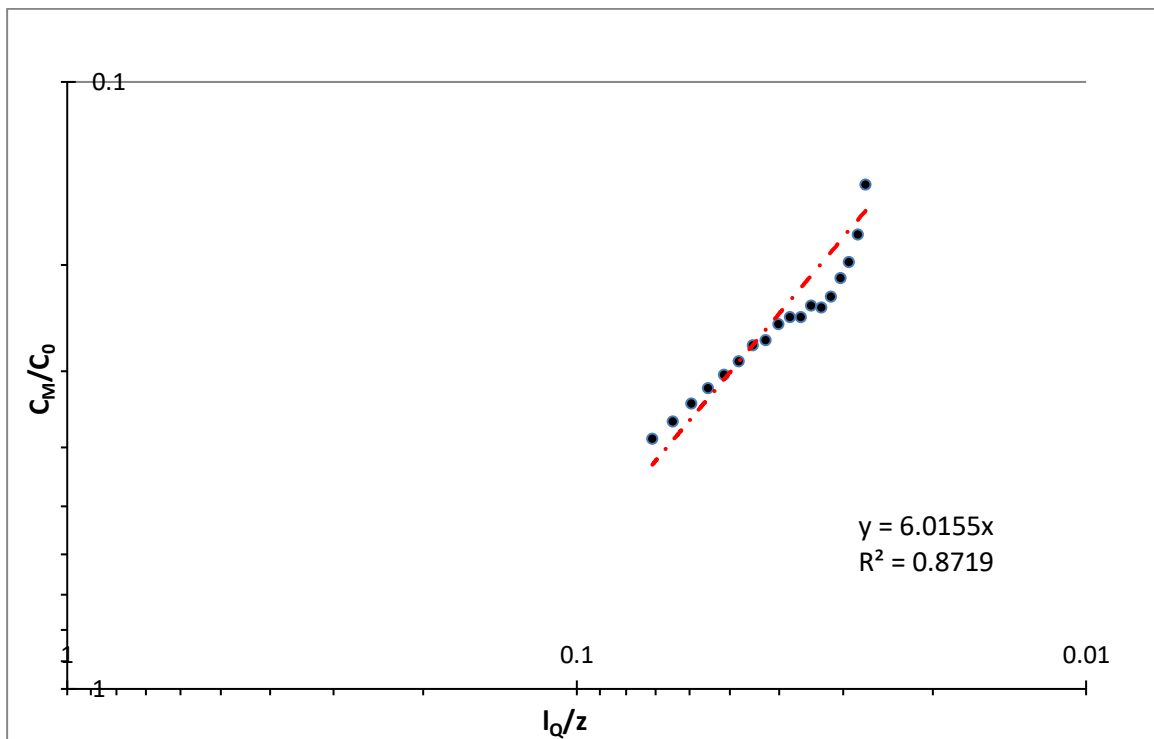
Σχήμα A.9 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 10 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP4



Σχήμα A.10 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 8 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP4

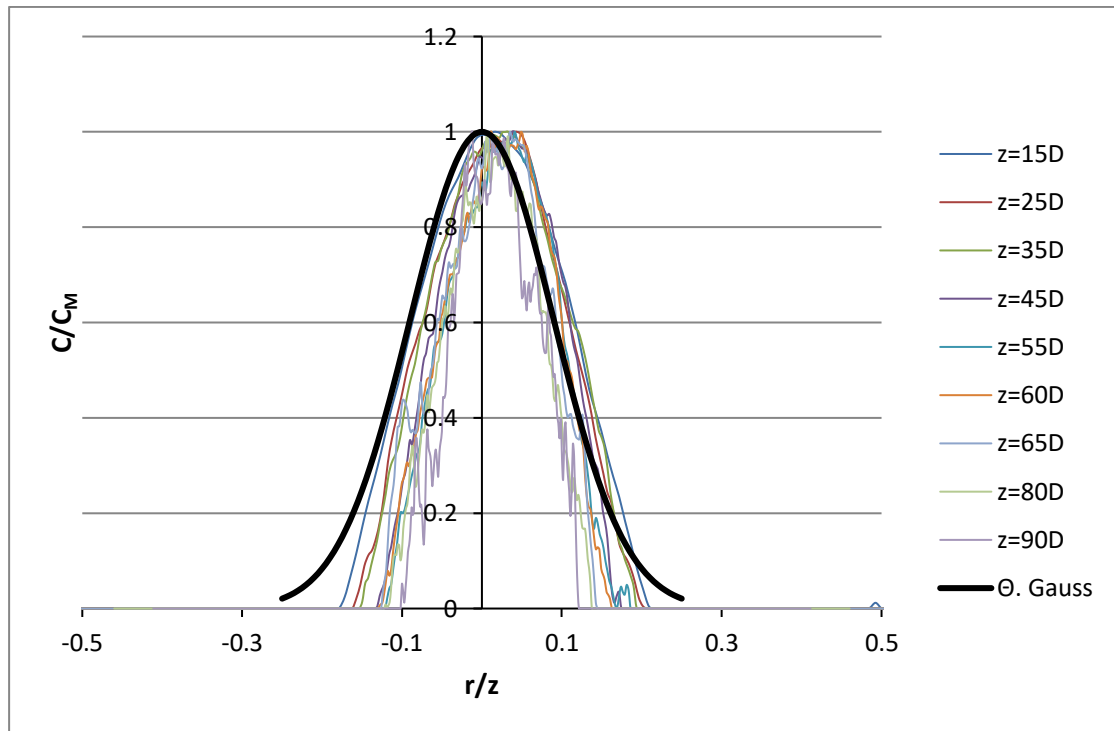


Σχήμα A.11 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP4

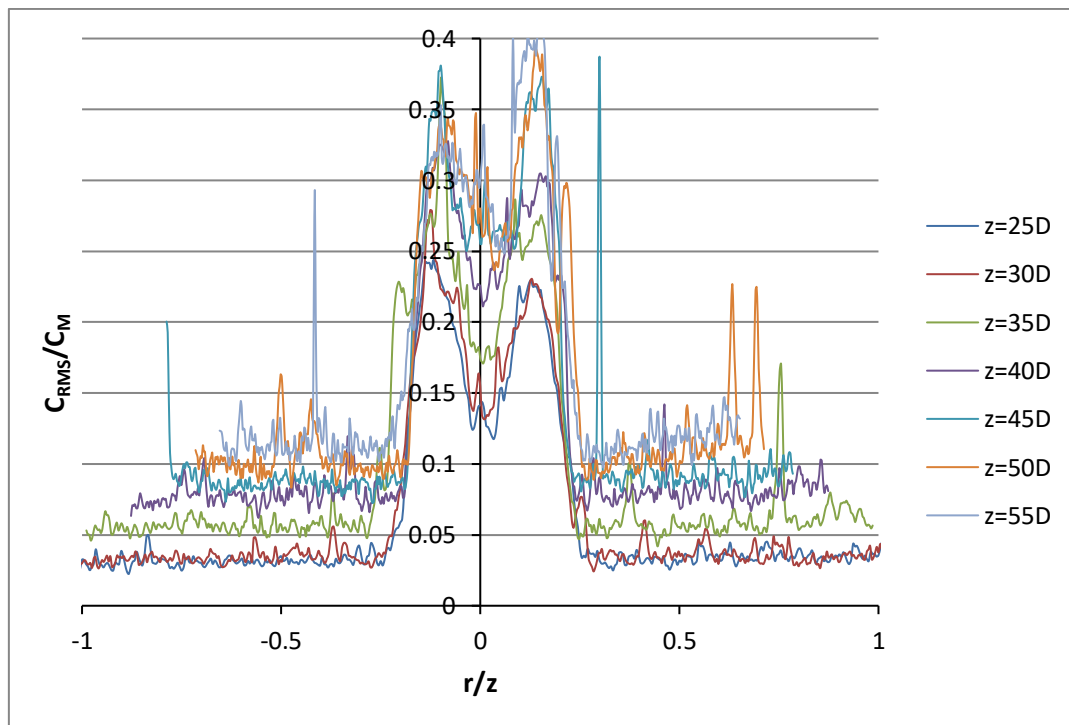


Σχήμα A.12 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP4

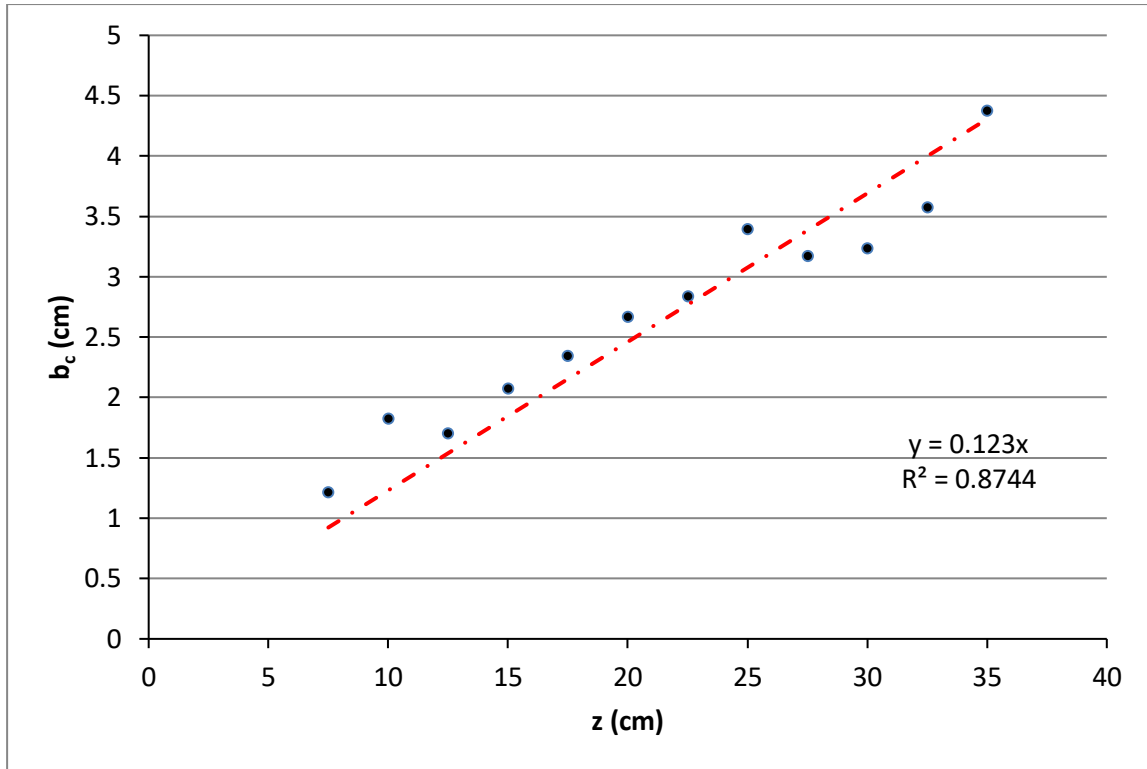
EXP5 ($D=0.5$ cm & $Re=2327$)



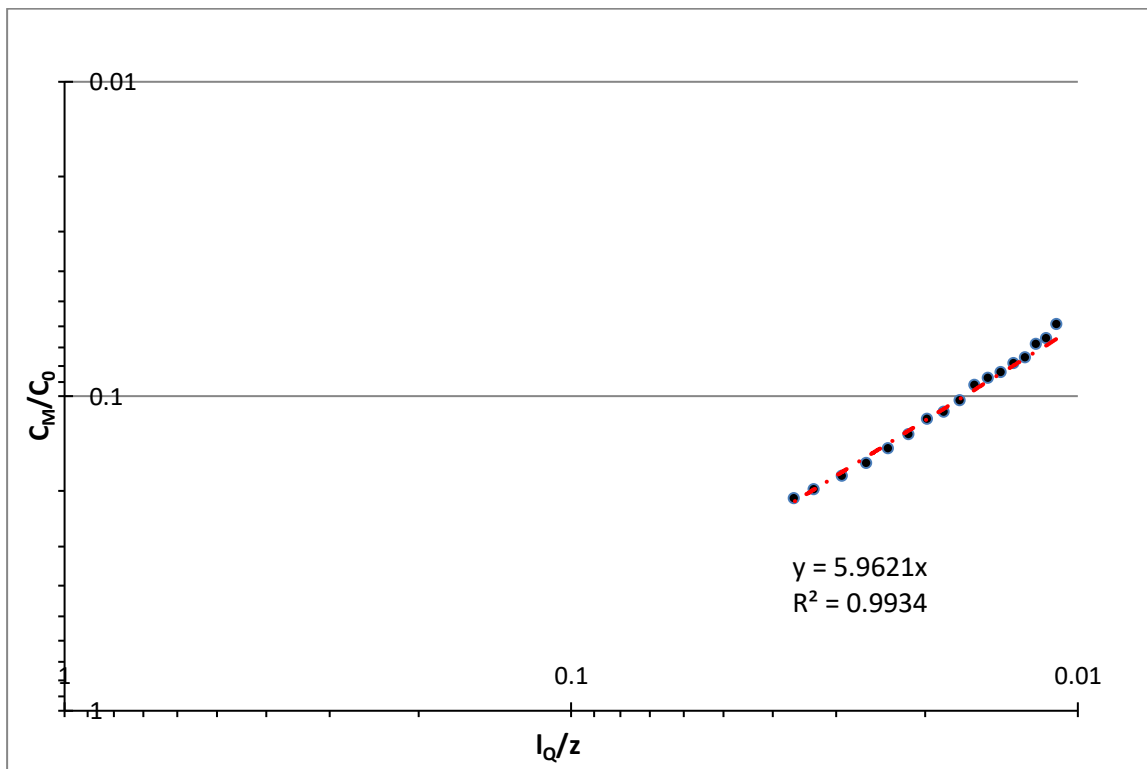
Σχήμα A.13 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 9 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP5



Σχήμα A.14 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 7 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP5

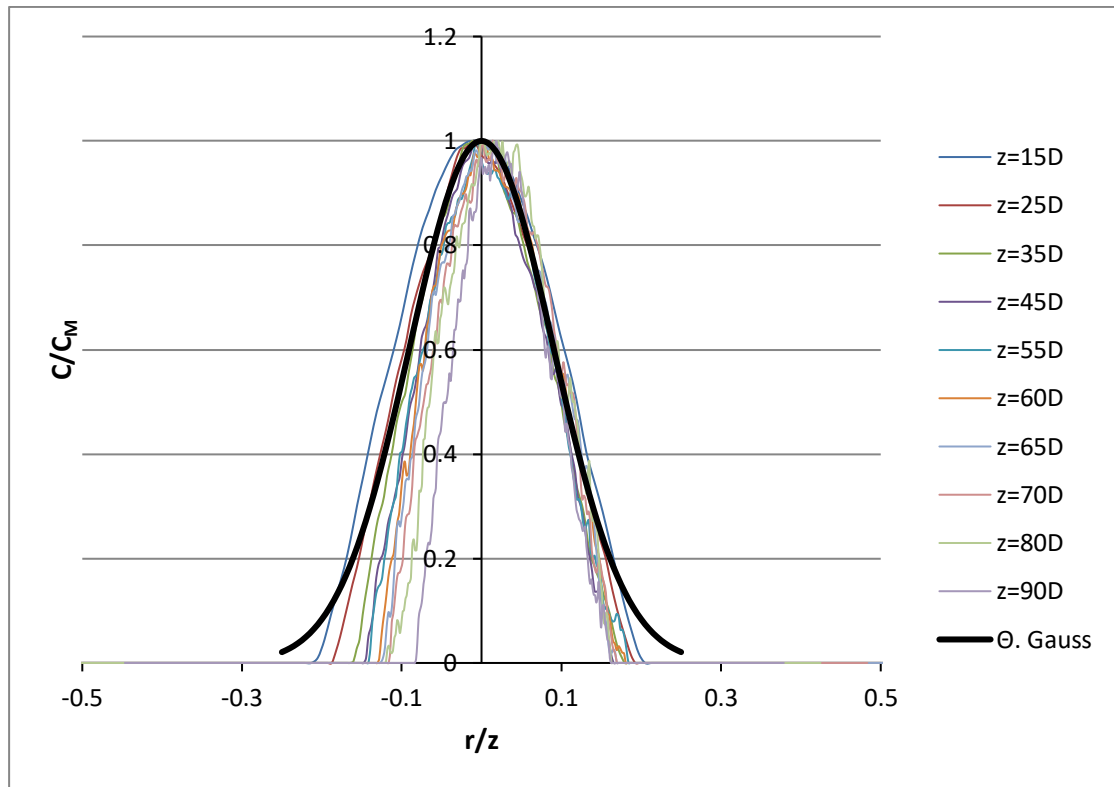


Σχήμα A.15 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP5

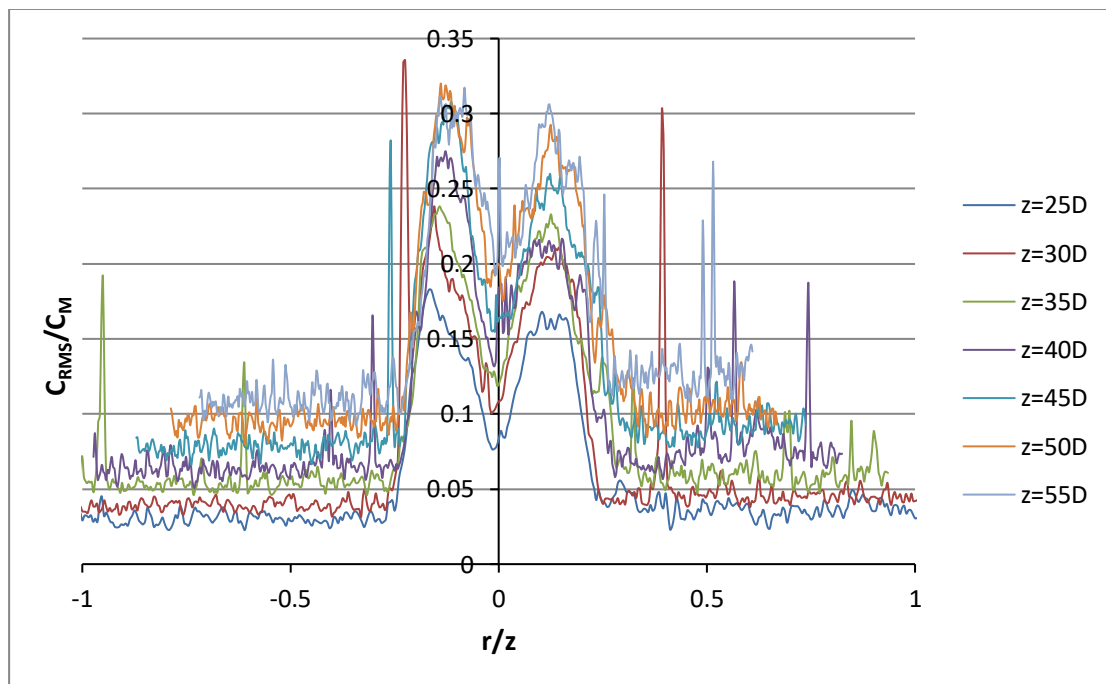


Σχήμα A.16 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP5

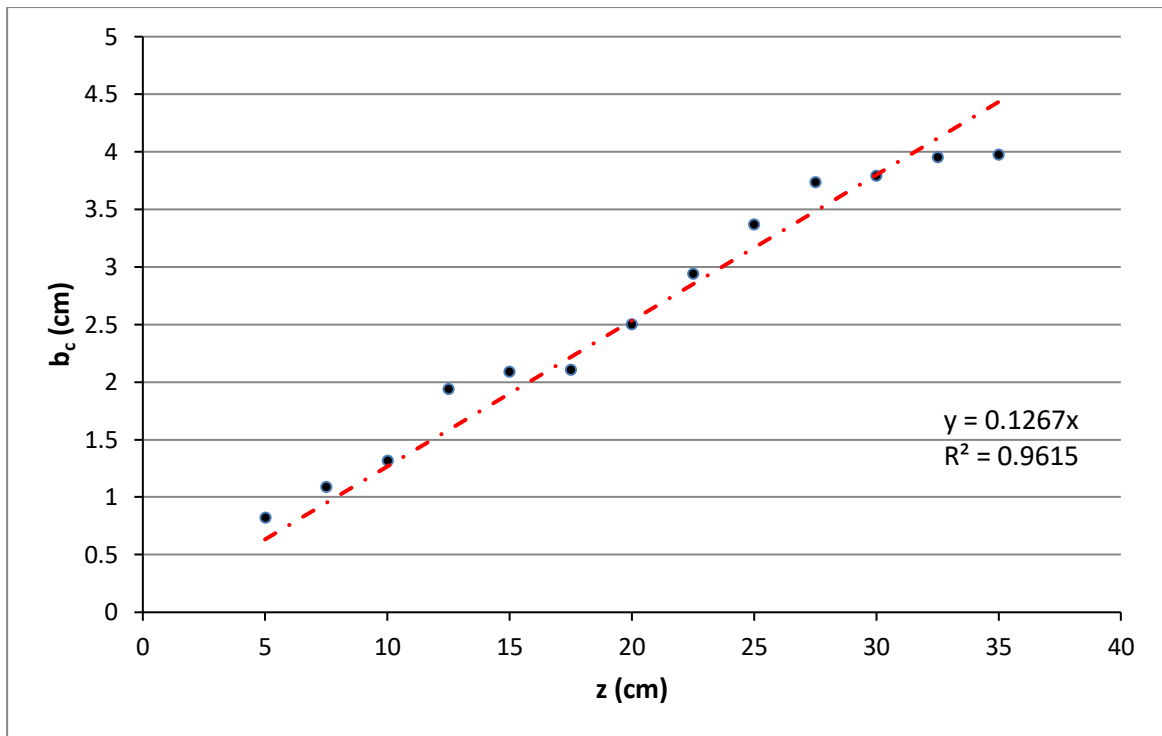
EXP6 (D=0.5 cm & Re=3784)



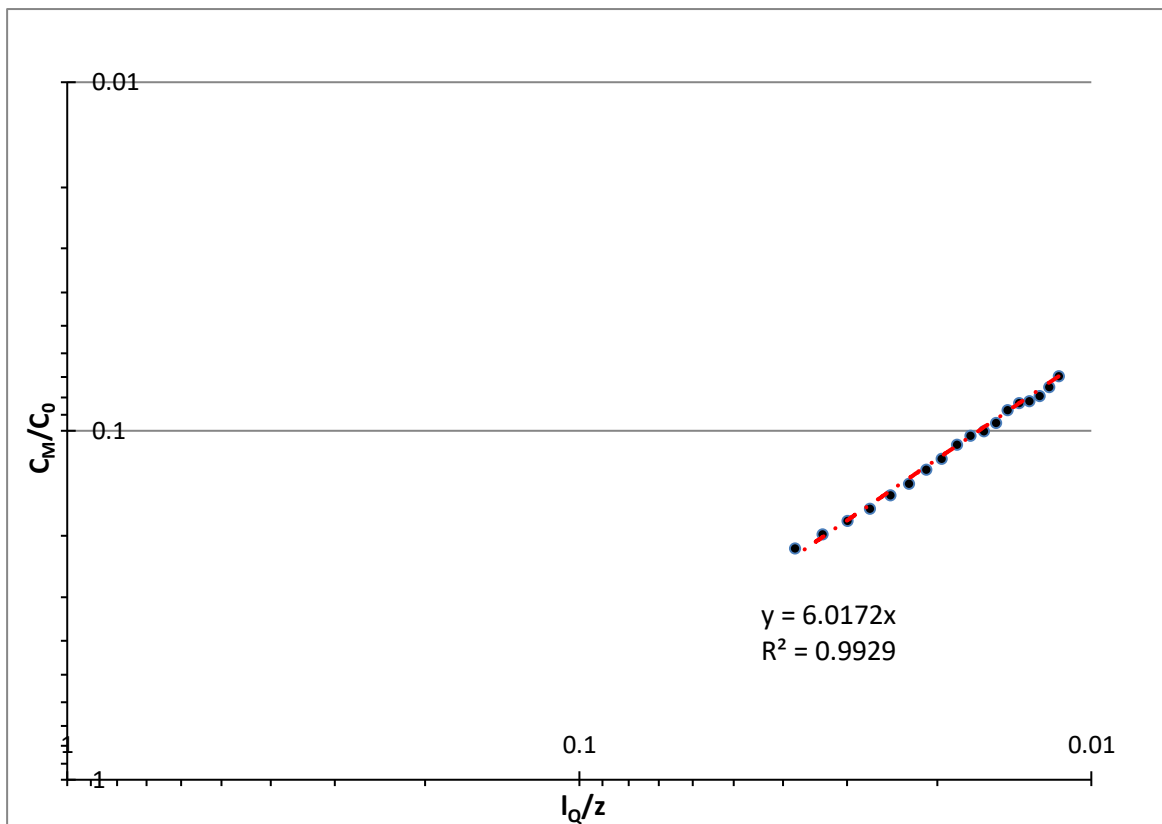
Σχήμα A.17 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 10 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP6



Σχήμα A.18 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 7 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP6

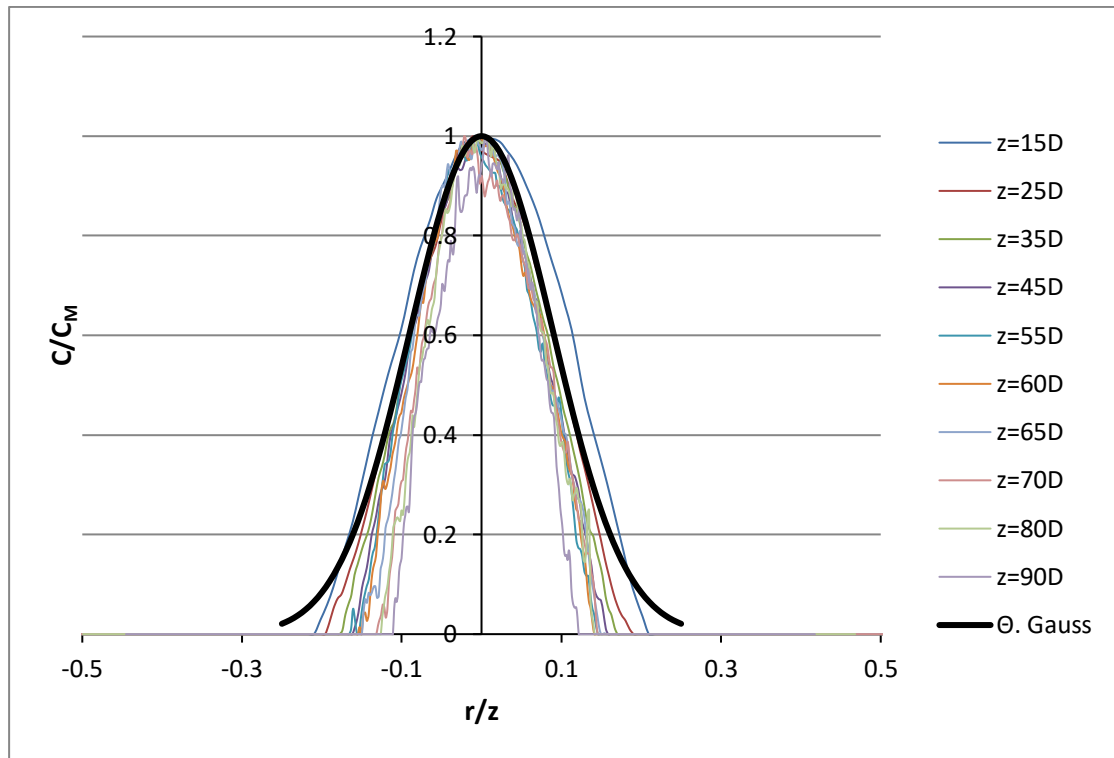


Σχήμα A.19 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP6

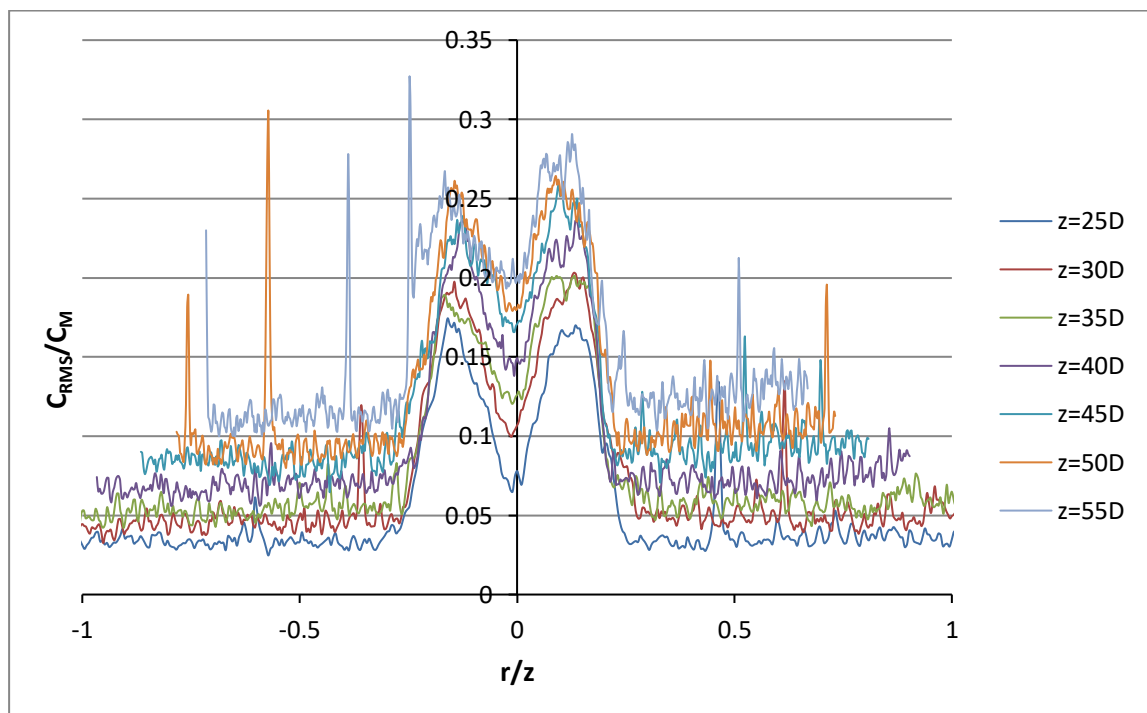


Σχήμα A.20 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C₀ με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP6

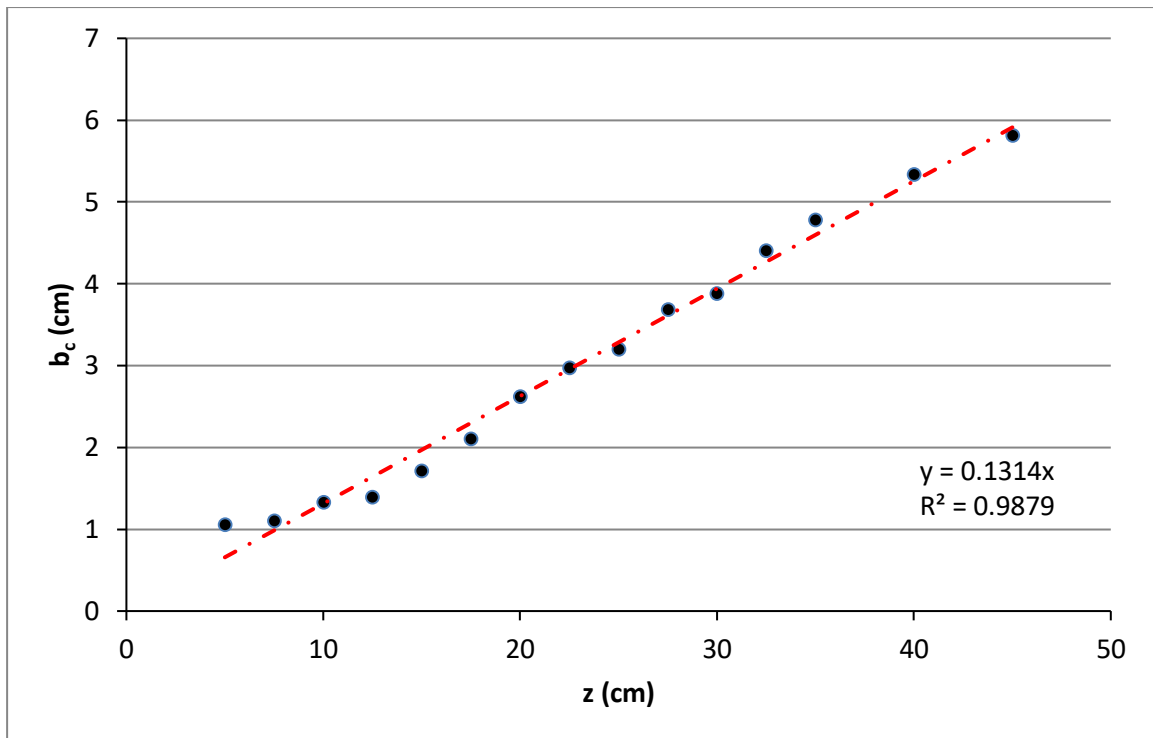
EXP7 (D=0.5 cm & Re=5240)



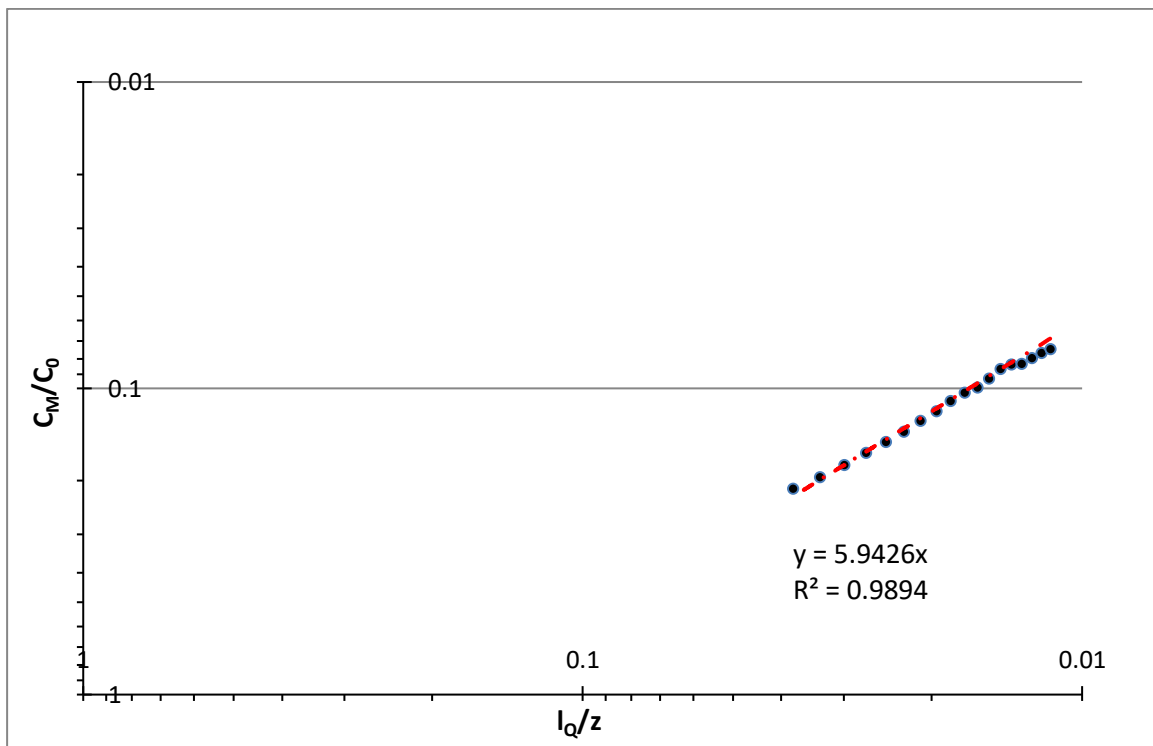
Σχήμα A.21 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 10 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP7



Σχήμα A.22 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 7 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP7

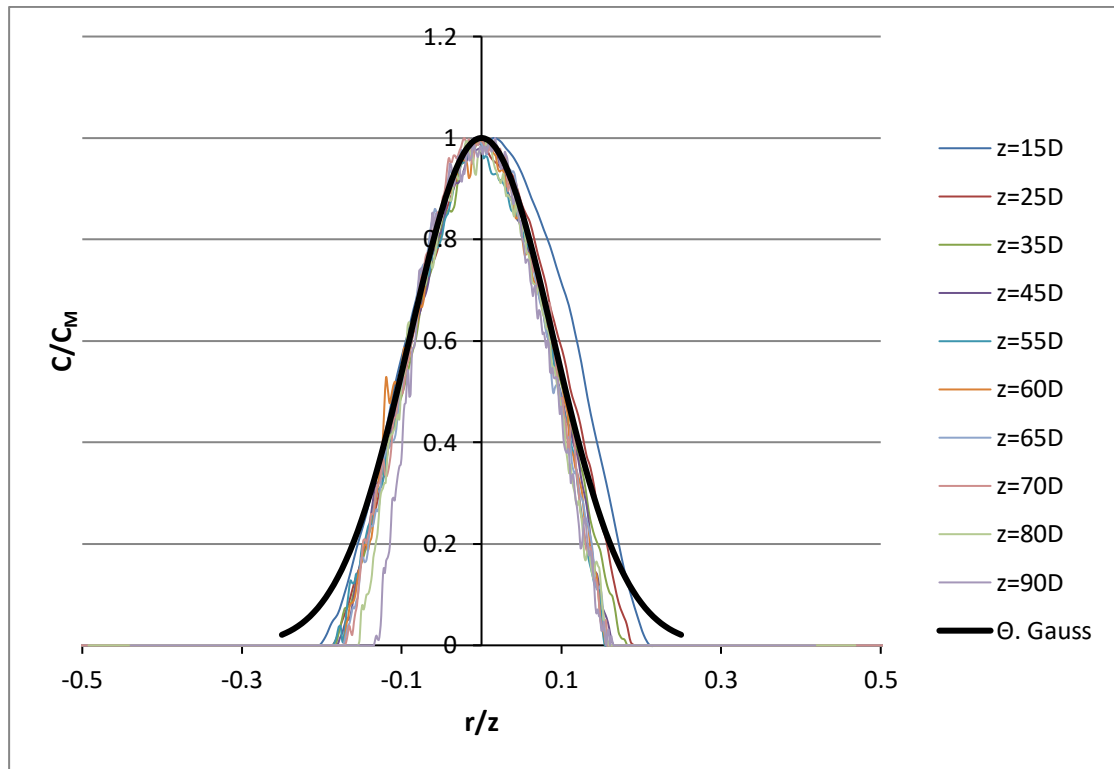


Σχήμα A.23 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP7

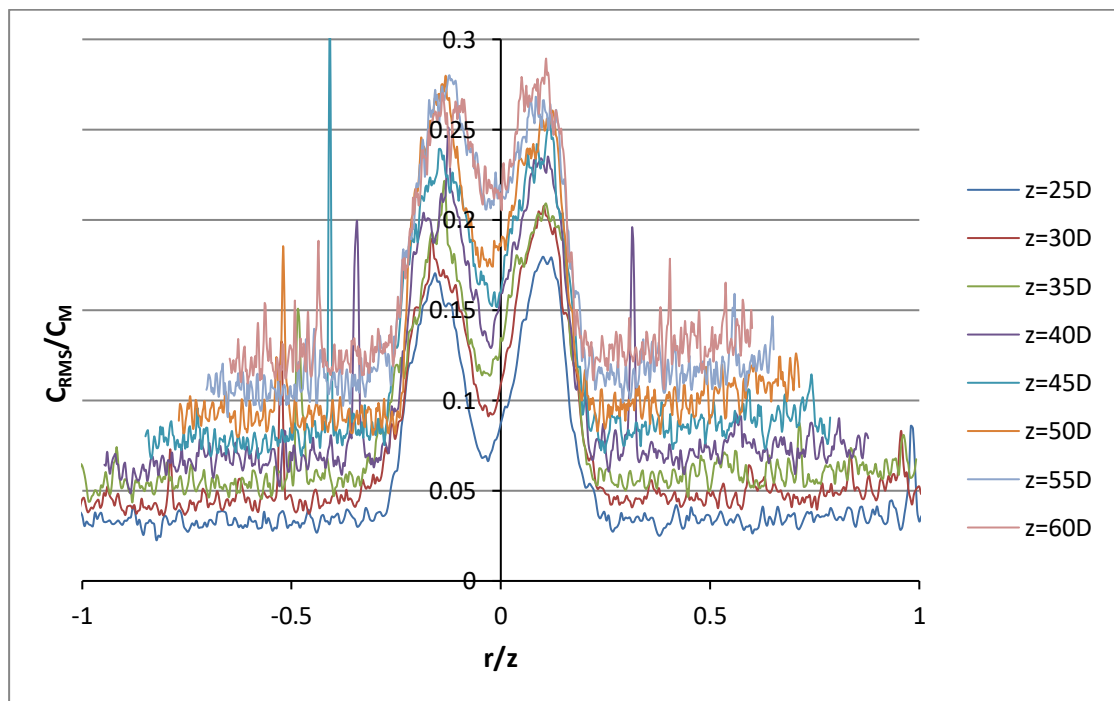


Σχήμα A.24 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP7

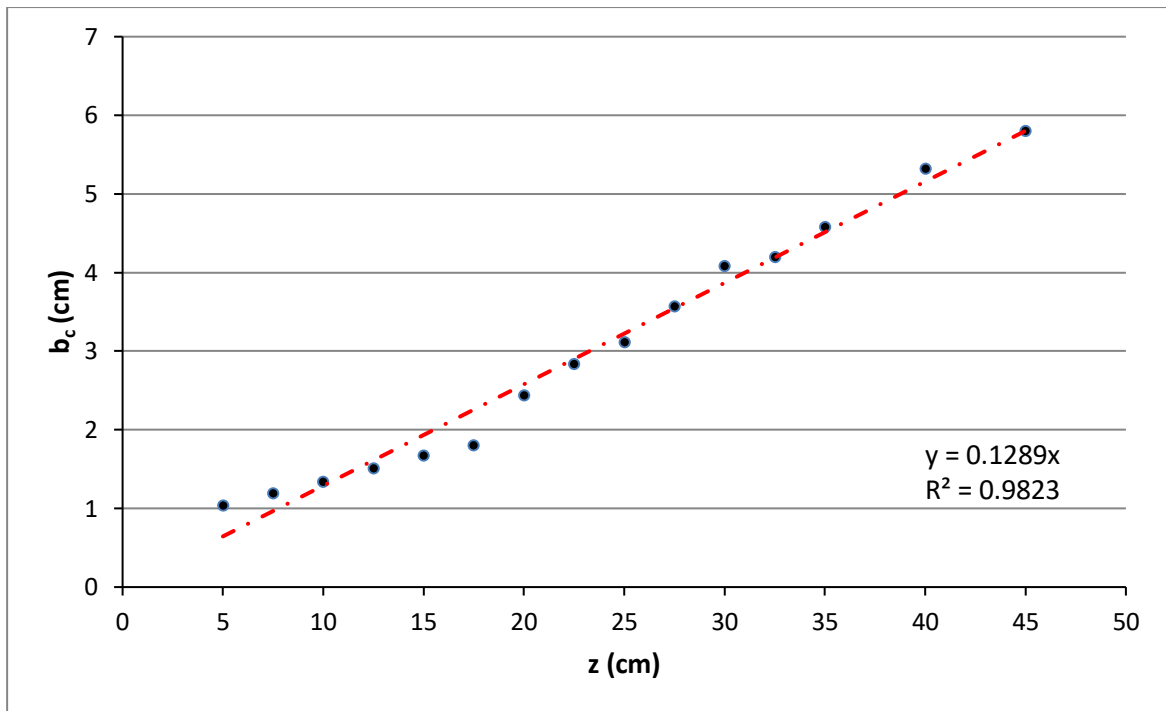
EXP8 (D=0.5 cm & Re=6628)



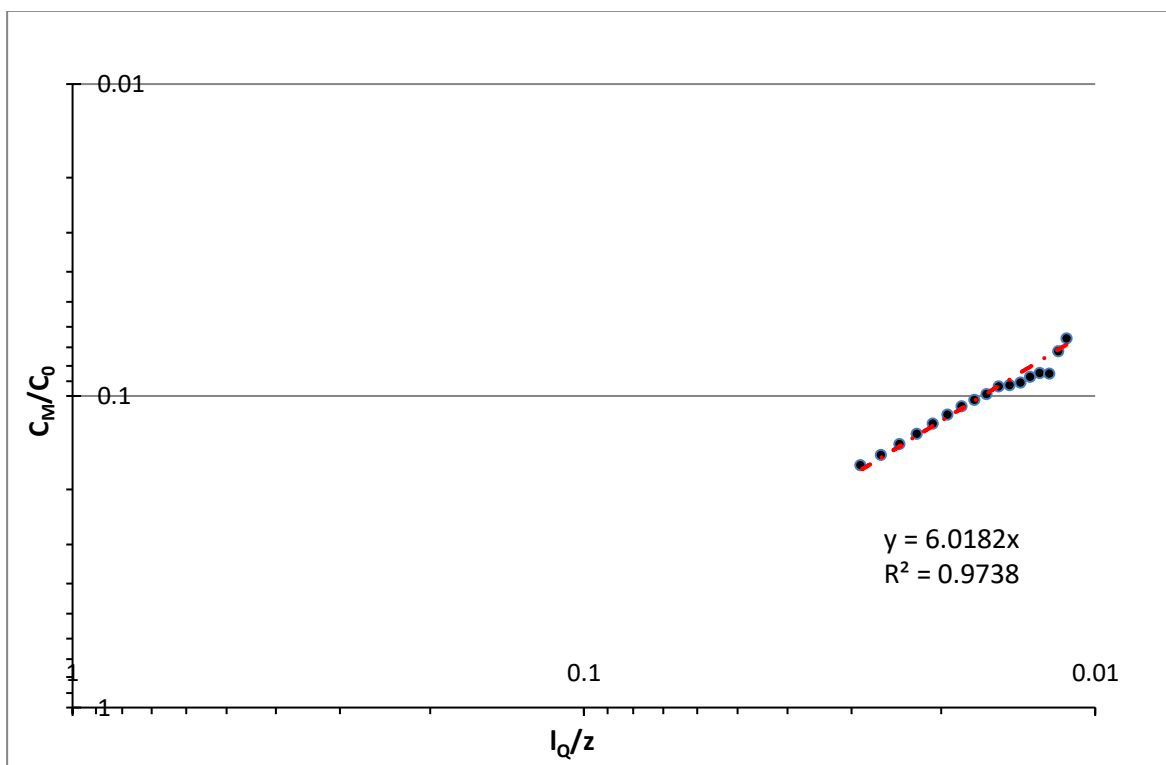
Σχήμα A.25 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 10 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP8



Σχήμα A.26 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 8 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP8

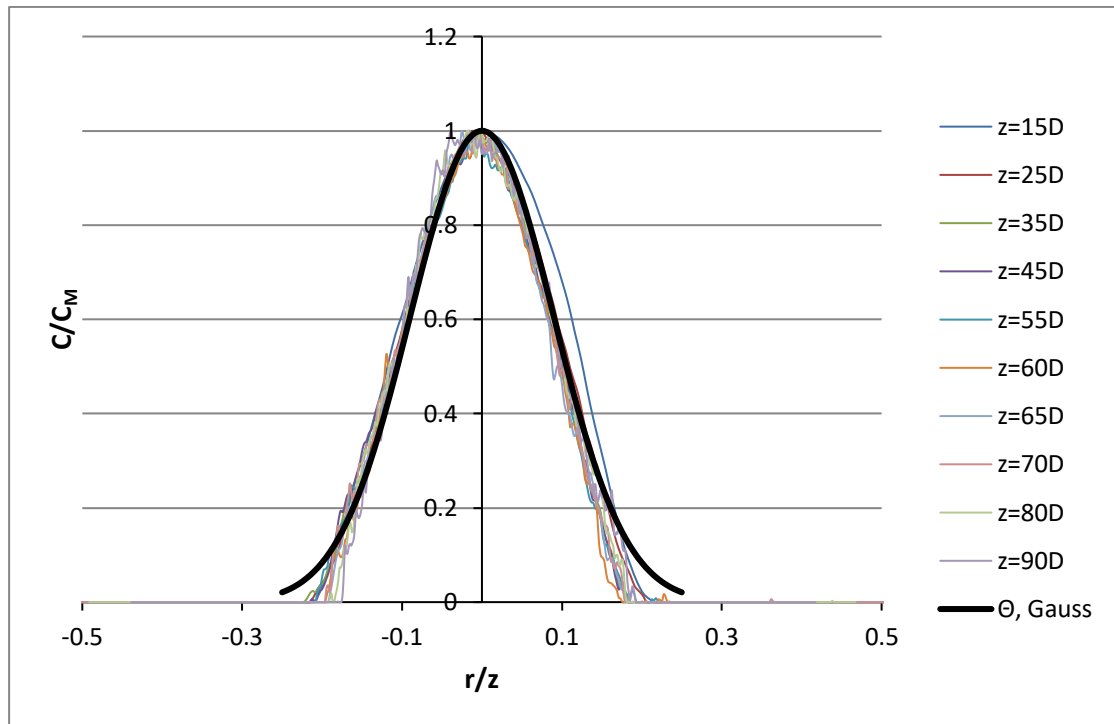


Σχήμα A.27 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP8

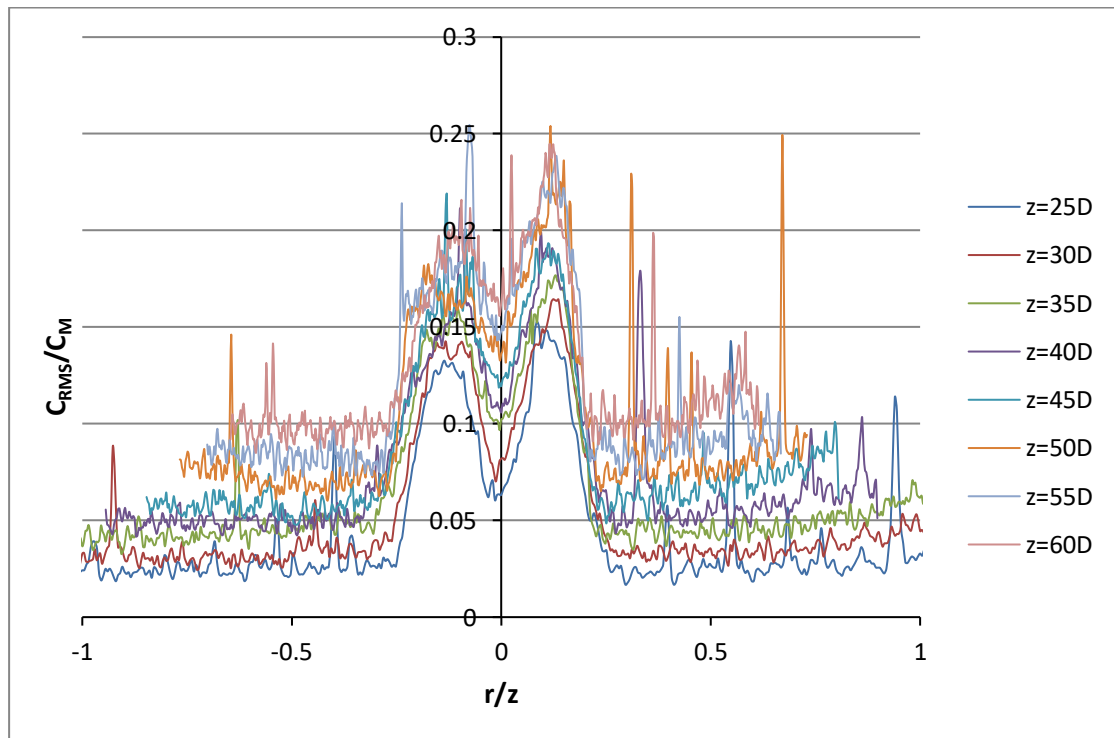


Σχήμα A.28 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP8

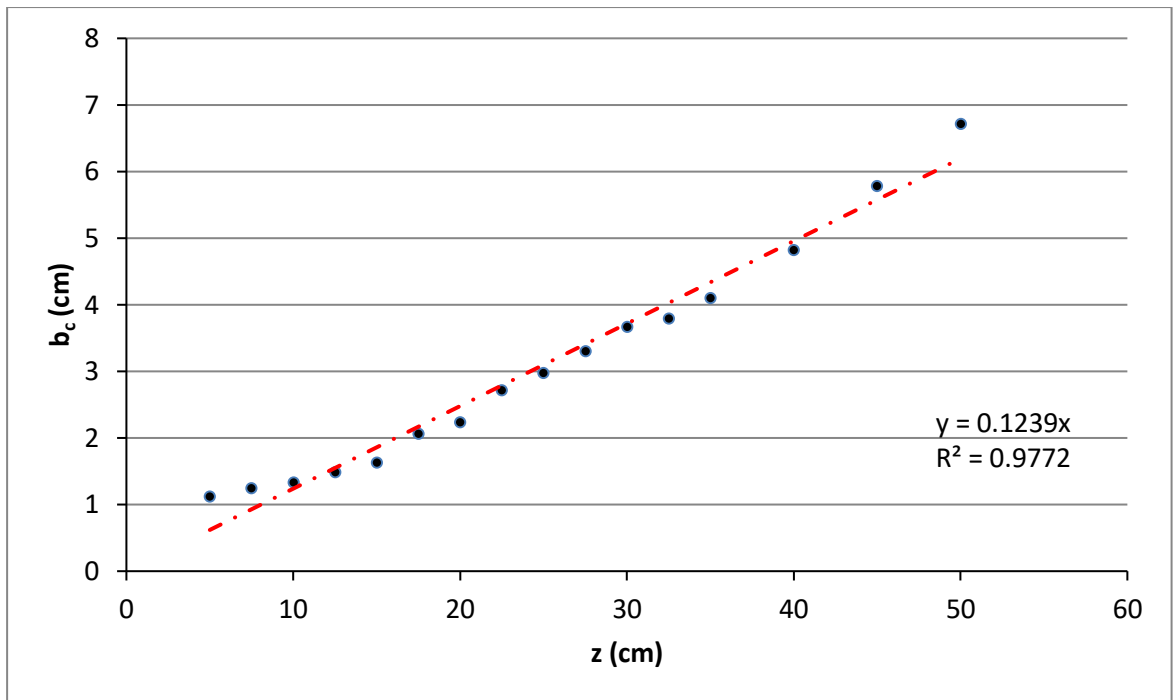
EXP9 (D=0.5 cm & Re=8292)



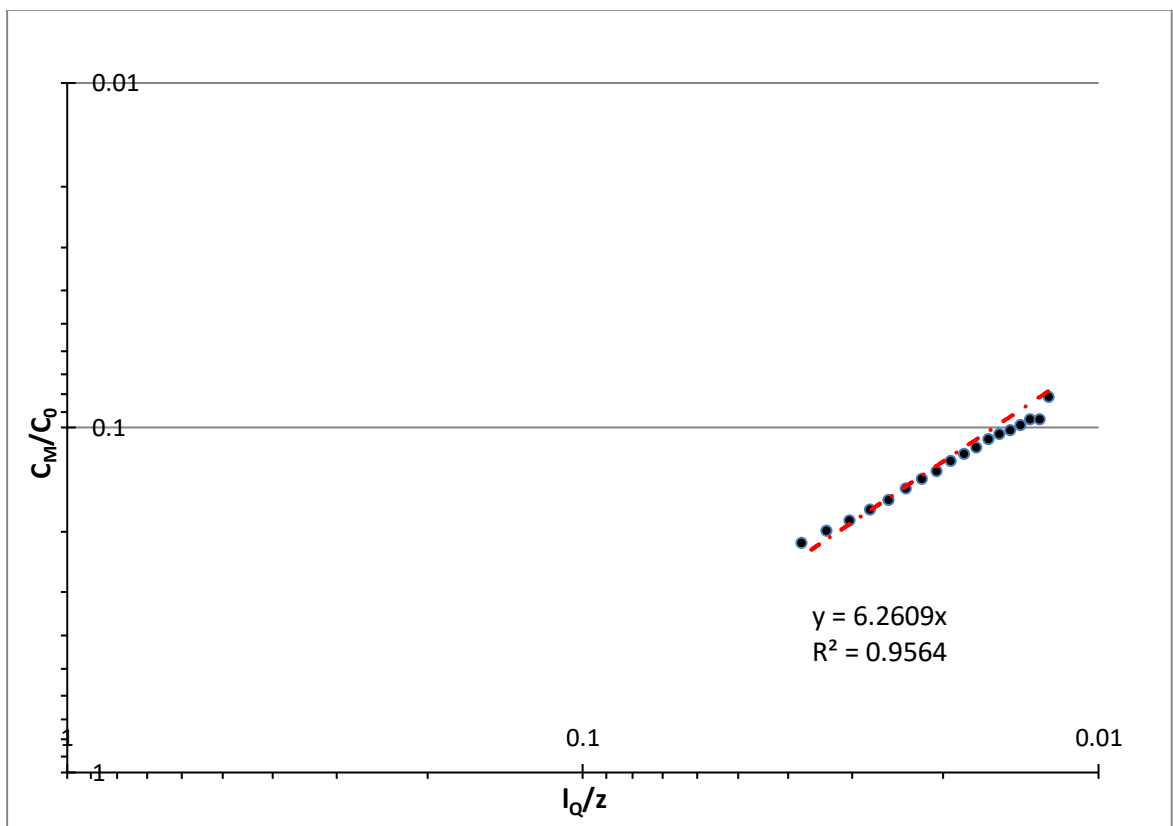
Σχήμα A.29 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 10 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP9



Σχήμα A.30 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 8 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP8



Σχήμα A.31 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP9

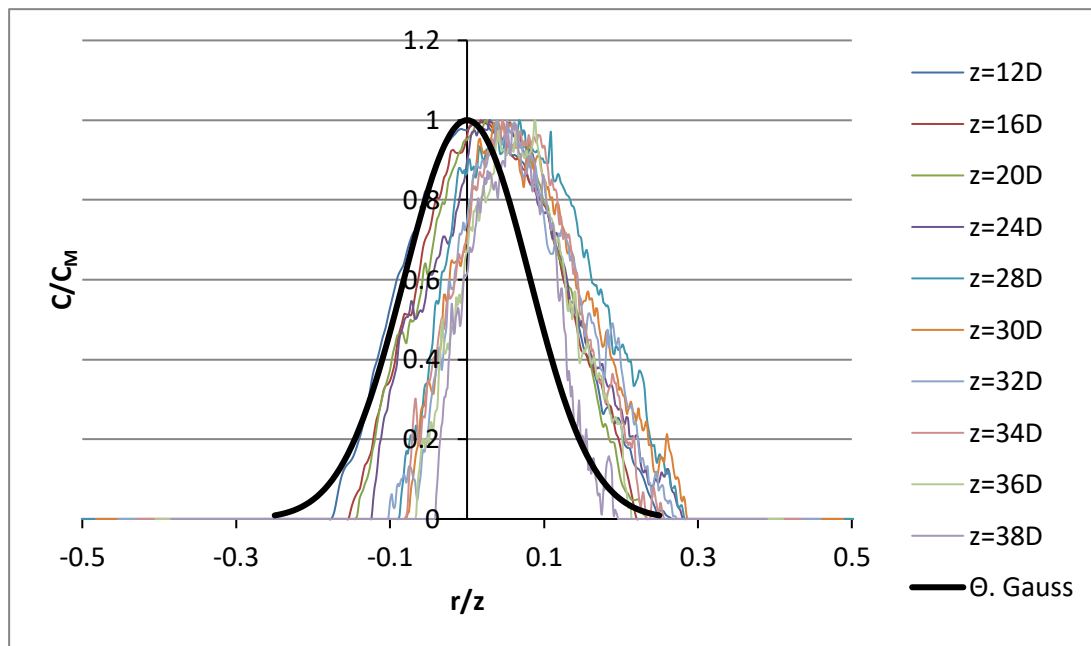


Σχήμα A.32 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP9

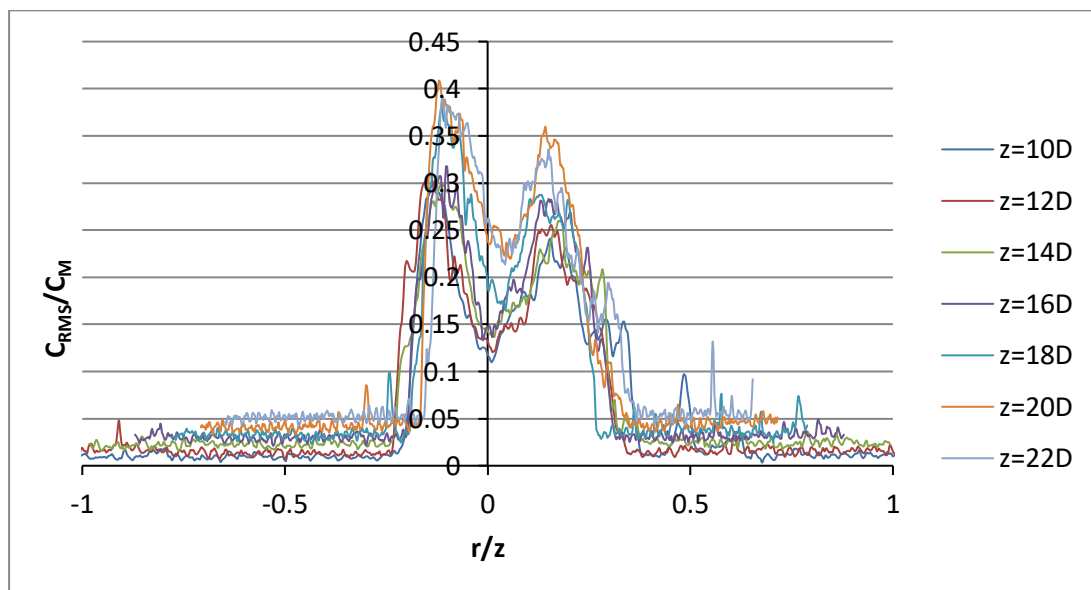
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Όπως και στο Παράρτημα Α πρέπει να σημειωθεί πως όπου αναφέρεται στα σχήματα Θ .Gauss εννοείται η κατανομή Gauss.

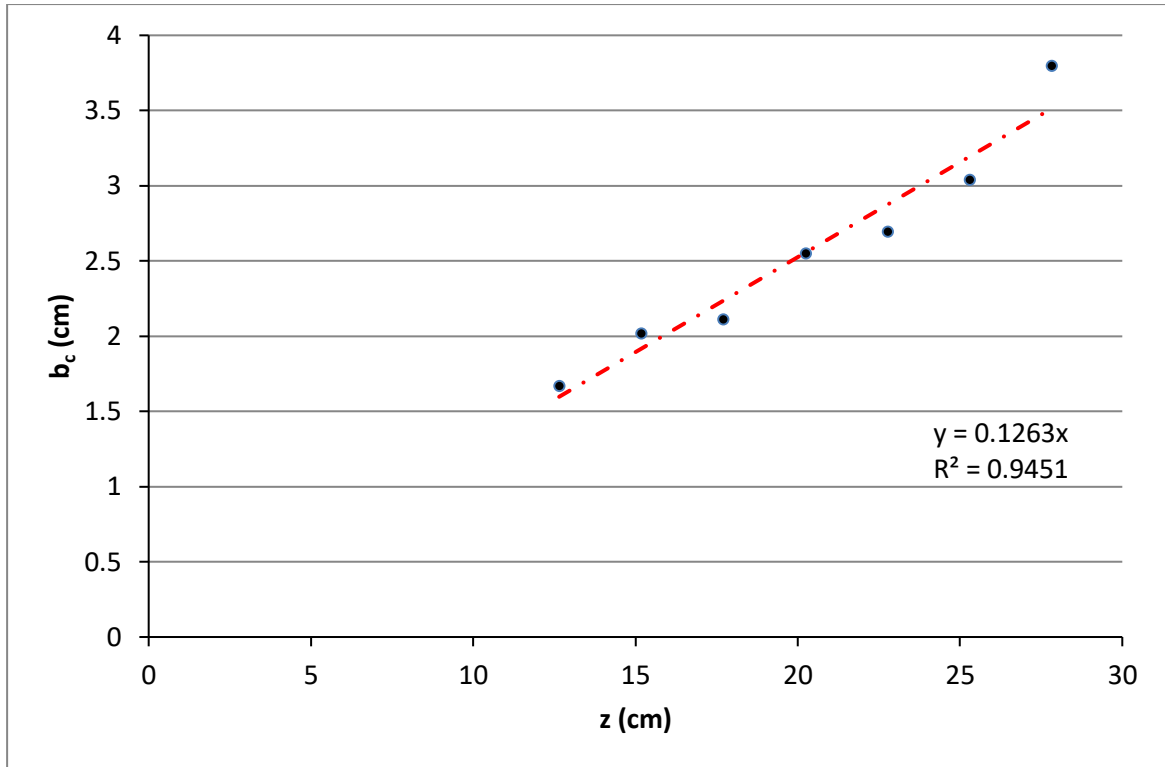
EXP14 ($D_h=1.265$ cm & $Re=1224$, Κύριος άξονας)



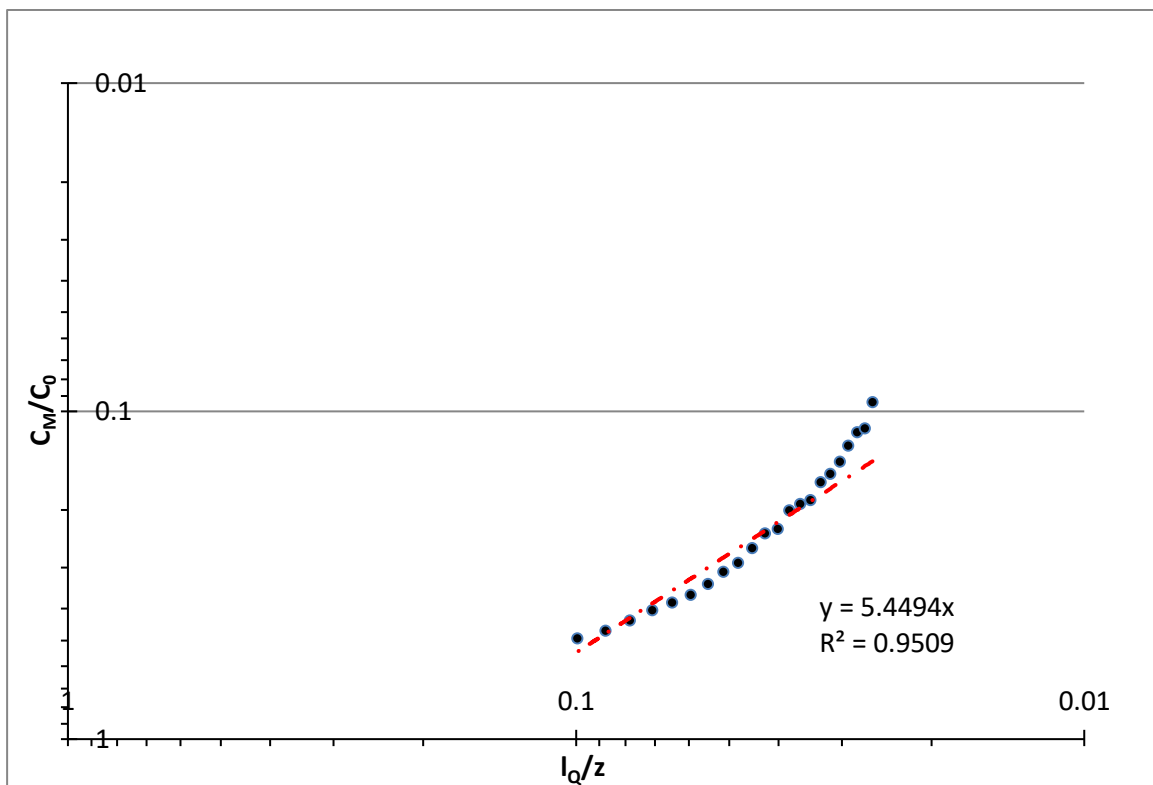
Σχήμα Β.1 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 10 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP14



Σχήμα Β.2 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 7 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP14

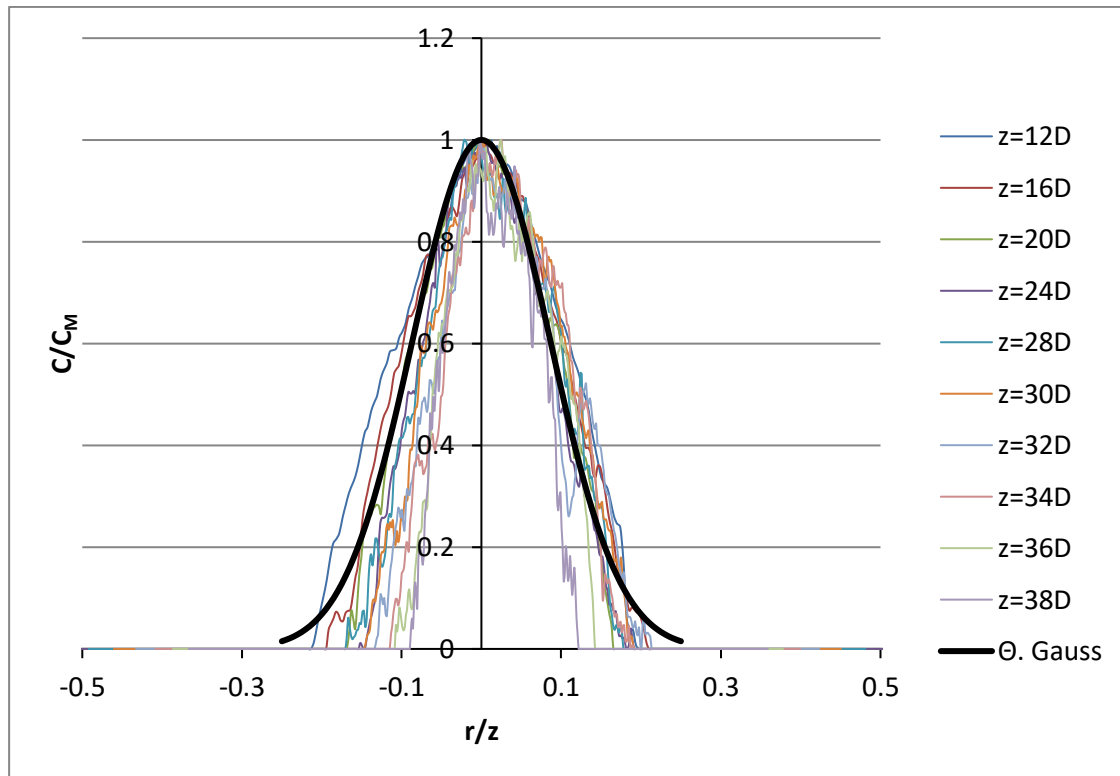


Σχήμα Β.3 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP14

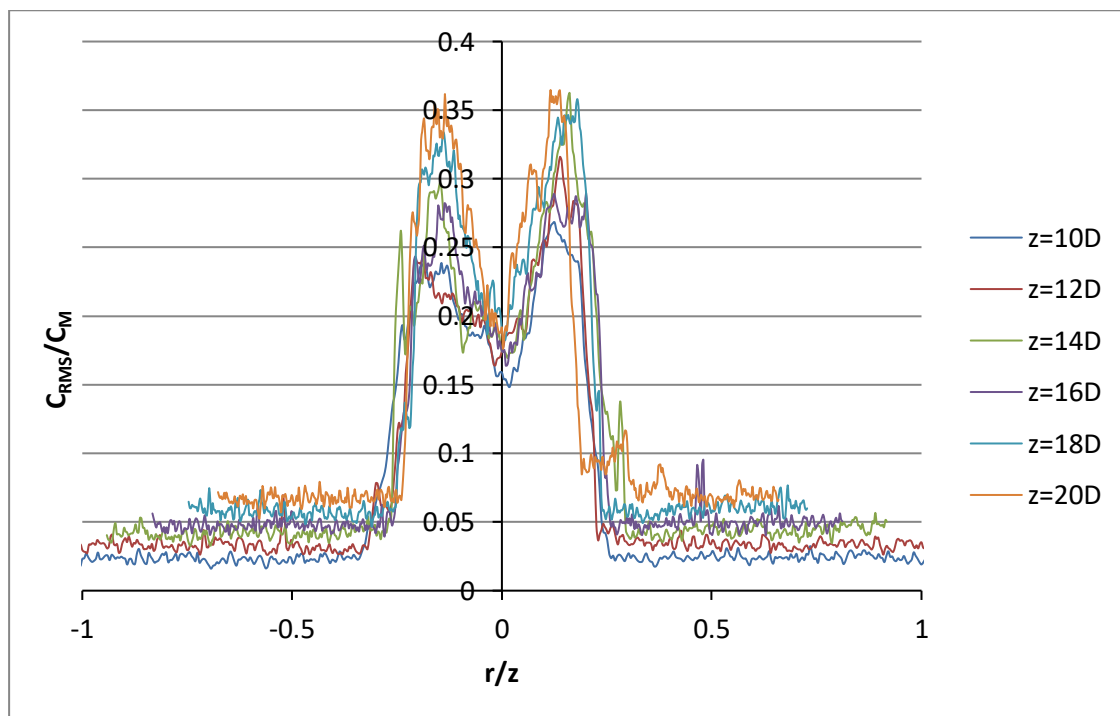


Σχήμα Β.4 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP14

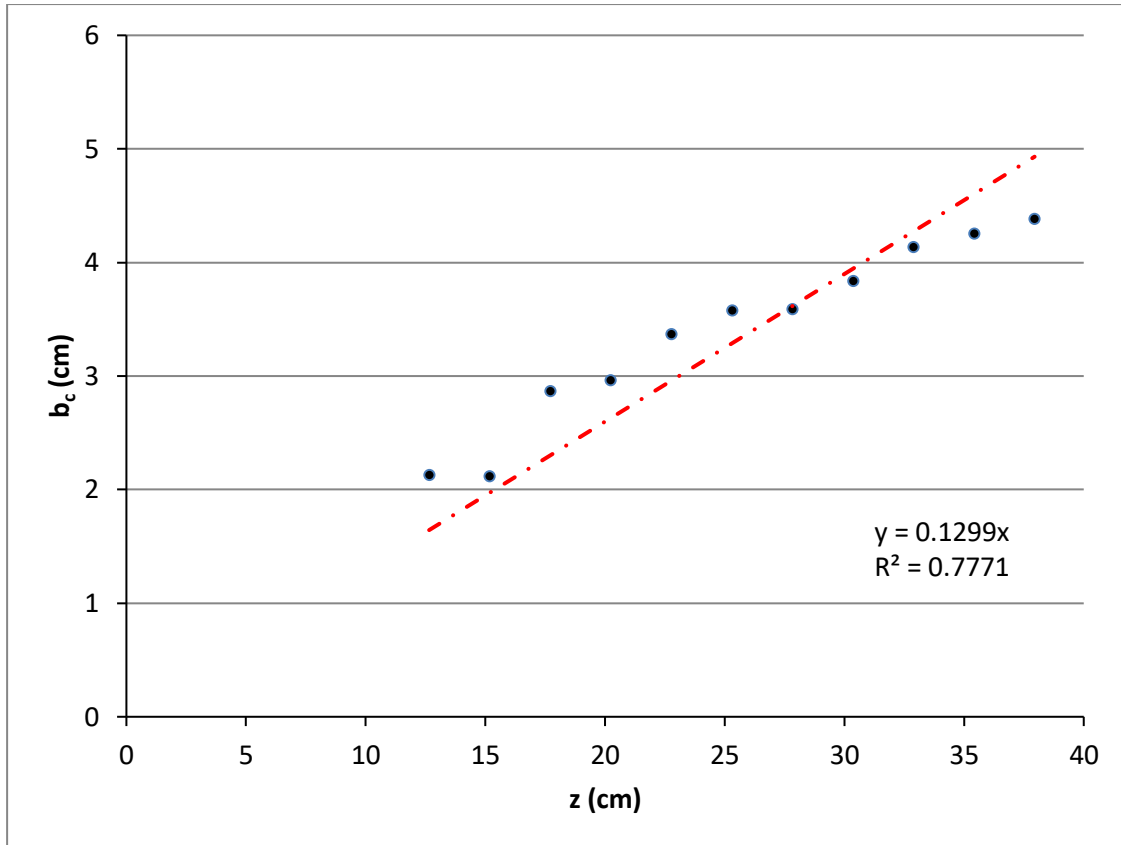
EXP15 ($D_h=1.265$ cm & $Re=1224$, Δευτερεύων άξονας)



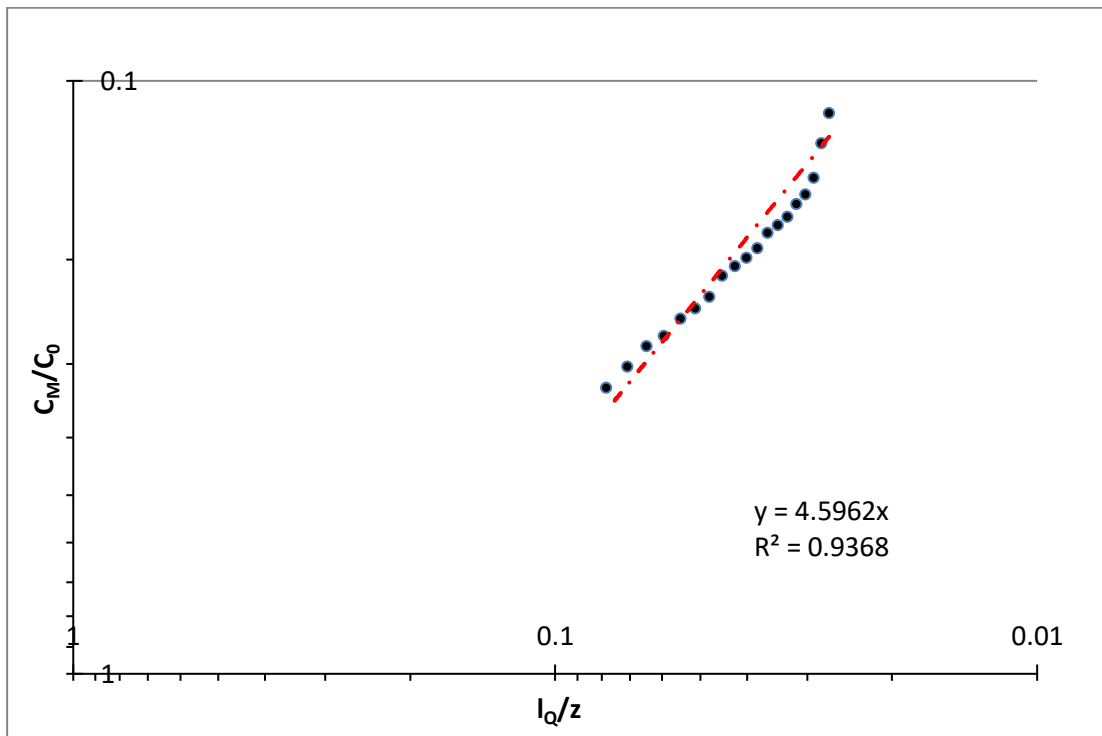
Σχήμα Β.5 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 10 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP15



Σχήμα Β.6 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 6 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP15

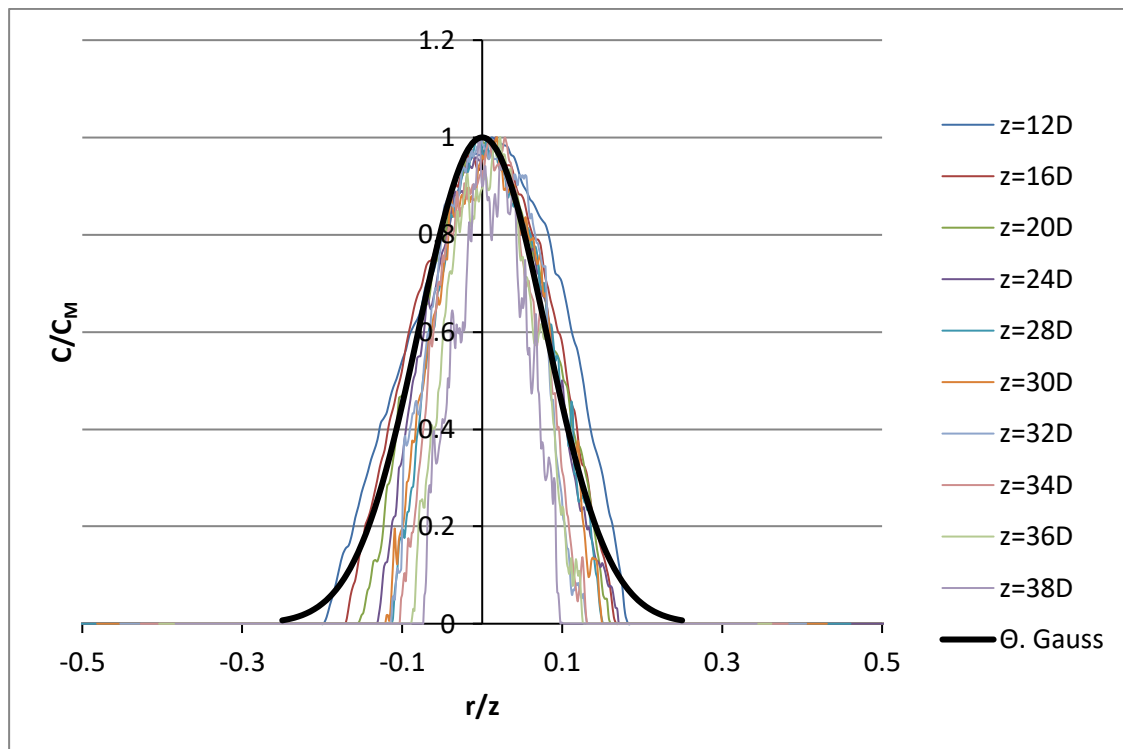


Σχήμα Β.7 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP15

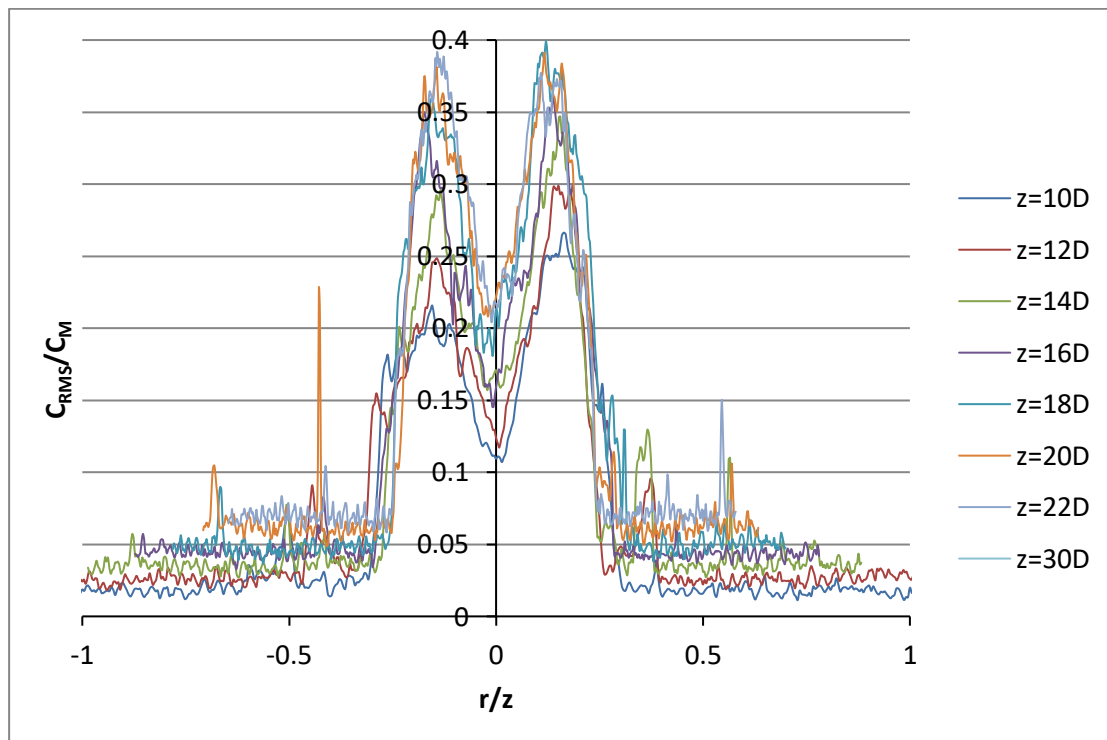


Σχήμα Β.8 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP15

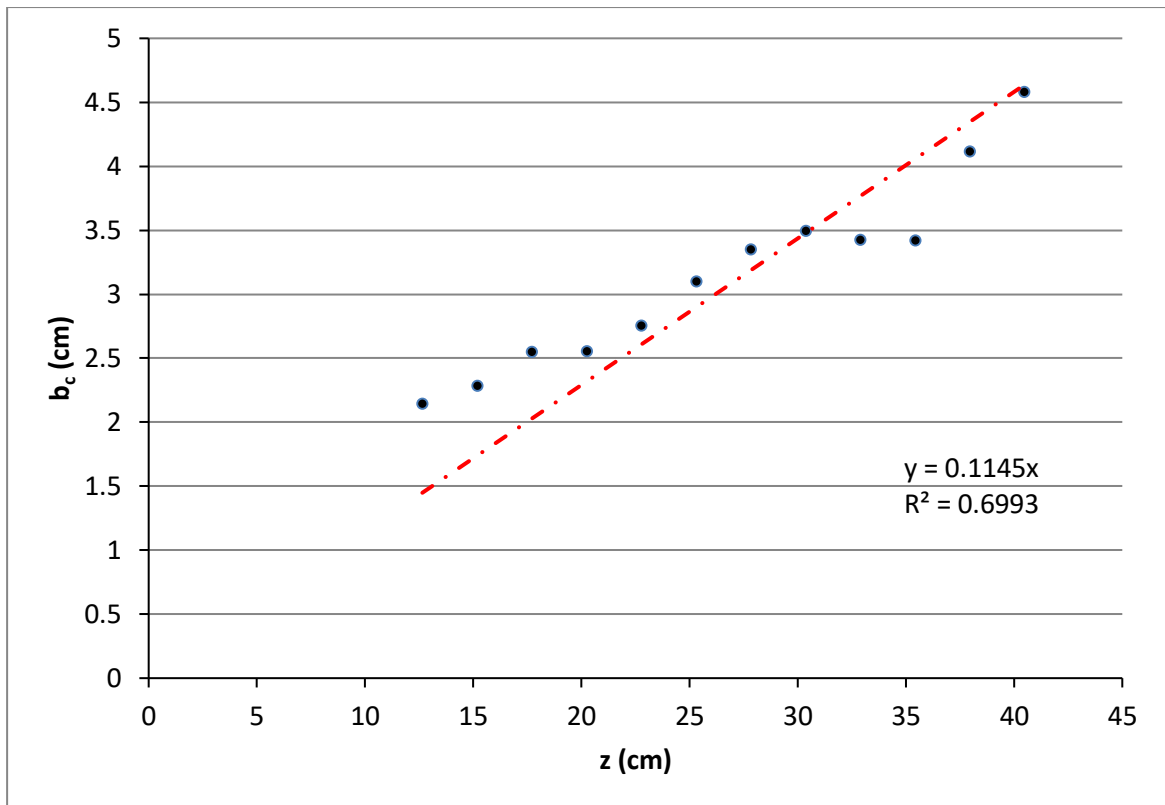
EXP16 ($D_h=1.265$ cm & $Re=1681$, Κύριος άξονας)



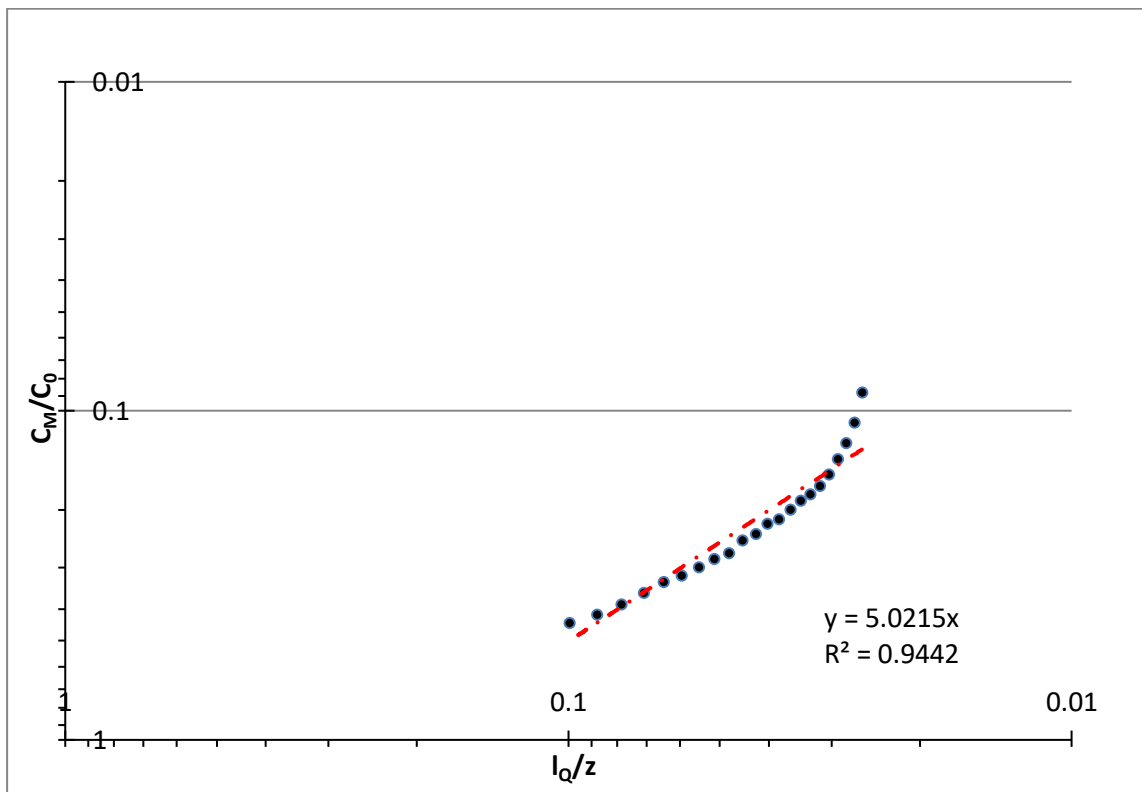
Σχήμα Β.9 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 10 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP16



Σχήμα Β.10 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 8 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP16

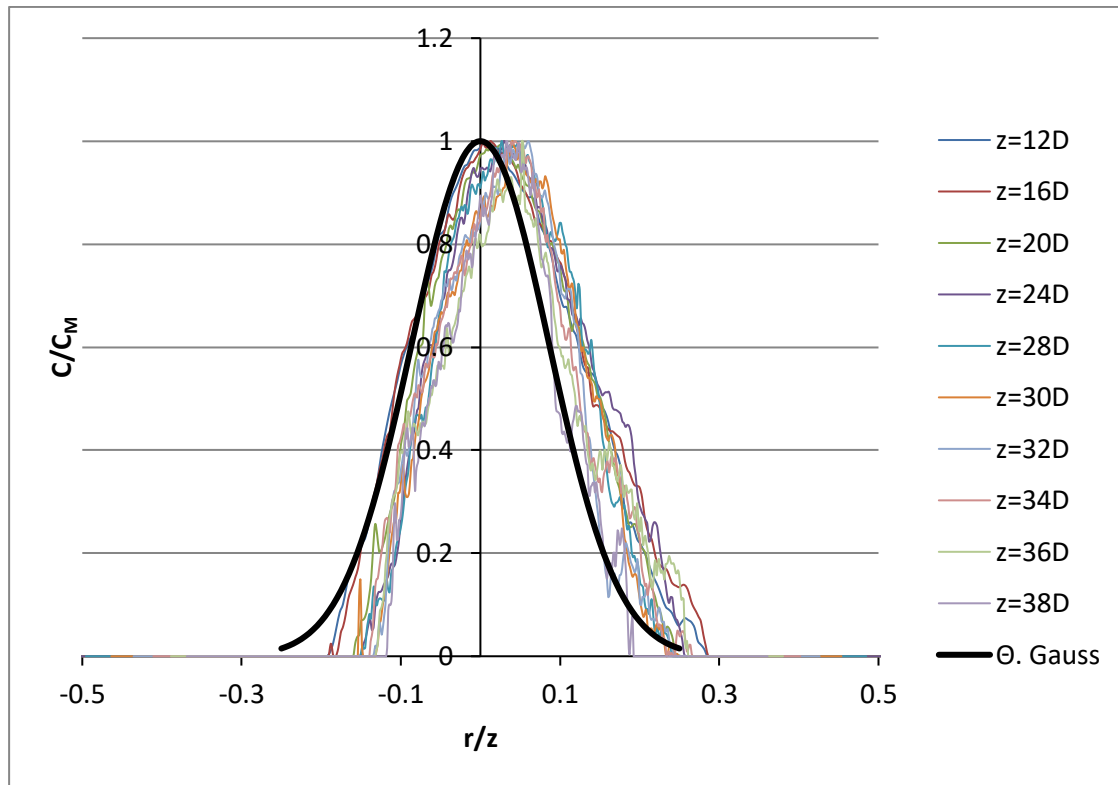


Σχήμα B.11 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP16

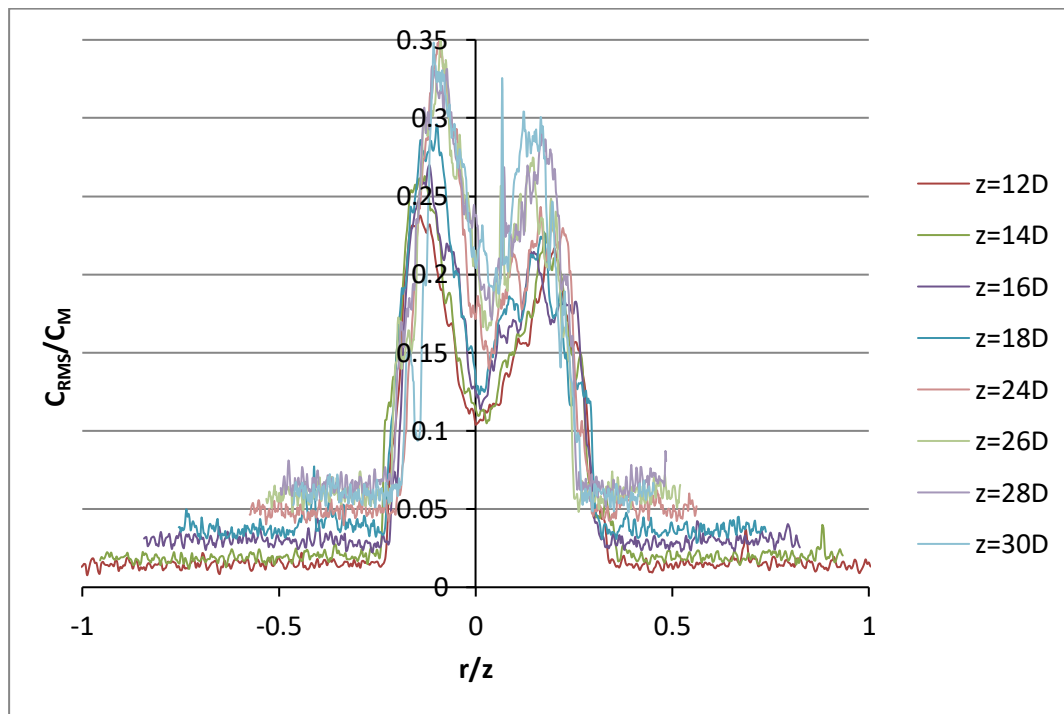


Σχήμα B.12 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP16

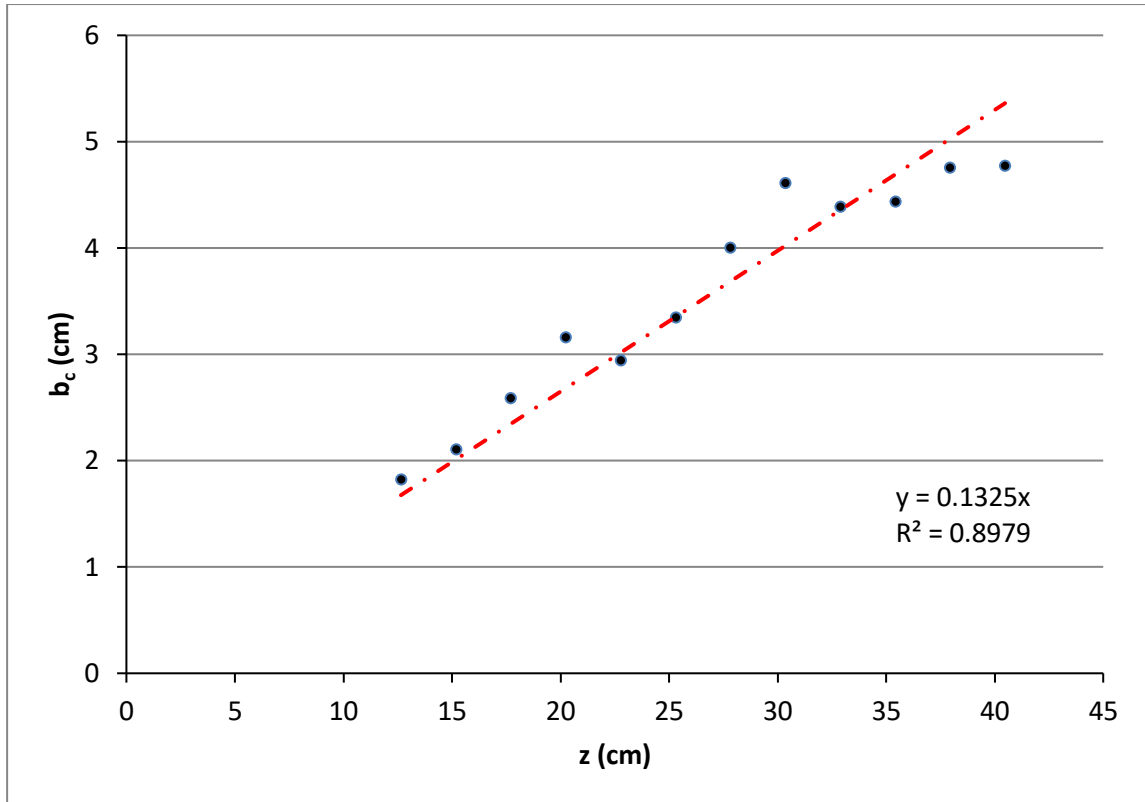
EXP17 ($D_h=1.265$ cm & $Re=1681$, Δευτερεύων άξονας)



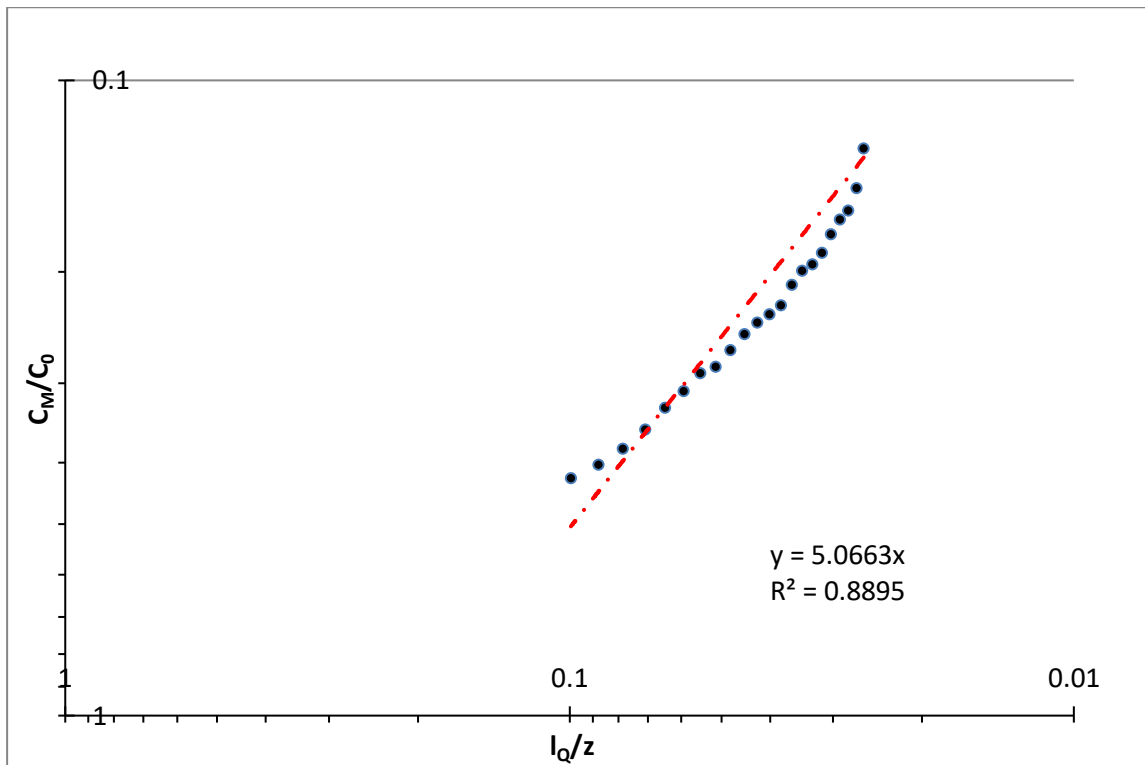
Σχήμα Β.13 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 10 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP17



Σχήμα Β.14 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 8 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP17

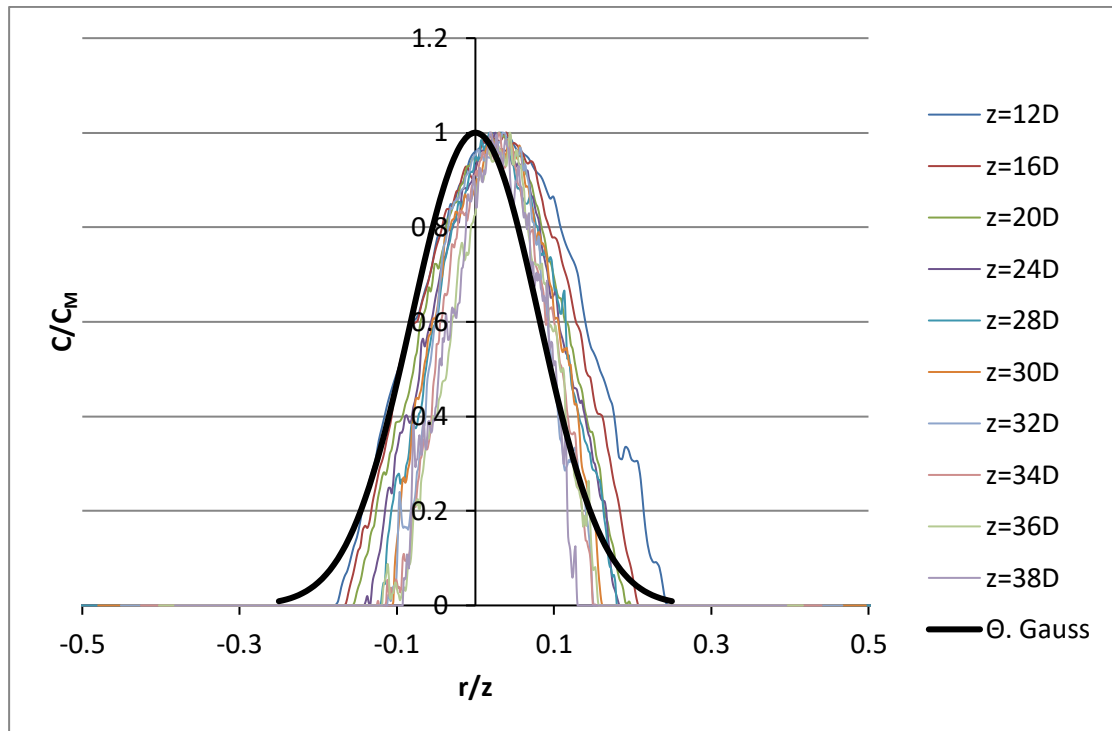


Σχήμα B.15 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP17

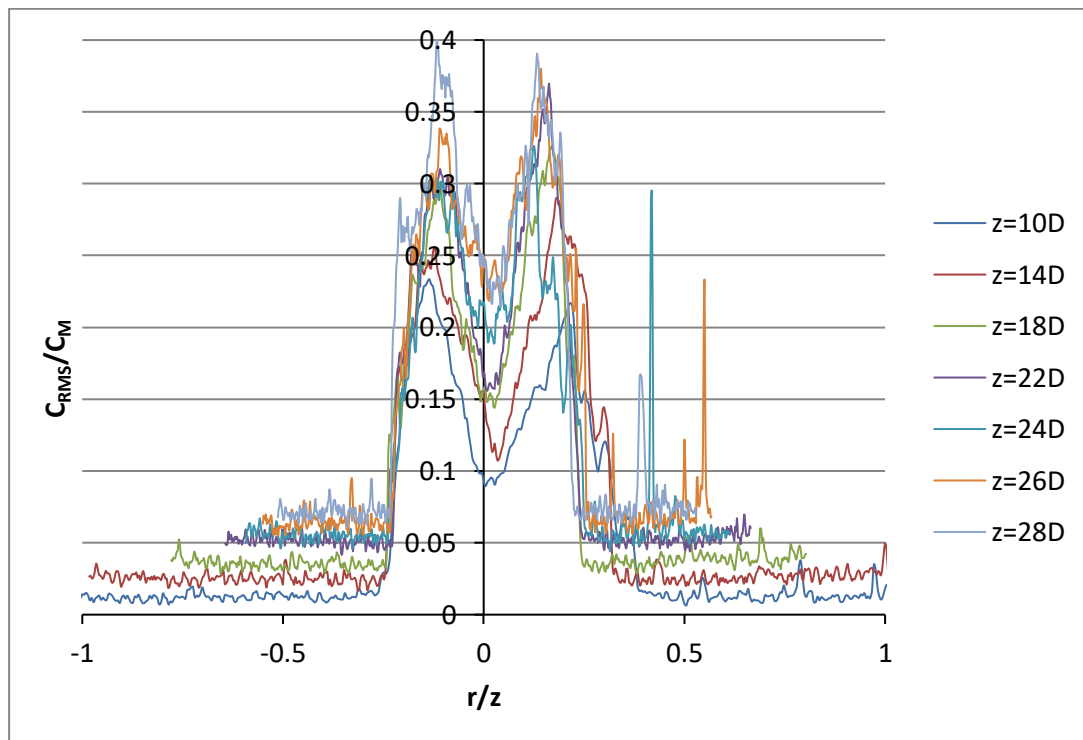


Σχήμα B.16 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP17

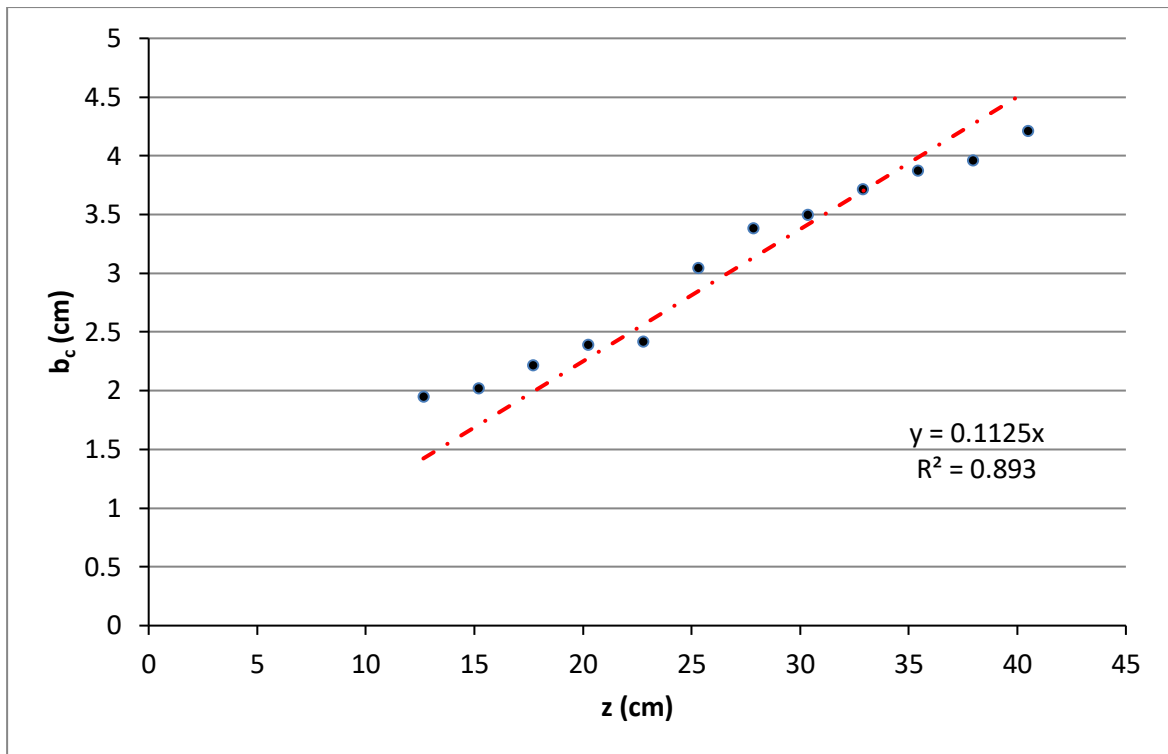
EXP18 ($D_h=1.265$ cm & $Re=2138$, Κύριος άξονας)



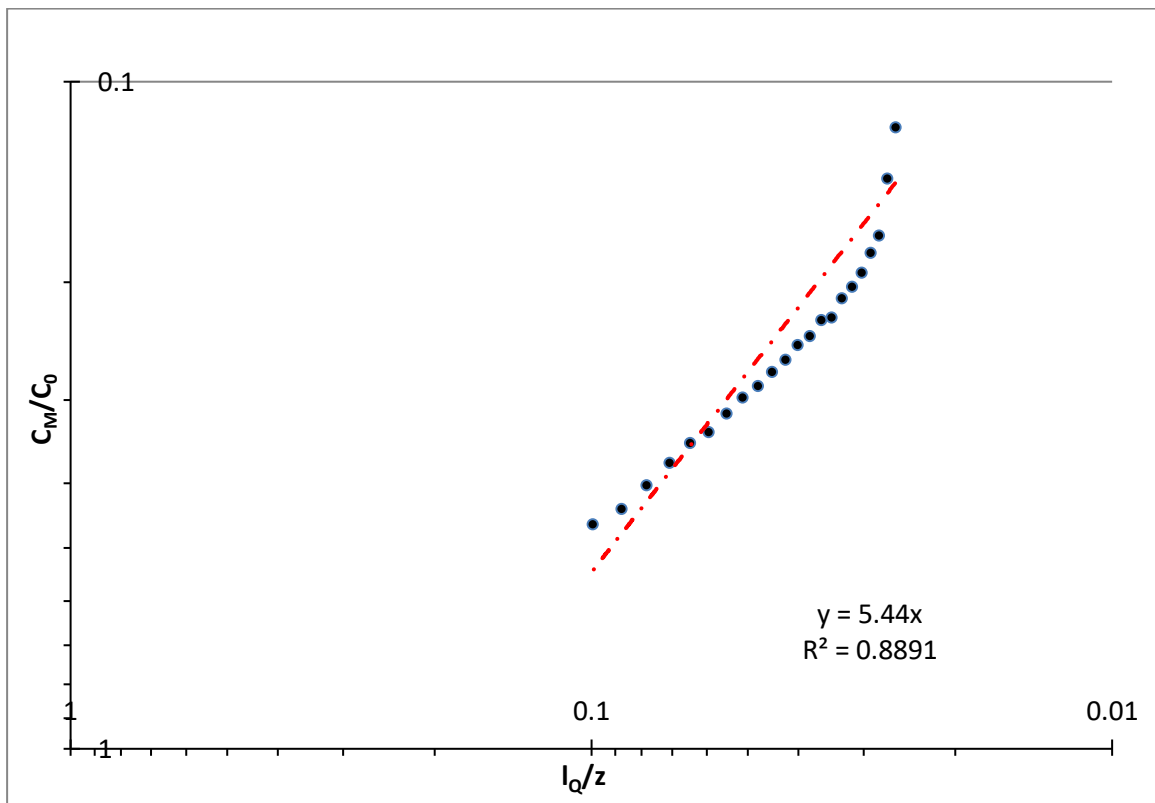
Σχήμα Β.17 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 10 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP18



Σχήμα Β.18 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 7 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP18

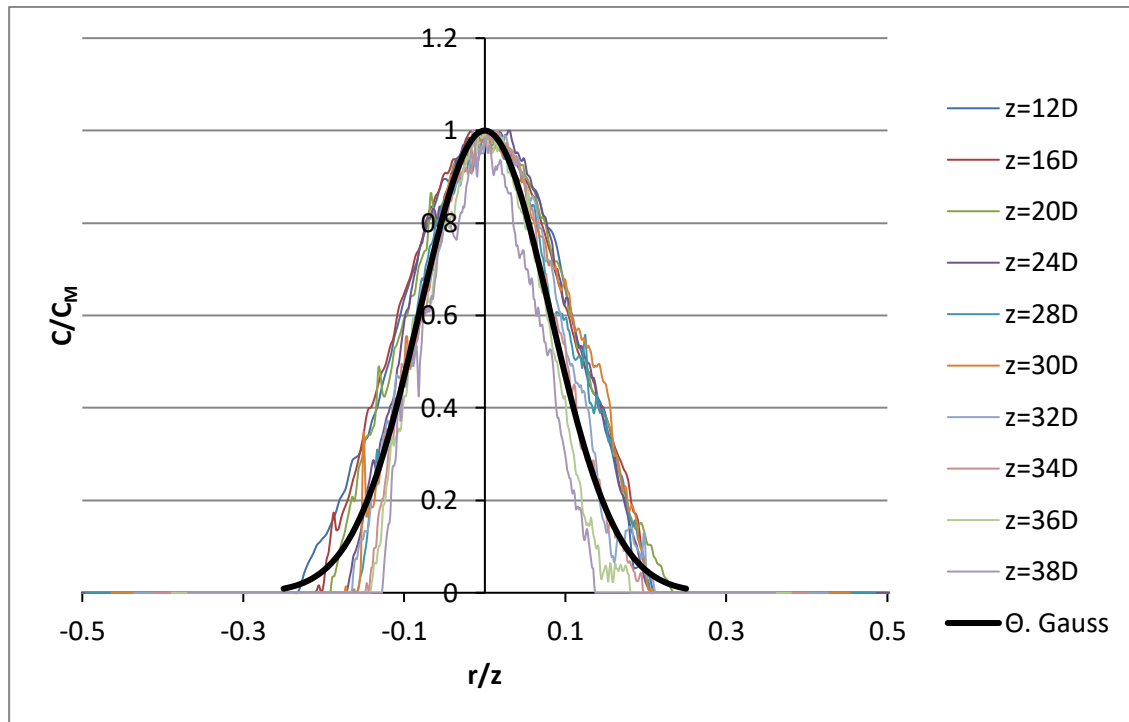


Σχήμα Β.19 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP18

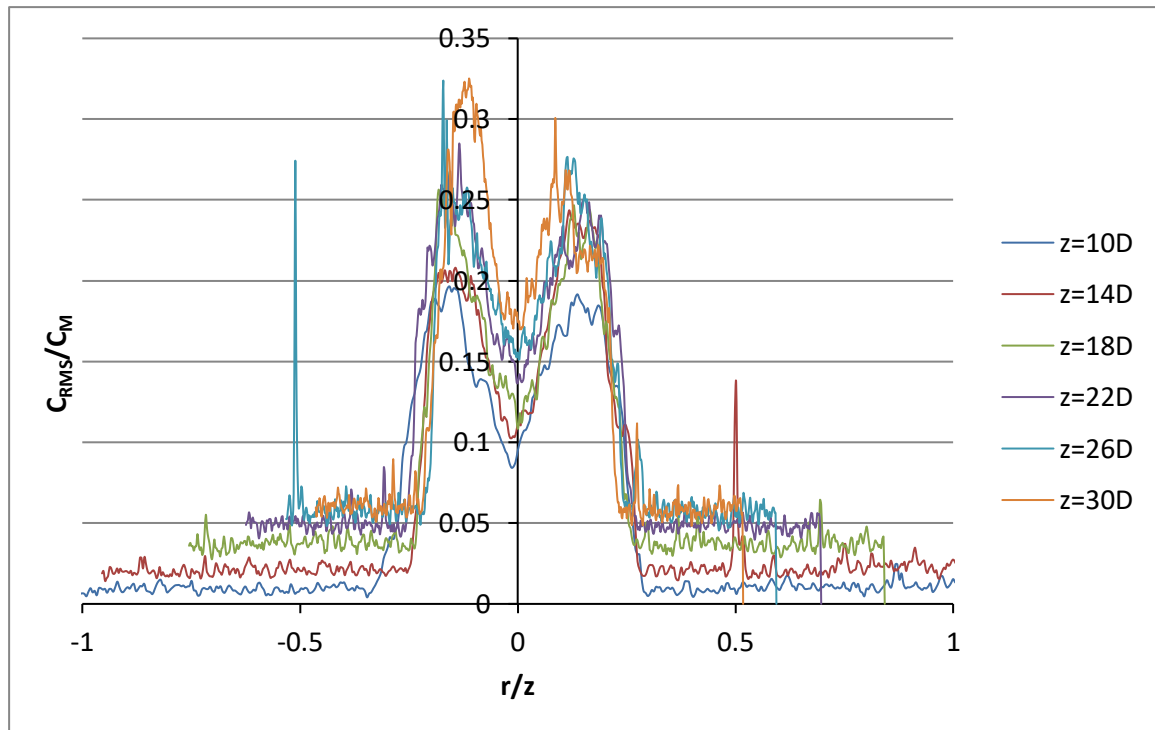


Σχήμα Β.20 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C₀ με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP18

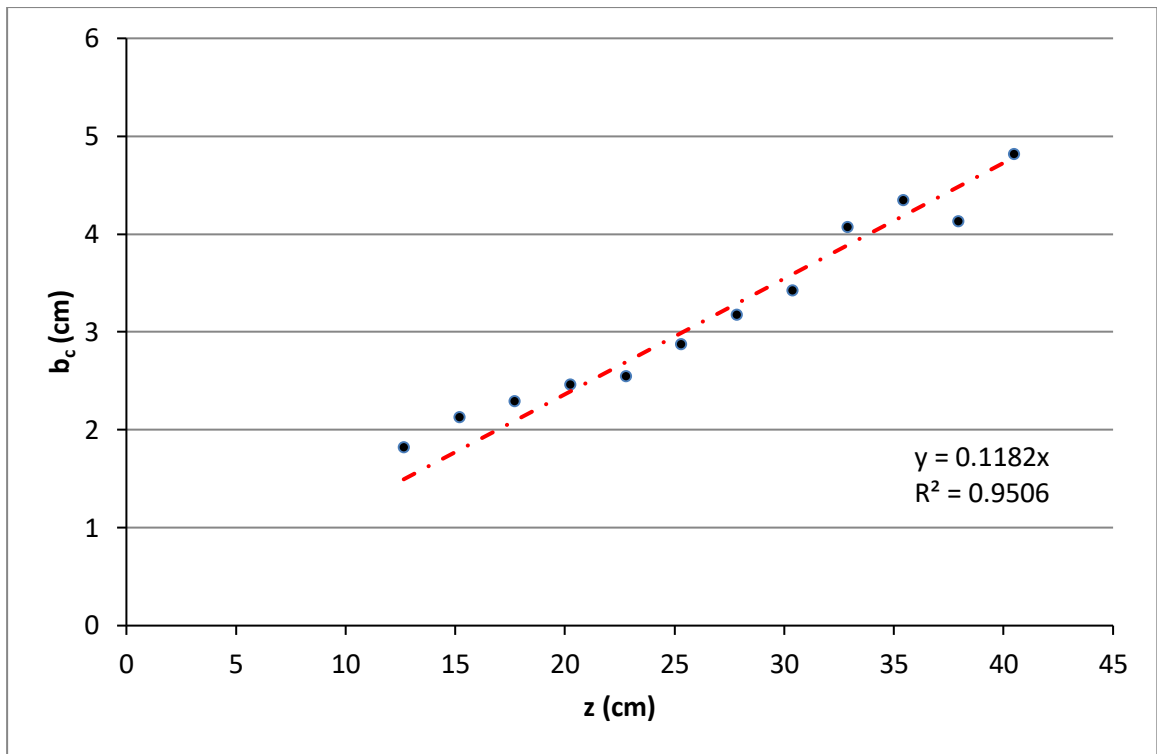
EXP19 ($D_h=1.265$ cm & $Re=2138$, Δευτερεύων άξονας)



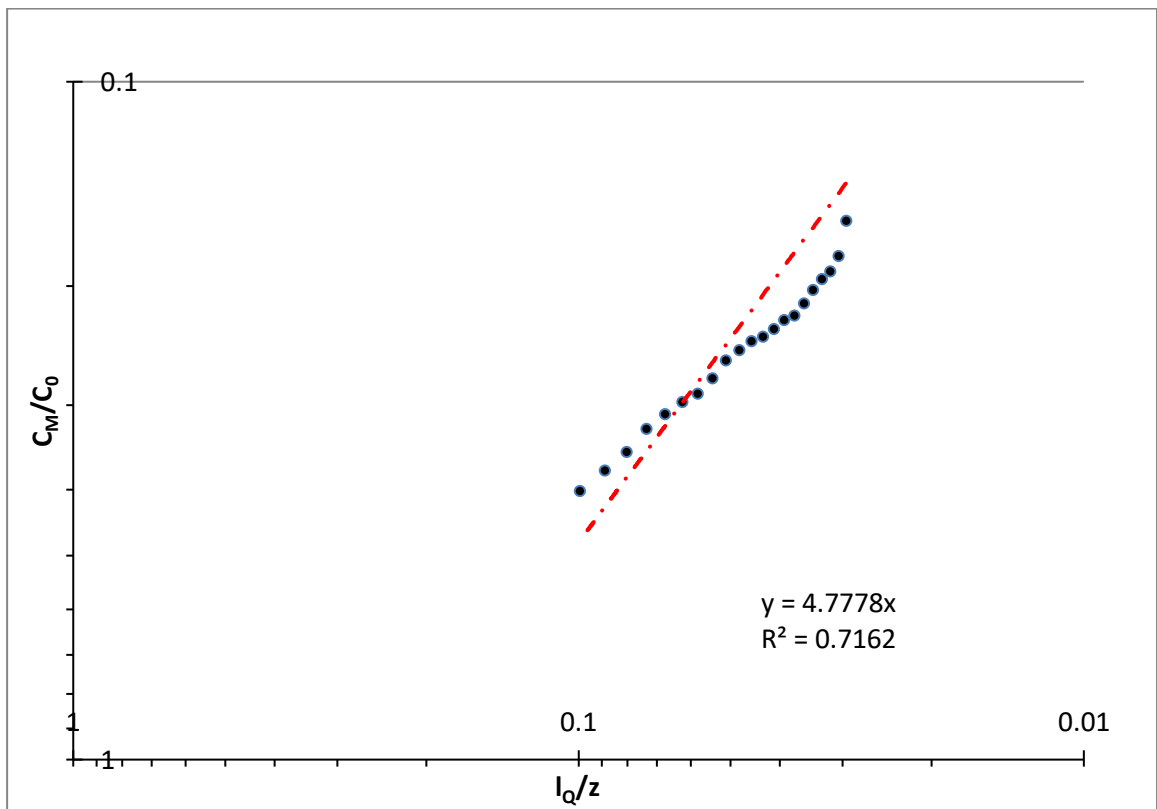
Σχήμα Β.21 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 10 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP19



Σχήμα Β.22 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 6 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP19

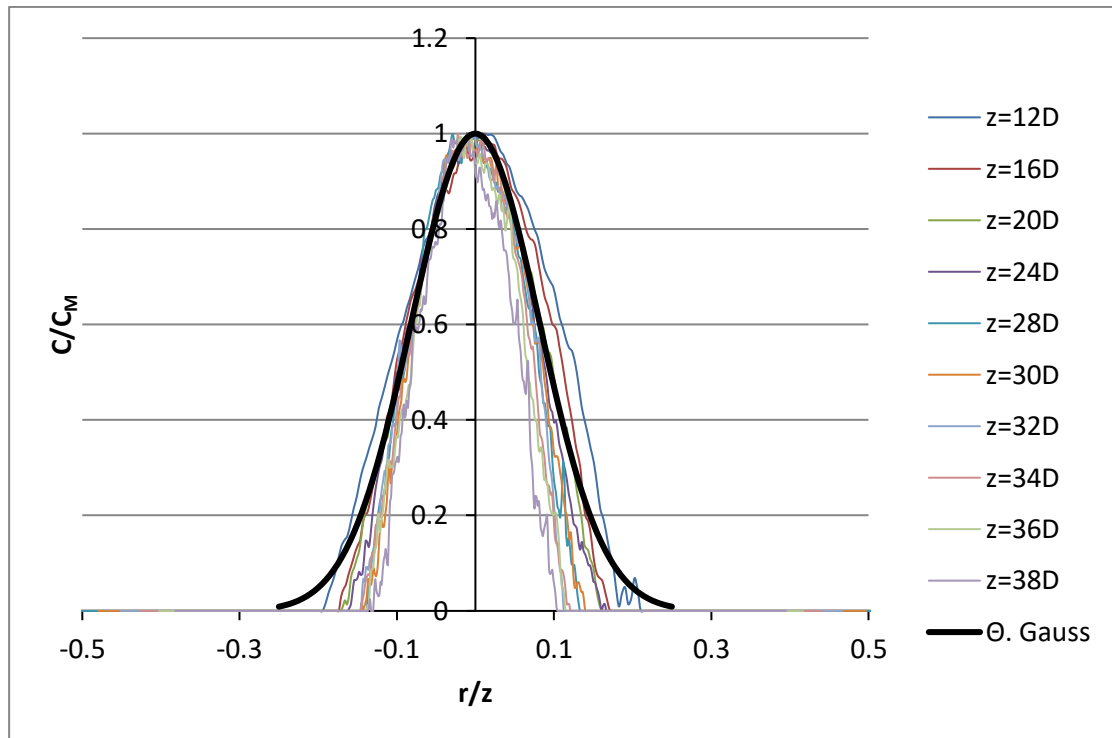


Σχήμα B.23 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP19

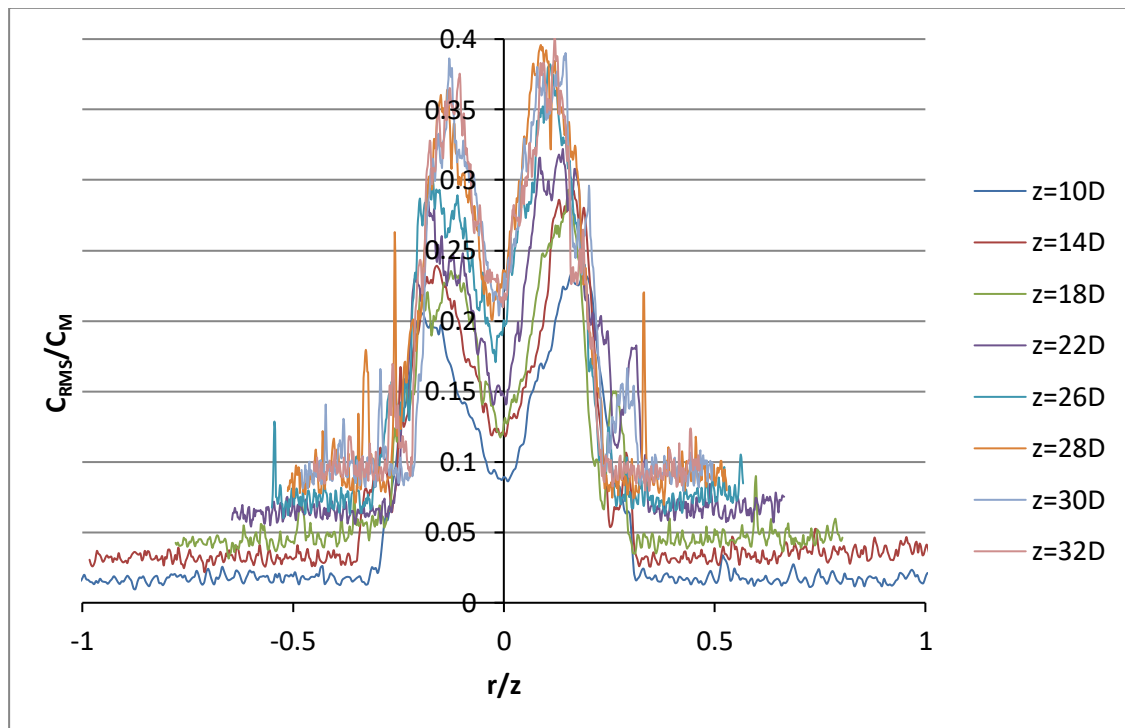


Σχήμα B.24 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP19

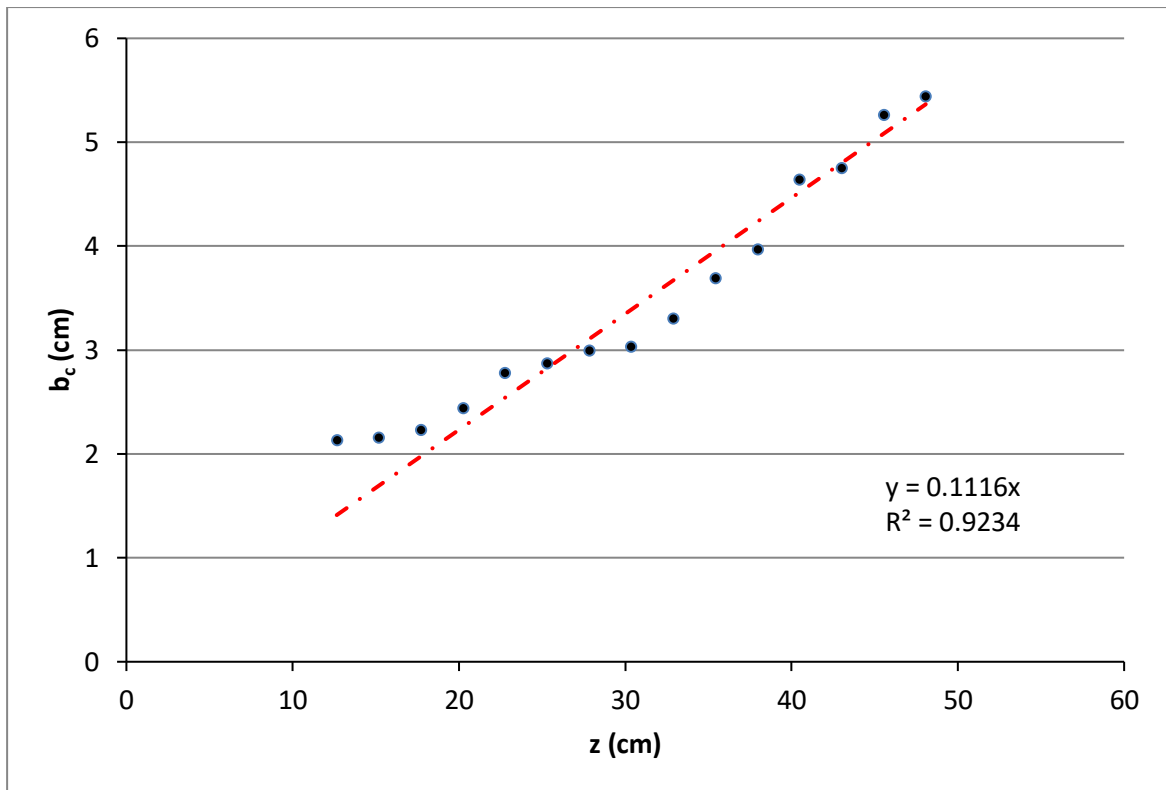
EXP20 ($D_h=1.265$ cm & $Re=2595$, Κύριος άξονας)



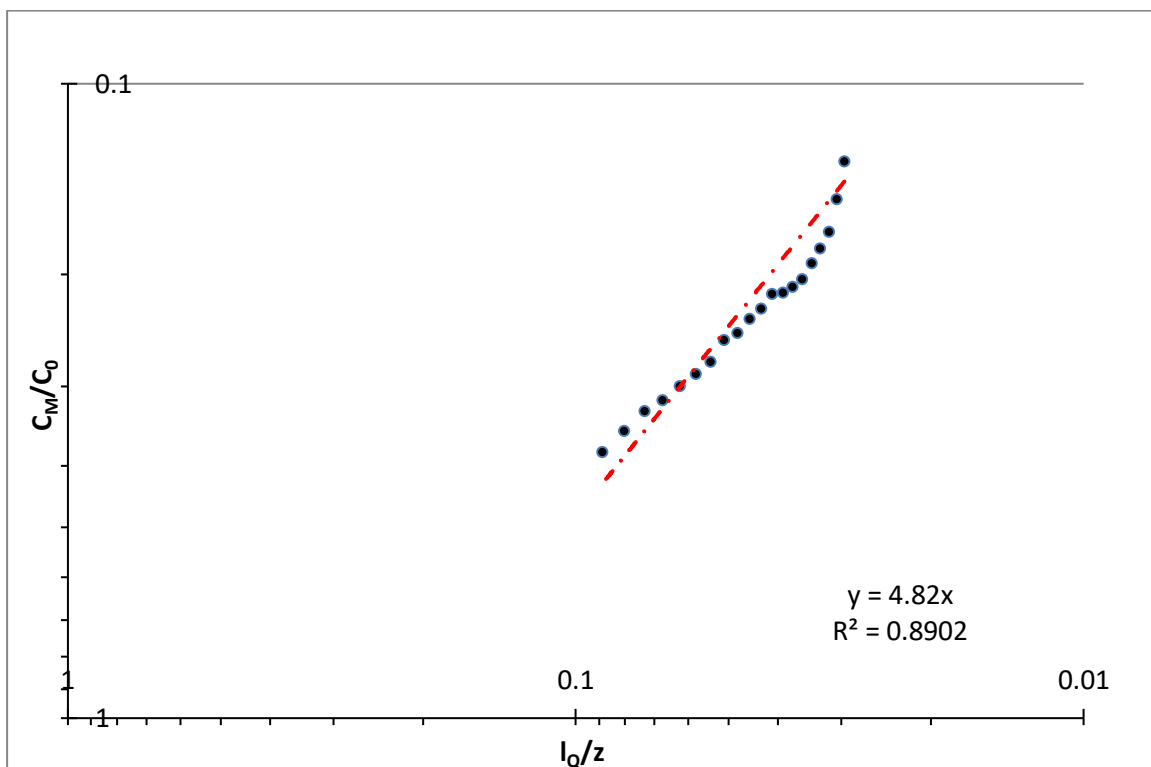
Σχήμα B.25 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 10 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP20



Σχήμα B.26 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 8 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP20

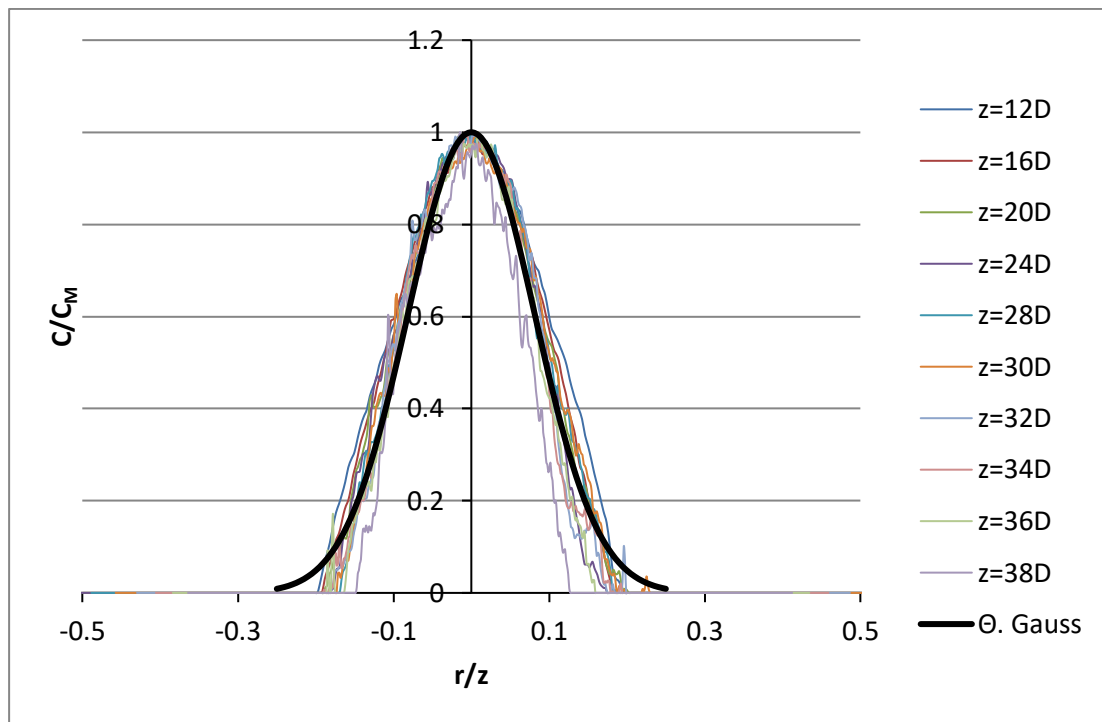


Σχήμα B.27 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP20

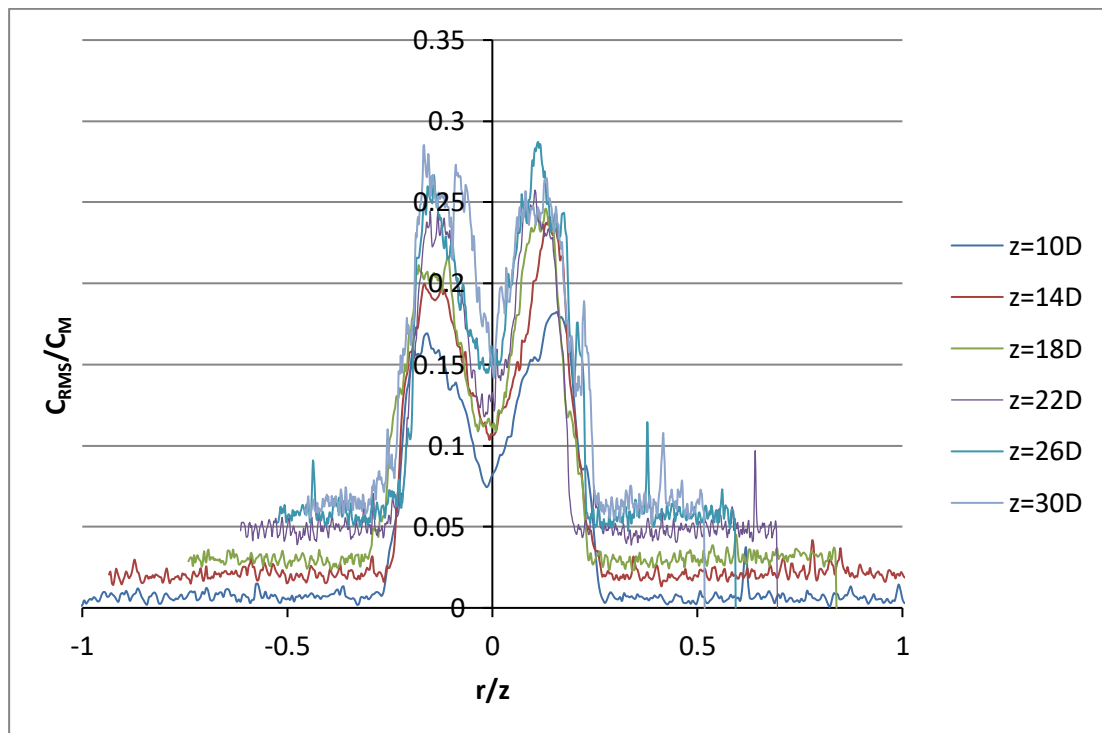


Σχήμα B.28 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP20

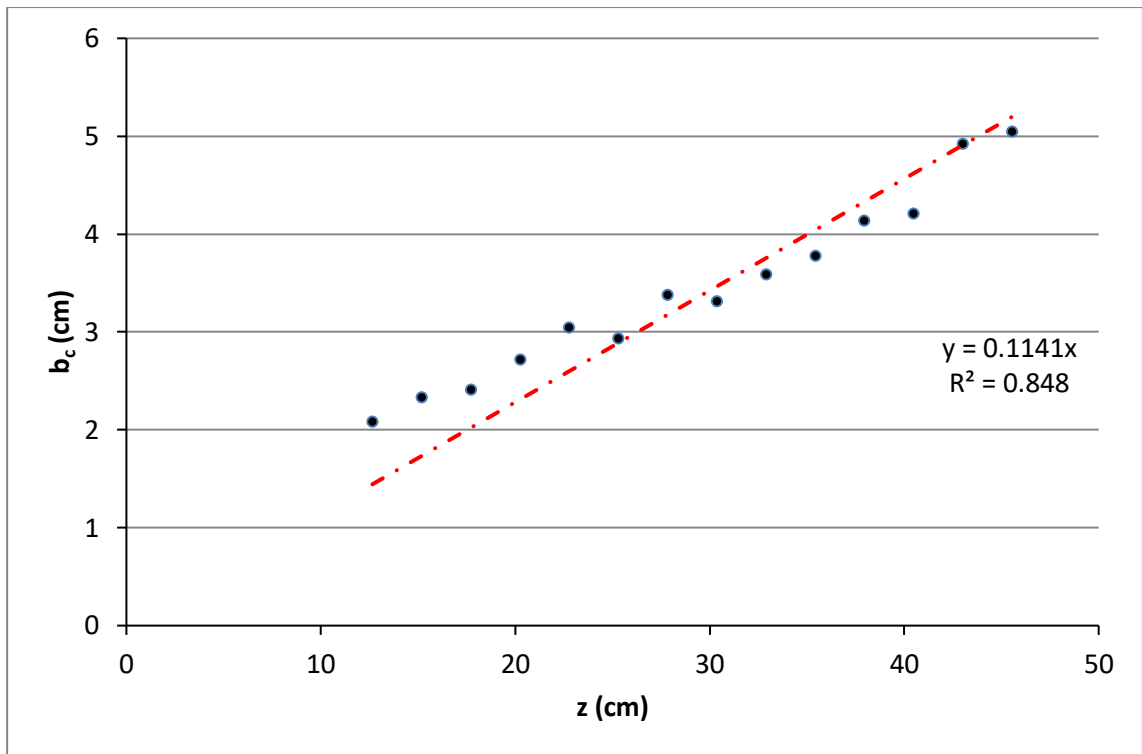
EXP21 ($D_h=1.265$ cm & $Re=2595$, Δευτερεύων άξονας)



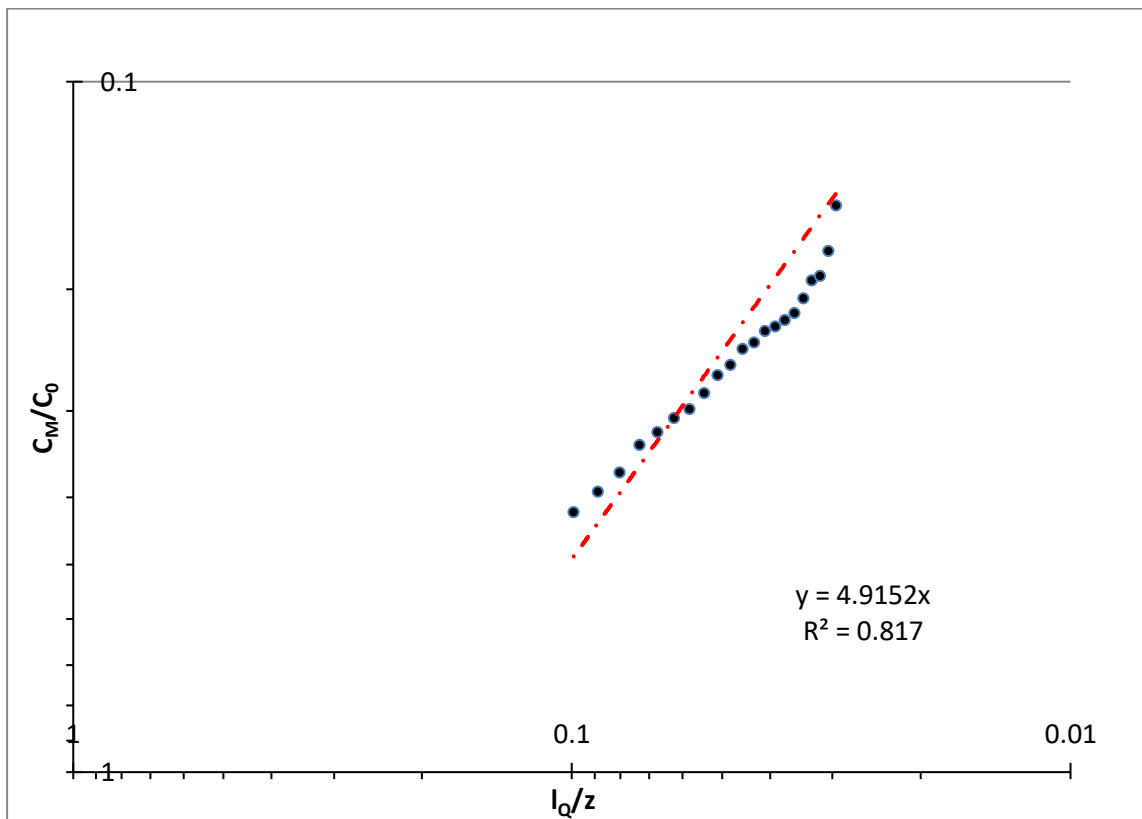
Σχήμα Β.29 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 10 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP21



Σχήμα Β.30 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 6 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP21

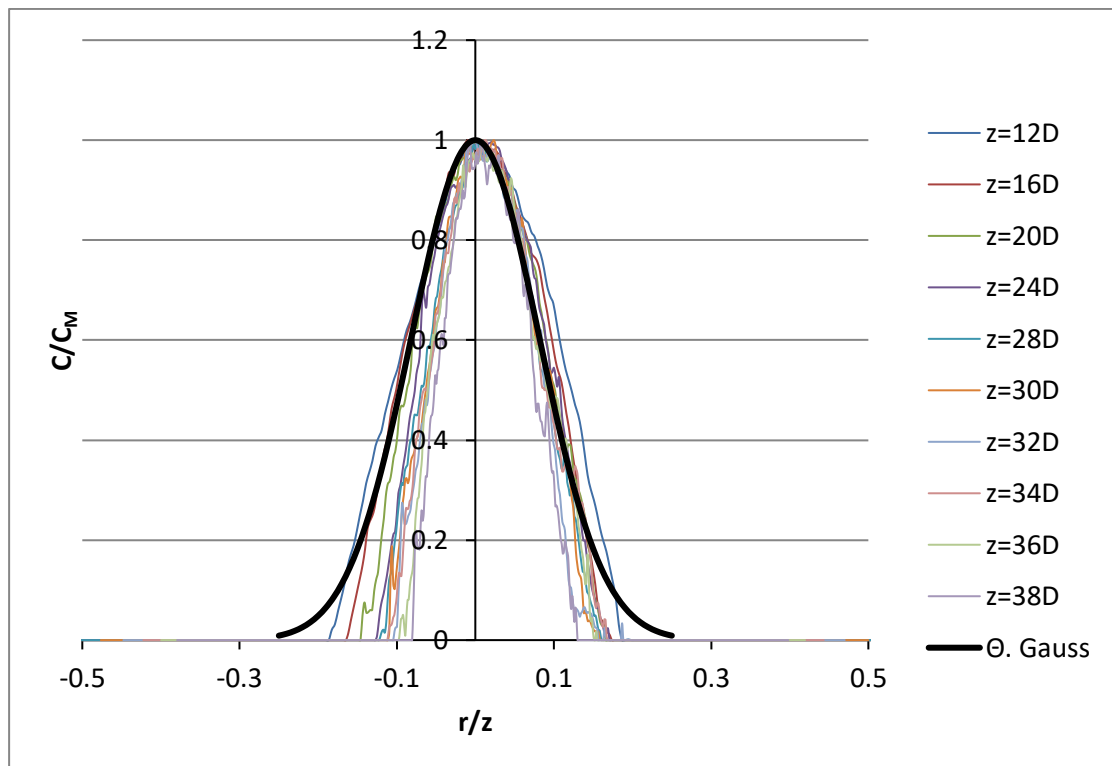


Σχήμα B.31 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP21

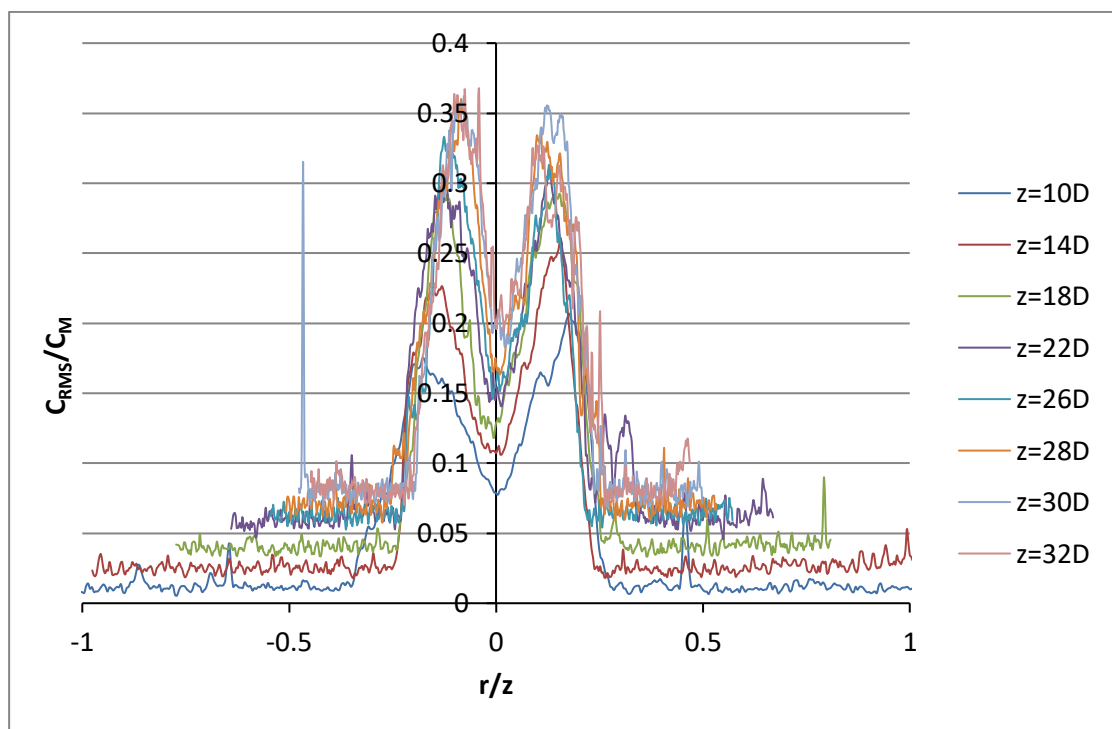


Σχήμα B. 32 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP21

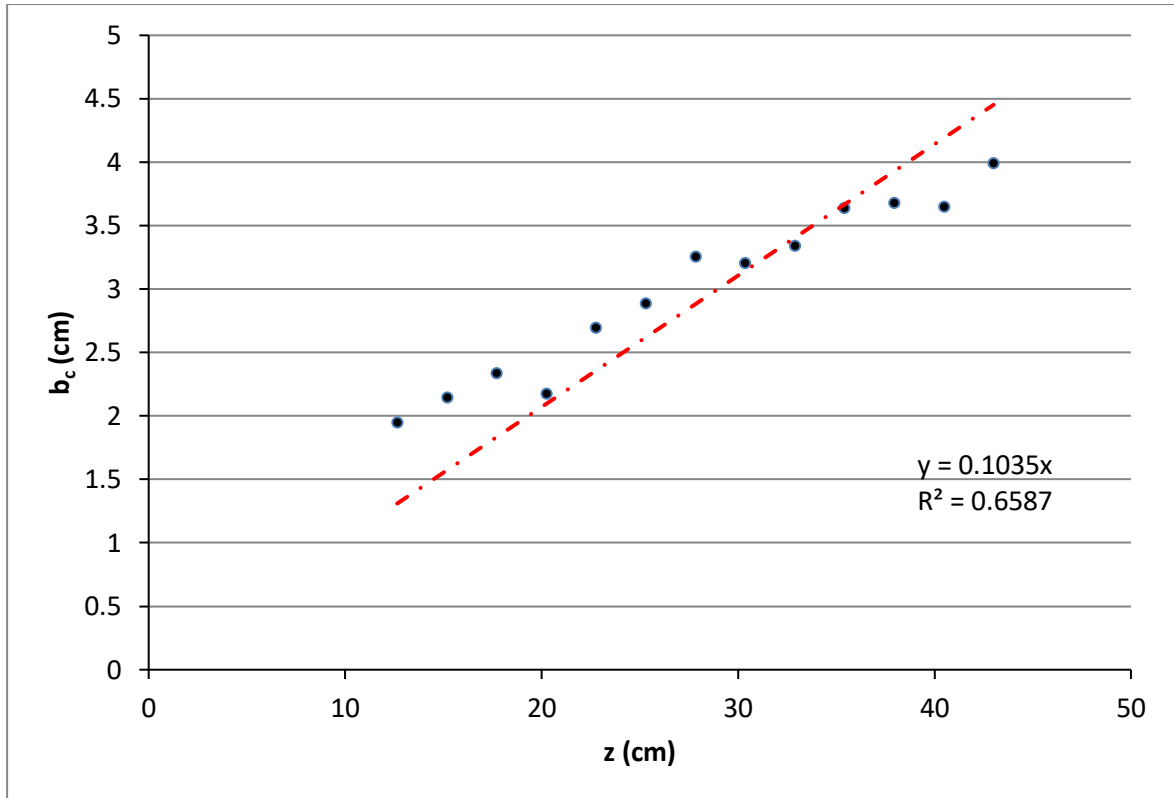
EXP22 ($D_h=1.265$ cm & $Re=3052$, Κύριος άξονας)



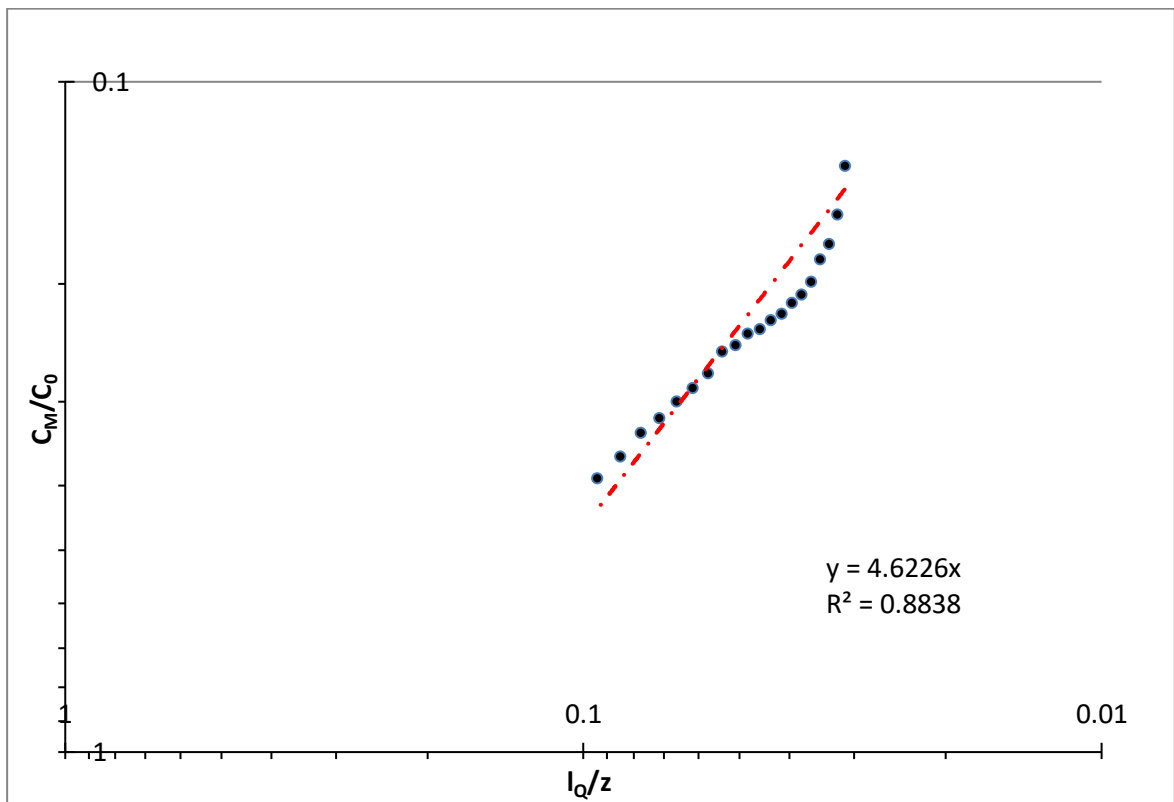
Σχήμα Β.33 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 10 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP22



Σχήμα Β.34 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 8 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP22

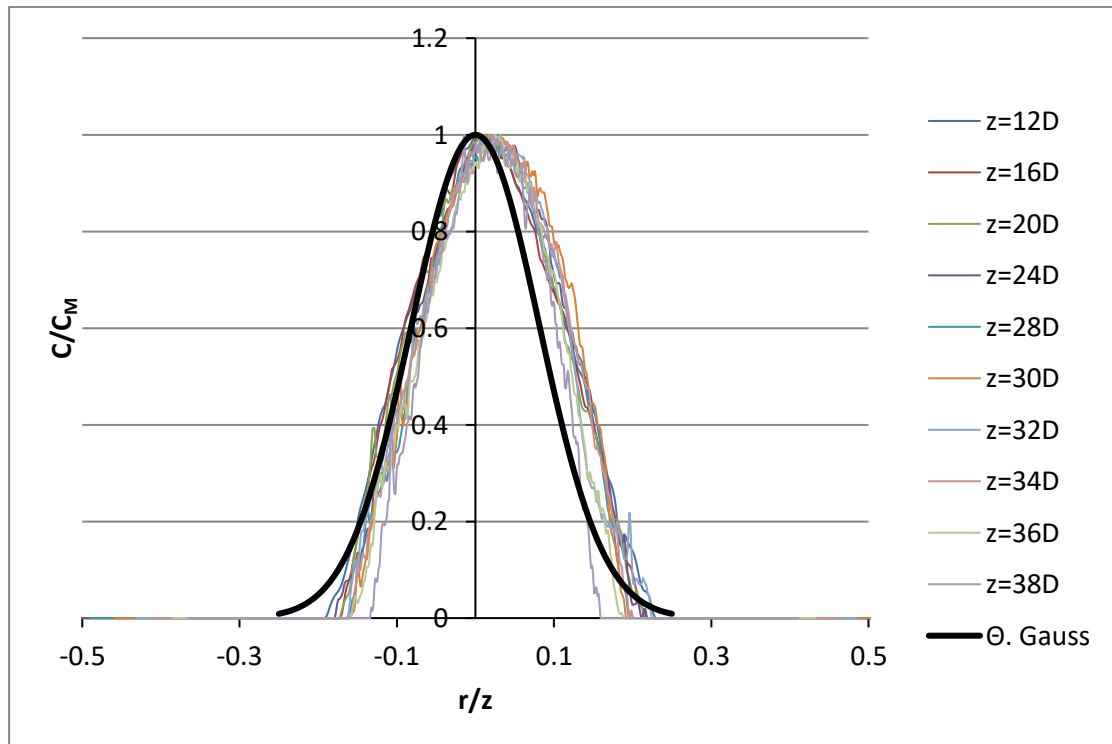


Σχήμα B.35 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP22

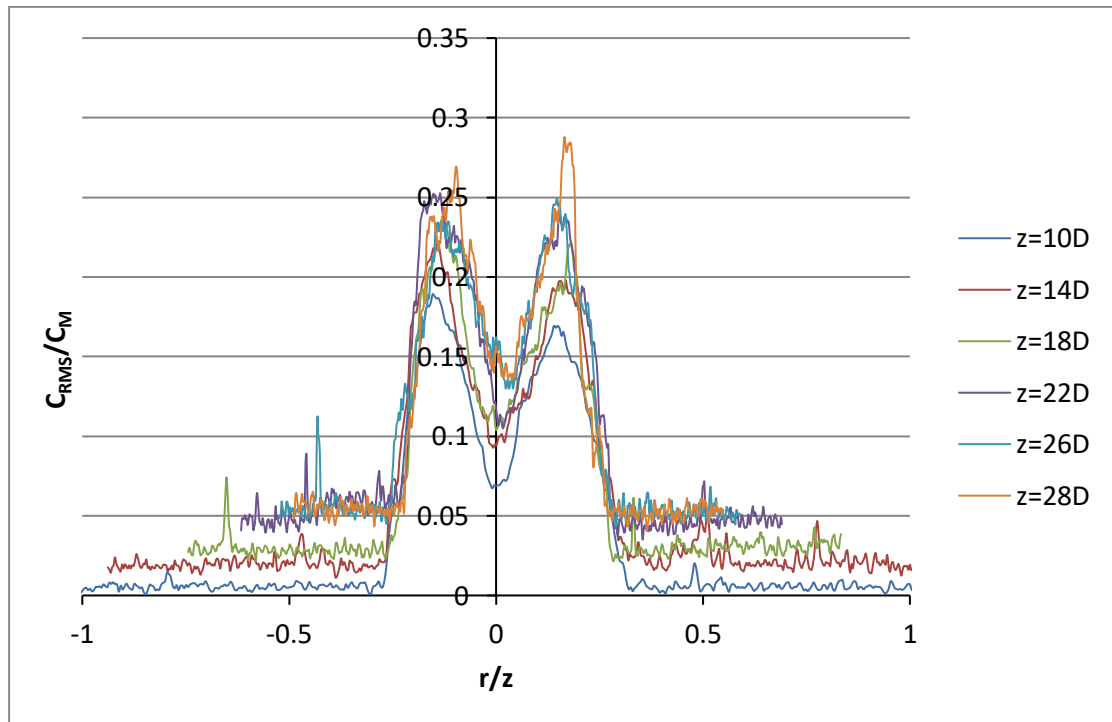


Σχήμα B.36 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP22

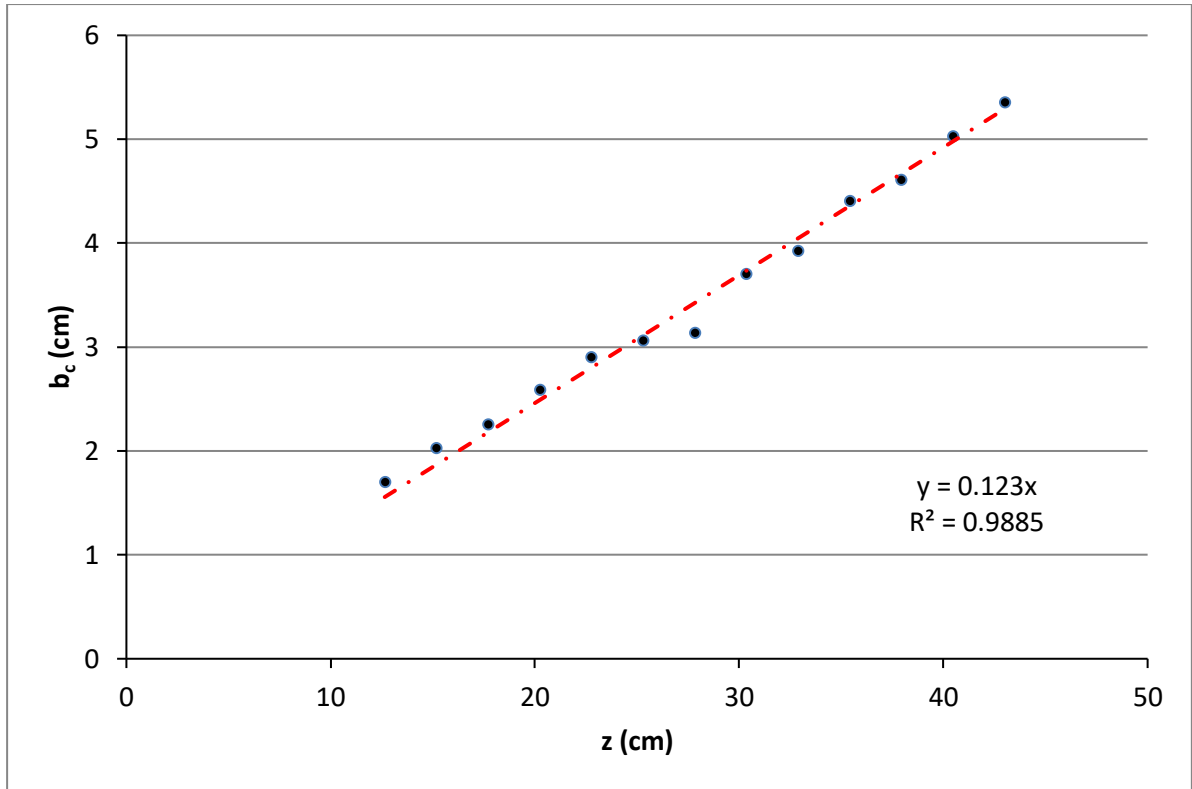
EXP23 ($D_h=1.265$ cm & $Re=3052$, Δευτερεύων άξονας)



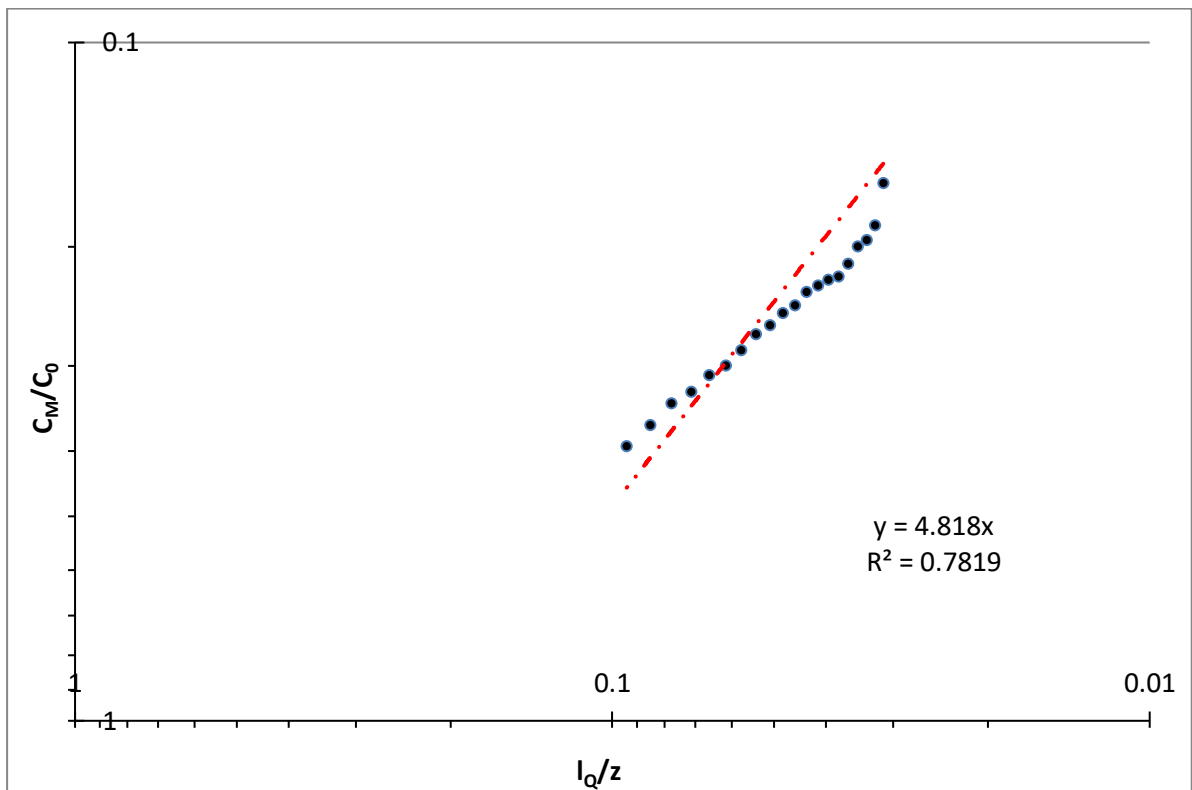
Σχήμα B.37 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 10 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP23



Σχήμα B.38 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 6 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP23

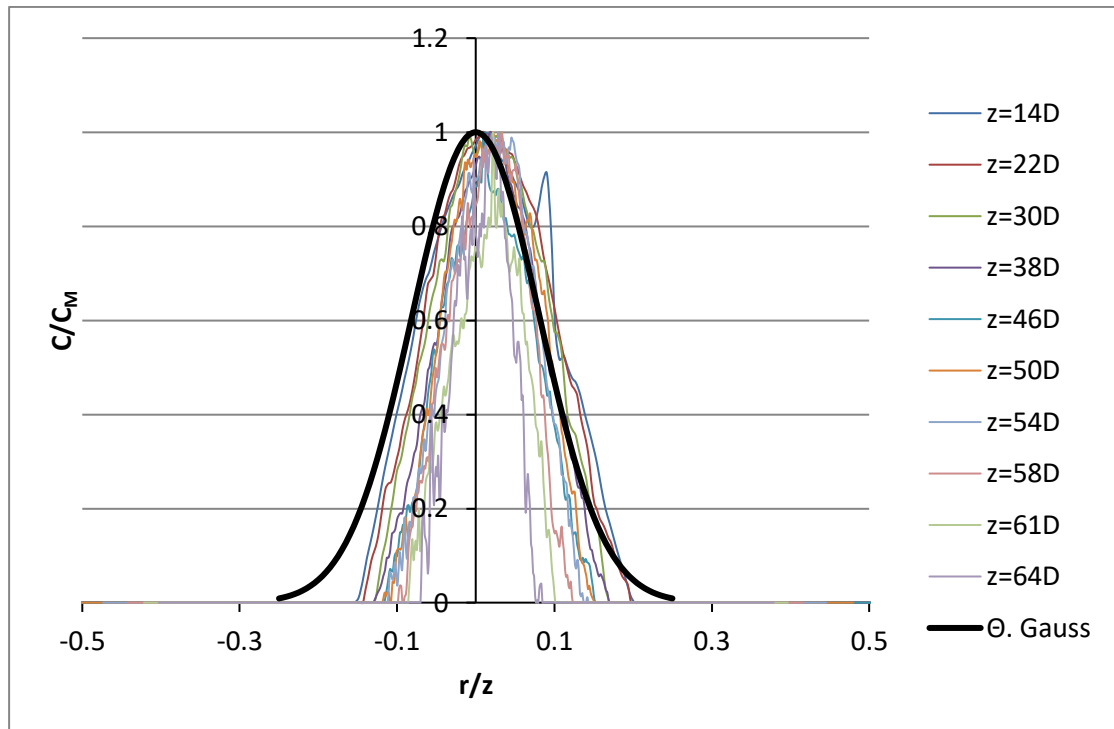


Σχήμα B.39 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP23

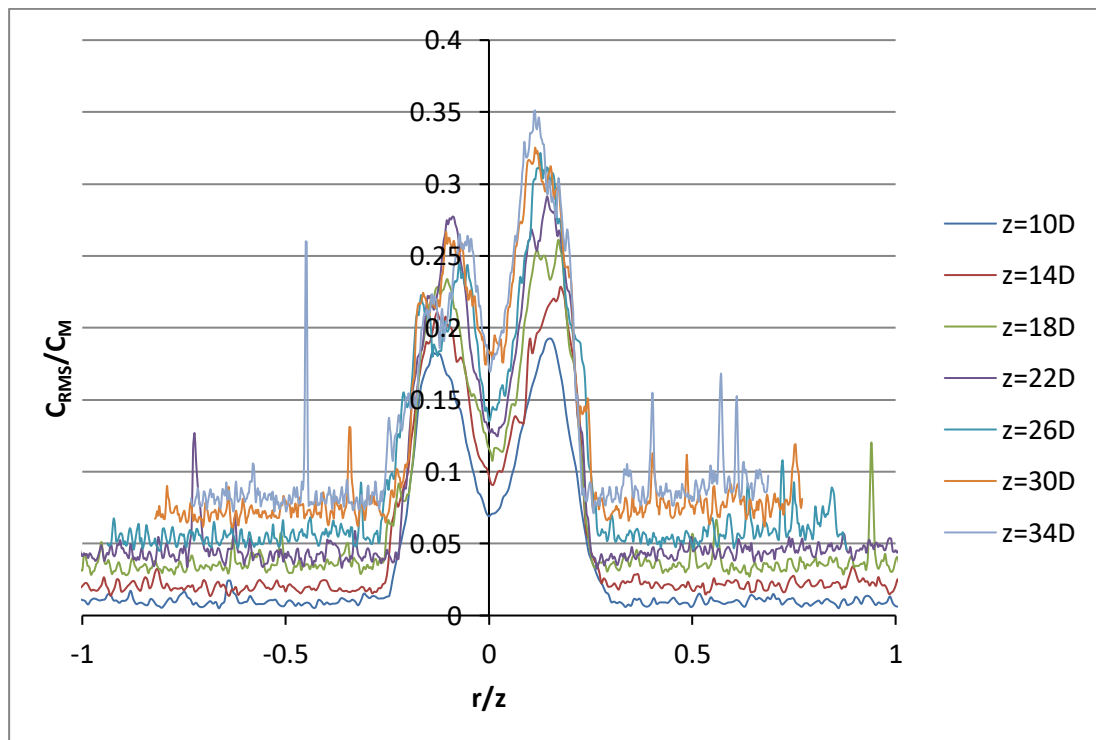


Σχήμα B.40 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP23

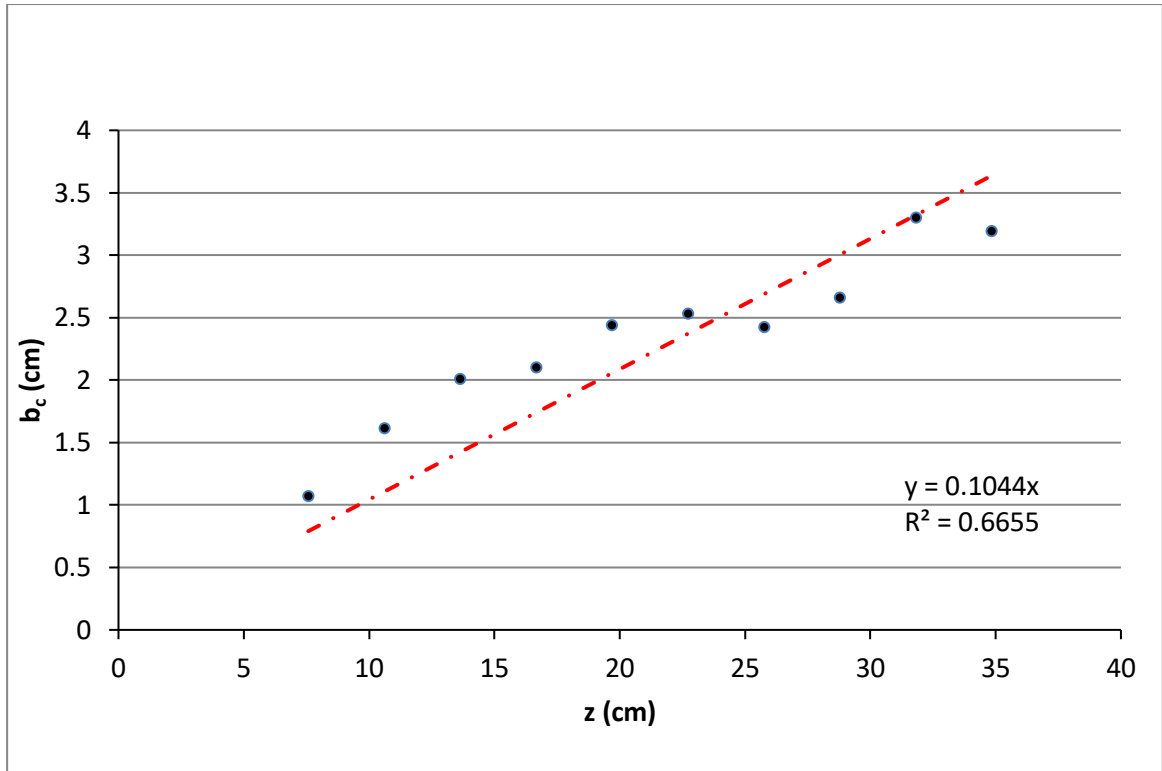
EXP28 ($D_h=0.757$ cm & $Re=1983$, Κύριος άξονας)



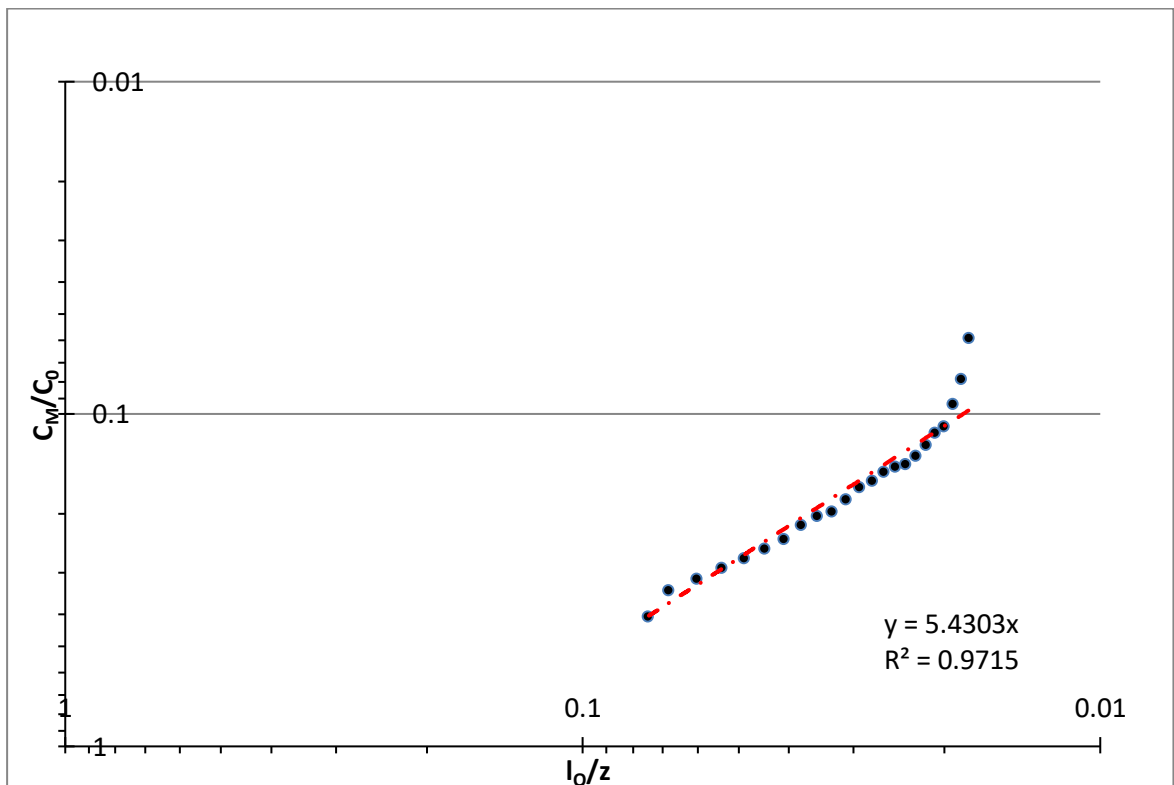
Σχήμα Β.41 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 10 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP28



Σχήμα Β.42 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 7 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP28

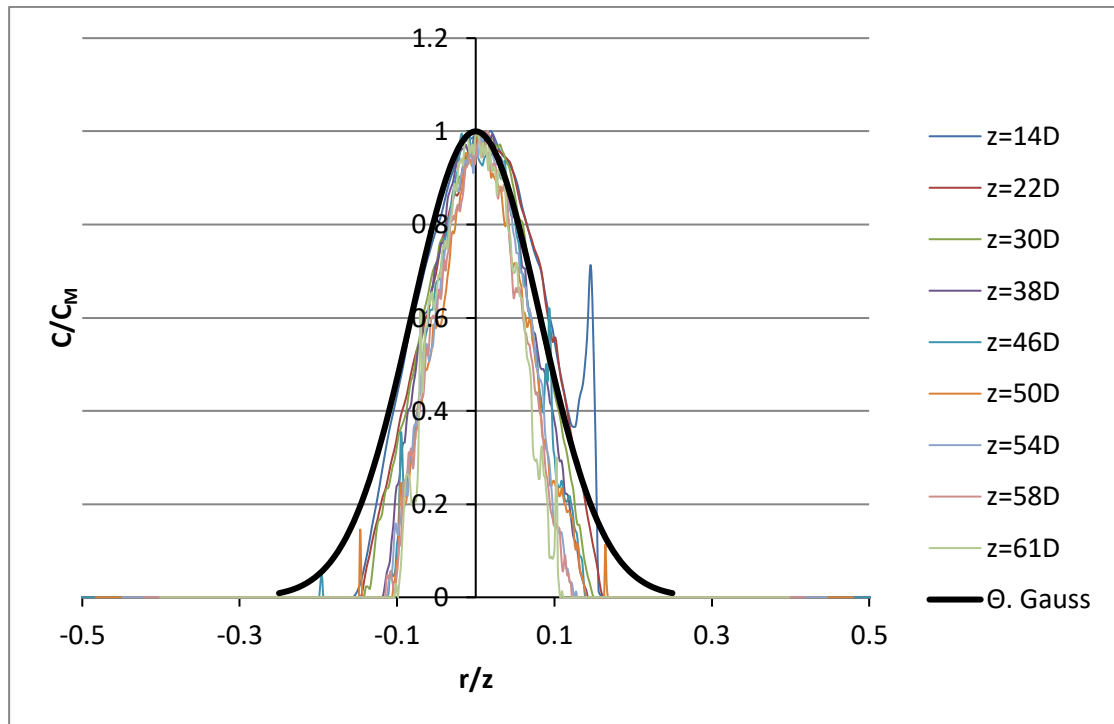


Σχήμα B.43 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP28

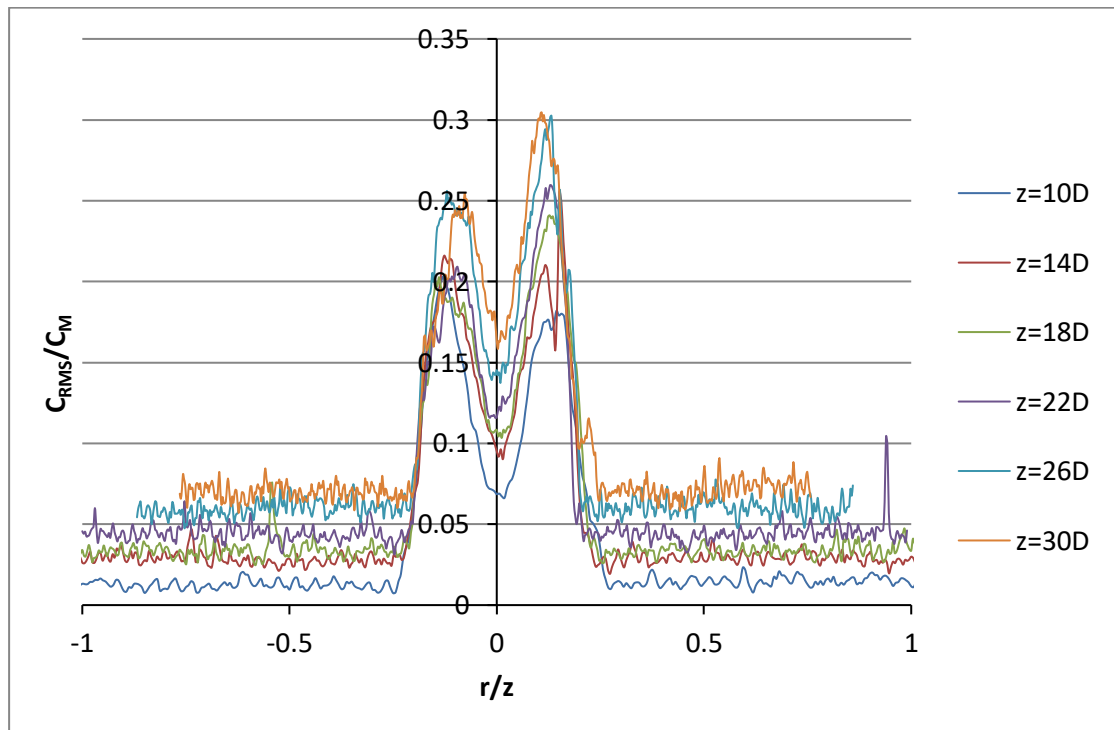


Σχήμα B.44 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP28

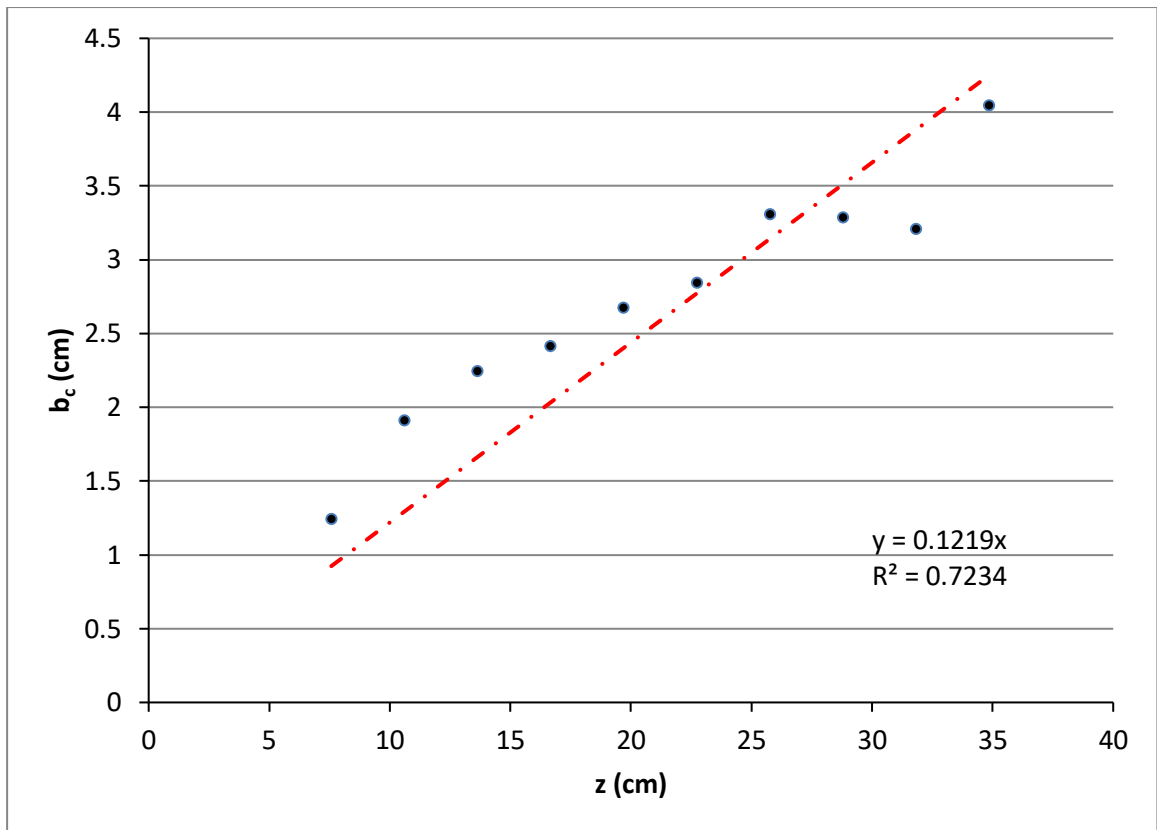
EXP29 ($D_h=0.757$ cm & $Re=1983$, Δευτερεύων άξονας)



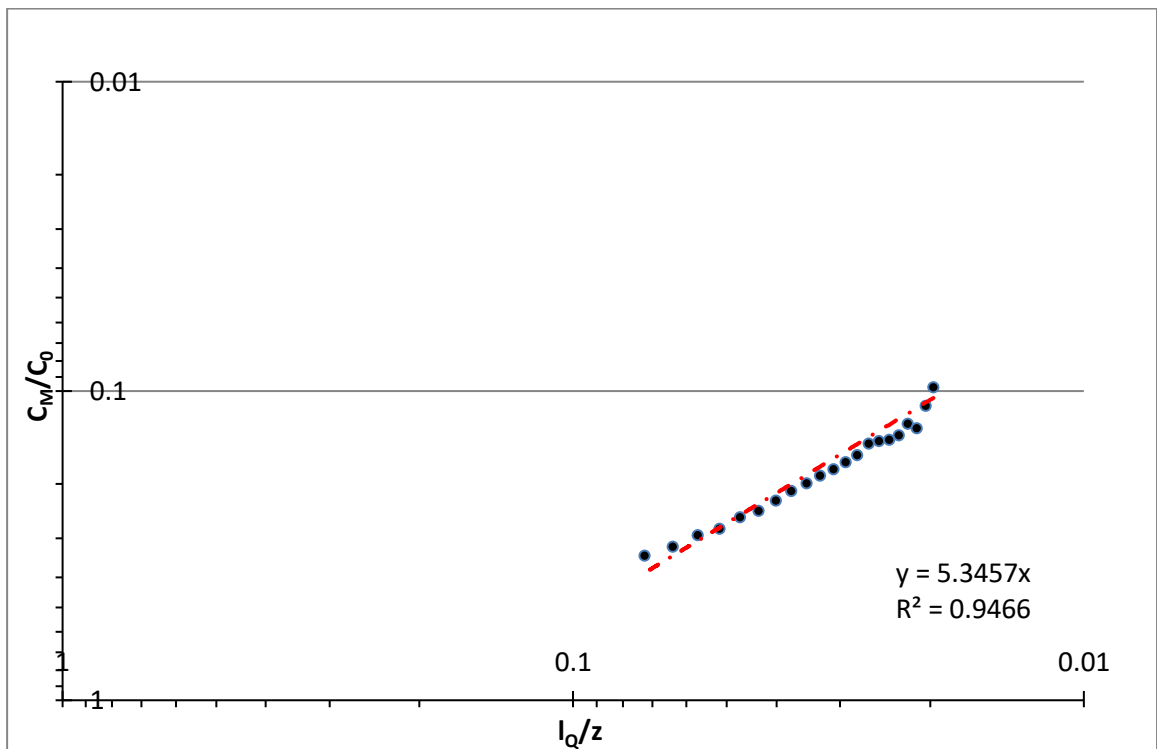
Σχήμα Β.45 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 9 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP29



Σχήμα Β.46 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 6 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP29

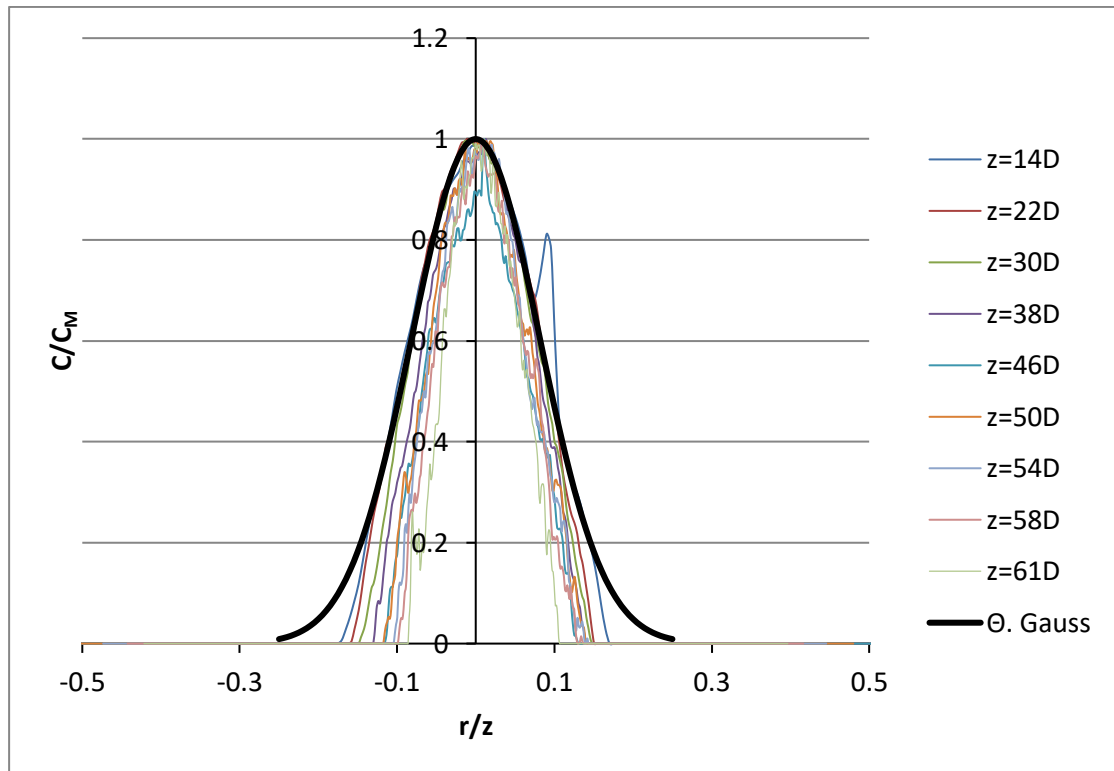


Σχήμα B.47 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP29

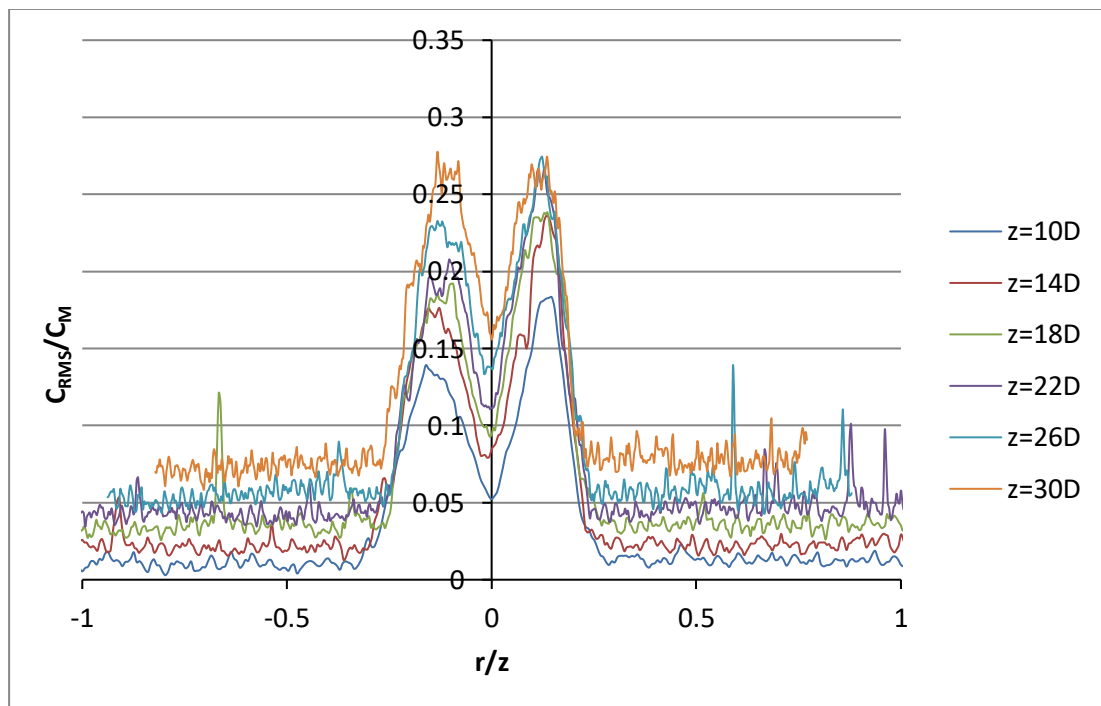


Σχήμα B.48 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP29

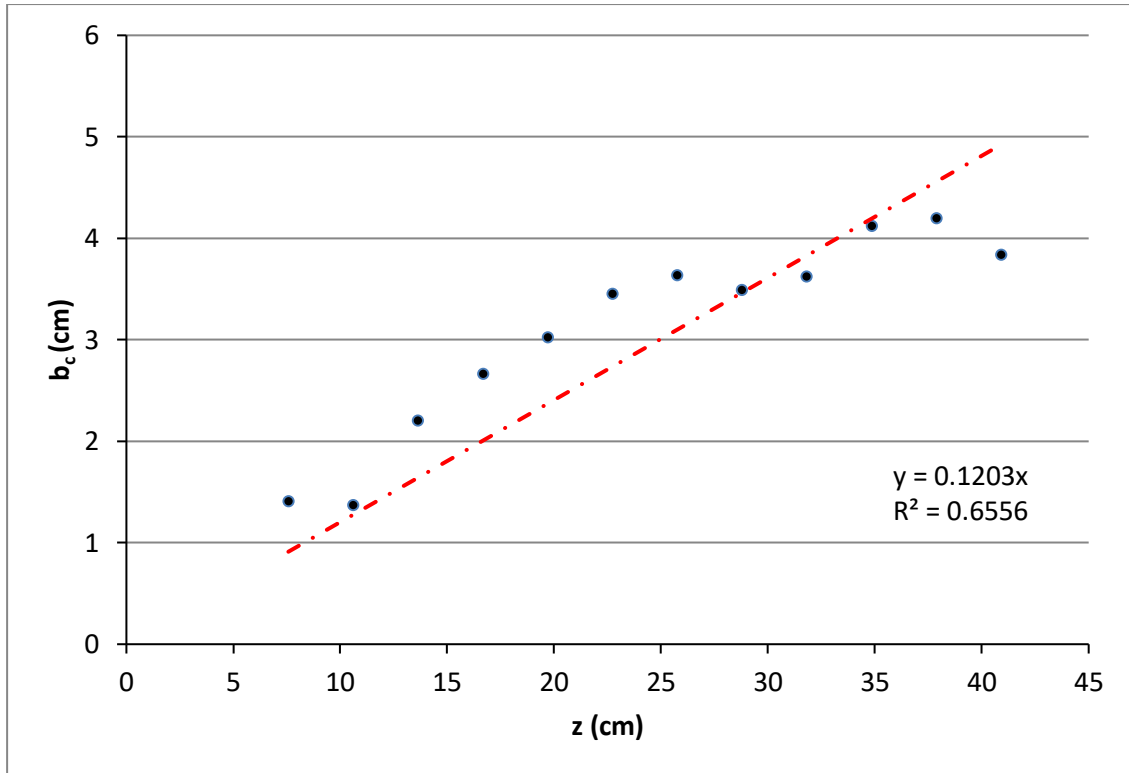
EXP30 ($D_h=0.757$ cm & $Re=2724$, Κύριος άξονας)



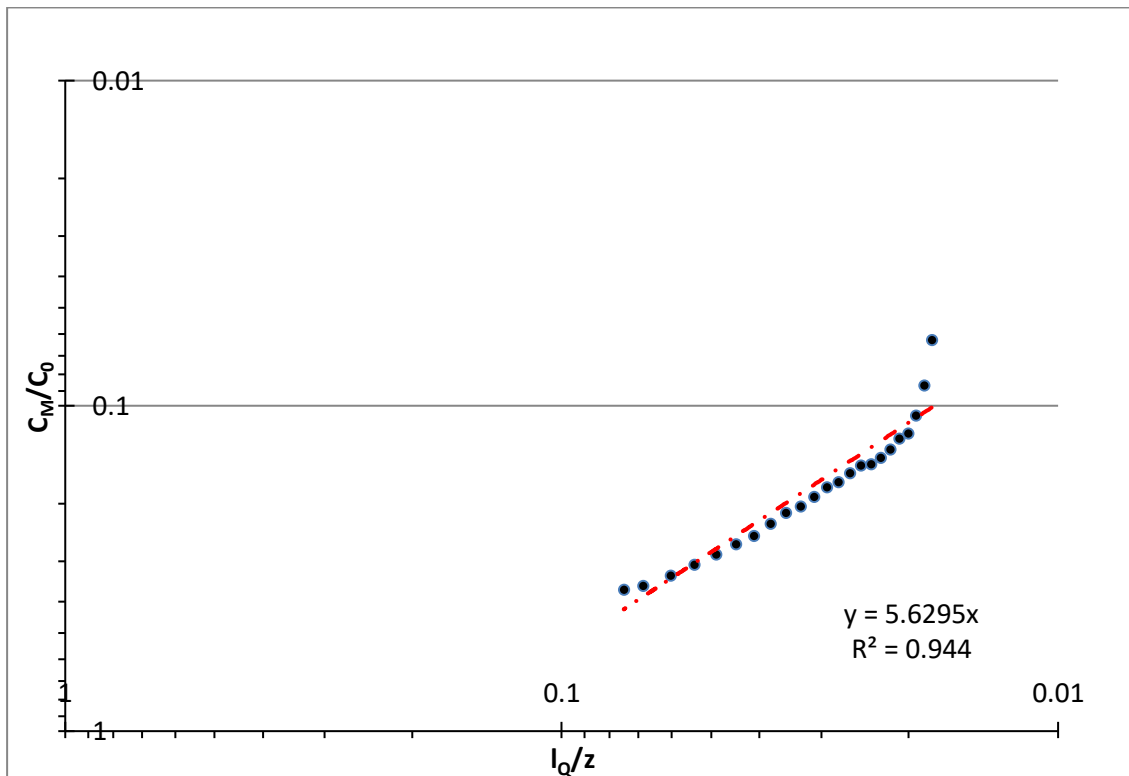
Σχήμα B.49 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 9 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP30



Σχήμα B.50 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 6 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP30

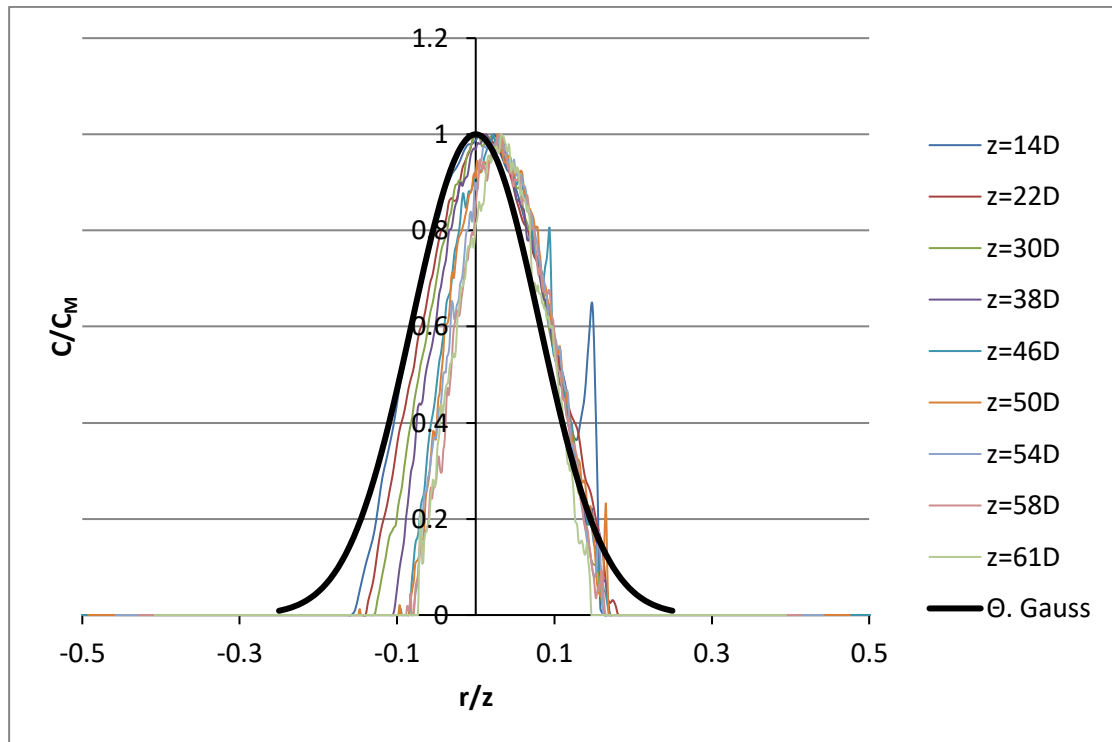


Σχήμα B.51 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP30

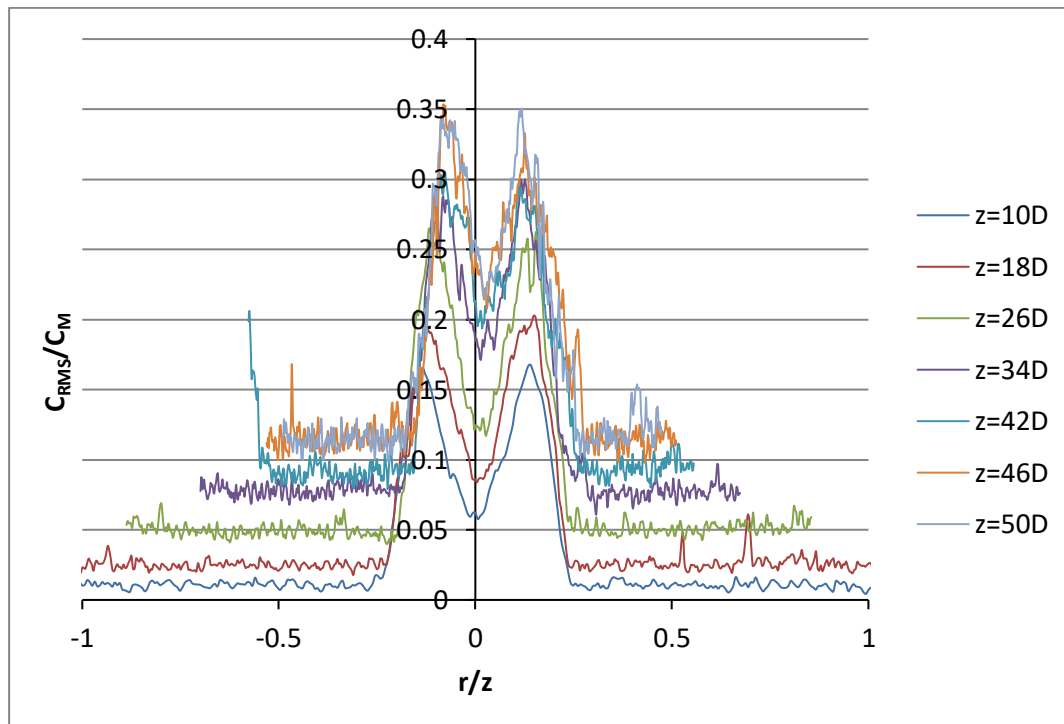


Σχήμα B.52 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP30

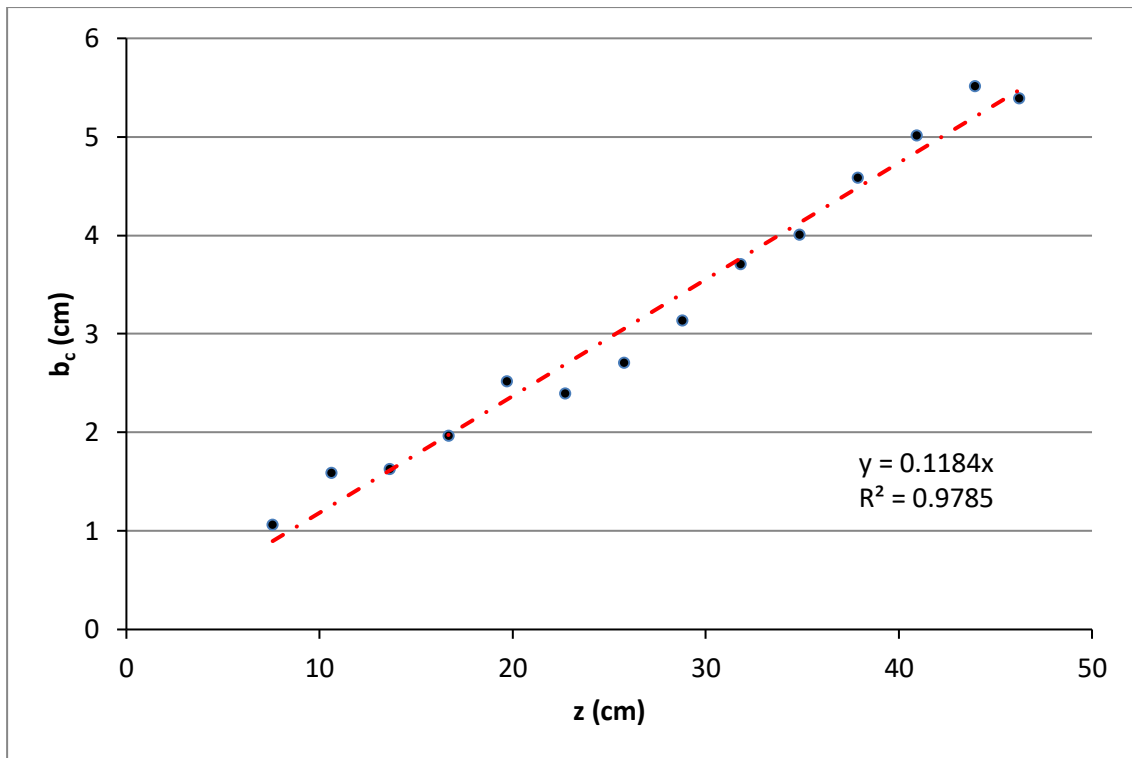
EXP31 ($D_h=0.757$ cm & $Re=2724$, Δευτερεύων άξονας)



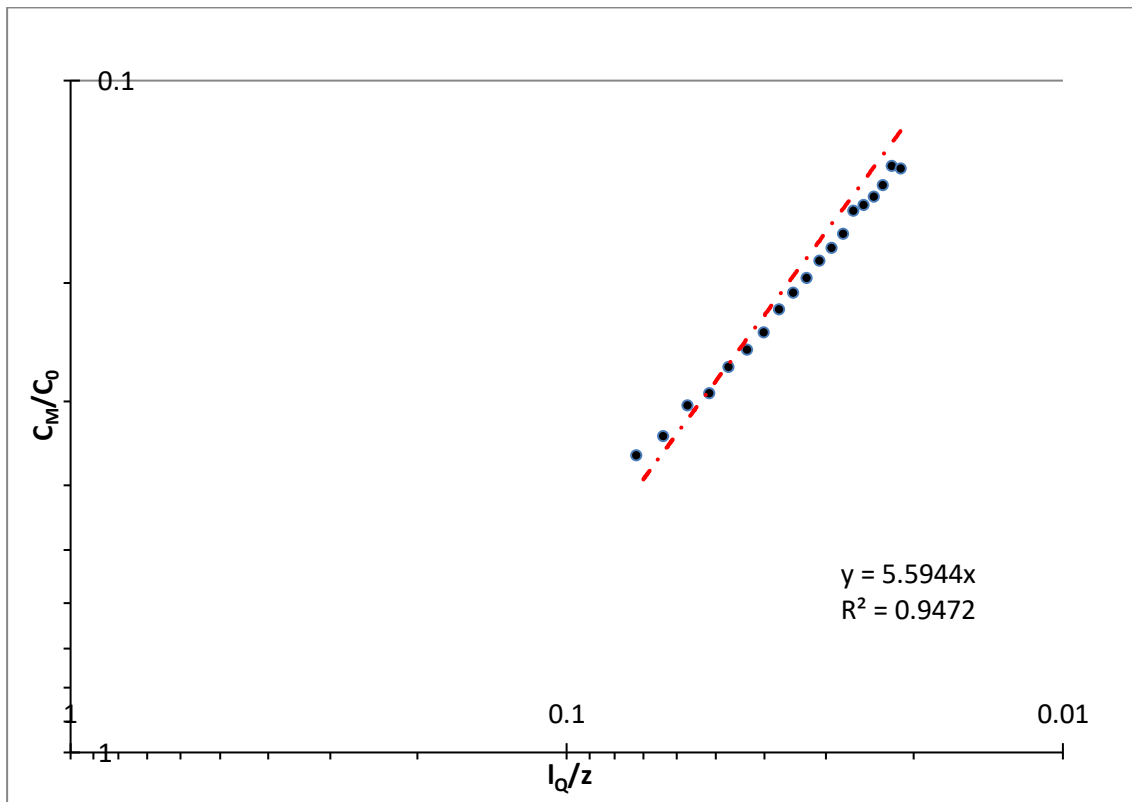
Σχήμα B.53 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 9 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP31



Σχήμα B.54 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 7 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP31

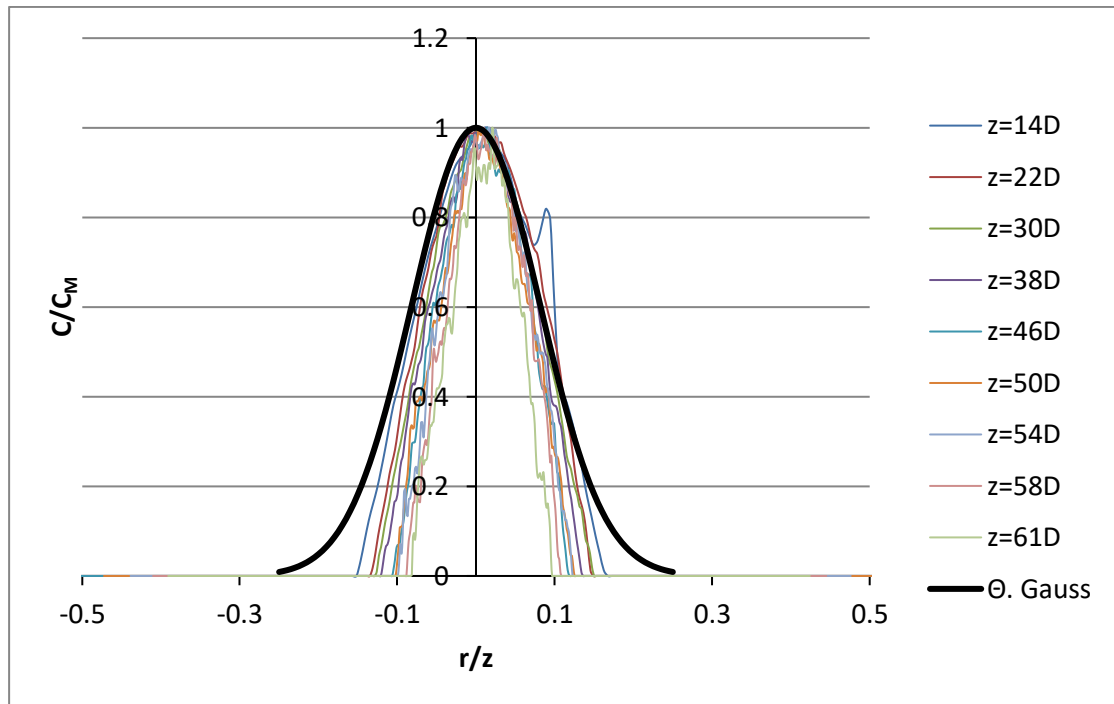


Σχήμα B.55 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP31

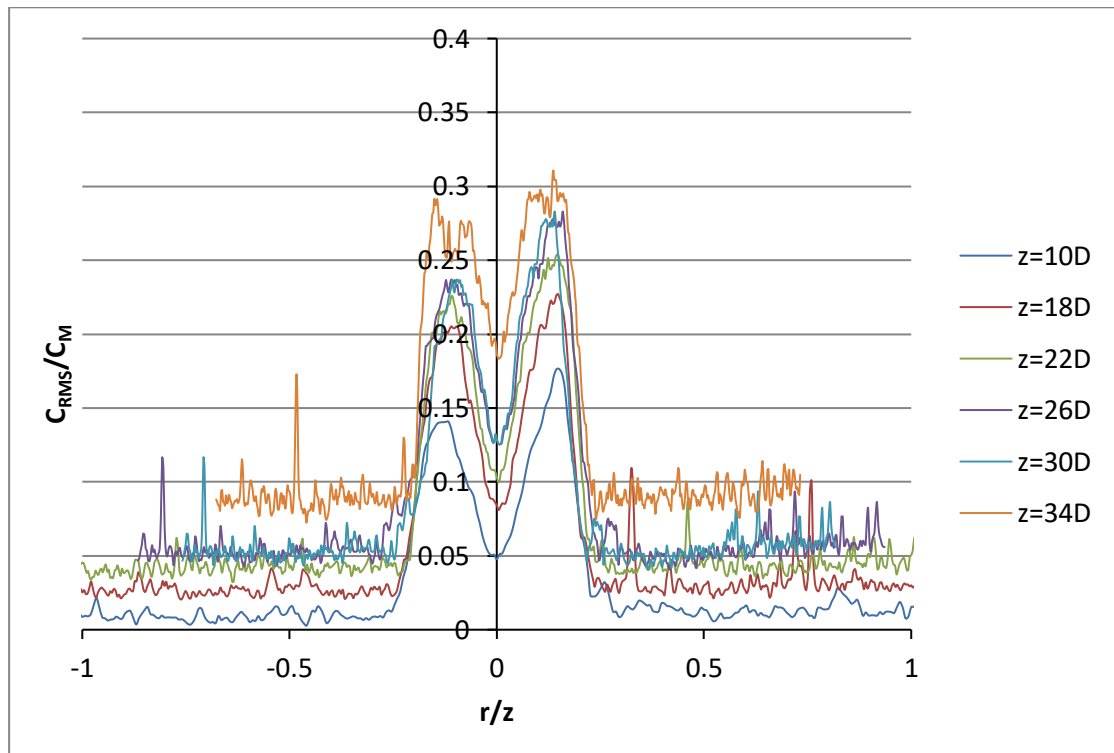


Σχήμα B. 56 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP31

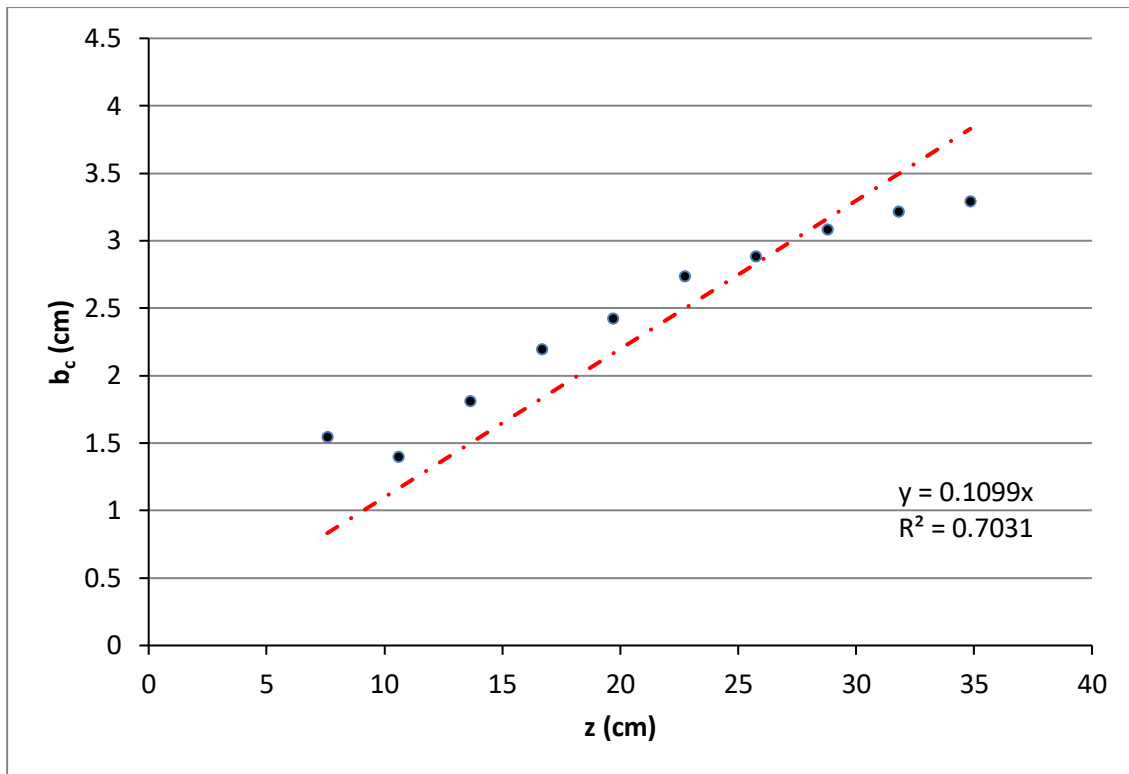
EXP32 ($D_h=0.757$ cm & $Re=3465$, Κύριος άξονας)



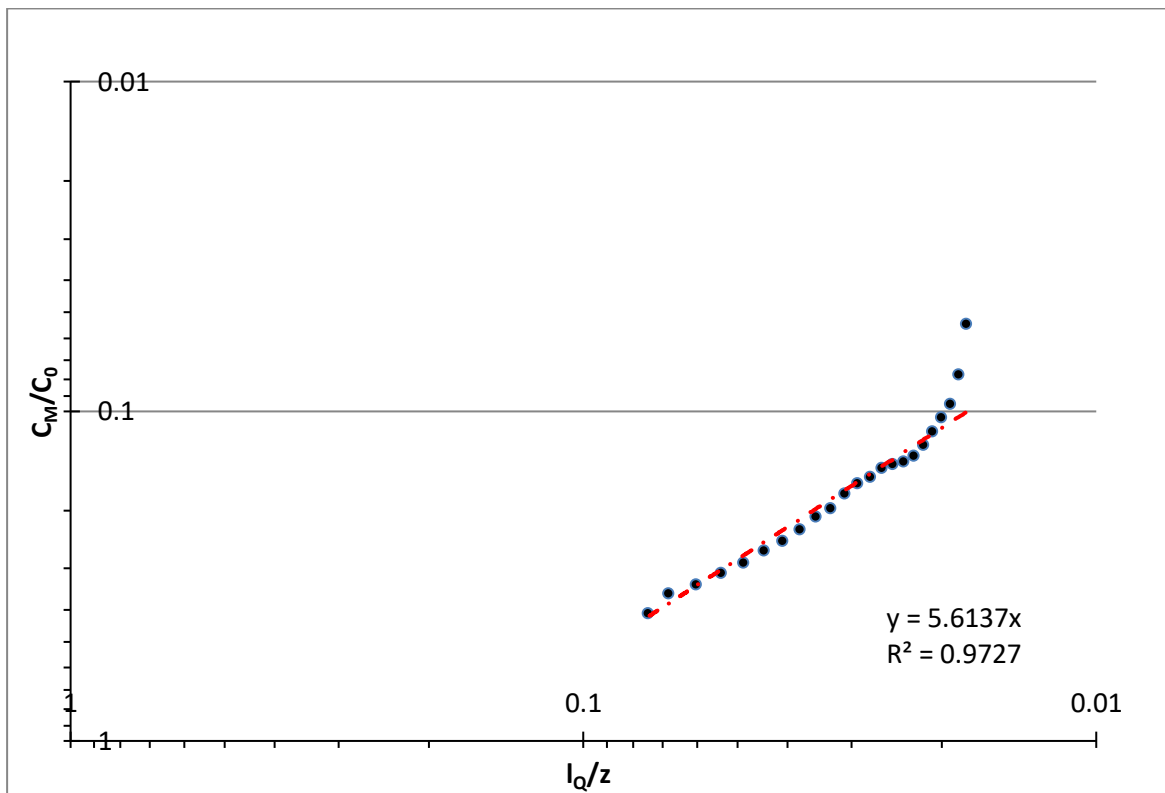
Σχήμα B.57 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 9 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP32



Σχήμα B.58 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 6 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP32

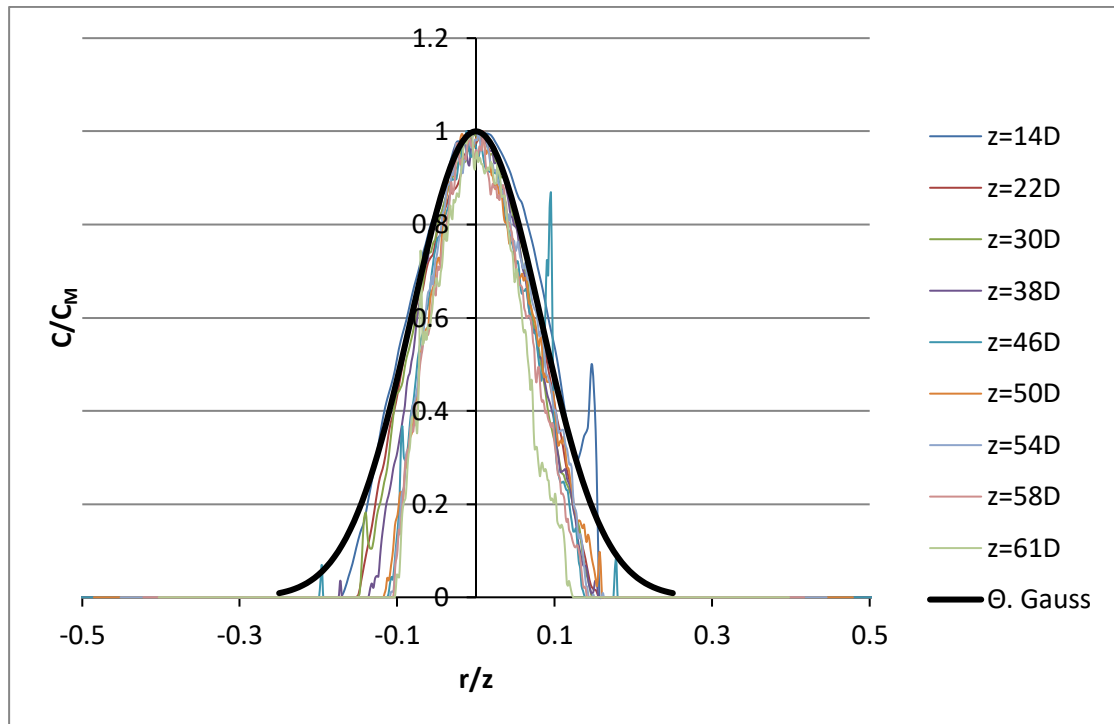


Σχήμα B.59 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP32

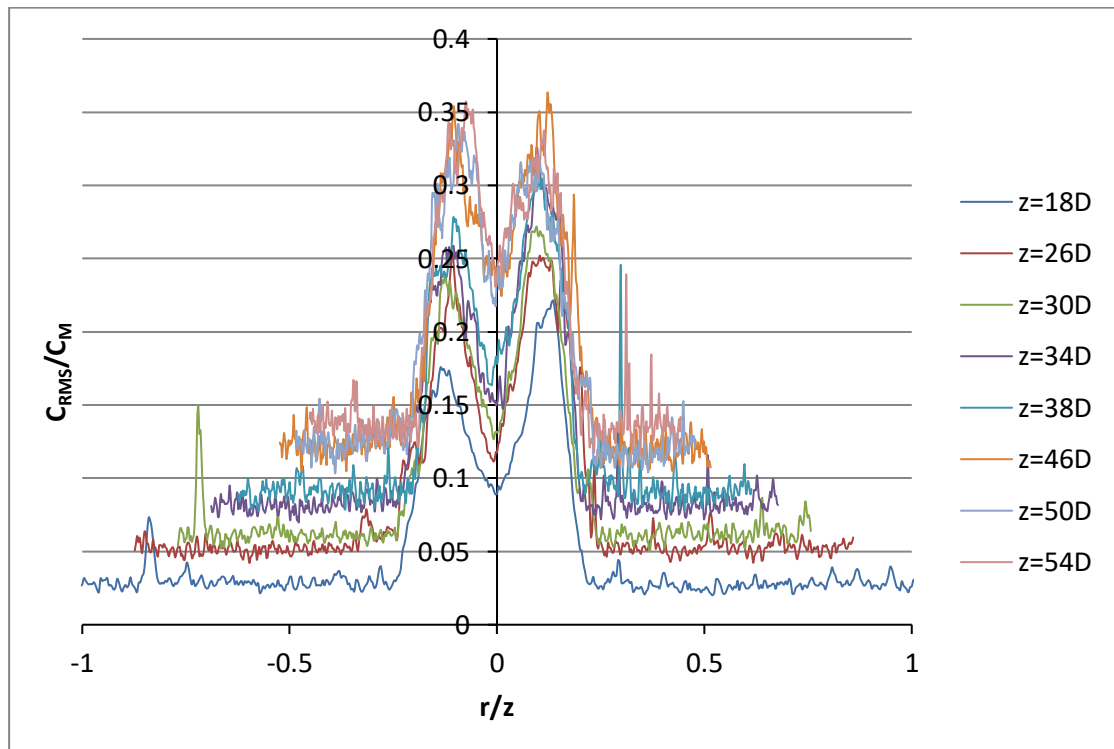


Σχήμα B.60 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP32

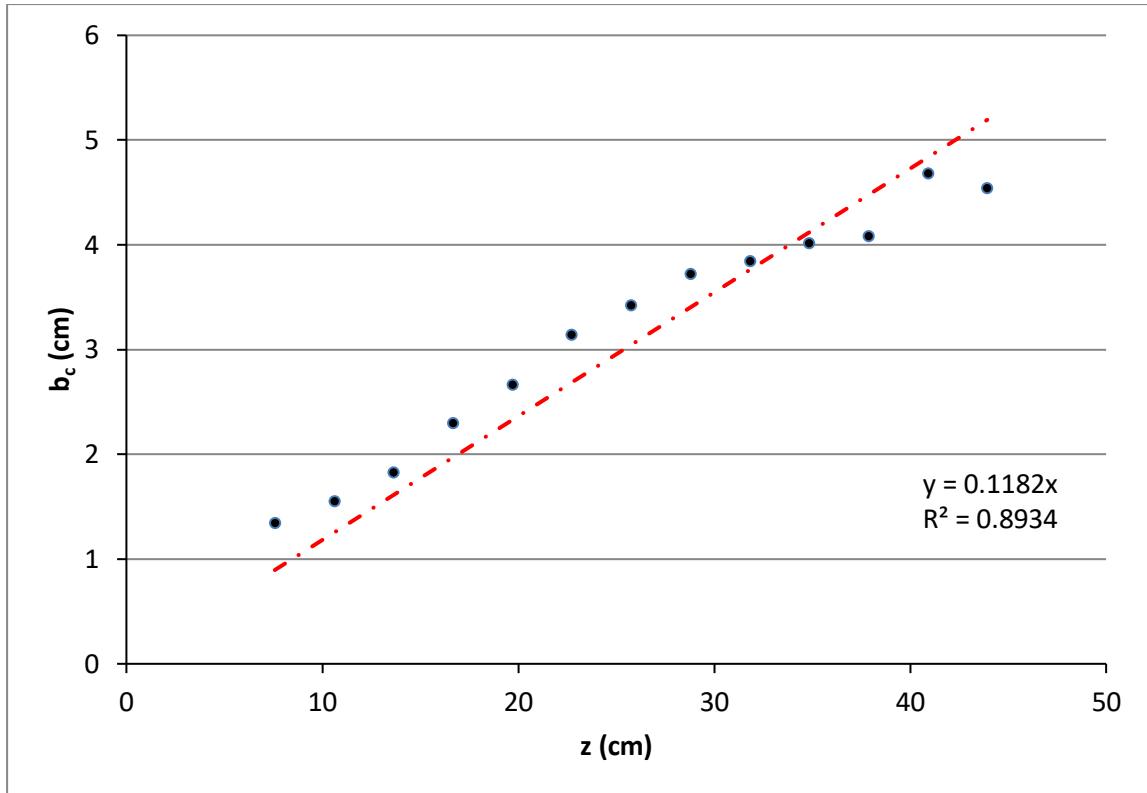
EXP33 ($D_h=0.757$ cm & $Re=3465$, Δευτερεύων άξονας)



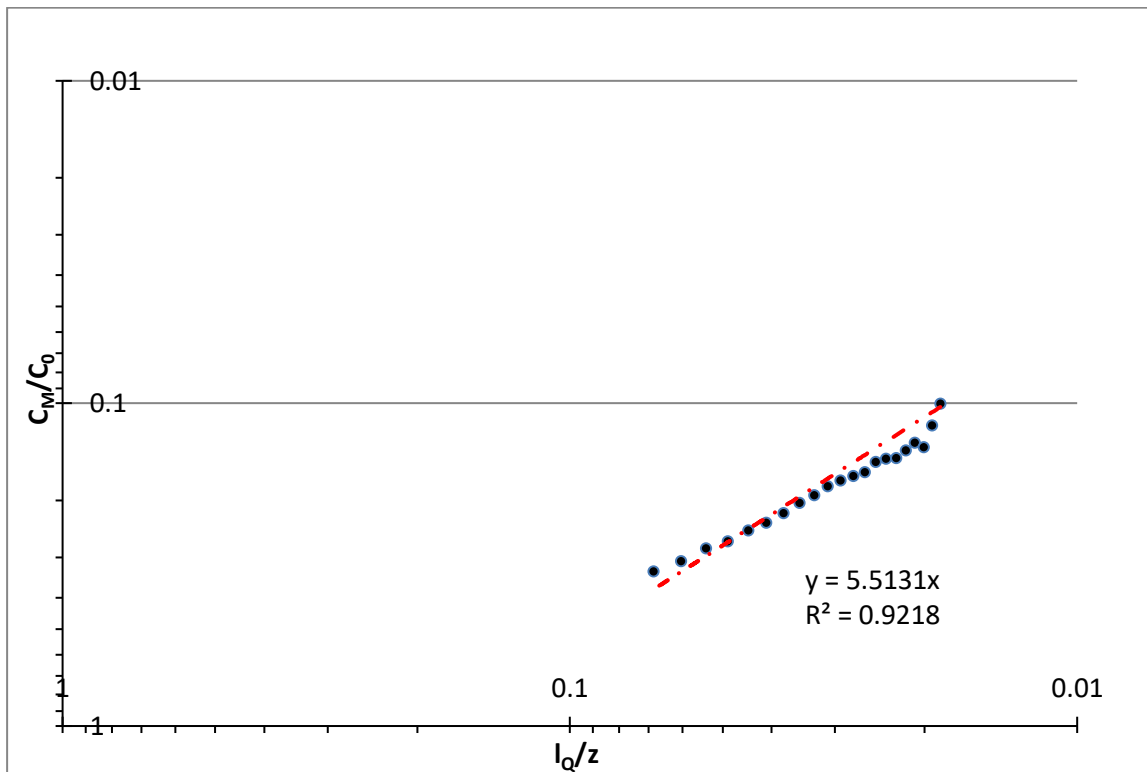
Σχήμα Β.61 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 9 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP33



Σχήμα Β.62 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 8 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP33

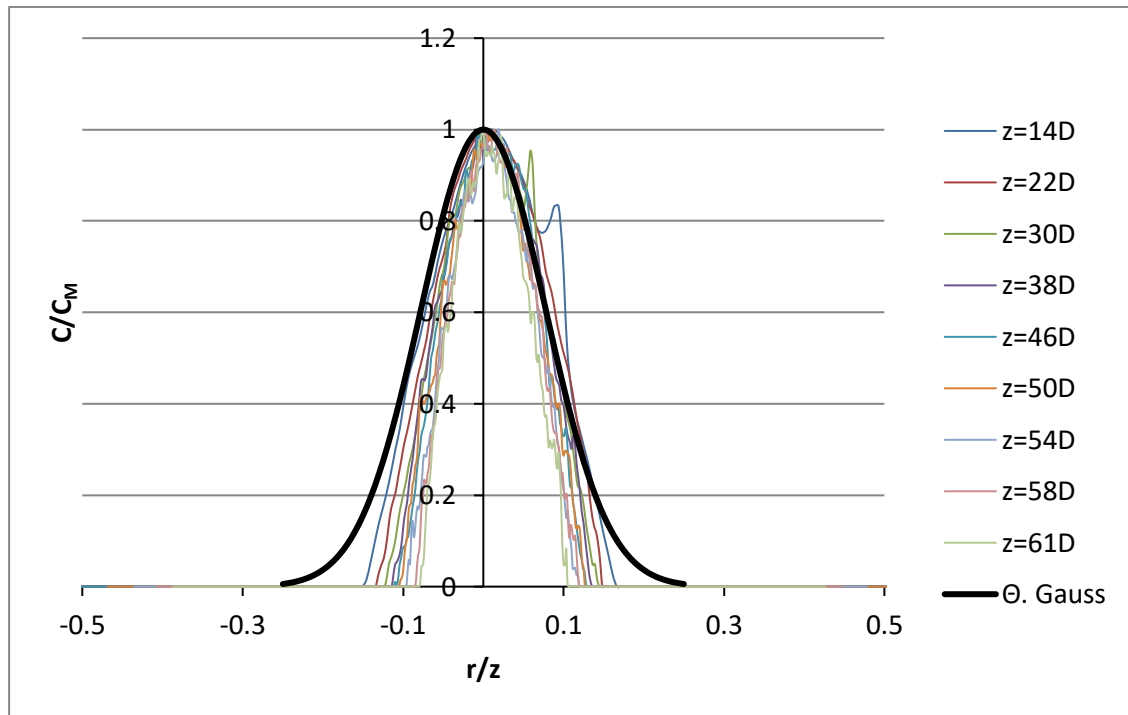


Σχήμα B.63 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP33

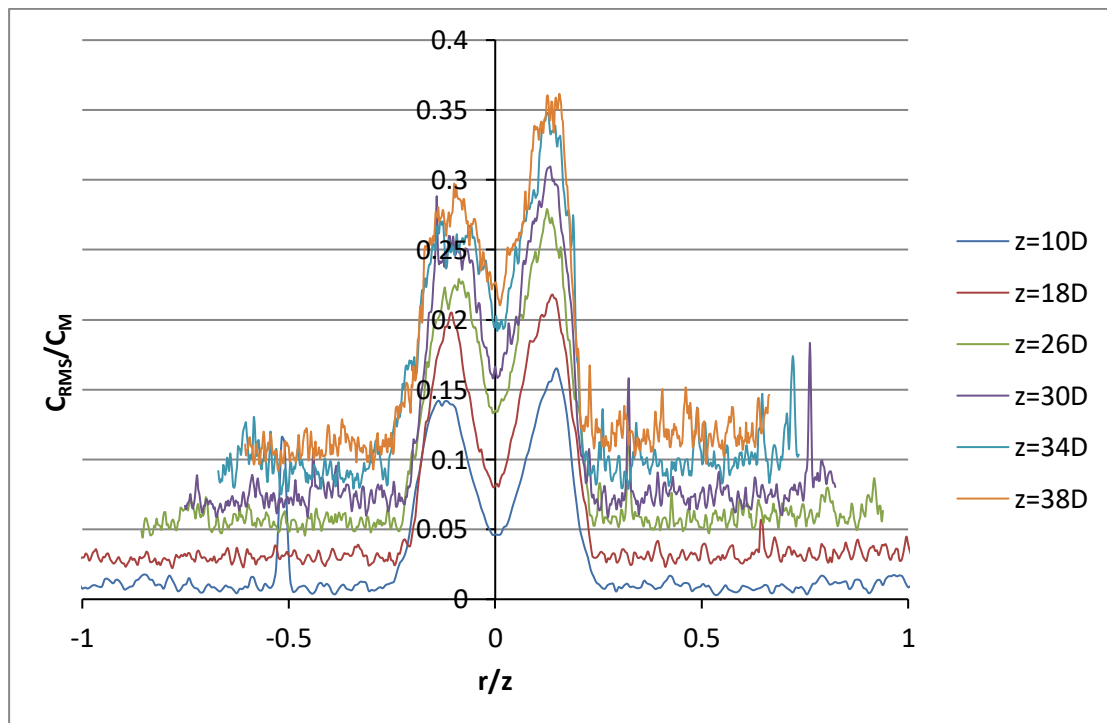


Σχήμα B.64 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP33

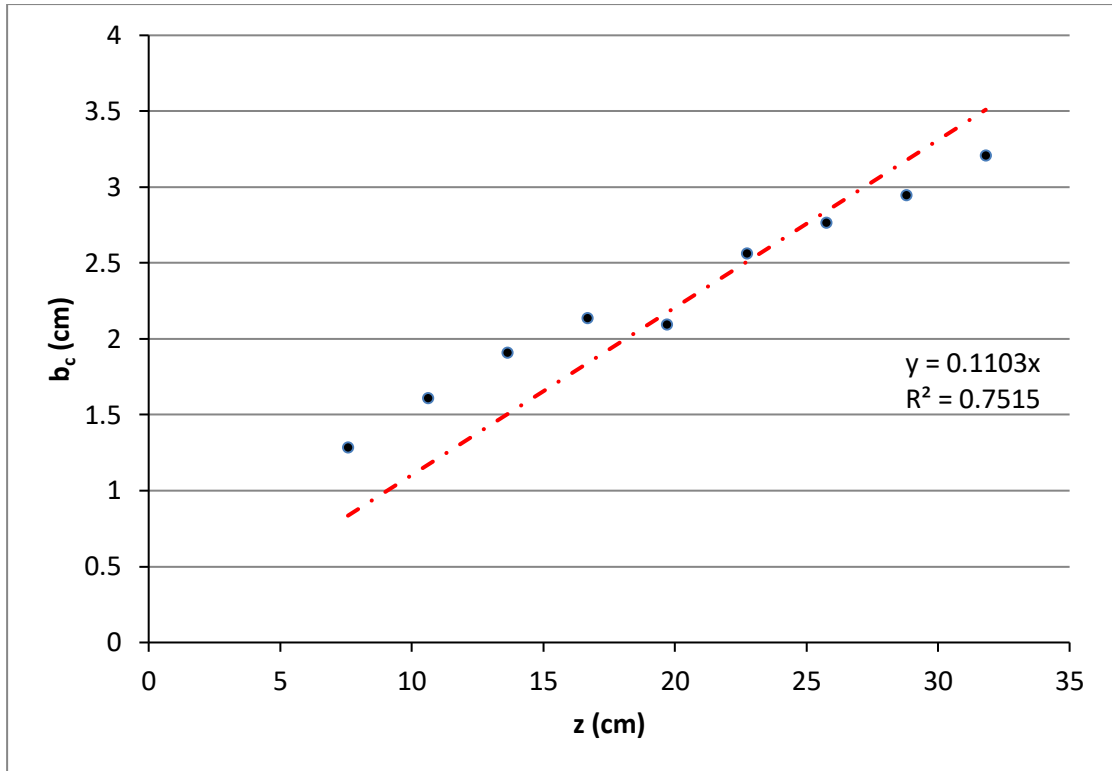
EXP34 ($D_h=0.757$ cm & $Re=4205$, Κύριος άξονας)



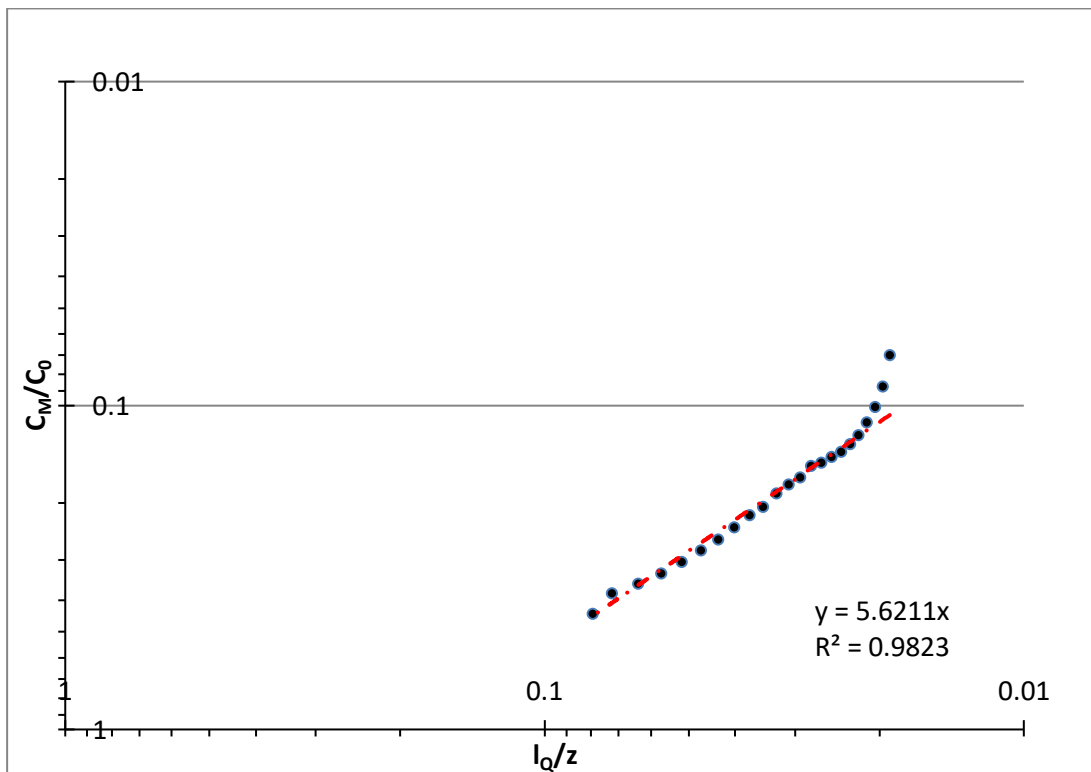
Σχήμα Β.65 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 9 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP34



Σχήμα Β.66 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 6 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP34

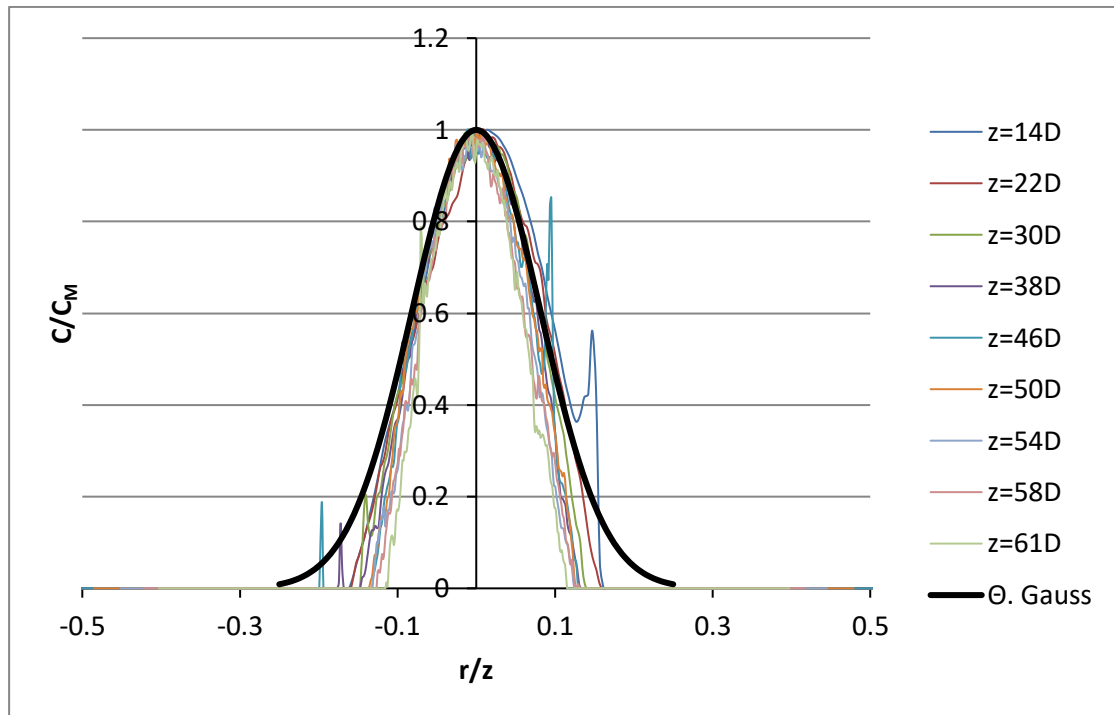


Σχήμα B.67 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP34

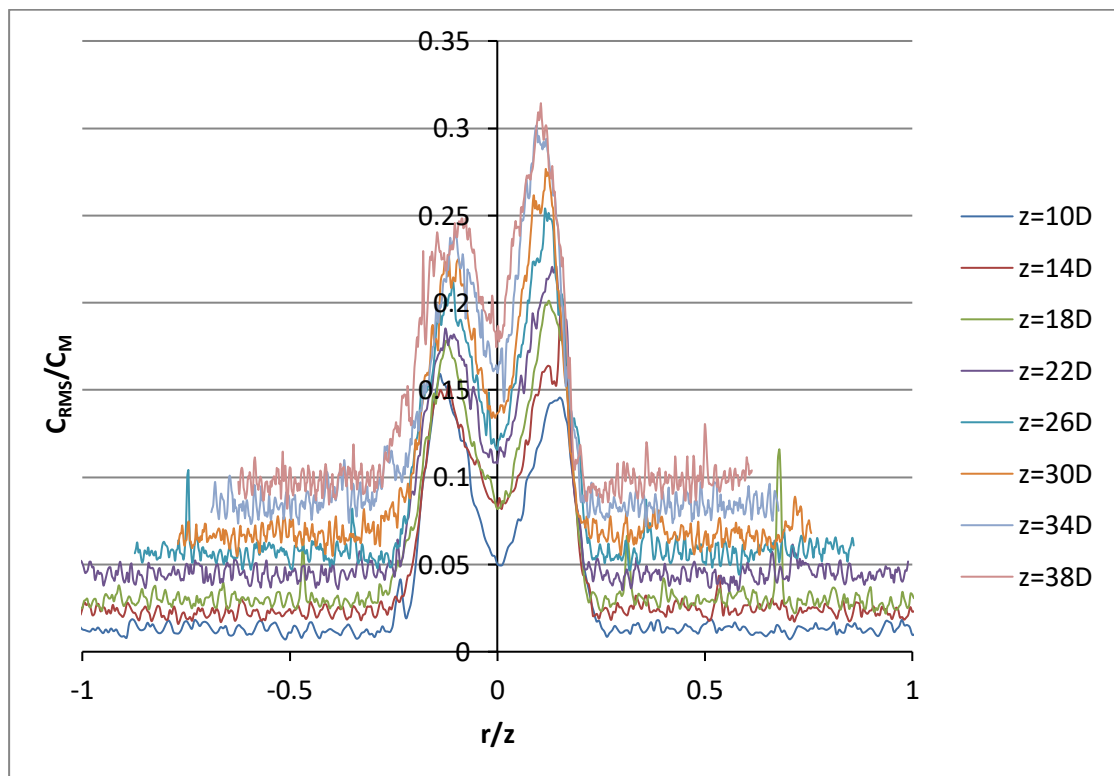


Σχήμα B.68 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP34

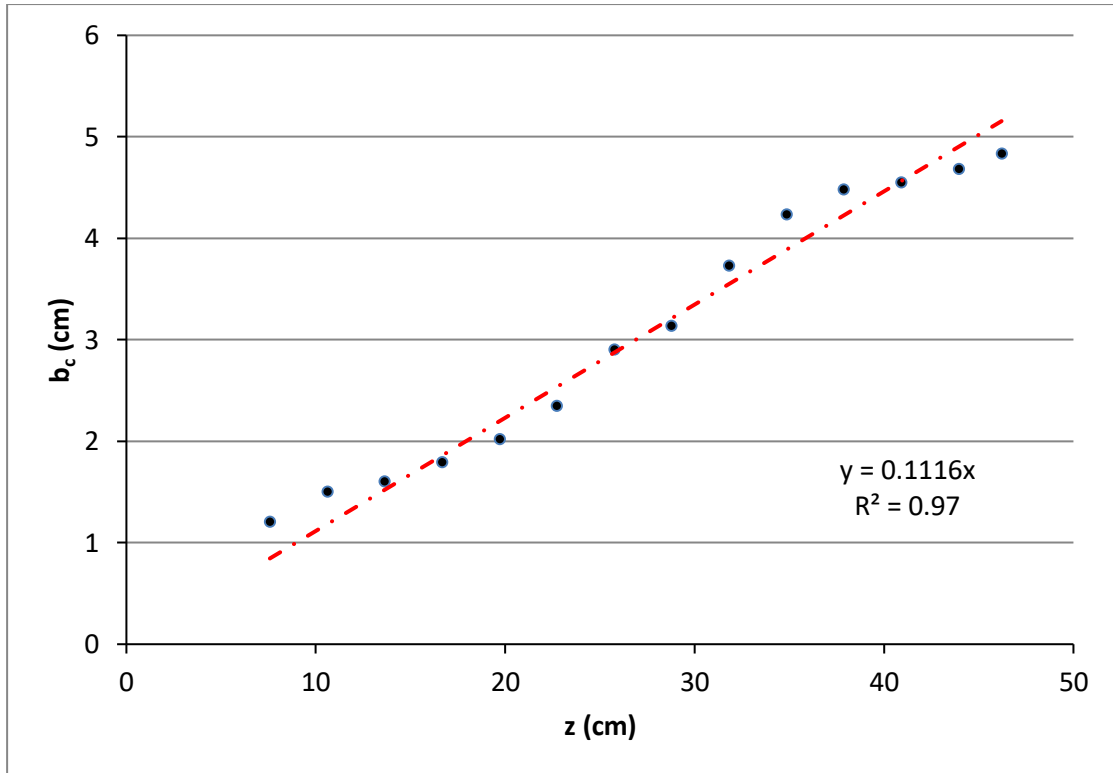
EXP35 ($D_h=0.757$ cm & $Re=4390$, Δευτερεύων άξονας)



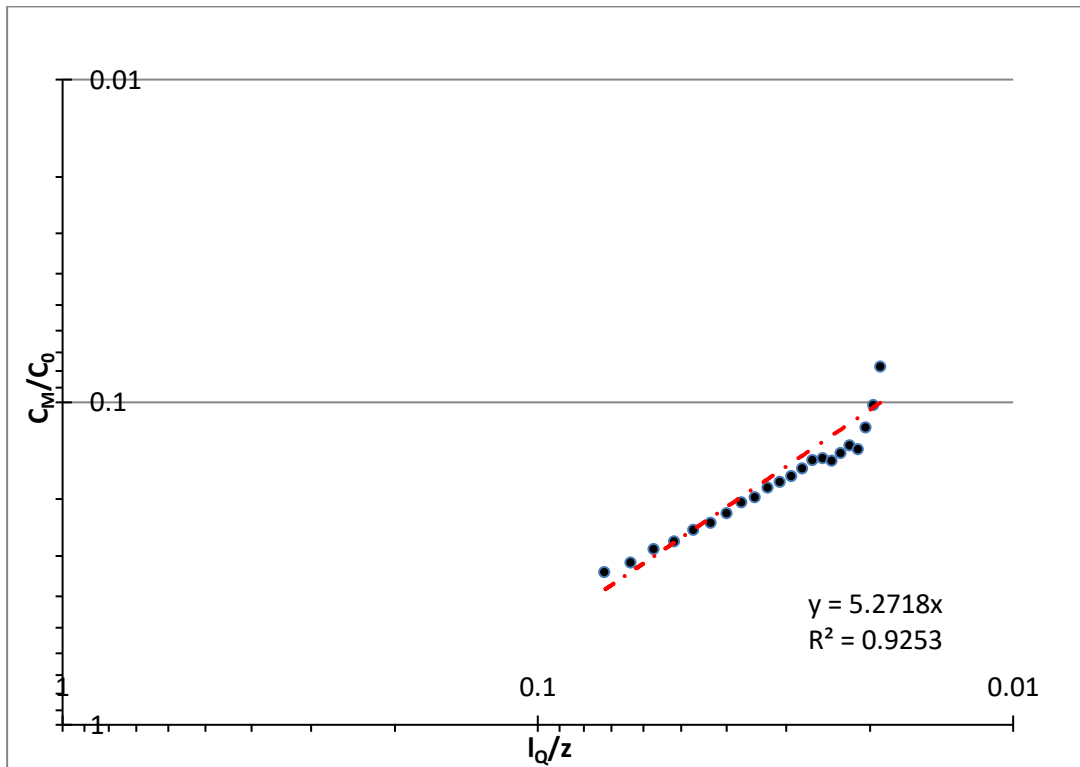
Σχήμα Β.69 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 9 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP35



Σχήμα Β.70 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 8 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP35

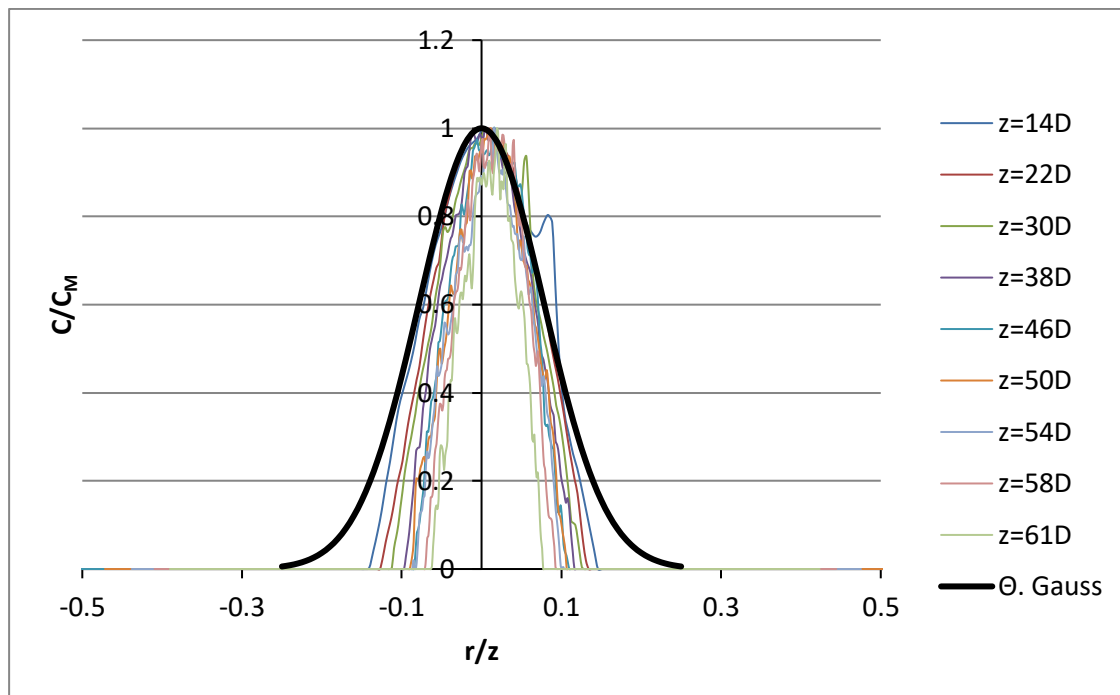


Σχήμα B.71 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP35

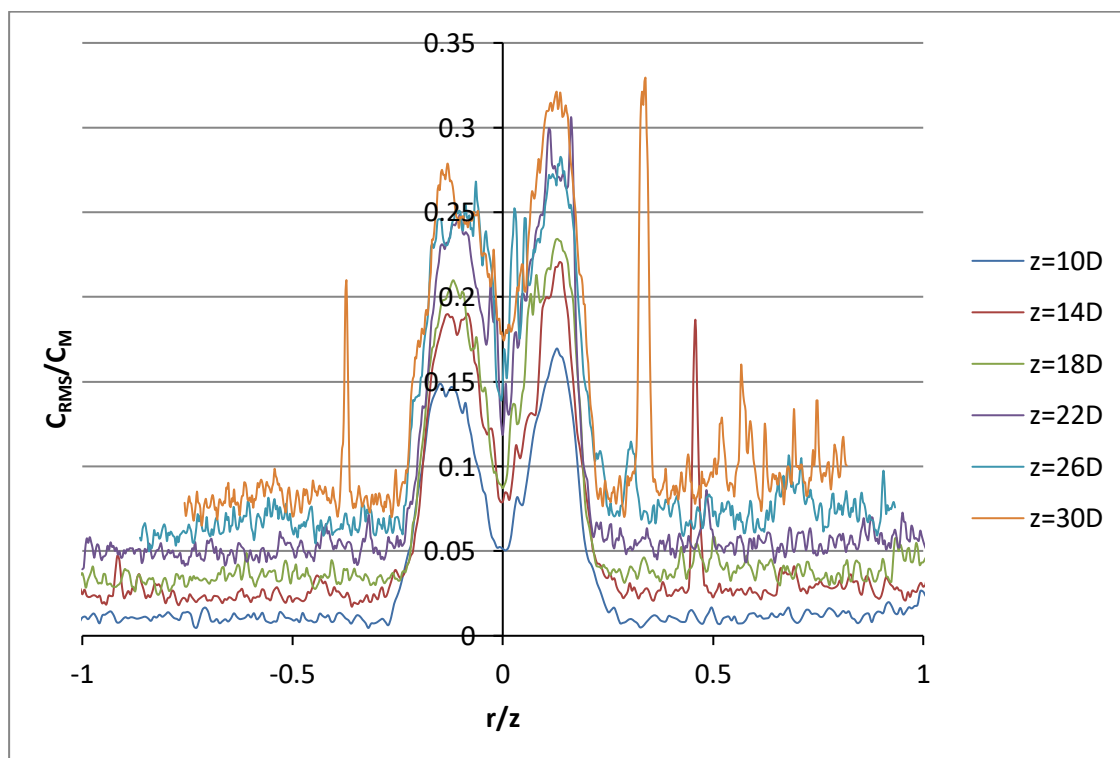


Σχήμα B. 72 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP35

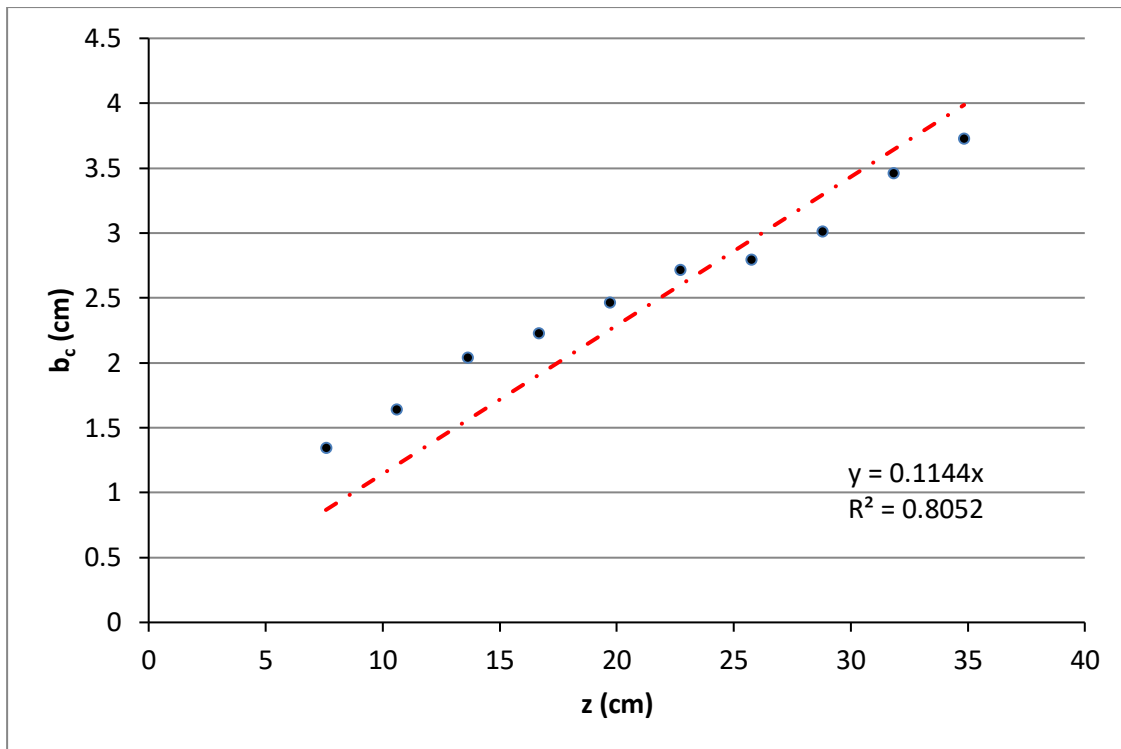
EXP36 ($D_h=0.757$ cm & $Re=4946$, Κύριος άξονας)



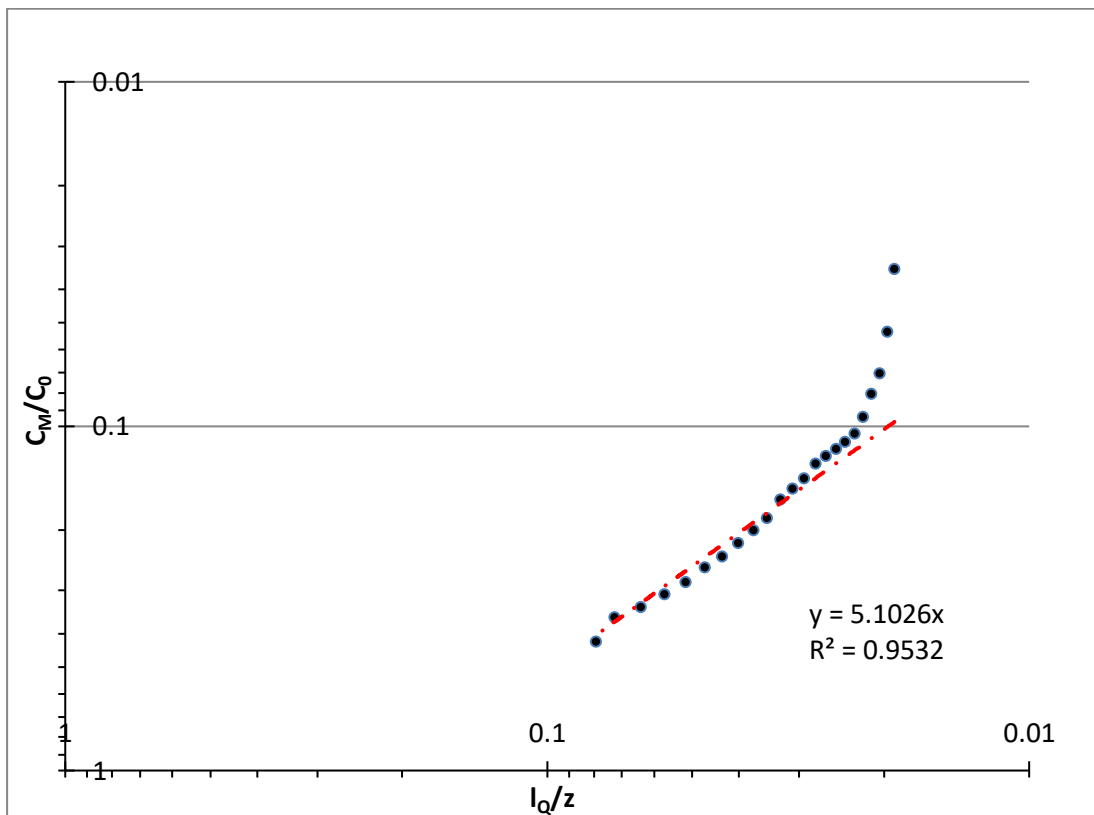
Σχήμα B.73 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 9 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP36



Σχήμα B.74 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 6 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP36

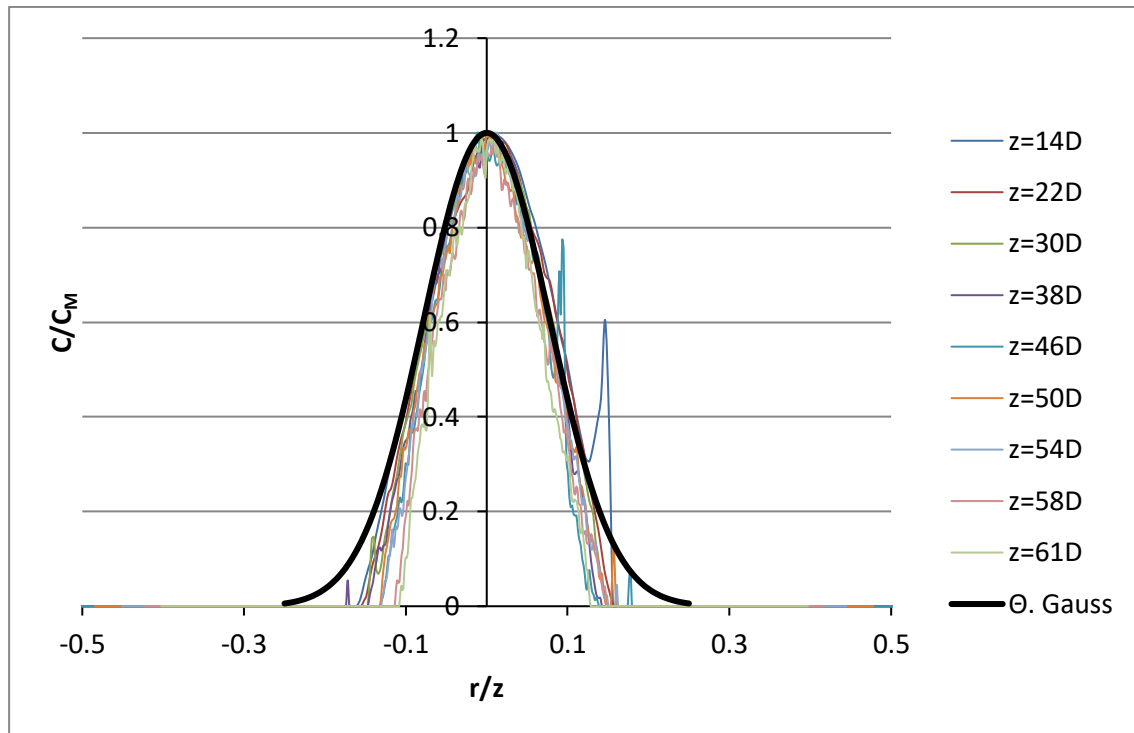


Σχήμα Β.75 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP36

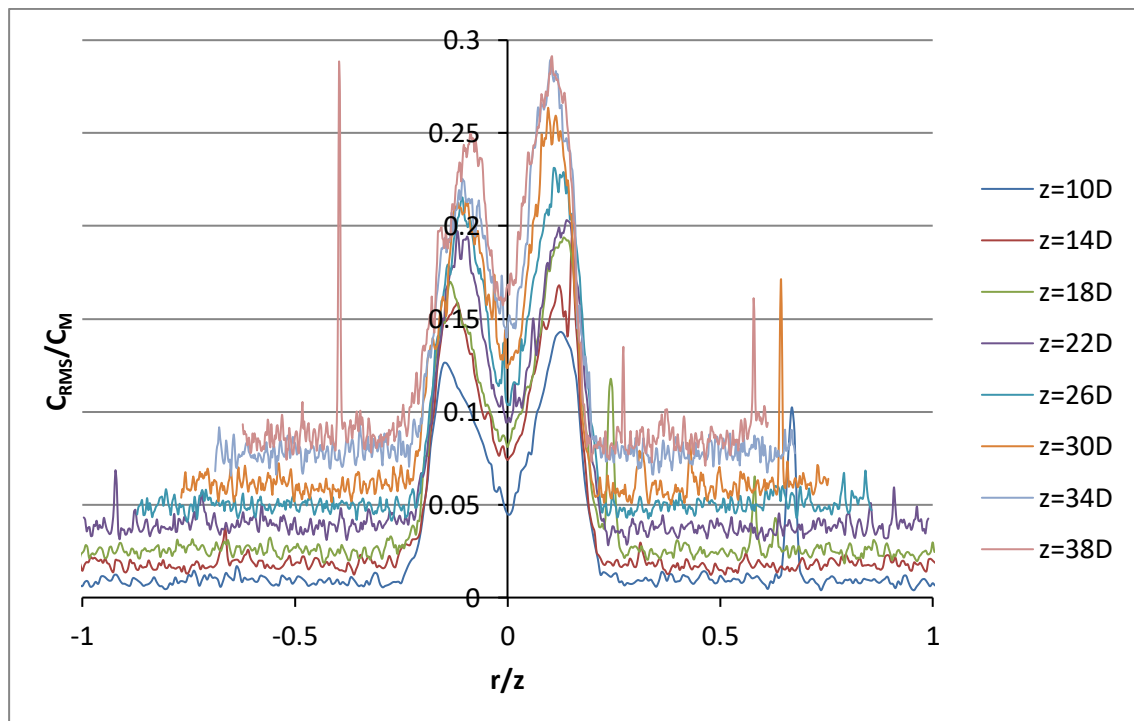


Σχήμα Β.76 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP36

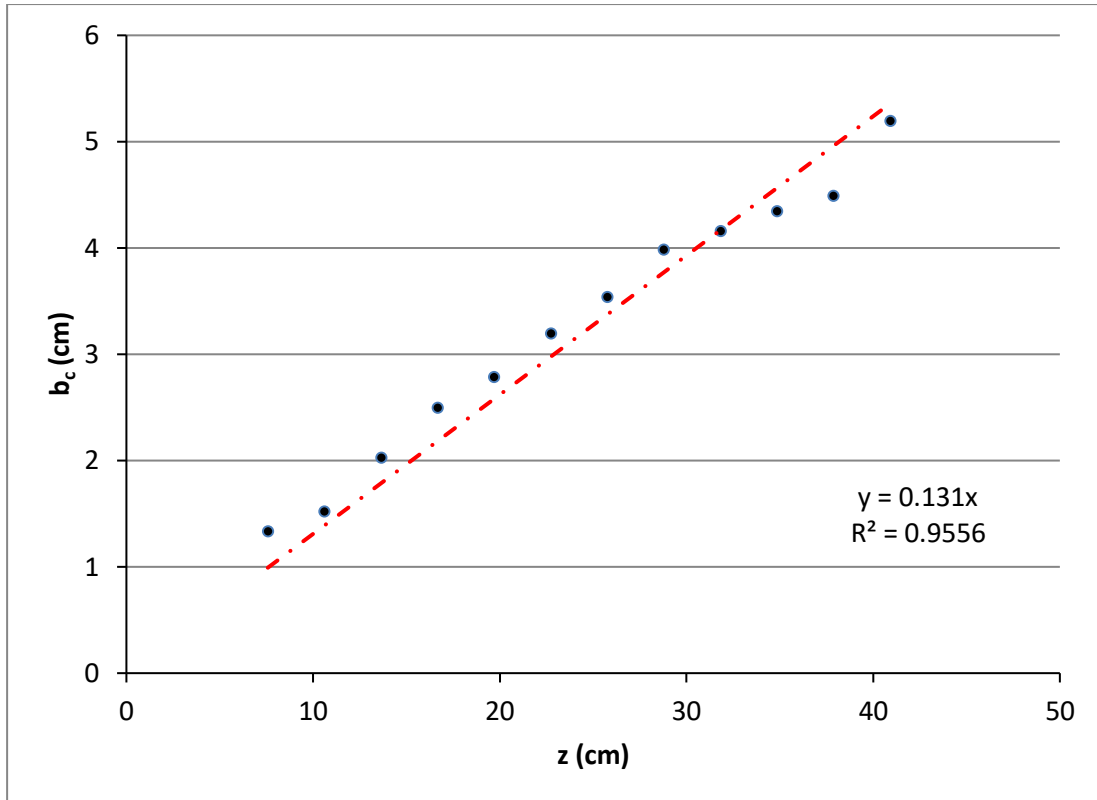
EXP37 ($D_h=0.757$ cm & $Re=5131$, Δευτερεύων άξονας)



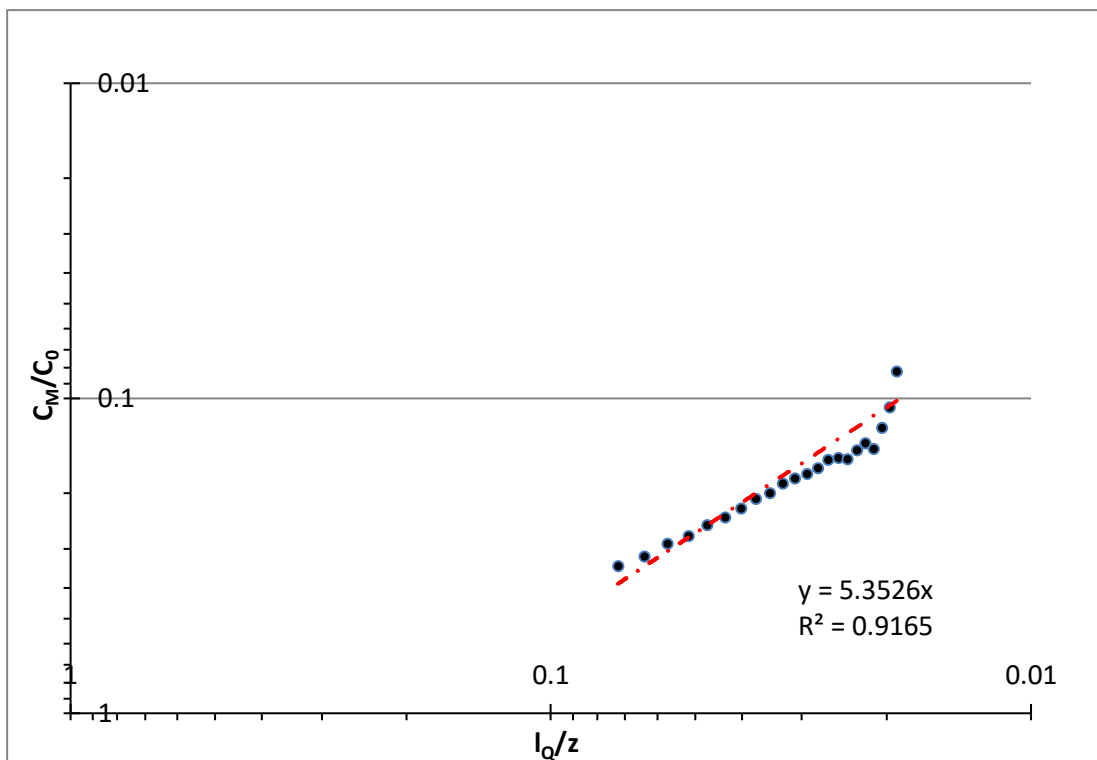
Σχήμα Β.77 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε 9 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP37



Σχήμα Β.78 Εγκάρσια κατανομή της RMS συγκέντρωσης σε 8 διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο στην ζώνη πλήρους ανεπτυγμένης ροής για το πείραμα EXP37



Σχήμα B.79 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP37



Σχήμα B.80 Μεταβολή της μέγιστης συγκέντρωσης C_M αδιαστατοποιημένης με την αρχική συγκέντρωση C_0 με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή για το πείραμα EXP37

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Κώδικας για διαχωρισμό του βίντεο σε Frames

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

Κώδικας για παραγωγή Μέσης Εικόνας και Τυπικής Απόκλισης

```
clear all; clc; format long;
Dir='F:\Diplomatikh\Frames\Eliptiko3kath145\F'; R=3;
Vid='Eliptiko3kath145'; TmFr=[500 3500]; SpFr=[260 850 300 1110]; Sc=1/15;
%cm/pixels
```

```
MR=NaN(SpFr(2)-SpFr(1)+1,SpFr(4)-SpFr(3)+1,floor((TmFr(2)-
TmFr(1)+1)/R)+1); MG=MR; MB=MR;
for T=TmFr(1):R:TmFr(2)
load(['Dir \F' num2str(T) '.mat']); X=floor((T-TmFr(1))/R+1);
MR(:,X)=double(Frame(SpFr(1):SpFr(2),SpFr(3):SpFr(4),1))/255;
MG(:,X)=double(Frame(SpFr(1):SpFr(2),SpFr(3):SpFr(4),2))/255;
MB(:,X)=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);
```

```
xlswrite(['Results' Vid '.xlsx'],Mean(:,1),'MeanR');
xlswrite(['Results' Vid '.xlsx'],Mean(:,2),'MeanG');
xlswrite(['Results' Vid '.xlsx'],Mean(:,3),'MeanB');
save(['Results' Vid 'Mean.mat'],'Mean'); clear Mean
save(['Results' Vid 'MR.mat'],'MR','-v7.3');
save(['Results' Vid 'MG.mat'],'MG','-v7.3');
```

save(['Results' Vid 'MB.mat'],'MB','-v7.3'); clear MG MB

StdevR=std(MR,[],3);

xlswrite(['Results' Vid '.xlsx'],StdevR,'StdvR');

save(['Results' Vid 'StdevR.mat'],'StdevR'); clear MR StdevR

load(['Results' Vid 'MG.mat'],'MG'); StdevG=std(MG,[],3);

xlswrite(['Results' Vid '.xlsx'],StdevG,'StdvG');

save(['Results' Vid 'StdevG.mat'],'StdevG'); clear MG StdevG

load(['Results' Vid 'MB.mat'],'MB'); StdevB=std(MB,[],3);

xlswrite(['Results' Vid '.xlsx'],StdevB,'StdvB');

save(['Results' Vid 'StdevB.mat'],'StdevB'); clear MB StdevB