



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

**ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΣΕ  
ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΦΛΕΒΑ  
ΑΡΝΗΤΙΚΗΣ ΑΝΩΣΗΣ ΜΕ PLIF**

*Ελένη Α. Καπογιάννη*

Αθήνα, Νοέμβριος 2018

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ  
ΥΔΑΤΙΚΩΝ  
ΠΟΡΩΝ»

**Επιβλέπων: Παναγιώτης Ν. Παπανικολάου,  
Αναπληρωτής Καθηγητής**



# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

## ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΣΕ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΦΛΕΒΑ ΑΡΝΗΤΙΚΗΣ ΑΝΩΣΗΣ ΜΕ PLIF

*Ελένη Α. Καπογιάννη*

*Πολιτικός Μηχανικός Πανεπιστημίου Πατρών*

**Επιβλέπων: Παναγιώτης Ν. Παπανικολάου,  
Αναπληρωτής Καθηγητής**

**Αθήνα, Νοέμβριος 2018**

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του Διατμηματικού Μεταπτυχιακού Προγράμματος «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων» της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Το πειραματικό τμήμα της εργασίας εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής του Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ.

Η αποπεράτωση της μεταπτυχιακής αυτής εργασίας κατέστη δυνατή χάρη στην πολύτιμη συμβολή του επιβλέποντα της εργασίας, κ. Παναγιώτη Παπανικολάου, Αναπληρωτή Καθηγητή ΕΜΠ, τον οποίο ευχαριστώ θερμά. Η καθοδήγηση και η προθυμία του για την επίλυση των εκάστοτε αποριών και προβλημάτων που δημιουργούνταν τόσο σε θεωρητικό όσο και πρακτικό επίπεδο αποτελέσαν καθοριστικούς παράγοντες για την ολοκλήρωση της εργασίας.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Παναγιώτη Δημητριάδη διδάκτορα ΕΜΠ για την βοήθειά του στην κατάστρωση του κώδικα υπολογισμού του μέγιστου ύψους αλλά και στην καθοδήγησή του στη διαδικασία της βαθμονόμησης της έντασης των χρωμάτων που χρησιμοποιήθηκε στην τεχνική PLIF (Planar Laser Induced Fluoresence).

Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω και τον κ. Ιωάννη Πατσέλη, τεχνικό Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Υδραυλικής, για τη συμβολή του στην επίλυση προβλημάτων που αφορούσαν την πειραματική διάταξη κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων.

Θα ήταν παράλειψή μου να μην ευχαριστήσω και τον κ. Ηλία Παπακωνσταντή λέκτορα ΕΜΠ για το ενδιαφέρον του και την προθυμία του για την επίλυση των αποριών μου όχι μόνο στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής εργασίας, αλλά και σε όλη τη διάρκεια του μεταπτυχιακού προγράμματος.

Ευχαριστίες εκφράζονται και στην κα. Αικατερίνη Νάνου, Επίκουρη Καθηγήτρια ΕΜΠ που αποτελεί μέλος της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	vi
Extended Abstract.....	viii
1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Εισαγωγικά στοιχεία.....	1
1.2 Βασικοί ορισμοί.....	2
1.3 Χαρακτηριστικές κλίμακες μήκους.....	4
1.4 Τυρβώδης φλέβα αρνητικής άνωσης – Μηχανισμός Fountain.....	5
1.5 Διαστατική ανάλυση.....	6
1.5.1 Μέγιστο ύψος.....	6
1.5.2 Αραίωση .....	7
2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	8
2.1 Εισαγωγή.....	8
2.2 Περιγραφή εργασιών σε τυρβώδεις φλέβες αρνητικής άνωσης.....	8
2.2.1 Turner (1966).....	8
2.2.2 Abraham (1967).....	9
2.2.3 Δημητρίου (1978).....	9
2.2.4 McLellan & Randall (1986).....	9
2.2.5 Baines, Turner, Cambell (1989).....	9
2.2.6 Zhang & Baddour (1998) .....	9
2.2.7 Pantzloff & Lueptow(1999).....	9
2.2.8 Kokkalis & Papanicolaou (2006).....	9
2.2.9 Spetsiotis & Papanicolaou (2008).....	10
2.2.10 Παπακωνσταντής (2009).....	10
2.3 Σκοπός Εργασίας.....	10
3 Πειραματική διαδικασία.....	11
3.1 Γενική περιγραφή πειραματικής διάταξης.....	12
3.2 Δεξαμενές.....	12
3.2.1 Κύρια δεξαμενή.....	12
3.2.2 Δεξαμενή προετοιμασίας διαλύματος.....	13
3.2.3 Δεξαμενή τροφοδοσίας της φλέβας.....	13
3.3 Αντλία.....	14
3.4 Παροχόμετρο.....	15
3.5 Σύστημα εκτόξευσης φλέβας.....	15
3.6 Βιντεοκάμερα.....	15
3.7 Προβολέας.....	16
3.8 Βοηθητικά Όργανα.....	17
3.8.1 Ψηφιακό όργανο μέτρησης αλατότητας.....	17
3.8.2 Άλλα βοηθητικά όργανα και υλικά.....	17
3.9 Διάταξη συσκευών οπτικοποίησης PLIF (Planar Laser Induced Fluorescence).....	17
3.9.1 Βαθμονόμηση έντασης χρώματων και συγκέντρωσης ροδαμίνης και ακτίνας laser.....	18
3.10 Περιγραφή τυπικού πειράματος.....	22
3.10.1 Περιγραφή πειράματος με τη μέθοδο Shadowgraph.....	22
3.10.2 Περιγραφή πειράματος με τη μέθοδο PLIF.....	23
3.11 Περιγραφή της τεχνικής Shadowgraph.....	24
4 Αποτελέσματα - Επεξεργασία δεδομένων.....	26
4.1 Υπολογισμός μέγιστου ύψους Z(t).....	29
4.2 Υπολογισμός μέσης εικόνας και χρονοσειράς έντασης κόκκινου	36

	χρώματος.....	
	4.2.1 Μέση Εικόνα.....	37
	4.2.2 Μέση Χρονικά Εικόνα- Χρονοσειρά έντασης κόκκινου χρώματος.....	44
5.	Συμπεράσματα.....	47
	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	48
	Αναφορές.....	48
	Παράρτημα.....	52

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1 Τυρβώδης διάχυση απλής φλέβας.....	3
Σχήμα 1.2 Διάχυση κατακόρυφης φλέβας με αρνητική άνωση. (α)Ροή μετά την έναρξη στο μέγιστο ύψος $Z=Z_{max}$ (β) Σταθεροποιημένη ροή σε ύψος $Z<Z_{max}$ .....	6
Σχήμα 3.1 Σχηματική απεικόνιση πειραματικής διάταξης.....	11
Σχήμα 3.2 Ορθογωνική δεξαμενή.....	12
Σχήμα 3.3 Αριστερά: Δεξαμενή προετοιμασίας διαλύματος. Δεξιά: Δεξαμενή τροφοδοσίας φλέβας.....	14
Σχήμα 3.4 Αριστερά: Βυθιζόμενη αντλία .Δεξιά: Παροχόμετρο.....	14
Σχήμα 3.5 Διάγραμμα βαθμονόμησης παροχής.....	15
Σχήμα 3.6 Αριστερά: Βιντεοκάμερα καταγραφής πειράματος. Δεξιά: Τρίποδας στήριξης βιντεοκάμερας.....	16
Σχήμα 3.7 Αριστερά: Προβολέας συγκεντρωτικής δέσμης. Δεξιά: Όργανο μέτρησης αλατότητας (YSI 30).....	16
Σχήμα 3.8 Αριστερά: Διάταξη δεξαμενής και συσκευής ακτίνας laser. Δεξιά: Συσκευή δημιουργίας ακτίνας lase.....	18
Σχήμα 3.9 Σχηματική απεικόνιση της απομείωσης της έντασης κατά μήκος μιας ακτίνας laser.....	20
Σχήμα 3.10 Μεταβολή έντασης I κατά μήκος μιας ακτίνας σε ύψος $z=600$ (pixels).....	21
Σχήμα 3.11 Μεταβολή έντασης I καθ' ύψος της δεξαμενής στη στήλη $x=970$ (pixels).....	21
Σχήμα 3.12 Προβολή οπίσθιου κανάβου.....	25
Σχήμα 4.1 Στιγμιότυπα πειράματος Exp-00195.....	31
Σχήμα 4.2 Στιγμιότυπα πειράματος Exp-00263.....	32
Σχήμα 4.3 Δημιουργία μέσου κανάβου.....	33
Σχήμα 4.4 Πείραμα 00195- Ύψος της φλέβας συναρτήσει του χρόνου $Z(t)$ .....	34
Σχήμα 4.5 Πείραμα 00263- Ύψος της φλέβας συναρτήσει του χρόνου $Z(t)$ .....	34
Σχήμα 4.6 Αδιάστατα ύψη $Z_{max}/l_M$ και $Z/l_M$ συναρτήσει του αριθμού Froude για πειράματα με την τεχνική Shadowgraph και την PLIF.....	35
Σχήμα 4.7 Αδιάστατος χρόνος $(t_{max} B/M)$ συναρτήσει του αριθμού Froude.....	36
Σχήμα 4.8 Αδιάστατο ύψος της φλέβας $Z(t)/l_M$ συναρτήσει του αδιάστατου χρόνου $t B/M$ .....	36
Σχήμα 4.9 Στιγμιότυπο $t= 110 \text{ sec}$ , Μέση εικόνα μετά τη σταθεροποίηση της ροής, αντίστοιχη rms εικόνα.....	38
Σχήμα 4.10 Χρωματικοί χάρτες της έντασης τους κόκκινου χρώματος, στιγμιότυπο $t= 110 \text{ sec}$ , μέση εικόνα μετά τη σταθεροποίηση της ροής, αντίστοιχη rms εικόνα .....	38
Σχήμα 4.11 Αδιάστατα προφίλ μέσης συγκέντρωσης και έντασης τύρβης καθ' ύψος της φλέβας ανά 5 διαμέτρους $d$ .....	41
Σχήμα 4.12 11 Αδιάστατα προφίλ μέσης συγκέντρωσης και έντασης τύρβης συναρτήσει της απόστασης $r/z$ σε βάθη $0.5 l_M$ , $0.75 l_M$ , $1 l_M$ , $1.5 l_M$ , $1.75 l_M$ .....	44
Σχήμα 4.13 Χρονοσειρά έντασης κόκκινου χρώματος για 3 διαφορετικά ύψη στην φλέβα.....	45
Σχήμα 4.14 Αδιάστατη μέση συγκέντρωση και ένταση τύρβης κατά μήκος του άξονα της φλέβας από τη μέση εικόνα και τη χρονοσειρά (Exp-263).....	45
Σχήμα 4.15 Μέση αδιάστατη αραίωση στον άξονα της φλέβας.....	46

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1 Συγκέντρωση ροδαμίνης σε κάθε βίντεο της βαθμονόμησης.....	19
Πίνακας 4.1 Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειραμάτων με τη μέθοδο Shadowgraph .....	27
Πίνακας 4.2 Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειραμάτων με τη μέθοδο του PLIF.....	28
Πίνακας 4.3 Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00195.....	30
Πίνακας 4.4 Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00263.....	30
Πίνακας 4.3 Συντεταγμένες κανάβων.....	33

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετώνται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και η μέση αραίωση κατακόρυφης ανωστικής φλέβας αρνητικής άνωσης που εκρέει σε ακίνητο και ομογενή αποδέκτη. Το υπό μελέτη πρόβλημα προσομοιώνει τη διάθεση των υγρών αποβλήτων από μονάδες αφαλάτωσης στη θάλασσα. Τα υγρά αυτά απόβλητα ή αλλιώς αλμόλοιπο διαθέτουν πολύ μεγαλύτερη αλατότητα από αυτή του θαλασσινού νερού και διατίθενται στον θαλάσσιο αποδέκτη μέσω των διαχυτήρων. Για τον λόγο αυτό επιδιώκεται η μέγιστη δυνατή αραίωση του διαλύματος.

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής πραγματοποιήθηκε πειραματική διερεύνηση ροής ρευστού που εκρέει κατακόρυφα με φορά προς τα επάνω σε αποδέκτη μικρότερης πυκνότητας. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 54 πειράματα εκ των οποίων τα 28 μελετήθηκαν με την τεχνική Shadowgraph και 26 με την τεχνική PLIF (Planar Laser Induced Fluorescence). Τα πειράματα διεξήχθησαν σε δεξαμενή με διαστάσεις 1.00m X 0.80m και βάθος 0.70m, ενώ η παροχέτευση της φλέβας έγινε κατακόρυφα από κυκλικό στόμιο διαμέτρου 0.5 cm. Όλα τα πειράματα βιντεοσκοπήθηκαν με χρήση ψηφιακής βιντεοκάμερας.

Κατά τη διάχυση μιας τυρβώδους ανωστικής φλέβας αρνητικής άνωσης μέσα σε ομογενή και ακίνητο αποδέκτη, το μέγιστο ύψος στο οποίο θα αναρριχηθεί η φλέβα εξαρτάται από τις αρχικές συνθήκες στην έξοδο. Αρχικά η φλέβα «αναρριχάται» μέχρι το μέγιστο ύψος  $Z_{max}$ , όπου η αρχική ορμή  $M$  μηδενίζεται, εξαιτίας της αρνητικής ανωστικής δύναμης που επιδρά στη ροή. Στη συνέχεια, η φλέβα αρχίζει να «αναδιπλώνεται» και το ύψος της μειώνεται σημαντικά. Μάλιστα, λόγω της αντίθετης ροής, η ροή της φλέβας επιβραδύνεται αλλά συνεχίζει να κινείται ανοδικά. Σε σύντομο χρονικό διάστημα, ωστόσο, η φλέβα ταλαντώνεται γύρω από μια συγκεκριμένη θέση,  $Z < Z_{max}$  και σταθεροποιείται σε αυτή. Η θέση αυτή στην οποία σταθεροποιείται η ροή, ονομάζεται τερματικό ύψος  $Z$ .

Μέσα από την επεξεργασία του ψηφιακού υλικού μελετώνται το μέγιστο ύψος  $Z_{max}$ , το τερματικό ύψος  $Z$  και η μέση αραίωση κατά μήκος τους άξονα της φλέβας  $S_c$ . Το μέγιστο και το τερματικό ύψος εξετάζονται από το σύνολο των πειραμάτων, παρόλο που εφαρμόστηκαν δύο διαφορετικές μέθοδοι. Πιο συγκεκριμένα, καταστρώθηκε κώδικας και με χρήση του λογισμικού Matlab υπολογίστηκε σε κάθε στιγμιότυπο το τερματικό ύψος  $Z(t)$  στο οποίο ανέρχεται η φλέβα. Με τον τρόπο αυτό περιγράφεται όλη η κίνηση του ρευστού συναρτήσει του χρόνου.

Στη περίπτωση της μεθόδου Shadowgraph η οπίσθια όψη της δεξαμενής, όπου είναι χαραγμένος κάναβος 5 cm X 5 cm προβάλλεται με χρήση προβολέα στην εμπρόσθια όψη της δεξαμενής. Η φλέβα ωστόσο βρίσκεται στο κέντρο της δεξαμενής. Για τον λόγο αυτό δημιουργείται ένας νέος μέσος κάναβος, απ' όπου και μετριέται το τερματικό ύψος  $Z$ .

Στην περίπτωση των πειραμάτων που διεξήχθησαν με την τεχνική PLIF δεν είναι ορατοί οι δύο κάναβοι συνεπώς για τη μέτρηση του μέγιστου ύψους και την αντιστοίχισή του από pixels που προκύπτει από τον κώδικα σε πραγματικά cm μετρήθηκε το πάχος του στομίου της φλέβας.



Συνεπώς, από την επεξεργασία του συνόλου των πειραμάτων δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα του τερματικού ύψους  $Z$  συναρτήσει του χρόνου. Στη συνέχεια δημιουργούνται ακόμη τα διαγράμματα των αδιάστατων υψών  $Z_{max}/l_M$  και  $Z/l_M$  συναρτήσει του αριθμού Froude  $F_0$ , καθώς και το διάγραμμα του αδιάστατου χρόνου όπου εμφανίζεται το μέγιστο ύψος συναρτήσει του αριθμού  $F_0$ . Από τη διαδικασία αυτή διαπιστώθηκε ότι τερματικό ύψος κυμαίνεται από  $1.7 l_M$  έως  $2 l_M$ , ενώ το μέγιστο ύψος  $Z_{max}$  εμφανίζεται σχεδόν σε απόσταση  $3 l_M$ .

Όσον αφορά τα διαγράμματα που διεξήχθησαν με τεχνική PLIF (Planar Laser Induced Fluorescence) γίνεται ξανά επεξεργασία του ψηφιακού υλικού με χρήση του λογισμικού Matlab από όπου εξάγεται η μέση εικόνα και η τυπική απόκλιση αυτής. Σύμφωνα με την τεχνική αυτή, η ένταση του χρώματος της ροδαμίνης όταν από αυτή διέρχεται μια ακτίνα laser είναι ανάλογη της έντασης της ακτίνας και της συγκέντρωσης της ροδαμίνης. Με την τεχνική αυτή σε συνδυασμό με τις τεχνικές της επεξεργασίας εικόνας μέσω του Matlab μπορούν να εξάγονται αποτελέσματα για το σύνολο της εικόνας της δεξαμενής.

Πιο συγκεκριμένα, υπολογίζονται με χρήση του λογισμικού Matlab η μέση εικόνα και η τυπική της απόκλιση. Από τη μέση εικόνα δημιουργούνται, τα διαγράμματα της αδιάστατης μέσης συγκέντρωσης  $C/C_m$  και της έντασης της τύρβης  $C_{rms}/C_m$  συναρτήσει της αδιάστατης απόστασης  $r/z$ , καθ' ύψος της φλέβας ανά 5 διαμέτρους από το ακροφύσιο. Στη συνέχεια υπολογίζονται τα διαγράμματα της αδιάστατης μέσης συγκέντρωσης  $C/C_m$  και έντασης της τύρβης  $C_{rms}/C_m$  για διάφορες αποστάσεις  $0.5 l_M, 0.75 l_M, 1 l_M, 1.25 l_M, 1.5 l_M$  και  $1.75 l_M$  συναρτήσει της αδιάστατης απόστασης  $r/z$ . Από τα διαγράμματα αυτά γίνεται αντιληπτό ότι το εύρος των κατανομών είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό που μετρήθηκε σε φλέβες θετικής άνωσης. Επίσης, όσο απομακρυνόμαστε από το στόμιο της φλέβας, καθώς η ροή μετατρέπεται σε πλούμιο, οι κορυφές που παρουσιάζονται στο διάγραμμα της έντασης της τύρβης ενώνονται και συγχρόνως η τιμή της αυξάνεται.

Με τη μέθοδο αυτή ακόμη, γίνεται εφικτός ο υπολογισμός της αδιάστατης μέσης συγκέντρωσης  $C/C_0$  και της έντασης της τύρβης  $C_{rms}/C_m$  κατά μήκος του άξονα της φλέβας και συγκρίνονται με τις αντίστοιχες καμπύλες που προέκυψαν μετά τον υπολογισμό των χρονικά μέσων τιμών.

Τέλος, δημιουργείται το διάγραμμα της μέσης αδιάστατης αραίωσης  $S_d l_0/z$  κατά μήκος του άξονα της φλέβας συναρτήσει της αδιάστατης απόστασης  $z/l_M$ . Από το διάγραμμα αυτό γίνεται προκύπτει ότι η μέση αραίωση στον άξονα κυμαίνεται από 0.115 έως 0.215. Τα αποτελέσματα προσεγγίζουν ικανοποιητικά αντίστοιχα αποτελέσματα που προέκυψαν έπειτα από μετρήσεις σε θερμαινόμενες φλέβες αρνητικής άνωσης από τους Spetsiotsis & Papanicolaou (2008).

# CONCENTRATION MEASUREMENTS IN A VERTICAL, CIRCULAR, NEGATIVELY BUOYANT JET USING PLIF TECHNIQUE

## EXTENDED ABSTRACT

When desalination wastewater is disposed in the sea it may have environmental effect on the fauna and flora of the disposal area, due to the increase of salinity at the bottom of the sea. For this reason, achievement of the maximum dilution of the brine from desalination units with seawater has been of paramount importance in order to diminish the environmental effects. The dilution can be accomplished by means of turbulent buoyant jets, as they entrain large volumes of ambient fluid and mix it with the wastewater. The desalination brines are disposed through diffusers placed at the sea bottom. The heavier than ambient brine moves upwards towards the free surface of the sea, and mixes with sea water to produce negatively buoyant jets, which are also called fountains.

The study of turbulent, negatively buoyant jets has been a subject of investigation by several researchers in the past. Turner in (1966) was the first to describe the motion of fountains, and showed that there is a crucial difference between jets and plumes and the way the upward motion is generated. The properties of a vertical dense jet moving upwards in a calm uniform ambient are governed by the initial specific momentum and buoyancy. Experiments have been conducted afterwards by several investigators such as Abraham (1967) for the computation of maximum penetration depth. Baines, Turner and Cambell (1989) investigated a jet which was inclined by  $7^\circ$  and found that the dilution increased by 40%. Fountain penetration depth measurements were also reported by Zhang and Badour (1998), Pantzlauff and Lueptow(1999), concerning the dimensionless height  $Z_{\max}/l_M$  and the dimensionless time  $tB/M$ . The dimensionless maximum penetration depth  $Z_{\max}/l_M$  and (steady state) terminal depth  $Z/l_M$  of a vertical fountain were found to be 3 and 2 respectively in the experimental investigation by Kokkalis and Papanicolaou (2008). Spetsiotis and Papanicolaou (2008) investigated experimentally the properties of turbulence and dilution of heated round turbulence vertical negatively buoyant jets, that discharged downwards into a calm, homogenous ambient. The normalized dilution at the jet axis was found to be between 0.15 and 0.17, when the dimensionless steady state penetration depth  $Z/l_M > 1$ . Experimental measurements of both maximum height and dilution at the jet axis have also been conducted by Papakonstantis (2009). Some experiments have also been performed with LIF technique (Laser Induced Fluorescence) and present results concerning the concentration distribution of the flow field.

In the present thesis, the maximum and terminal (steady state) height of vertical, turbulent, negatively buoyant jets and the dilution at the jet flowfield have been investigated experimentally. Visualization of the flow for the study of the geometrical characteristics has been performed with two techniques, the Shadowgraph and PLIF (Planar Laser Induced Fluorescence) technique, whereas the study of dilution was carried out using PLIF.

A jet of a dense saltwater fluid is injected upwards, into a homogenous, calm ambient of lower density. At the early stages of the flow, the jet mixes with the lighter fluid of the ambient and reaches a maximum height  $Z_{\max}$ . Then the jet folds back and oscillates around a lower height  $Z < Z_{\max}$ , which is called steady-state, terminal rise height  $Z$ .

Both the maximum height  $Z_{\max}$  and the terminal, steady-state height  $Z$ , depend on initial parameters that characterize the flow:

$$Z = f(Q, M, B) \quad (1)$$

Where

$Q$ : is the specific mass flux (source volume flux)

$M$ : is the specific momentum flux

$B$ : is the specific buoyancy flux

These parameters can be computed as follows:

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

$$M = Q W \quad (3)$$

$$B = \left( \frac{\rho_a - \rho_0}{\rho_0} g \right) Q = g'_0 Q \quad (4)$$

where  $g$  is the gravitational acceleration,  $\rho_a$  and  $\rho_0$  are the ambient and jet fluid densities respectively.

Fisher et al.(1979) have proposed two length scales:

$$l_Q = \frac{Q}{\sqrt{M}} \quad (5)$$

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

The ratio  $l_Q/l_M$  is defined to be the initial buoyant jet Richardson number  $R_0$ :

$$Ri_0 = \frac{l_Q}{l_M} = \frac{Q B^{1/2}}{M^{5/4}} = \left( \frac{\pi}{4} \right)^{1/4} \frac{1}{F_0} \quad (7)$$

Where  $F_0 = U_0 / (g_0' D)^{1/2}$  is the densimetric Froude number.

From equations (1), (5), (6) and (7) the dimensionless maximum height is a function of the initial Richardson number  $R_0$

$$\frac{z}{l_Q} = f(R_0) \text{ or } \frac{z}{l_M} = f(R_0) \quad (8)$$

In case the initial specific momentum is larger than the buoyancy  $B$ , the volumetric discharge can be ignored and the former equation becomes:

$$\frac{z}{l_M} = C \quad (9)$$

Where  $C$  is a constant, that doesn't depend on Richardson number  $R_0$ .

The same dimensionless arguments can be applied on the maximum height  $Z_{max}$

$$\frac{z_{max}}{l_Q} = f(R_0) \text{ or } \frac{z_{max}}{l_M} = f(R_0) \quad (10)$$

In case of a jet-like flow the initial specific discharge,  $Q$  can be neglected and the ratio  $Z_{max}/l_M$  is also a constant.

The dilution  $S$  at a vertical distance  $z$  from the nozzle is defined by the ratio:

$$S = \frac{C_0 - C_a}{C - C_a} \quad (11)$$

where  $C_0$ : is the concentration of the salt of the jet

$C_a$ : is the concentration of the salt of the ambient

The dilution at the jet axis  $S_C = C_0/C_c$  is normalized as

$$\frac{S_C l_Q}{z} = \frac{C_0 - C_a}{C_C - C_a} \frac{Q}{z\sqrt{M}} \text{ or } \frac{S_C}{F_0} = \frac{C_0 - C_a}{C_C - C_a} \frac{1}{F_0} \quad (12)$$

In the present thesis, the maximum height of turbulent negatively buoyant jets and dilution are investigated experimentally with Shadowgraph and PLIF (Planar Induced Fluorescence) techniques. Experiments were carried out in a 1.00 m X 0.80 m X 0.70 m tank filled with tap water. Jets of dense saltwater were discharged vertically upwards from a round nozzle of 0.5 cm diameter. The fountain was made visible with two different techniques: the shadowgraph and the PLIF (Planar Laser Induced Fluorescence) technique. Both techniques were used for the measurement of the maximum and the terminal steady state height. The PLIF technique was also used for the measurement of concentration of a rhodamine 6G dye. The initial conditions of the two sets of experiments are presented in tables 1 and 2 respectively.

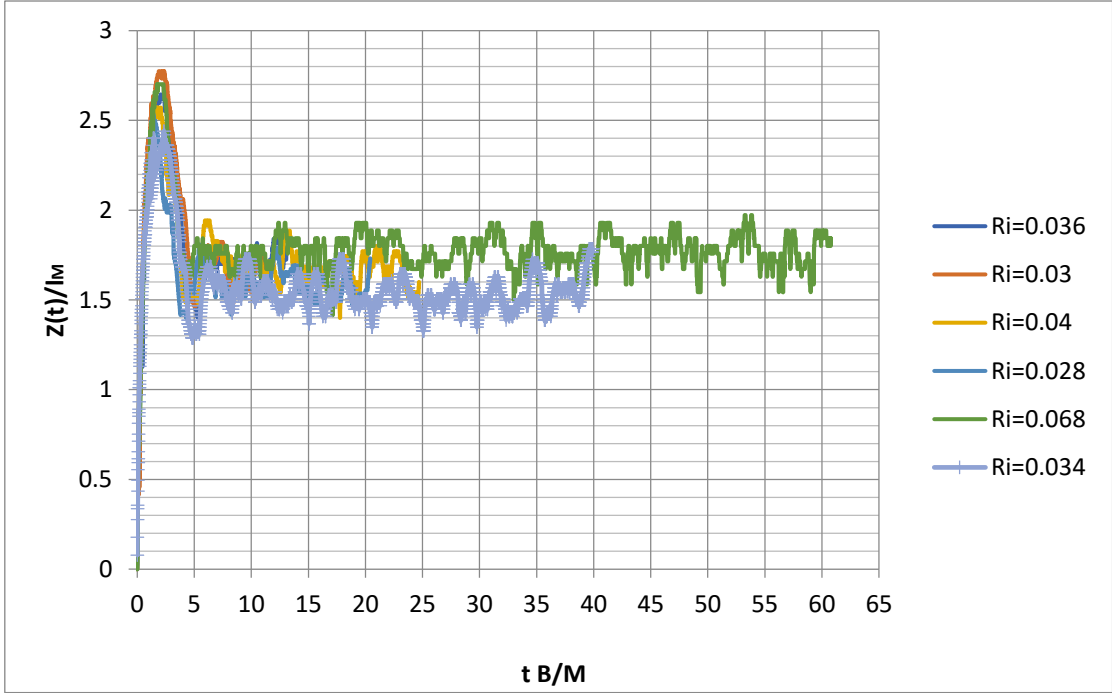
**Table 1.** Initial Conditions for the first set of experiments conducted with the shadowgraph technique

EXPERIMENTS	d (cm)	Q' (cm <sup>3</sup> /s)	W (cm/s)	$\rho_a$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_0$ (kg/m <sup>3</sup> )	IQ	IM	Fr	Z/l <sub>M</sub>	Z <sub>max</sub> /l <sub>M</sub>
31/10/2017- EXP193	0.5	9.24	47.07	998.73	1014.48	0.44	8.03	17.06	1.80	3.22
31/10/2017- EXP195	0.5	14.85	75.63	998.57	1014.48	0.44	12.84	27.27	2.21	2.91
31/10/2017- EXP196	0.5	17.65	89.91	998.82	1014.48	0.44	15.38	32.68	2.05	3.02
31/10/2017- EXP197	0.5	20.46	104.19	998.89	1014.48	0.44	17.87	37.96	2.08	-
3/11/2017- EXP199	0.5	14.85	75.63	998.77	1023.80	0.44	10.28	21.84	2.46	2.90
3/11/2017- EXP200	0.5	17.65	89.91	998.77	1023.80	0.44	12.22	25.97	2.06	2.61
22/11/2017- EXP201	0.5	9.24	47.07	999.27	1021.95	0.44	6.72	14.27	1.82	3.22
22/11/2017- EXP204	0.5	14.85	75.63	999.36	1021.95	0.44	10.81	22.97	1.72	2.61
23/11/2017- EXP205	0.5	9.24	47.07	999.17	1013.62	0.44	8.38	17.80	1.54	2.58
23/11/2017- EXP206	0.5	14.85	75.63	999.19	1013.62	0.44	13.47	28.62	1.98	2.61
23/11/2017- EXP207	0.5	20.46	104.19	999.26	1013.62	0.44	18.61	39.53	1.68	2.63
12/12/2017- EXP215	0.5	9.24	47.07	999.27	1013.89	0.44	8.33	17.70	1.82	2.97
12/12/2017- EXP216	0.5	12.05	61.35	999.32	1013.89	0.44	10.88	23.11	2.24	3.11
12/12/2017- EXP217	0.5	14.85	75.63	999.41	1013.89	0.44	13.45	28.58	1.82	2.52
12/12/2017- EXP218	0.5	17.65	89.91	999.41	1013.89	0.44	15.99	33.97	1.71	2.75
13/12/2017- EXP219	0.5	9.24	47.07	999.17	1026.42	0.44	6.14	13.04	1.94	3.15
13/12/2017- EXP220	0.5	12.05	61.35	999.19	1026.42	0.44	8.01	17.01	1.85	2.89
13/12/2017- EXP221	0.5	14.85	75.63	999.28	1026.42	0.44	9.88	21.00	1.83	2.79
13/12/2017- EXP222	0.5	17.65	89.91	999.35	1026.42	0.44	11.77	25.00	1.83	2.91
15/12/2017- EXP223	0.5	14.85	75.63	999.13	1024.89	0.44	10.14	21.55	1.83	2.82
15/12/2017- EXP224	0.5	17.65	89.91	999.24	1024.89	0.44	12.08	25.67	1.71	2.64
15/12/2017- EXP225	0.5	20.46	104.19	999.31	1024.89	0.44	14.02	29.79	1.69	2.77
15/12/2017- EXP226	0.5	23.26	118.47	999.40	1024.89	0.44	15.97	33.93	2.07	2.71
20/12/2017- EXP227	0.5	14.85	75.63	999.32	1026.11	0.44	9.95	21.14	1.85	2.89
20/12/2017- EXP228	0.5	17.65	89.91	999.41	1026.11	0.44	11.85	25.17	1.89	2.80
20/12/2017- EXP229	0.5	20.46	104.19	999.41	1026.11	0.44	13.73	29.17	1.82	2.77
20/12/2017- EXP230	0.5	23.26	118.47	999.49	1026.11	0.44	15.64	33.22	1.86	2.77
20/12/2017- EXP231	0.5	26.07	132.75	999.60	1026.11	0.44	17.56	37.30	1.73	2.71

**Table 2.** Initial Conditions for the second set of experiments with PLIF technique

EXPERIMENT	d (cm)	Q' (cm <sup>3</sup> /s)	W (cm/s)	$\rho_a$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_o$ (kg/m <sup>3</sup> )	C <sub>apob</sub> ( $\mu$ g/L)	C <sub>opob</sub> ( $\mu$ g/L)	I <sub>Q</sub>	I <sub>M</sub>	Fr	Z/I <sub>M</sub>	Z <sub>max</sub> /I <sub>M</sub>
22/5/2018-EXP263	0.5	14.85	75.63	998.0288	1019.103	0	37.5	0.44	11.18	23.76	1.69	2.57
22/5/2018-EXP265	0.5	20.46	104.19	998.0774	1019.103	0.09	37.5	0.44	15.43	32.78	1.61	2.58
22/5/2018-EXP267	0.5	26.07	132.75	998.1741	1019.103	0.24	37.5	0.44	19.71	41.87	1.66	-
18/7/2018-EXP268	0.5	12.75	64.92	996.8966	1020.612	1.785	37.5	0.44	9.06	19.24	3.35	-
18/7/2018-EXP269	0.5	16.25	82.77	996.8966	1020.612	1.855	37.5	0.44	11.55	24.53	1.81	2.70
18/7/2018-EXP270	0.5	23.26	118.47	997.0811	1020.612	2.055	37.5	0.44	16.60	35.26	2.01	2.64
19/7/2018-EXP272	0.5	10.36	52.78	996.7865	1028.053	1.785	42.85	0.44	6.44	13.67	1.78	2.70
19/7/2018-EXP273	0.5	14.85	75.63	996.8571	1028.053	1.87	42.85	0.44	9.23	19.61	1.68	2.63
19/7/2018-EXP275	0.5	20.46	104.19	996.9982	1028.053	1.99	42.85	0.44	12.75	27.09	1.54	2.36
19/7/2018-EXP277	0.5	26.07	132.75	997.2522	1028.053	2.19	42.85	0.44	16.32	34.66	1.79	2.79
19/7/2018-EXP279	0.5	31.67	161.31	997.5056	1028.053	2.44	42.85	0.44	19.91	42.31	1.94	-
23/7/2018-EXP280	0.5	7.84	39.93	996.6469	1014.817	0	37.5	0.44	6.35	13.48	1.76	-
23/7/2018-EXP281	0.5	12.05	61.35	996.7173	1014.817	0.03	37.5	0.44	9.77	20.76	1.72	3.54
23/7/2018-EXP283	0.5	14.85	75.63	996.7595	1014.817	0.126	37.5	0.44	12.06	25.62	1.69	2.89
23/7/2018-EXP285	0.5	17.65	89.91	996.999	1014.817	0.245	37.5	0.44	14.44	30.68	1.89	3.06
23/7/2018-EXP289	0.5	17.65	89.91	996.8582	1030.341	0	42.85	0.44	10.61	22.53	1.57	3.08
23/7/2018-EXP291	0.5	20.46	104.19	997.0693	1030.341	0.145	42.85	0.44	12.33	26.20	1.83	2.97
23/7/2018-EXP293	0.5	23.26	118.47	997.3506	1030.341	0.31	42.85	0.44	14.09	29.93	1.73	2.57
21/8/2018-EXP294	0.5	12.05	61.35	996.703	1024.728	1.785	42.85	0.44	7.89	16.76	1.75	3.08
21/8/2018-EXP295	0.5	13.45	68.49	996.7735	1024.728	1.85	42.85	0.44	8.82	18.73	1.77	2.87
21/8/2018-EXP296	0.5	13.45	68.49	996.844	1024.728	1.92	42.85	0.44	8.83	18.76	1.70	3.26
21/8/2018-EXP297	0.5	17.09	87.05	996.9145	1024.728	1.984	42.85	0.44	11.24	23.88	2.04	3.10
21/8/2018-EXP298	0.5	17.09	87.05	997.0554	1024.728	2.09	42.85	0.44	11.27	23.94	1.86	2.90
21/8/2018-EXP300	0.5	21.58	109.90	997.1258	1024.728	2.18	42.85	0.44	14.25	30.26	1.76	2.64
21/8/2018-EXP301	0.5	28.87	147.03	997.1258	1024.728	2.32	42.85	0.44	19.06	40.49	1.83	-

In the first set of experiments visualization of the flow was obtained using the shadowgraph technique. Two square grids with dimensions 5 cm X 5 cm were drawn on the two opposite sides of the tank. A slide projector illuminates the flow from the back side of the tank, and as a result the fountain is projected at the front grid. A new mid – grid is drawn upon which projection of the fountain provided the desired geometrical characteristics. The flow field was recorded via a digital image camera at a rate of 25 fps. The video was processed, and the height of the fountain was computed from every frame. As a result, the diagram of the normalized  $Z(t)$  is plotted against the dimensionless time  $tB/M$  in figure 1, for experiments with different initial Richardson numbers.



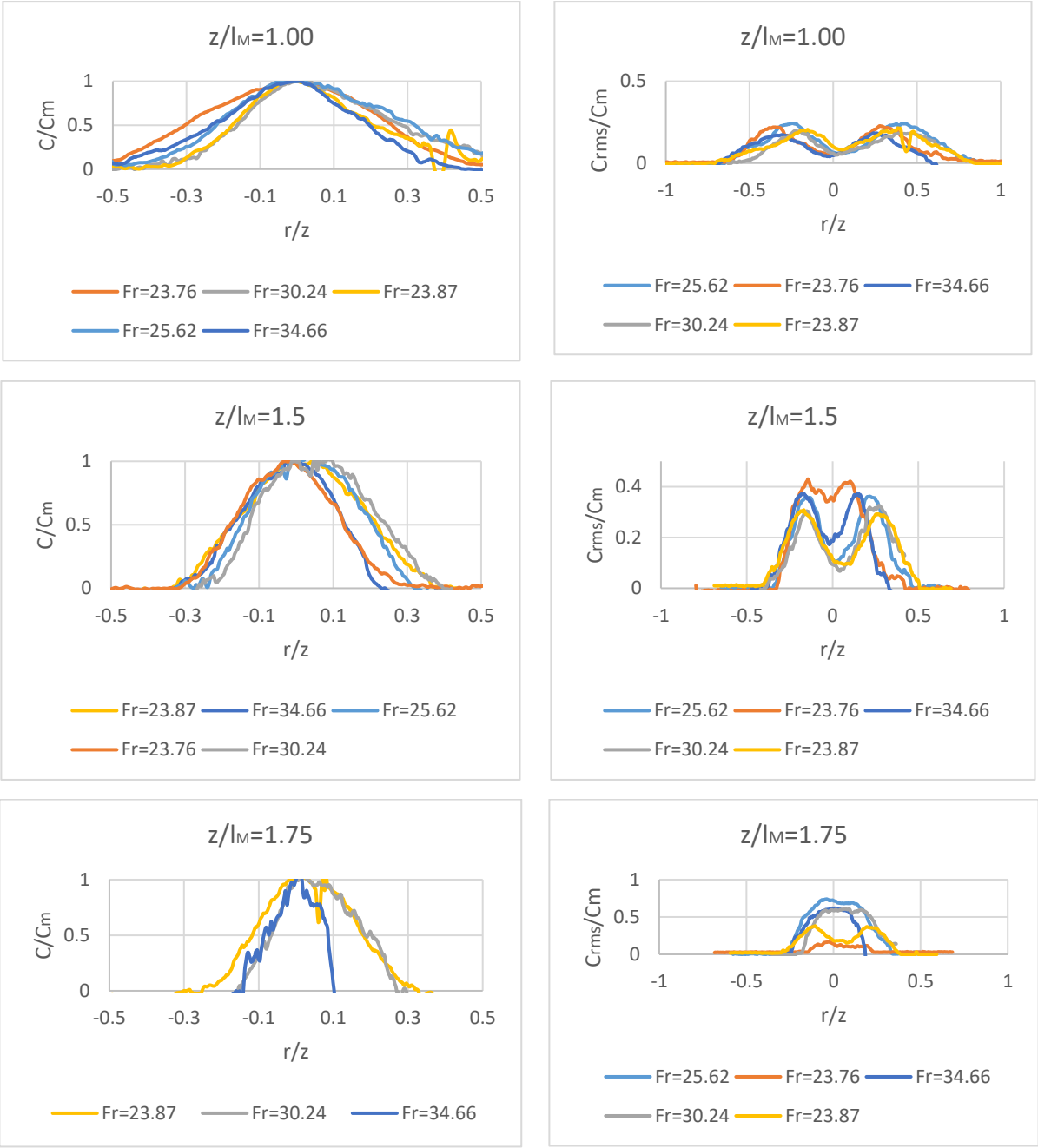
**Figure 1.** Evolution of the dimensionless height as a function of dimensionless time for various  $R_o$

As we can observe from figure 1, all jets reach a maximum height  $Z_{max}$ , then the height is reduced and oscillates around the terminal height  $Z$ . From the experiments it is evident that the terminal height varied from 1.70 to 2.00  $l_M$ . The maximum height was found to vary from 2.50 to 3.00  $l_M$ .

As far as the second set of experiments is concerned, PLIF technique was applied in order to measure the jet dilution. The saltwater of the jet contains a small amount of rodhamine 6G dye (R6G). In this case the flow field is illuminated with a thin green laser light sheet (at 532 nm wavelength). When the rodhamine dye is excited by this wavelength it emits light at 556 nm (yellow). The intensity of the last is a linear function of rodhamine concentration, if it does not exceed 50 ppb. The yellow light is split into three components red, green and blue (RGB). In order to avoid the contribution of the green laser light, the concentration of

rodhamine was determined only by the use of red light intensity. The experiments we recorded and the videos were converted into frames in order to compute the mean and the rms image. The computation was performed from the frames acquire after the flow reached steady state.

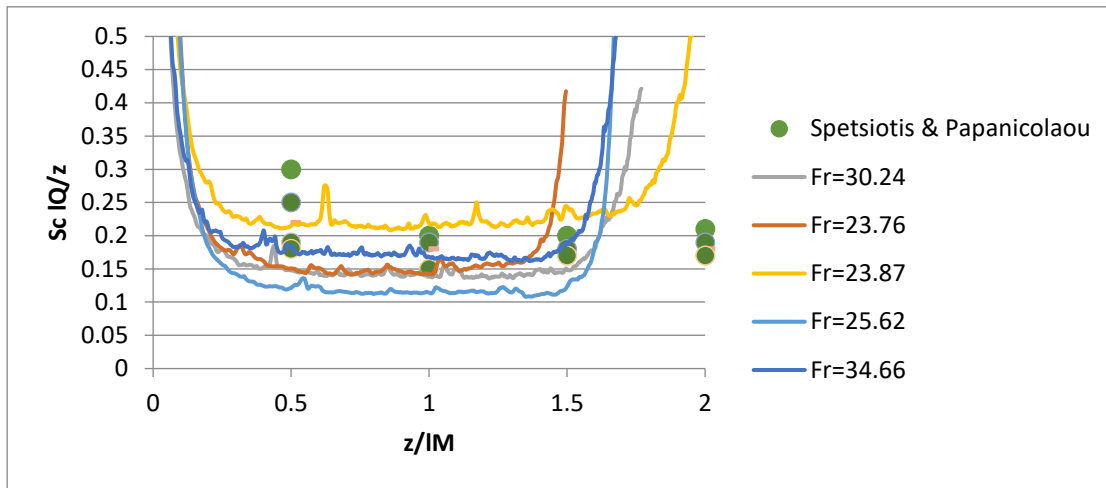
The normalized concentration profiles  $C/C_m$  and turbulence intensity  $C_{rms}/C_m$  are plotted against the dimensionless distance  $r/z$ ,  $r$  being the radial distance from the jet axis and  $z$  the elevation of measurement for three different dimensionless elevations  $z/l_M= 1.00, 1.50$  and  $1.75$ . As we can observe from figure 2 below, the turbulence intensity profiles are much wider than those reported in positively buoyant jets. We can also observe that the turbulence profile varies as the flow moves towards the terminal height  $Z$ .



**Figure 2.** Normalized concentration and turbulence intensity profiles at (a)  $z/l_M=1.00$  (top), (b)  $z/l_M=1.50$  (middle) and (c)  $z/l_M=1.750$  (bottom)



The dimensionless dilution at the jet axis is also computed and plotted against  $z/l_M$ . When  $z/l_M > 0.5$  the dimensionless mean dilution along the jet axis takes an average value of 0.1 to 0.2. These results compare well with experiments of Spetsiotis & Papanicolaou (2008) in round, vertical, heated, negatively buoyant jets.



**Figure 3.** Dimensionless mean dilution at the jet axis against  $z/l_M$

The study of maximum height, terminal height and dilution in turbulent buoyant jets has led us to the following conclusions.

As far as the maximum and terminal heights are concerned it was observed that the jet reaches a maximum height  $Z_{max}$  and then oscillates around the terminal height  $Z$ .

The terminal height  $Z$  and the maximum height  $Z_{max}$  varied between  $1.70l_M - 2.00l_M$  and  $2.70l_M - 3.00l_M$  respectively. The jet reaches the maximum height at dimensionless time 2.50. The results from both techniques Shadowgraph and PLIF compare well. However we consider that the PLIF technique gives more accurate results.

To study the dilution, the normalized mean  $C/C_m$  and turbulence intensity  $C_{rms}/C_m$  concentration profiles are plotted against the dimensionless distance  $r/z$ , for three different dimensionless elevations  $z/l_M = 1.00, 1.50$  and  $1.75$ .

The turbulence intensity profiles are much wider than those reported in positively buoyant jets. In addition the turbulence intensity grows as the jet reaches the terminal height. All profiles of both concentration and turbulence become less wide as the elevation increases.

The normalized dilution at the jet axis varied between 0.10 and 0.20 when  $z/l_M > 0.5$ . These values are quite similar to those reported by Spetsiotis & Papanicolaou (2008).

# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Το νερό αποτελεί έναν φυσικό πόρο με κυρίαρχη σημασία για τη ζωή και την ανάπτυξη. Παρόλο που το αγαθό αυτό φαίνεται να είναι σε αφθονία στον πλανήτη μας, καθώς καλύπτει τα 7/10 της επιφάνειας της γης, μόνο το 2,6% της συνολικής ποσότητας είναι γλυκό. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση λόγω της ραγδαίας αύξησης του παγκόσμιου πληθυσμού και της βιομηχανικής παραγωγής, θέτουν επιτακτική την ανάγκη για παραγωγή πόσιμου νερού.

Μια μέθοδος παραγωγής νερού, ιδανική για τις περιοχές με πρόσβαση σε αλμυρό ή υφάλμυρο νερό αποτελεί η αφαλάτωση. Ορισμένα παραδείγματα στον ελλαδικό χώρο αποτελούν πολλά νησιά όπως η Αμοργός, η Μήλος, η Κίμωλος και πολλά άλλα, δίνοντας λύση στο πρόβλημα της αυξανόμενης ζήτησης ή και της λειψυδρίας ιδιαίτερα κατά τους θερινούς μήνες. Κατά τη διαδικασία της αφαλάτωσης, το θαλασσινό νερό υφίσταται ειδική επεξεργασία, από την οποία παράγονται δύο προϊόντα: το πόσιμο νερό και το αλμόλοιπο (αλμυρό νερό με μεγάλο ποσοστό αλατιού), που αποτελεί το απόβλητο της διαδικασίας.

Το αλμόλοιπο ή αλλιώς άλμη αποτελεί ένα διάλυμα που διαθέτει διπλάσια αλατότητα από αυτή του θαλασσινού νερού με αποτέλεσμα να αποτελεί κίνδυνο για την ισορροπία του θαλάσσιου οικοσυστήματος. Για τον λόγο αυτό, είναι αναγκαίος ο βέλτιστος σχεδιασμός διάθεσης του αλμόλοιπου στον αποδέκτη (Μυλωνάκου 2018). Η διαδικασία αυτή γίνεται μέσω των διαχυτήρων, οι οποίοι τοποθετούνται στον πυθμένα του βυθού και διαθέτουν ειδικά στόμια, οπές ή σχισμές, από τα οποία εκρέει το διάλυμα του αλμόλοιπου υπό μορφή τυρβώδους φλέβας. Ως τυρβώδης ανωστική φλέβα ορίζεται η εκροή υγρού μέσα σε ένα μεγάλο όγκο ρευστού με διαφορετική πυκνότητα. Η συγκέντρωση μιας ουσίας που μεταφέρει η φλέβα μειώνεται καθώς αυτή αναμιγνύεται με το υγρό του αποδέκτη, εξαιτίας της συμπαράσυρσης. Ο μηχανισμός αυτός αποτελεί χαρακτηριστικό των ανωστικών τυρβωδών φλεβών και έχει σαν αποτέλεσμα την αραίωση του παροχτευόμενου ρευστού. (Παπακωνσταντής 2009).

## 1.2 Βασικοί ορισμοί

Οι τυρβώδεις εκτοξευόμενες φλέβες ανήκουν στην κατηγορία των ελεύθερων διατμητικών ροών και αποτελούν φλέβες ή δέσμες νερού από οπή, ακροφύσιο ή σχισμή που διαχέονται σε ομοειδές ή μη ρευστό. Ονομάζονται τυρβώδεις όταν στο πεδίο ροής της φλέβας υπάρχει χρονική διακύμανση της ταχύτητας και της συγκέντρωσης κάποιας ουσίας που μεταφέρει η εκτοξευόμενη φλέβα. Ανάλογα με τις ιδιότητες του αποδέκτη, οι τυρβώδεις φλέβες χαρακτηρίζονται ως απλές όταν διαχέονται σε ομοειδές ρευστό με την ίδια πυκνότητα, και σε ανωστικές όταν διαχέονται σε ομοειδές ρευστό με διαφορετική πυκνότητα. Η ρευστοδυναμική συμπεριφορά των εκτοξευόμενων φλεβών εξαρτώνται από τις εξής παραμέτρους:

α) Χαρακτηριστικά της φλέβας όπως η αρχική κατανομή της ταχύτητας, η ένταση της τύρβης, η ογκομετρική παροχή, η ορμή της φλέβας, η συγκέντρωση μεταφερόμενων ουσιών κλπ.

β) Παράμετροι του περιβάλλοντος ρευστού όπως η πυκνομετρική διαφορά μεταξύ της φλέβας και του αποδέκτη, η θερμική ή πυκνομετρική στρωμάτωση, η κίνηση στον αποδέκτη κλπ.

γ) Γεωμετρικές παράμετροι όπως ο προσανατολισμός (π.χ. κατακόρυφες ή υπό γωνία) και η μορφή των φλεβών (π.χ. κυκλικές ή από σχισμή), η αλληλεπίδραση με άλλες φλέβες καθώς και η επίδραση των ορίων του αποδέκτη.

Οι τυρβώδεις εκτοξευόμενες φλέβες μπορεί να απαντηθούν στη φύση όπως στην περίπτωση των υποθαλάσσιων φλεβών του βυθού (black smokers) ή των φλεβών που δημιουργούνται λόγω έκρηξης ηφαιστείων. Στην περίπτωση αυτή ονομάζονται φυσικές. Ορισμένες φορές, όμως, η δημιουργία τους μπορεί να οφείλεται στην ανθρώπινη δραστηριότητα, όπως συμβαίνει με τις φλέβες καπνού από καμινάδες ή από πυρκαγιές, ή και φλέβες από διαχυτήρες διάθεσης αποβλήτων από μονάδες επεξεργασίας λυμάτων κλπ. Στην περίπτωση που είναι αποτέλεσμα ανθρώπινης δραστηριότητας είναι τεχνητές.

Οι φλέβες ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους αλλά και με τις ιδιότητες του αποδέκτη διακρίνονται σε απλές φλέβες, πλούμια και ανωστικές φλέβες.

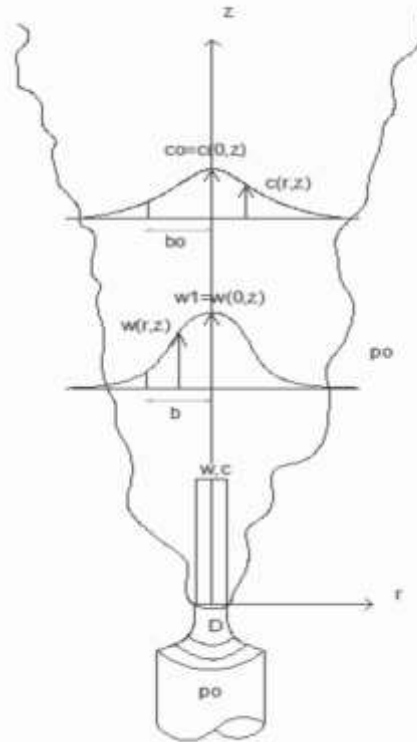
Σαν απλή εκτοξευόμενη φλέβα (Jet) χαρακτηρίζεται η παροχή ρευστού από οπή ή σχισμή, με πυκνότητα ίδια με αυτή του περιβάλλοντος ρευστού. Η απλή φλέβα διαθέτει μόνο αρχική ορμή και συνεπώς η ροή κυριαρχείται από αυτή.

Η απλή ανωστική φλέβα ή αλλιώς πλούμιο (Plume), δεν διαθέτει αρχική ορμή αλλά προκαλείται από θετική ή αρνητική ανωστική δύναμη, η οποία δημιουργείται λόγω της πυκνομετρικής διαφοράς μεταξύ της φλέβας και του αποδέκτη.

Στη φύση συνήθως μια φλέβα αποτελεί συνδυασμό απλής φλέβας και πλουμίου, διαθέτοντας αρχική ορμή και αρχική άνωση. Στη περίπτωση αυτή ονομάζεται ανωστική φλέβα (Buoyant Jet). Αν η αρχική ορμή είναι επικρατέστερη, τότε η φλέβα συμπεριφέρεται σαν απλή φλέβα και στη συνέχεια σε κάποια απόσταση από την πηγή μετατρέπεται σε πλούμιο, αφού επικρατέστερη είναι πλέον η ανωστική δύναμη. (Παπανικολάου 2016)

Η ανωστική αυτή δύναμη μπορεί να είναι είτε ομόρροπη με την κίνηση της φλέβας και στην περίπτωση αυτή η φλέβα να ονομάζεται ανωστική φλέβα θετικής άνωσης, είτε αντίρροπη με την κίνηση και η φλέβα να ονομάζεται ανωστική φλέβα αρνητικής άνωσης (fountain). Οι κατακόρυφες φλέβες αρνητικής άνωσης μπορούν να δημιουργηθούν είτε εισάγοντας ρευστό μεγαλύτερης πυκνότητας σε ελαφρύτερο αποδέκτη με κατεύθυνση από κάτω προς τα πάνω,

είτε εισάγοντας ρευστό μικρότερης πυκνότητας σε βαρύτερο αποδέκτη με αντίθετη όμως κατεύθυνση. Αυτή η κατηγορία των φλεβών παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς συμπεριφέρονται άλλοτε ως απλές φλέβες και στην κατάσταση αυτή κυριαρχεί η ορμή και άλλοτε ως πλούμια, όπου κυρίαρχη στη ροή είναι η άνωση, ενώ στη μεταβατική κατάσταση συνυπάρχουν και οι δύο καταστάσεις.



**Σχήμα 1.1** Τυρβώδης διάχυση απλής φλέβας (Παπανικολάου 2016)

Έστω η κυκλική ανωστική φλέβα του σχήματος 1.1, που εκρέει κατακόρυφα προς τα επάνω από στόμιο κυκλικής διατομής διαμέτρου  $D$ , με πυκνότητα  $\rho_a$  και ταχύτητα  $W$ , σε ομογενή, ήρεμο αποδέκτη πυκνότητας  $\rho_a$ , όπου  $\rho_a > \rho_a$ . Η αρχική ογκομετρική παροχή της φλέβας  $Q$  με διαστάσεις  $[L^3 T^{-1}]$  δίνεται από τη σχέση:

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} W \quad (1.1)$$

όπου  $W$ : είναι η μέση ταχύτητα εξόδου με διαστάσεις  $[L T^{-1}]$

Η ειδική ορμή  $M$  ανά μονάδα μάζας ρεόντος ρευστού (specific momentum flux) είναι:

$$M = Q W \quad (1.2)$$

και έχει διαστάσεις  $[L^4 T^{-2}]$

Η ειδική άνωση  $B$  (specific buoyancy flux) στην πηγή, με διαστάσεις  $[L^4 T^{-3}]$ , δίνεται από την σχέση:

$$B = \frac{\rho_a - \rho_0}{\rho_0} g Q = g'_0 Q \quad (1.3)$$

όπου  $g$ : είναι επιτάχυνση της βαρύτητας με διαστάσεις  $[L T^{-2}]$  και  $g'_0$  είναι η φαινόμενη επιτάχυνση της βαρύτητας, η οποία ισούται με  $\frac{\rho_a - \rho_0}{\rho_0} g$ .

Τα παραπάνω μεγέθη σε απόσταση  $z$  από το ακροφύσιο όπου η ροή είναι πλήρως ανεπτυγμένη, υπολογίζονται ως εξής:

Η ογκομετρική παροχή που διέρχεται από μια διατομή  $A$  της φλέβας στη μονάδα του χρόνου προκύπτει ως

$$\mu(z) = \int_A w(r, z) dA \quad (1.4)$$

Αντίστοιχα, η ειδική ορμή του ρευστού  $m(z)$  και η ειδική άνωση  $\beta(z)$  προκύπτουν από τις σχέσεις:

$$m(z) = \int_A w^2(r, z) dA \quad (1.5)$$

$$\beta(z) = \int_A g \frac{\Delta\rho(r, z)}{\rho_0} w(r, z) dA \quad (1.6)$$

Όπου  $w(r, z)$  και  $\Delta\rho(r, z)$  είναι οι κατανομές της μέσης ταχύτητας και πυκνομετρικής διαφοράς με το περιβάλλον ρευστό της φλέβας, Γκαουσιανής μορφής

$$w(r, z) = w_c(z) \exp\left(-\frac{r^2}{b_w^2}\right) \text{ και } \Delta\rho(r, z) = \Delta\rho_c(z) \exp\left(-\frac{r^2}{b_c^2}\right) \quad (1.7)$$

Ένα πολύ σημαντικό μέγεθος των ανωστικών φλεβών αποτελεί η αραίωση  $S$ . Ως μέση αραίωση  $S_{ave}$  ορίζεται ο λόγος της συνολικής παροχής της φλέβας  $Q$  ως προς την αρχική παροχή  $Q_0$  (Παπακωνσταντής 2009):

$$S_{ave} = \frac{Q}{Q_0} \quad (1.8)$$

Εναλλακτικά, η αραίωση σε μία θέση της φλέβας μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει είτε της πυκνότητας  $\rho$ , είτε της αδιάστατης φαινόμενης βαρύτητας  $g_0'/g$  ως εξής (Roberts et al. 1997):

$$S = \frac{g_0'}{g} = \frac{\rho_\alpha - \rho_0}{\rho_\alpha - \rho} \quad (1.9)$$

Η αραίωση σε κάποιο σημείο του πεδίου ροής της φλέβας μπορεί να εκφραστεί και μέσω της συγκέντρωσης του δείκτη:

$$S = \frac{C_0 - C_\alpha}{C - C_\alpha} \quad (1.10)$$

όπου  $C_\alpha$ : είναι η συγκέντρωση του αποδέκτη,  $C_0$  είναι η συγκέντρωση της φλέβας στο σημείο εκροής και  $C$  είναι η συγκέντρωση της φλέβας στην θέση όπου υπολογίζεται η αραίωση. Σημειώνεται ότι συνήθως λαμβάνονται μέσες χρονικά τιμές συγκέντρωσης με αποτέλεσμα η αραίωση που υπολογίζεται να είναι μέση χρονικά αραίωση (Παπακωνσταντής 2009).

Σημαντικό ενδιαφέρον παρουσιάζει ο υπολογισμός της ελάχιστης αραίωσης  $S_c$ , δηλαδή η αραίωση κατά μήκος του άξονα της φλέβας, η οποία είναι ίση με:

$$S_c = \frac{g_0'}{g_c'} = \frac{\rho_\alpha - \rho_0}{\rho_c - \rho_\alpha} = \frac{C_0 - C_\alpha}{C_c - C_\alpha} \quad (1.11)$$

### 1.3 Χαρακτηριστικές κλίμακες μήκους

Με βάση τα αρχικά χαρακτηριστικά μιας απλής φλέβας, την ορμή  $M$  και την παροχή  $Q$ , ορίζεται μια χαρακτηριστική κλίμακα μήκους (Fischer et al, 1979):

$$l_Q = \frac{Q}{\sqrt{M}} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{\frac{1}{2}} D = \sqrt{A} \quad (1.12)$$

Στην περίπτωση μιας ανωστικής φλέβας ορίζεται μια ακόμη κλίμακα μήκους που λαμβάνει υπόψιν τις αρχικές παραμέτρους  $M$  και  $B$ :

$$l_M = \frac{M^{3/4}}{B^{1/2}} \quad (1.13)$$

Όλα τα στοιχεία που αφορούν στη φλέβα μπορούν να εκφραστούν μέσω των χαρακτηριστικών κλιμάκων μήκους. Ανάλογα με την κατακόρυφη απόσταση  $z$  από το στόμιο και την κλίμακα μήκους  $l_M$  διακρίνονται οι εξής περιοχές στο πεδίο ροής της φλέβας:

α) Εάν  $z/l_M < 1$ , η ροή συμπεριφέρεται σαν απλή φλέβα (jet).

β) Εάν  $z/l_M > 5$ , η ροή συμπεριφέρεται σαν πλούμιο (plume).

γ) Εάν  $1 < z/l_M < 5$ , η ροή συμπεριφέρεται σαν ανωστική φλέβα (buoyant jet).

Ο λόγος των δύο παραπάνω μηκών ονομάζεται αρχικός αριθμός Richardson  $R_0$ , εκφράζει το λόγο των αδρανειακών προς τις ανωστικές δυνάμεις και δίνεται από τη σχέση:

$$R_0 = \frac{l_Q}{l_M} = \frac{Q B^{1/2}}{M^{5/4}} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{1/4} \frac{1}{F_0} \quad (1.14)$$

Όπου  $F_0$ : ο πυκνομετρικός αριθμός Froude και είναι ίσος με:

$$F_0 = \frac{W}{\sqrt{\frac{(\Delta\rho)_0}{\rho_0} g D}} \quad (1.15)$$

Όπου  $W$  είναι η αρχική ταχύτητα εξόδου, δηλαδή η ταχύτητα της φλέβας στο στόμιο διαμέτρου  $D$ .

Σε απόσταση  $z$  από την πηγή ο τοπικός αριθμός Richardson  $R_0$  προκύπτει μέσα από τις αντίστοιχες παραμέτρους  $\mu(z)$ ,  $m(z)$  και  $\beta(z)$ :

$$R_0(z) = \frac{\mu \beta^{1/2}}{m^{5/4}} \quad (1.16)$$

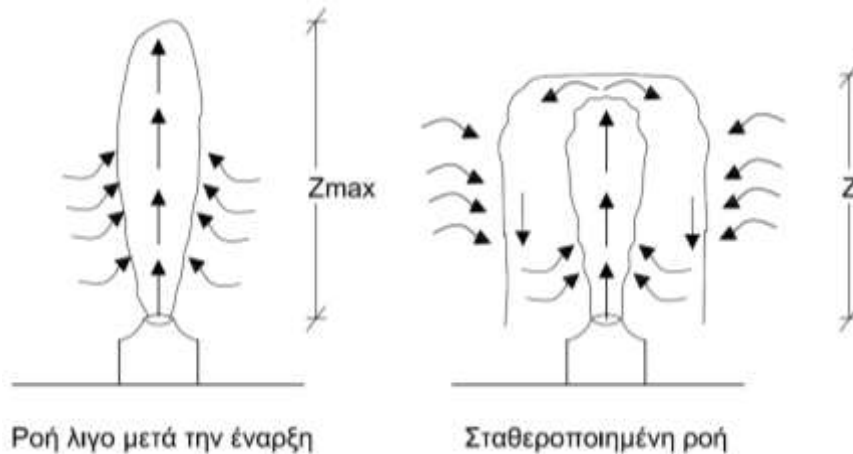
Στην περίπτωση της απλής φλέβας, όπου δηλαδή  $z/l_M < 1$  οι Papanicolaou & List (1988) απέδειξαν ότι  $R_0(z) \sim z$ , ενώ στην περίπτωση του πλουμίου υπολόγισαν  $R_0(z) = R_p = 0,63$ .

#### 1.4 Τυρβώδης φλέβα αρνητικής άνωσης – Μηχανισμός Fountain

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα ο μηχανισμός ανάμιξης των τυρβωδών φλεβών είναι πολύ σημαντικός για την επίτευξη της μέγιστης δυνατής αραίωσης των ουσιών που περιέχονται σε αυτές. Όσο μεγαλύτερη τροχιά διανύσει η φλέβα, τόσο μεγαλύτερο όγκο ρευστού από τον αποδέκτη συμπαρασύρει. Οι κατακόρυφες φλέβες έχουν μικρότερη τροχιά σε σχέση με τις φλέβες που εκβάλλουν υπό γωνία. Επί πλέον δε, εάν η κατακόρυφη φλέβα έχει αρνητική άνωση, μετά την εξέλιξη της ροής θα επιστρέψει με καθοδική πορεία πάνω στο ίδιο πεδίο ροής της. Παρ' όλα αυτά η κατακόρυφη φλέβα παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω της αστάθειας της ροής, που τελικά ξεφεύγει από την κατακόρυφο (ασταθής ισορροπία).

Κατά τη διάχυση μιας κατακόρυφης τυρβώδους ανωστικής φλέβας αρνητικής άνωσης μέσα σε ομογενή και ακίνητο αποδέκτη, το μέγιστο ύψος στο οποίο θα αναρριχηθεί εξαρτάται τόσο από τις αρχικές συνθήκες στην έξοδο, όσο και από την πυκνομετρική διαφορά μεταξύ του ρευστού της φλέβας και του αποδέκτη. Αρχικά η φλέβα εισέρχεται μέσα στον αποδέκτη διαθέτοντας αρχική ειδική ορμή  $M$ . Στις αρχικές 5-6 διαμέτρους εμφανίζονται δακτυλιοειδείς στρόβιλοι οι οποίοι οδηγούν τη φλέβα σε τυρβώδη συμπεριφορά, και δημιουργούν μεγάλες

δίνες που συμπαρασύρουν μεγάλους όγκους περιβάλλοντος ρευστού μικρότερης πυκνότητας από τον αποδέκτη. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της παροχής της φλέβας, την μείωση της συγκέντρωσης των δεικτών που μεταφέρει και τη μείωση της αρχικής ορμής που μηδενίζεται όταν η φλέβα φτάσει σε ένα οριακό ύψος που ορίζουμε ως μέγιστο ύψος  $Z_{max}$ , εξαιτίας της αρνητικής ανωστικής δύναμης. Στη συνέχεια, η φλέβα αρχίζει να «αναδιπλώνεται» και το ύψος της μειώνεται σημαντικά. Μάλιστα, λόγω της αντίθετης ροής, η ροή της φλέβας επιβραδύνεται αλλά συνεχίζει να κινείται ανοδικά. Σε σύντομο χρονικό διάστημα, ωστόσο, η φλέβα ταλαντώνεται γύρω από μια συγκεκριμένη θέση, το τερματικό ύψος  $Z$ ,  $Z < Z_{max}$  και σταθεροποιείται γύρω από αυτή.



**Σχήμα 1.2** Διάχυση κατακόρυφης φλέβας με αρνητική άνωση. (α) Ροή μετά την έναρξη στο μέγιστο ύψος  $Z=Z_{max}$  (β) Σταθεροποιημένη ροή στο τερματικό ύψος  $Z < Z_{max}$

## 1.5 Διαστατική ανάλυση

### 1.5.1 Μέγιστο ύψος

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι χαρακτηριστικές παράμετροι της ροής είναι η ογκομετρική παροχή  $Q$ , η ειδική ποσότητα κίνησης  $M$  και η ειδική άνωση  $B$ . Το ύψος στο οποίο ανέρχεται η φλέβα όταν η ροή γίνει μόνιμη αποτελεί συνάρτηση των παραμέτρων αυτών και συγκεκριμένα:

$$Z = f(Q, M, B) \quad (1.17)$$

Από τις σχέσεις των παραπάνω παραμέτρων και με τη βοήθεια των χαρακτηριστικών κλιμάκων που ορίστηκαν στις σχέσεις (1.15) και (1.16), αλλά και τον αριθμό Richardson (1.17) προκύπτουν τα εξής αδιάστατα μονόμετρα:

$$\frac{Z}{l_Q} = f(R_0) \quad \text{ή} \quad \frac{Z}{l_M} = f(R_0) \quad (1.18)$$

Στην περίπτωση όπου η ειδική ποσότητα κίνησης  $M$  είναι αρκετά μεγαλύτερη από την ειδική άνωση  $B$ , δηλαδή ο αριθμός  $R_0$  είναι πολύ μικρός και η ροή συμπεριφέρεται σαν απλή φλέβα, η αρχική ειδική ογκομετρική παροχή  $Q$  θεωρείται αμελητέα σε σχέση με την παροχή του ρευστού που διέρχεται από επίπεδο κάθετο στον άξονα της φλέβας σε απόσταση  $z$ . Επομένως, το ύψος  $Z$  όπου σταθεροποιείται η ροή αποτελεί πλέον συνάρτηση δύο μόνο παραμέτρων:

$$Z = f(M, B) \quad (1.19)$$

και η σχέση 1.21 γίνεται:

$$\frac{z}{l_M} = C \quad (1.20)$$

όπου C=σταθερά

Εφαρμόζοντας την ίδια διαδικασία, υπολογίζονται και τα παρακάτω αδιάστατα μονώνυμα που αφορούν στο μέγιστο ύψος  $Z_{max}$  που αναρριχάται η φλέβα:

$$\frac{Z_{max}}{l_Q} = f(R_0) \quad \text{ή} \quad \frac{Z_{max}}{l_M} = f(R_0) \quad (1.21)$$

Για τον ίδιο λόγο, αμελώντας και στην περίπτωση του μέγιστου ύψους την αρχική ογκομετρική παροχή Q, προκύπτει ομοίως ότι:

$$\frac{Z_{max}}{l_M} = C' \quad (1.22)$$

### 1.5.2 Αραίωση

Η αλατότητα της φλέβας είναι μεγαλύτερη από εκείνη του αποδέκτη. Ωστόσο, η συγκέντρωση της φλέβας μειώνεται όσο αυτή αναμιγνύεται με τον αποδέκτη λόγω της συμπαράσυρσης. Ο μηχανισμός αυτός, δηλαδή η μείωση της διαφοράς πυκνότητας μεταξύ της φλέβας και του αποδέκτη, καλείται αραίωση. Η μέση αραίωση S προκύπτει από τη σχέση:

$$S = \frac{c_0 - c_a}{c - c_a} \quad (1.23)$$

όπου  $C_a$ : είναι η συγκέντρωση του αποδέκτη,  $C_0$  είναι η συγκέντρωση της φλέβας στο στόμιο εκβολής, και C η μέση (time-averaged) συγκέντρωση της φλέβας στην θέση όπου υπολογίζεται η αραίωση.

Η μέση αραίωση στον άξονα της φλέβας μπορεί σύμφωνα με τους Paranicolaou & List (1987) και Kokkalis & Paranicolaou (2008) να εκφραστεί αδιάστατα ως εξής:

$$\frac{S_c l_Q}{z} = \frac{c_0 - c_a}{c_c - c_a} \frac{Q}{z \sqrt{M}} \quad (1.24)$$

όπου  $S_c$ : είναι η ελάχιστη μέση αραίωση στον άξονα της φλέβας.

Εναλλακτικά μπορεί να εκφραστεί και σύμφωνα με τη σχέση του Jirka 2004

$$\frac{S_c}{Fr} = \frac{c_0 - c_a}{c_c - c_a} \frac{1}{F_0} \quad (1.25)$$

Αναλυτικότερα, οι Paranicolaou & List (1987) απέδειξαν ότι η μέση αραίωση σε κατακόρυφη φλέβα θετικής άνωσης είναι σταθερή όταν  $z \ll l_M$ , δηλαδή στην περίπτωση της απλής φλέβας, ενώ στην περιοχή του πλουμίου όπου  $z \gg l_M$ , η αραίωση S είναι ανάλογη του λόγου  $\left(\frac{z}{l_M}\right)^{2/3}$ .



## 2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

### 2.1 Εισαγωγή

Ο μηχανισμός της διάχυσης ανωστικών φλεβών έχει αποτελέσει αντικείμενο τόσο θεωρητικού όσο και πρακτικού ενδιαφέροντος, γεγονός που αποδεικνύεται από το πλήθος των επιστημόνων που έχει ασχοληθεί με το αντικείμενο αυτό από τη δεκαετία του 70 έως και σήμερα. Όσον αφορά στις τυρβώδεις φλέβες θετικής άνωσης οι Fischer et al.(1979) περιγράφουν τυρβώδεις κυκλικές και διδιάστατες φλέβες θετικής άνωσης με βάση την βιβλιογραφία. Οι Kotsovinos (1975) και Papanicolaou & List (1982) διερεύνησαν πειραματικά τη ροή σε κατακόρυφες διδιάστατες και κυκλικές ανωστικές φλέβες αντίστοιχα. Μετέπειτα, πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με τις τυρβώδεις φλέβες θετικής άνωσης. Ωστόσο, μικρότερος είναι ο αριθμός των εργασιών που αναφέρονται σε τυρβώδεις φλέβες αρνητικής άνωσης, οι σημαντικότερες εκ των οποίων παρουσιάζονται στη συνέχεια.

### 2.2 Περιγραφή εργασιών σε κατακόρυφες τυρβώδεις φλέβες αρνητικής άνωσης

#### 2.2.1 Turner (1966)

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε δεξαμενή από Plexiglas τετραγωνικής διατομής  $45\text{cm}^2$  και βάρους 140 cm. Το ακροφύσιο ήταν τοποθετημένο στο κέντρο της διατομής σε απόσταση 50 cm από τον πυθμένα, ώστε η φλέβα να εκτοξεύεται κατακόρυφα προς τα επάνω. Η πυκνότητα του ρευστού της φλέβας ήταν μεγαλύτερη από αυτή του αποδέκτη. Τα ακροφύσια που χρησιμοποιήθηκαν είχαν διάμετρο από  $\frac{1}{2}''$  έως  $\frac{1}{4}''$ . Μέσα από τα πειράματα αυτά, ο Turner τόνισε τις διαφορές στη συμπεριφορά μιας απλής φλέβας (jet) και ενός πλουμίου (plume) και παράλληλα περιέγραψε την αρχικά ανοδική και έπειτα καθοδική πορεία της φλέβας, καθώς η ανωστική δύναμη αντιτίθεται στην κίνηση. Οι φλέβες αποκτούν αρχικά ένα μέγιστο ύψος και τελικά ταλαντώνονται με μικρό εύρος γύρω από μια μικρότερη τιμή. Τα αποτελέσματα αυτά, αναπαραστάθηκαν στα διαγράμματα του ύψους της φλέβας συναρτήσει του χρόνου. Παρόλο που τα αποτελέσματα του Turner παρουσιάζουν απόκλιση από αυτά των επόμενων ερευνητών και αναφέρονταν σε μετεωρολογικά φαινόμενα, είναι βασικής σημασίας, καθώς γίνεται περιγραφή του φαινομένου, χρήση διαστατικής ανάλυσης και δημιουργίας του διαγράμματος του τερματικού ύψους της φλέβας σε κάθε χρονική στιγμή.

### 2.2.2 Abraham (1967)

Μετά από θεωρητική διερεύνηση της ροής φλέβας με μεγαλύτερη πυκνότητα από αυτή του αποδέκτη, ο Abraham προσδιόρισε το ύψος  $Z$  της φλέβας συναρτήσει του αριθμού Froude και της διαμέτρου  $D$  της φλέβας.

### 2.2.3 Δημητρίου (1978)

Σε πειραματική διερεύνηση τυρβωδών φλεβών αρνητικής άνωσης, μελετήθηκαν γεωμετρικά μεγέθη της ροής. Επίσης μετρήθηκαν χαρακτηριστικά μεγέθη όπως η μέση ταχύτητα και συγκέντρωση της φλέβας, αλλά και η δομή της τύρβης.

### 2.2.4 McLellan & Randall (1986)

Μετά από διερεύνηση τυρβωδών φλεβών, διεξήχθησαν μετρήσεις στο πεδίο για το τερματικό ύψος και την αραίωση τυρβωδών ανωστικών φλεβών αρνητικής άνωσης. Η εμπειρική σχέση που προέκυψε για τον υπολογισμό του μέγιστου ύψους προβλέπει μεγαλύτερα ύψη σε σύγκριση με άλλες που αναπτύχθηκαν από εργαστηριακές μετρήσεις.

### 2.2.5 Baines, Turner, Cambell (1989)

Η δεξαμενή όπου πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα είχε διαστάσεις 70X70X60cm. Η φλέβα είχε μεγαλύτερη πυκνότητα από αυτή του αποδέκτη, ενώ το ακροφύσιο ήταν τοποθετημένο με κλίση  $7^\circ$  από την κατακόρυφο. Και σε αυτή την περίπτωση μετρήθηκε το μήκος διείδυσης συναρτήσει του χρόνου και διαπιστώθηκε ότι εξαιτίας της κλίσης του ακροφυσίου, το ύψος της φλέβας αυξήθηκε κατά 17% ενώ η αραίωση σε όλα τα επίπεδα αυξήθηκε κατά 40% σε σύγκριση με την περίπτωση του κατακόρυφου ακροφυσίου.

### 2.2.6 Zhang & Baddour (1998)

Ομοίως διεξήχθησαν πειράματα όπου το ρευστό της φλέβας ήταν βαρύτερο από αυτό του αποδέκτη και μάλιστα διαπιστώθηκε ότι ο λόγος  $Z/l_M$  παραμένει σταθερός για αριθμούς Froude  $>7$ .

### 2.2.7 Pantzloff & Lueptow (1999)

Τα πειράματα έγιναν σε κυλινδρική δεξαμενή διαμέτρου  $D=0.295m$  και ύψους  $H=0.87m$ , ενώ το ακροφύσιο που χρησιμοποιήθηκε είχε διάμετρο  $0.508cm$ . Οι μελετητές και εδώ εξέτασαν το ύψος διείδυσης της φλέβας για διάφορους αριθμούς Froude. Το ύψος διείδυσης και ο χρόνος συσχετίστηκαν με την ανωστική δύναμη  $B$  και την αρχική ορμή  $M$  ως  $Z M^{-3/4} |F|^{1/2}$  συναρτήσει του αδιάστατου χρόνου  $t B/M$ . Η ροή σταθεροποιείται στο ύψος  $Z$  μετά από  $t |B|/M = 4$ . Η τεχνική οπτικοποίησης της φλέβας έγινε με τεχνικές laser εξαναγκασμένου φθορισμού (induced fluorescence).

### 2.2.8 Kokkalis & Papanicolaou (2006)

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε δεξαμενή διατομής  $0.80X0.80m$  και βάθους  $0.94m$ . Η φλέβα εισέρχεται κατακόρυφα με φορά προς το πυθμένα ενώ η πυκνότητα της είναι μικρότερη από αυτή του αποδέκτη. Τοποθετήθηκαν διάφορα σχήματα στομιών, ενώ όσον

αφορά τα κυκλικά στόμια, είχαν διαμέτρους 0.50, 1.00, 1.50 και 2.00cm. Το μέγιστο ύψος  $Z_{max}$  υπολογίζεται ίσο με  $3l_M$ , ενώ τελικά η ροή σταθεροποιείται σε τερματικό ύψος ίσο με  $2l_M$ , για αριθμούς Richardson  $R_0 < 0.1$ .

### 2.2.9 *Spetsiotis & Papanicolaou (2008)*

Τα πειράματα διεξήχθησαν σε δεξαμενή διατομής 0.80X0.80m και βάθους 1m. Η φορά της φλέβας ήταν και πάλι κατακόρυφη από επάνω προς τα κάτω, όπου η φλέβα είχε μικρότερη πυκνότητα από τον αποδέκτη, καθώς ήταν θερμαινόμενη. Παράλληλα έγιναν μετρήσεις θερμοκρασίας και με θερμίστορες. Η κανονικοποιημένη αραίωση στον άξονα ( $Sc_{IQ}/z$ ) σε σχέση με το  $z/l_M$  βρέθηκε ίση με 0.2.

### 2.2.10 *Παπακωνσταντής (2009)*

Πειράματα πραγματοποιήθηκαν τόσο για τη μέτρηση γεωμετρικών χαρακτηριστικών των τυρβωδών φλεβών με αρνητική άνωση, όσο και για μετρήσεις συγκέντρωσης. Συγχρόνως, εφαρμόστηκε η μέθοδος LIF (Laser Induced Fluorescence) από όπου και προέκυψαν ποιοτικά χαρακτηριστικά για τα προφίλ της συγκέντρωσης και της έντασης της τύρβης.

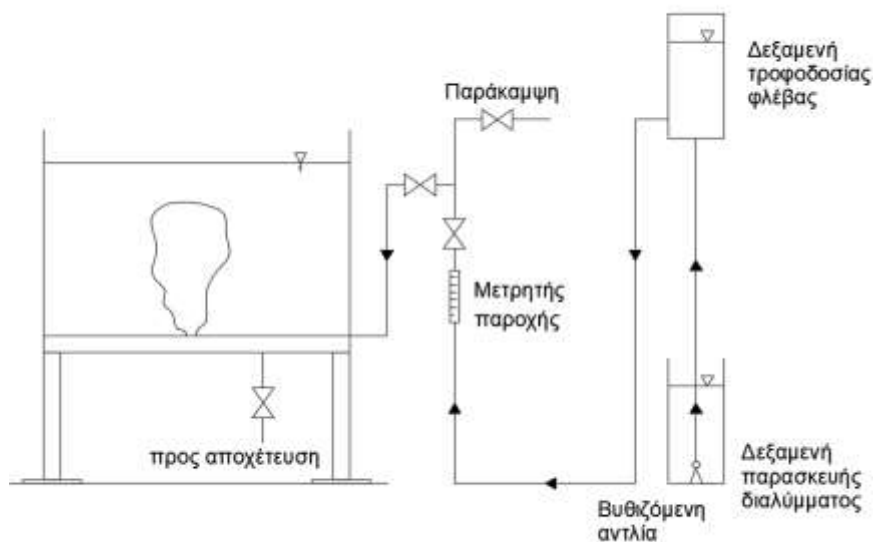
## 2.3 Σκοπός Εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η πειραματική διερεύνηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών κατακόρυφης ανωστικής φλέβας αρνητικής άνωσης και της αραίωσης. Η οπτικοποίηση των πειραμάτων πραγματοποιήθηκε με τεχνική Shadowgraph και τεχνική PLIF (planar laser induced fluorescence). Στη συνέχεια έγινε πειραματική διερεύνηση της μέσης αραίωσης σε ανωστική φλέβα αρνητικής άνωσης που εκρέει σε ακίνητο και ομογενή αποδέκτη, με τεχνική PLIF. Τα αποτελέσματα αδιαστατοποιούνται κατάλληλα και συγκρίνονται με άλλα διαθέσιμα αποτελέσματα.

### 3 . Πειραματική διαδικασία

Στα πλαίσια της μεταπτυχιακής αυτής εργασίας διεξήχθησαν στο Εργαστήριο Υδραυλικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ δυο σειρές πειραμάτων. Η 1<sup>η</sup> σειρά πειραμάτων έγινε για τον προσδιορισμό του μέγιστου και τερματικού ύψους που φτάνει κατακόρυφη τυρβώδης κυκλική φλέβα αρνητικής άνωσης και εφαρμόστηκε η μέθοδος Shadowgraph.

Στη 2<sup>η</sup> σειρά πειραμάτων μελετήθηκε τόσο το μέγιστο (τερματικό) ύψος όσο και η αραιώση που επιτυγχάνεται σε αυτό από τις τυρβώδεις ανωστικές φλέβες με μεθοδολογία PLIF. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε και για τις δύο σειρές πειραμάτων απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.1 Σχηματική απεικόνιση πειραματικής διάταξης

### 3.1 Γενική περιγραφή πειραματικής διάταξης

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων παρουσιάζεται παραπάνω (Σχ. 3.1) και αποτελείται από τα εξής επιμέρους στοιχεία:

1. Ορθογωνική δεξαμενή διαστάσεων (ΜxΠxΥ) 1.00 m x 0.8 m x 0.7 m. (Σχ. 3.2)
2. Δεξαμενή προετοιμασίας του διαλύματος της φλέβας. (Σχ. 3.3)
3. Δεξαμενή τροφοδοσίας της φλέβας. (Σχ. 3.3)
4. Βυθιζόμενη αντλία για την μεταφορά του διαλύματος στη δεξαμενή τροφοδοσίας. (Σχ. 3.4)
5. Παροχόμετρο για τη μέτρηση της παροχής. (Σχ. 3.4)
6. Κυκλικό στόμιο (ακροφύσιο) από το οποίο διοχετεύεται η φλέβα στην κύρια δεξαμενή (jet plenum).
7. Κάμερα βιντεοσκόπησης. (Σχ. 3.6)
8. Βοηθητικά όργανα.

Όσον αφορά τα πειράματα όπου εφαρμόστηκε η μέθοδος Shadowgraph το όργανο που χρησιμοποιήθηκε επιπλέον των παραπάνω είναι:

9. Προβολέας. (Σχ. 3.7)

Στα πειράματα που διεξήχθησαν με τη τεχνική PLIF χρησιμοποιήθηκαν επιπλέον των ανωτέρω:

10. Συσκευή δημιουργίας φύλλου laser.
11. Υφάσματα για σκίαση.
12. Ειδικά διαμορφωμένη κατασκευή γύρω από τη δεξαμενή για τη τοποθέτηση των υφασμάτων.

### 3.2 Δεξαμενές

#### 3.2.1 Κύρια δεξαμενή

Η κύρια δεξαμενή είναι αυτή όπου λαμβάνουν χώρα τα πειράματα και έχει διαστάσεις 1.00 m x 0.80 m και βάθος 0.70 m. Οι τρεις κατακόρυφες πλευρές της είναι κατασκευασμένες από θερμικά επεξεργασμένο γυαλί (tempered glass) πάχους 12.5 mm, σε αντίθεση με τον πυθμένα και τη μία πλευρά που είναι κατασκευασμένα από διάφανο Plexiglas ίδιου πάχους (Μίχας 2008). Στις δυο πλευρές μήκους 1 m είναι σχεδιασμένος κάναβος 5cm X 5cm. Η δεξαμενή στηρίζεται σε ειδικά διαμορφωμένη μεταλλική βάση και απέχει από το έδαφος 80 cm. Ο πυθμένας διαθέτει 2 οπές, μία στη γωνία για την αποχέτευση του νερού διαμέτρου 2.5 cm και μια στο κέντρο του διαμέτρου 5 cm, όπου τοποθετείται το σύστημα ακροφυσίου εκτόξευσης της φλέβας. (Η δεξαμενή διαθέτει δύο ακόμα οπές στην κατακόρυφη πλευρά από Plexiglas). Στο επάνω μέρος της δεξαμενής είναι τοποθετημένο περιμετρικά ορθογωνικό κανάλι με σχισμές V (V-notch weir) για την αποχέτευση της περίσσειας νερού που υπερχειλίζει. Η δεξαμενή απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα (Σχ. 3.2.)



**Σχήμα 3.2** Ορθογωνική δεξαμενή

### 3.2.2 Δεξαμενή προετοιμασίας διαλύματος

Στο κυλινδρικό αυτό δοχείο προετοιμάζεται το διάλυμα της φλέβας (Σχ. 3.3). Είναι κατασκευασμένο από πλαστικό και έχει χωρητικότητα 60 l. Στο εσωτερικό του δοχείου έγινε βαθμονόμηση της χωρητικότητας από 10 l έως 60 l ανά 10 μονάδες. Εδώ αναμιγνύεται το αλάτι με το νερό και στην περίπτωση της 2<sup>ης</sup> ομάδας πειραμάτων και με τη ροδαμίνη. Στο εσωτερικό του δοχείου τοποθετείται και η αντλία.

### 3.2.3 Δεξαμενή τροφοδοσίας της φλέβας

Η δεξαμενή αυτή είναι κατασκευασμένη από πλαστικό και έχει κυλινδρικό σχήμα. Η μέγιστη χωρητικότητα του δοχείου είναι 55 l, ενώ η βαθμονόμηση της χωρητικότητας είναι στο εξωτερικό μέρος του δοχείου. Στον πυθμένα δημιουργήθηκαν 2 οπές, μία για την πλήρωση του δοχείου και μία για την μεταφορά του διαλύματος προς το παροχόμετρο και στη συνέχεια στο ακροφύσιο της φλέβας (Σχ. 3.3). Το δοχείο στηρίζεται σε ειδικά διαμορφωμένη βάση και είναι τοποθετημένο σε ύψος 3 m από το δάπεδο του εργαστηρίου.



**Σχήμα 3.3** Αριστερά: Δεξαμενή προετοιμασίας διαλύματος. Δεξιά: Δεξαμενή διαλύματος τροφοδοσίας φλέβας.

### 3.3 Αντλία

Η αντλία χρησιμοποιείται για τη μεταφορά του διαλύματος στη δεξαμενή τροφοδοσίας της φλέβας. Έχει μικρό μέγεθος, είναι βυθιζόμενη και συνεπώς τοποθετείται στο εσωτερικό του δοχείου όπου προετοιμάζεται το διάλυμα. Η αντλία έχει κατασκευαστεί από την εταιρία Eihell. Η αναρρόφηση γίνεται από τον πυθμένα, ενώ διαθέτει και πλωτήρα ώστε να διακόπτεται η λειτουργία όταν η στάθμη στο δοχείο είναι χαμηλότερη από αυτή της κατώτατης λειτουργίας.

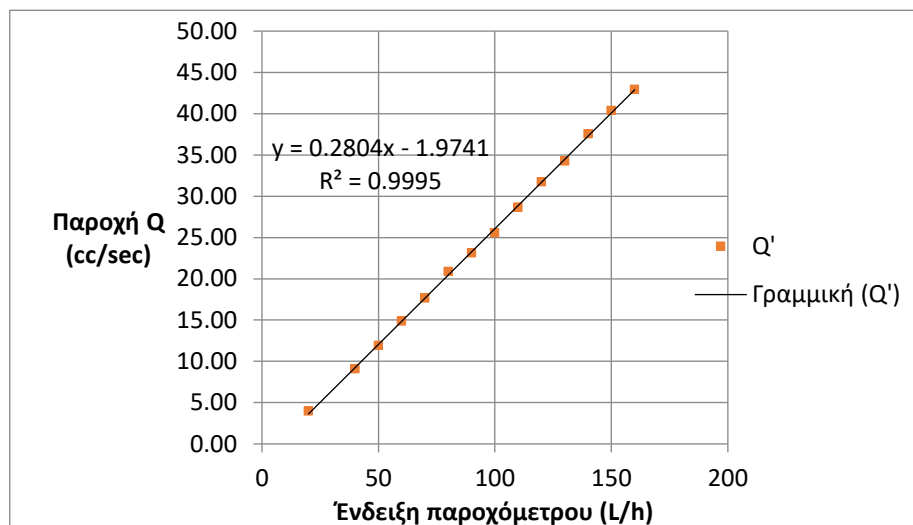


**Σχήμα 3.4** Αριστερά: Βυθιζόμενη αντλία. Δεξιά: Παροχόμετρο.

### 3.4 Παροχόμετρο

Το παροχόμετρο που χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της ροής έχει εύρος μετρήσεων από 10 L/h έως 160 L/h. Ωστόσο για την επιτυχή ρύθμιση της παροχής είναι απαραίτητη πρώτα η διαδικασία της βαθμονόμησης, ώστε η ένδειξη του παροχόμετρου να αντιστοιχεί σε πραγματική τιμή παροχής.

Η διαδικασία της βαθμονόμησης έγινε με επαναληπτική διαδικασία μέτρησης του χρόνου πλήρωσης ενός δοχείου όγκου 1 L. Η διαδικασία αυτή έγινε για διάφορες ενδείξεις του παροχόμετρου και έτσι δημιουργήθηκε το παρακάτω διάγραμμα (Σχ 3.5).



Σχήμα 3.5 Διάγραμμα βαθμονόμησης παροχής

Συνεπώς, η πραγματική παροχή υπολογίζεται πλέον από τη γραμμική σχέση που προέκυψε ως η ευθεία ελαχίστων τετραγώνων:

$$Q' = 0.2804 F - 1.9741 \quad (3.1)$$

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

### 3.5 Σύστημα εκτόξευσης φλέβας

Για τη δημιουργία της φλέβας τοποθετείται στο κέντρο του πυθμένα σωλήνας διαμέτρου 5 cm. Στο κάτω άκρο του εφαρμόζεται ο σωλήνας τροφοδοσίας του με αλατόνερο. Στο άνω άκρο του μπορούν να τοποθετηθούν στόμια διαφόρων σχημάτων και διαμέτρων, ώστε το ακροφύσιο να βρίσκεται σε απόσταση 10cm από τον πυθμένα. Στη πλαίσια της εργασίας αυτής τοποθετήθηκε κυκλικό στόμιο διαμέτρου 0.5 cm.

### 3.6 Βιντεοκάμερα

Για την καταγραφή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε ψηφιακή βιντεοκάμερα Panasonic, hcn770, η οποία διαθέτει ταχύτητα καταγραφής 25 fps (frames per second). Η βιντεοκάμερα στερεώνεται οριζόντια σε τρίποδα εξασφαλίζοντας τη σταθερή λήψη κατά τη διάρκεια του πειράματος (Σχ. 3.6).





**Σχήμα 3.6** Αριστερά: Βιντεοκάμερα καταγραφής πειράματος. Δεξιά: Τρίποδο στήριξης βιντεοκάμερας

### 3.7 Προβολέας

Στην περίπτωση των πειραμάτων όπου εφαρμόστηκε η μέθοδος Shadowgraph χρησιμοποιήθηκε ο προβολέας του Σχήματος 3.7.



**Σχήμα 3.7** Αριστερά: Προβολέας συγκεντρωτικής δέσμης. Δεξιά: Όργανο μέτρησης αλατότητας (YSI 30)

### 3.8 Βοηθητικά Όργανα

#### 3.8.1 Ψηφιακό όργανο μέτρησης αλατότητας

Το όργανο YSI30 (Σχ.3.7) χρησιμοποιήθηκε τόσο για τη μέτρηση της αλατότητας  $S$  σε ppt όσο και της θερμοκρασίας  $T$  σε °C. Για τον προσδιορισμό της αλατότητας του διαλύματος της φλέβας και του αποδέκτη ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

Η πυκνότητα του νερού συναρτήσεται της θερμοκρασίας  $T$  (°C) υπολογίζεται από τη σχέση των Streeter et.al (1998):

$$\rho_w(T) = 999.9399 + \frac{4.216485}{10^2} T - \frac{7.097451}{10^3} T^2 + \frac{3.509571}{10^5} T^3 - \frac{9.9037785}{10^8} T^4 \quad (3.2)$$

Η πυκνότητα θαλασσινού νερού αλατότητας  $S$  (ppt) και θερμοκρασίας  $T$  (°C), δίνεται από τη σχέση:

$$\rho(S, T) = \rho_w(T) + S \left( 0.824493 - \frac{4.0899}{10^3} T + \frac{7.6438}{10^5} T^2 - \frac{8.2467}{10^7} T^3 + \frac{5.3875}{10^9} T^4 \right) + S^{\frac{3}{2}} \left( -\frac{5.72466}{10^3} + \frac{1.0227}{10^4} T - \frac{1.6546}{10^6} T^2 \right) + S^2 \frac{4.8314}{10^4} \quad (3.3)$$

Στη συνέχεια, έχοντας πλέον την πυκνότητα του θαλασσινού νερού με αλατότητα  $S$  (ppt) και θερμοκρασία  $T$  (°C), αφαιρείται η ποσότητα  $\Delta\rho_o = 0.0398S$  (Παπακωνσταντής 2009) και υπολογίζεται τελικά η πυκνότητα του διαλύματος της φλέβας. Η ίδια διαδικασία, η οποία εφαρμόζεται και για τον υπολογισμό της πυκνότητας του αποδέκτη σε όλα τα πειράματα, έχει παρουσιαστεί σε προηγούμενη εργασία (Παπακωνσταντής 2009).

#### 3.8.2 Άλλα βοηθητικά όργανα και υλικά

Επιπλέον των παραπάνω για τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν:

- Μεταλλικός αναδευτήρας για την ανάμιξη του διαλύματος και του αποδέκτη
- Πιπέτα για τη μέτρηση της ποσότητας διαλύματος της ροδαμίνης με συγκέντρωση 1gr/l που εισάγεται στο διάλυμα.
- Σκουρόχρωμο ύφασμα για δημιουργία συνθηκών σκότους στην περίπτωση των πειραμάτων με τεχνική PLIF

### 3.9 Διάταξη συσκευών οπτικοποίησης PLIF (Planar Laser Induced Fluorescence)

Για τη διεξαγωγή της 2ης σειράς πειραμάτων εφαρμόστηκε η τεχνική PLIF (Planar Laser Induced Fluorescence). Με τη μέθοδο αυτή εισάγεται στο διάλυμα της φλέβας μικρή ποσότητα διαλύματος 1 gr/l ροδαμίνης 6G, η οποία όταν διεγείρεται από μονοχρωματική ακτινοβολία (Laser) μήκους κύματος  $\lambda=532$  nm (πράσινο), εκπέμπει μονοχρωματική ακτινοβολία (dye-laser, fluorescence) μήκους κύματος  $\lambda=570$  nm (κίτρινο) (Paranicolaou 1984). Η ένταση αυτή είναι ανάλογη τόσο της έντασης της ακτίνας του laser όσο και της συγκέντρωσης της ροδαμίνης στο νερό, εφόσον η συγκέντρωση της ροδαμίνης δεν ξεπερνά τα 50 ppb (Ferrier et al.1993). Ο απαιτούμενος εξοπλισμός για την εφαρμογή της μεθόδου

είναι η συσκευή ακτίνας laser και ο μηχανισμός περιστρεφόμενου πολυγωνικού κατόπτρου. Η συσκευή ακτίνας laser είναι τύπου DPSS (Diode Pumped Solid State) και εκπέμπει ακτίνα laser ισχύος 1 W. Το πολυγωνικό κάτοπτρο διαθέτει 24 έδρες και περιστρέφεται με ταχύτητα 20000 rpm δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο ένα φύλλο laser πάχους 1 mm. Το laser μαζί με το κάτοπτρο στηρίζονται σε ειδικό τρίποδα σε θέση τέτοια ώστε το επίπεδο του φύλλου laser να είναι κατακόρυφο, κάθετο στο τζάμι της δεξαμενής και να διέρχεται από τον άξονα της φλέβας. Για τη λειτουργία του συστήματος παραγωγής του φύλλου laser απαιτούνται δυο επιπλέον τροφοδοτικά.

Για αποφυγή των ανακλάσεων τοποθετήθηκε εσωτερικά στη δεξαμενή στο τοίχωμα από Plexiglas ένα ειδικά διαμορφωμένο χαλύβδινο φύλλο με σχισμή μέσα στην οποία εισέρχεται κάθετα το φύλλο του laser και απορροφάται. Συγχρόνως, τοποθετήθηκε μαύρο χαρτόνι στην πλευρά όπου προσπίπτει το φύλλο του laser αφήνοντας ελεύθερη κατακόρυφη σχισμή ώστε να διέρχεται το φύλλο στη δεξαμενή. Το ίδιο χαρτόνι τοποθετήθηκε σε όλο το πίσω μέρος της δεξαμενής αλλά και σε τμήμα της εμπρόσθιας όψης της δεξαμενής. Το τμήμα της διάταξης που περιλαμβάνει τη δεξαμενή, την ακτίνα laser αλλά και τη βιντεοκάμερα καλύφθηκε με σκουρόχρωμο ύφασμα, ώστε να επιτευχθούν συνθήκες σκότους.



**Σχήμα 3.8** Διάταξη δεξαμενής και συσκευής ακτίνας laser.

### *3.9.1 Βαθμονόμηση έντασης χρώματων και συγκέντρωσης ροδαμίνης και ακτίνας laser.*

Στην περίπτωση όπου η συγκέντρωση της ροδαμίνης είναι μικρότερη από αυτή των 50 ppb, η ένταση της ακτινοβολίας ( $\lambda \sim 570$  nm) που εκπέμπει είναι ανάλογη της συγκέντρωσης. Παράλληλα η ένταση της ακτινοβολίας που ελπέμεται είναι ανάλογη της ισχύος του laser. Επομένως είναι απαραίτητη η διαδικασία της βαθμονόμησης του συστήματος για τη μέτρηση της συγκέντρωσης (Dimitriadis 2017).

Στην πραγματικότητα η ένταση της ακτινοβολίας induced fluorescence  $I(x)$  όταν ακτίνα laser διέρχεται από διάλυμα ροδαμίνης 6G εξαρτάται από την ένταση της ακτίνας του laser  $P(x)$ , η οποία όμως μειώνεται λόγω της απορρόφησης μέρους της έντασης της ακτίνας από τη ροδαμίνη με συγκέντρωση  $C(x)$ . Στα πλαίσια τη συγκεκριμένης εργασίας, λαμβάνεται υπ'

όψη η απομείωση της έντασης της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας σαν συνάρτηση της απόστασης που διανύει η ακτίνα laser μέσα από διάλυμα ροδαμίνης για διάφορες τιμές συγκέντρωσης της ροδαμίνης.

Κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης, αρχικά, γίνεται πλήρωση της δεξαμενής, προστίθεται μικρή ποσότητα θειώδους νατρίου ώστε να μην εξουδετερωθεί η ροδαμίνη από το χλώριο που περιέχεται στο νερό και έπειτα εισάγεται στη δεξαμενή συγκεκριμένη ποσότητα διαλύματος ροδαμίνης από 0 έως 30ml (Πίν.3.1). Η δεξαμενή αναδεύεται και βιντεοσκοπείται για μερικά δευτερόλεπτα. Συνεπώς, προκύπτει ένα βίντεο για γνωστή συγκέντρωση διαλύματος ροδαμίνης στη δεξαμενή, από το οποίο με χρήση του λογισμικού Matlab εξάγεται η μέση εικόνα έντασης της ακτινοβολίας σαν συνάρτηση των συντεταγμένων του επίπεδου φύλλου laser επειδή η ισχύς του laser απομειώνεται λόγω απορρόφησής του από τη ροδαμίνη. Από τις RGB εικόνες της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας επιλέγουμε την ακτινοβολία του κόκκινου (R) χρώματος για περαιτέρω ανάλυση της εικόνας. Στη συνέχεια παράγονται οι καμπύλες απομείωσης της έντασης του κόκκινου (R) χρώματος για διάφορες τιμές συγκέντρωσης ροδαμίνης κατά μήκος των ακτίνων του laser. Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι στα πλαίσια της εργασίας αυτής γίνεται η παραδοχή ότι οι ακτίνες προσπίπτουν κάθετα στη δεξαμενή. Στην πραγματικότητα, ωστόσο οι ακτίνες προσπίπτουν υπό γωνία.

**Πίνακας 3.1** Συγκέντρωση ροδαμίνης σε κάθε βίντεο της βαθμονόμησης

VIDEO	V (L)	C (ml)	C (μg/L)
234	560	0.00	0.000
235	560	1.00	1.786
236	560	2.00	3.571
237	560	4.00	7.143
238	560	6.00	10.714
239	560	8.00	14.286
240	560	10.00	17.857
241	560	12.00	21.429
242	560	15.00	26.786
243	560	18.00	32.143
244	560	21.00	37.500
245	560	24.00	42.857
246	560	27.00	48.214
247	560	30.00	53.571

Πιο συγκεκριμένα, κατά μήκος μιας ακτίνας κάθε pixel  $i$  εμφανίζει μια τιμή έντασης η οποία μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση, σύμφωνα με τη σχέση:

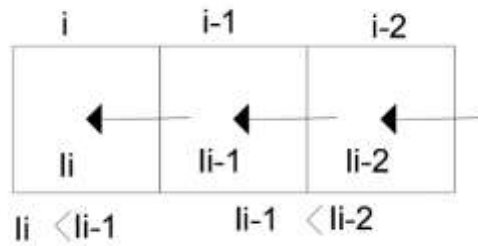
$$I_{real}^i = I^i - a I_{real}^{i-1} \quad (3.4)$$

Όπου

$I_{real}^i$ : είναι η τιμή της έντασης μετά τη διόρθωση λόγω της απομείωσης

$I^i$ : είναι η τιμή της έντασης που υπολογίζεται από τη μέση εικόνα

$a$ : είναι οι συντελεστές σύμφωνα με τους οποίους μειώνεται η ένταση κατά μήκος της συγκεκριμένης ακτίνας

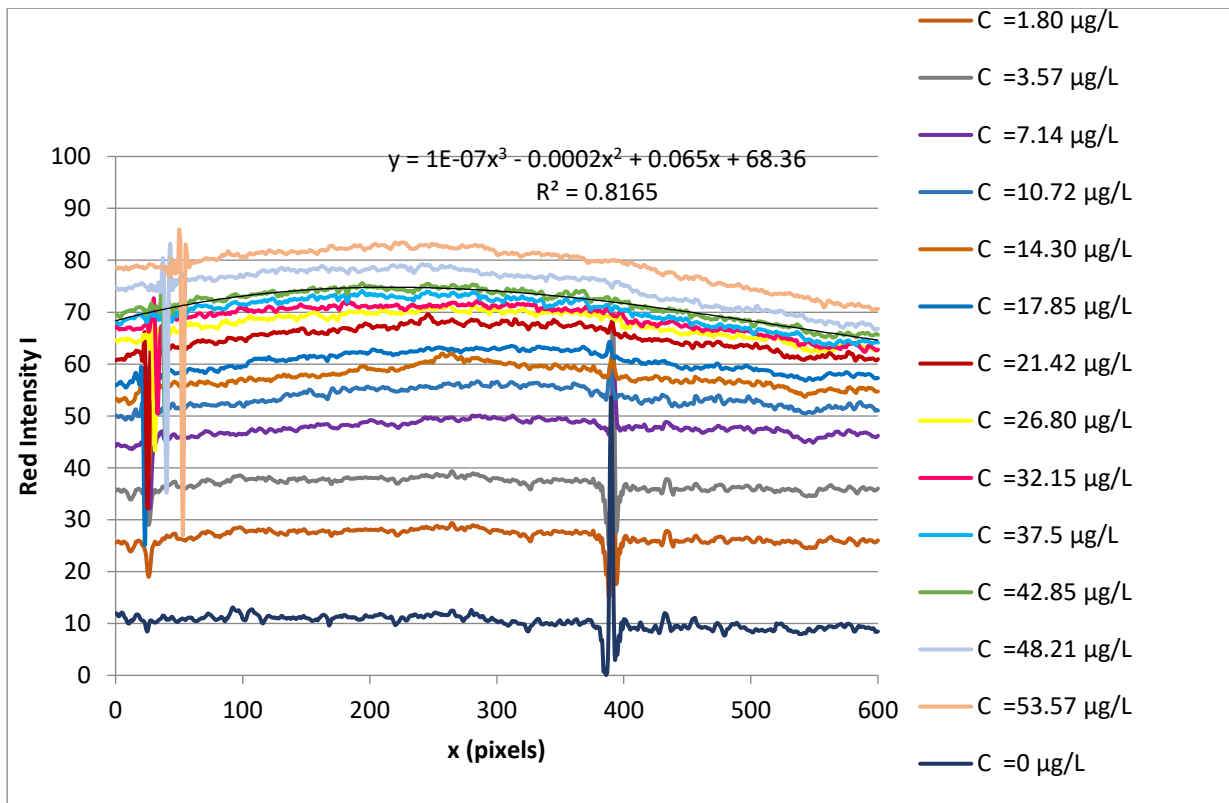


**Σχήμα 3.9** Σχηματική απεικόνιση της απομείωσης της έντασης κατά μήκος μια ακτίνας laser.

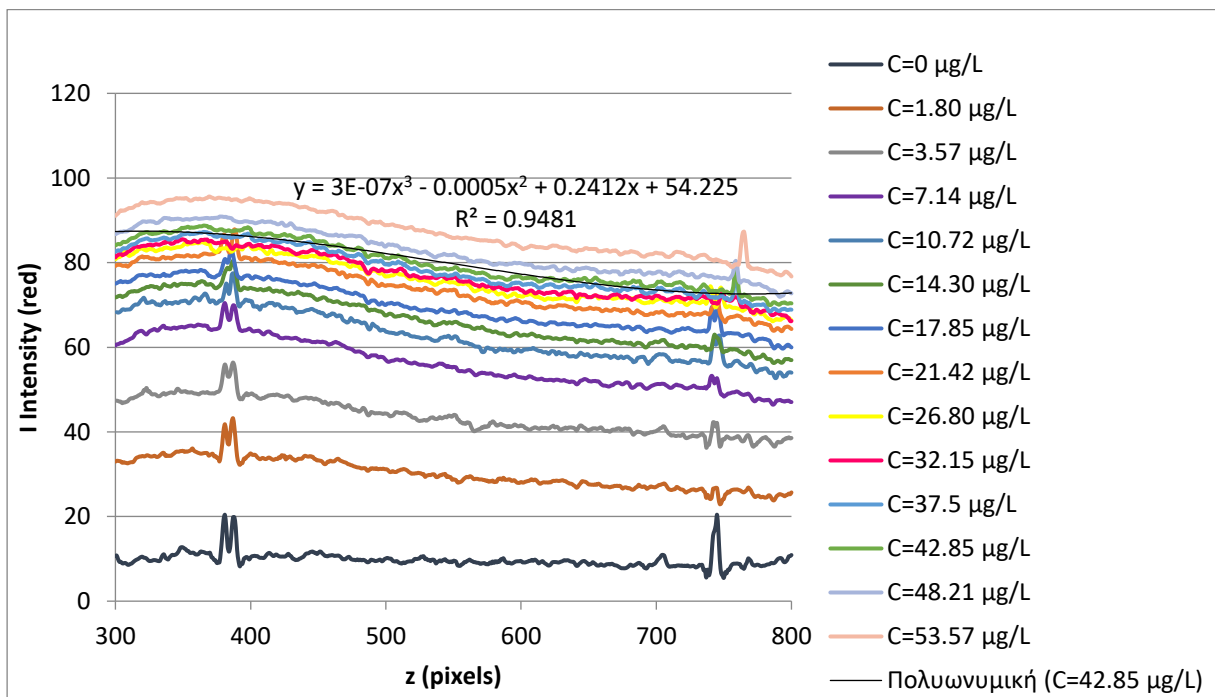
Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλες της γραμμές της περιοχής ενδιαφέροντος της δεξαμενής. Οι συντελεστές αυτοί υπολογίζονται από τα διαγράμματα έντασης  $I$  και απόστασης  $x$  από την πηγή από τη μέση αυτή εικόνα για κάθε περίπτωση συγκέντρωσης της ροδαμίνης.

Στο σημείο αυτό επισημαίνεται ότι στην περιοχή ενδιαφέροντος της φλέβας θεωρείται ίδια συμπεριφορά απομείωσης ενώ σχεδόν ίδια είναι και η συμπεριφορά της βαθμονόμησης για κάθε συγκέντρωση  $C$ .

Ενδεικτικά παρουσιάζεται το διάγραμμα της απομείωσης της έντασης  $I$  συναρτήσει της απόστασης για διάφορες συγκεντρώσεις ροδαμίνης για μία ακτίνα στο μέσο της δεξαμενής.



Σχήμα 3.10 Μεταβολή έντασης I κατά μήκος μια ακτίνας σε ύψος z=600 (pixels)



Σχήμα 3.11 Μεταβολή έντασης I καθ' ύψος της δεξαμενής στη στήλη x=970 (pixels)

Σύμφωνα με το χρωματικό μοντέλο RGB κάθε εικόνα μπορεί να απεικονιστεί σαν 3 υπο-εικόνες μία για κάθε βασικό χρώμα κόκκινο (Red), πράσινο (Green) και μπλε (Blue). Συνεπώς, κάθε εικονοστοιχείο που αποτελεί την εικόνα είναι συνδυασμός 3 μεταβλητών R,G,B. Η ακτίνα του laser έχει πράσινο χρώμα σε αντίθεση με τη ροδαμίνη που όταν διεγείρεται από την ακτίνα του laser φωσφορίζει σε κίτρινο χρώμα. Το κίτρινο χρώμα ωστόσο αποτελεί συνδυασμό του κόκκινου και του πράσινου. Έπειτα από κατάλληλη επεξεργασία της εικόνας στο λογισμικό Matlab, αποσυνθέτοντας την εικόνα, επιλέγεται ο υποπίνακας του κόκκινου χρώματος. Συνεπώς για την διεξαγωγή των απαραίτητων αποτελεσμάτων, και όλη την παραπάνω διαδικασία χρησιμοποιείται μόνο ο υποπίνακας του κόκκινου χρώματος κάθε εικόνας, καθώς με βάση αυτόν έχουμε την εικόνα της ροδαμίνης.

### 3.10 Περιγραφή τυπικού πειράματος

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η διαδικασία ενός τυπικού πειράματος για κάθε ένα είδος πειράματος.

#### 3.10.1 Περιγραφή πειράματος με τη μέθοδο Shadowgraph

- **Πλήρωση της δεξαμενής παρασκευής διαλύματος**

Αφού πληρωθεί η δεξαμενή μέχρι την ένδειξη των 60L, εισάγεται το αλάτι και αναδεύεται για αρκετή ώρα με το μεταλλικό αναδευτήρα μέχρι να ομογενοποιηθεί το διάλυμα.

- **Μέτρηση αλατότητας και θερμοκρασίας διαλύματος**

Με χρήση του ψηφιακού οργάνου YSI μετριέται η αλατότητα και η θερμοκρασία του διαλύματος. Με τη βοήθεια λογιστικού φύλλου στο excel και με βάση τις σχέσεις (3.2) και (3.3) που περιεγράφηκαν ανωτέρω στην παράγραφο 3.8 υπολογίζεται η πυκνότητα.

- **Πλήρωση της κύριας δεξαμενής διαλύματος**

Η βυθιζόμενη αντλία τοποθετείται στο δοχείο παρασκευής του διαλύματος και το διάλυμα μεταφέρεται στο 2<sup>ο</sup> δοχείο, το οποίο πληρώνεται μέχρι την ένδειξη των 50L.

- **Πλήρωση της κύριας δεξαμενής**

Μετά την πλήρωση της κύριας δεξαμενής μέχρι τη στάθμη της υπερχειλίσης, ακολουθεί η εξαέρωση του συστήματος μέσω του οποίου η φλέβα οδηγείται στη δεξαμενή. Μετά την εξαέρωση του συστήματος μέσω μιας βοηθητικής βαλβίδας, ρυθμίζεται η απαιτούμενη παροχή έτσι ώστε να επιτευχθεί ο επιθυμητός αριθμός Froude.

- **Προετοιμασία αποδέκτη**

Στη συνέχεια αναδεύεται η κύρια δεξαμενή, ώστε ο αποδέκτης να είναι ομογενής, ενώ μετριέται με το YSI η αλατότητα και η θερμοκρασία του. Με τη βοήθεια και πάλι του ίδιου λογιστικού φύλλου και των σχέσεων (3.1) και (3.2) υπολογίζεται η πυκνότητα του αποδέκτη  $\rho_a$ .

- **Αναμονή κατάστασης ηρεμίας**

Η αναμονή διαρκεί 30 λεπτά, ώστε ο αποδέκτης να επέλθει σε κατάσταση ηρεμίας, και να αποφευχθεί εσωτερική κίνηση του νερού. Παράλληλα προετοιμάζεται η κάμερα και ο προβολέας.

- **Παροχέτευση φλέβας στον αποδέκτη**

Εφόσον έχει παρέλθει ο απαιτούμενος χρόνος αναμονής ανοίγοντας τον διακόπτη εισάγεται η φλέβα στην κύρια δεξαμενή η οποία έχει μεγαλύτερη πυκνότητα από αυτή του αποδέκτη. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η φλέβα να ανέρχεται σε ένα μέγιστο ύψος  $Z_{max}$ , έπειτα να αναδιπλώνεται προς τα κάτω σχεδόν μέχρι το ύψος του στομίου και τελικά η ροή να σταθεροποιείται και η φλέβα να ταλαντώνεται γύρω από ένα τερματικό ύψος  $Z$ . Η διαδικασία καταγράφεται από την κάμερα για 1' - 1.30'. Η σκιά της φλέβας είναι ορατή στο εμπρόσθιο μέρος της δεξαμενής όπου έχει τοποθετηθεί ημιδιαφανές χαρτί. Συγχρόνως προβάλλεται και ο κάναβος που έχει σχεδιαστεί με ισοδιάσταση 5cm X 5cm στο οπίσθιο μέρος της δεξαμενής καθιστώντας έτσι δυνατή τη μέτρηση του κατακόρυφου ύψους της φλέβας.

### 3.10.2 Περιγραφή πειράματος με τη μέθοδο PLIF

Τα βήματα που ακολουθούνται που ακολουθούνται για τη διεξαγωγή αυτών των πειραμάτων είναι παρόμοια. Στα πειράματα αυτά οι 2 πλευρές της δεξαμενής είναι καλυμμένες με μαύρο χαρτόνι και όλη η διάταξη είναι καλυμμένη με σκουρόχρωμα και κυρίως μαύρα υφάσματα ώστε να μην διέρχεται φως στη δεξαμενή. Τα βήματα που ακολουθούνται είναι τα εξής:

Κατά την πλήρωση της δεξαμενής προετοιμασίας του διαλύματος με νερό, μετά την εισαγωγή του αλατιού και εισάγεται στο διάλυμα μικρή ποσότητα Θειώδους Νατρίου  $Na_2SO_3$ . Το άλας αυτό εισάγεται για την εξουδετέρωση του χλωρίου που υπάρχει στο νερό. Εναλλακτικά, σε περίπτωση που δεν εισαχθεί η ουσία αυτή, η ροδαμίνη 6G αντιδρά με το χλώριο και αναλύεται με αποτέλεσμα να μην είναι ορατή κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Αφού, λοιπόν εισαχθεί το θειώδες νάτριο στο δοχείο προετοιμασίας του διαλύματος είναι απαραίτητη η ταχεία ανάδευση για την ομογενοποίηση του διαλύματος. Στη συνέχεια εισάγεται με την πιπέτα συγκεκριμένη ποσότητα του διαλύματος της ροδαμίνης. Το διάλυμα αναδεύεται και πάλι και στη συνέχεια τοποθετείται η βυθιζόμενη αντλία. Με τη βοήθεια της αντλίας το διάλυμα μεταφέρεται στο δοχείο της παροχέτευσης της φλέβας.

- **Πλήρωση της δεξαμενής παρασκευής διαλύματος και Παρασκευή διαλύματος**

Ακολουθείται ξανά η ίδια διαδικασία πλήρωσης δεξαμενής. Κατά την παρασκευή του διαλύματος ωστόσο, μετά την προσθήκη του άλατος προστίθεται μικρή ποσότητα θειώδους νατρίου (Sodium Sulfite- $Na_2SO_3$ ) ώστε να εξουδετερωθεί το χλώριο που περιέχεται στο νερό, καθώς αντιδρά με τη ροδαμίνη 6G και την εξουδετερώνει. Χωρίς την προσθήκη του θειώδους νατρίου είναι αδύνατη η οπτικοποίηση της φλέβας. Στη συνέχεια το διάλυμα αναδεύεται ταχέως, προστίθεται με χρήση πιπέτας ορισμένη ποσότητα ροδαμίνης και αναδεύεται ξανά.

- **Μέτρηση αλατότητας και θερμοκρασίας διαλύματος**

Όπως και στην περίπτωση των πειραμάτων που διεξήχθησαν με την τεχνική Shadowgraph γίνεται χρήση του οργάνου YSI30 για τη μέτρηση θερμοκρασίας και αλατότητας.

- **Πλήρωση της δεξαμενής διαλύματος**

Η βυθιζόμενη αντλία τοποθετείται στο δοχείο παρασκευής του διαλύματος και το διάλυμα μεταφέρεται στο 2<sup>ο</sup> δοχείο, το οποίο πληρώνεται μέχρι την ένδειξη των 50L.

- **Πλήρωση της κύριας δεξαμενής**

Μετά την πλήρωση της κύριας δεξαμενής μέχρι τη στάθμη της υπερχειλίσσης με καθαρό νερό, ακολουθεί η εξαέρωση του συστήματος μέσω του οποίου η φλέβα οδηγείται στη δεξαμενή. Μετά την εξαέρωση του συστήματος μέσω μιας βοηθητικής βαλβίδας, ρυθμίζεται η απαιτούμενη παροχή έτσι ώστε να επιτευχθεί ο επιθυμητός αριθμός Froude. Στη συνέχεια



προστίθεται και στην κύρια δεξαμενή θειώδες νάτριο και ακολουθεί ανάδευση του αποδέκτη.

- **Προετοιμασία αποδέκτη**

- **Αναμονή κατάστασης ηρεμίας**

Η αναμονή διαρκεί 30 λεπτά, ώστε ο αποδέκτης να επέλθει σε κατάσταση ηρεμίας, και να αποφευχθεί εσωτερική κίνηση του νερού. Παράλληλα προετοιμάζεται η κάμερα και η διάταξη του laser.

- **Παροχέτευση φλέβας στον αποδέκτη**

Όπως περιγράφεται και παραπάνω, με το άνοιγμα του διακόπτη η φλέβα εισάγεται στον αποδέκτη. Η φλέβα αρχικά κινείται ανοδικά και ανέρχεται στο μέγιστο ύψος  $Z_{max}$ , ενώ στη συνέχεια σταθεροποιείται στο τερματικό ύψος  $Z$ . Η κίνηση της φλέβας καταγράφεται και πάλι με χρήση ψηφιακής βιντεοκάμερας.

### 3.11 Περιγραφή της μεθοδολογίας Shadowgraph

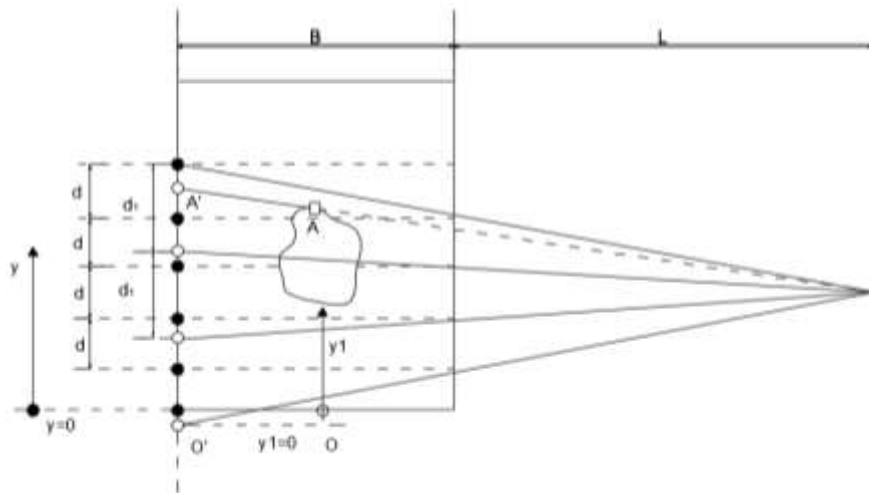
Το πειράματα του 1<sup>ου</sup> μέρους για τον υπολογισμό του μέγιστου ύψους οπτικοποιήθηκαν με τη μέθοδο Shadowgraph και την προβολή του διπλού κανάβου. Αναλυτικότερα, στην πλευρά της δεξαμενής που είναι πλησιέστερα στην φωτεινή πηγή είναι σχεδιασμένος κানাβος με ισοδιάσταση 5cm. Ο κানাβος αυτός προβάλλεται μαζί με τον κানাβο της αντίστοιχης εμπρόσθιας πλευράς και με τη φλέβα σε κοινό επίπεδο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ο γραμμικός μέσος όρος των δύο κανάβων να αποτελεί τον κানাβο στο επίπεδο της φλέβας. Συνεπώς, η μετρήση του ύψους  $Z$  μπορεί να ανάγεται στο επίπεδο της φλέβας.

Έστω  $L$  η απόσταση της φωτεινής πηγής από την πίσω πλευρά της δεξαμενής και  $B$  το πλάτος της και  $d$  η πραγματική ισοδιάσταση του κανάβου. Από ομοιότητα τριγώνων προκύπτει ότι η απόσταση που προβάλλεται στην εμπρόσθια πλευρά της δεξαμενής είναι ίση με:

$$d_1 = d \frac{B+L}{L} \quad (3.3)$$

Κατά αυτόν τον τρόπο η προβολή του ορίου της φλέβας προκύπτει σαν ημίθροισμα της προβολής των σημείων των δύο κανάβων. Το όριο της φλέβας στο παρακάτω σχήμα είναι το σημείο  $A$ , και θα δίνεται από τη σχέση  $A'$  η προβολή του στον εμπρόσθιο κানাβο και  $A''$  στον οπίσθιο κানাβο. Το ύψος της φλέβας με βάση το μέσο κানাβο θα δίνεται από τη σχέση:

$$(OA) = \frac{(O'A')+(O''A'')}{2} \quad (3.4)$$



Σχήμα 3.12 Προβολή οπίσθιου κανάβου

## 4. Αποτελέσματα - Επεξεργασία δεδομένων

Στα πλαίσια της μεταπτυχιακής εργασίας πραγματοποιήθηκαν συνολικά 4 πειράματα εκ των οποίων τα 28 μελετήθηκαν με τη μέθοδο Shadowgraph και 26 με την τεχνική PLIF. Στο σύνολο των πειραμάτων που μελετήθηκαν οι αριθμοί Richardson που προέκυψαν έχουν εύρος από 0.017 έως 0.07. Από τις μετρήσεις και των 54 πειραμάτων προέκυψαν τα διαγράμματα του τερματικού ύψους της φλέβας συναρτήσει του χρόνου, καθώς και τα αδιάστατα ύψη  $Z_{max}/l_M$  και  $Z/l_M$  συναρτήσει του αριθμού Richardson  $R_0$ . Από τα πειράματα που μελετήθηκαν με την τεχνική PLIF δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα των προφίλ της αδιάστατης συγκέντρωσης  $C/C_m$  και της έντασης της τύρβης  $C_{rms}/C_m$  συναρτήσει της αδιάστατης απόστασης  $r/z$ , όπου  $r$  η οριζόντια απόσταση από τον άξονα της φλέβας, καθ' ύψος της φλέβας ανά πέντε διαμέτρους  $d$ . Στη συνέχεια, τα διαγράμματα κατηγοριοποιήθηκαν ανά  $0.50 l_M$ ,  $0.75 l_M$ ,  $1.00 l_M$ ,  $1.25 l_M$ ,  $1.50 l_M$  και  $1.75 l_M$ . Έπειτα, δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα της μέσης αδιάστατης συγκέντρωσης  $C/C_0$  και της έντασης της τύρβης  $C_{rms}/C_m$  κατά μήκος του άξονα της φλέβας. Όμοια διαγράμματα δημιουργήθηκαν από τη χρονοσειρά της έντασης του κόκκινου χρώματος και συγκρίνονται με τα προηγούμενα. Τέλος, παρουσιάζεται το διάγραμμα της μέσης αδιάστατης αραιώσης ( $S l_Q / z$ ) συναρτήσει της αδιάστατης απόστασης και συγκρίνονται με αυτά των Spetsiotis & Papanicolaou (2008). Στη συνέχεια παρατίθενται δύο πίνακες με τις αρχικές συνθήκες των πειραμάτων.

**Πίνακας 4.1** Αρχικές συνθήκες πειραμάτων με τη μέθοδο Shadowgraph

ΠΕΙΡΑΜΑ	d (cm)	Q' (cm <sup>3</sup> /s)	W (cm/s)	ρa (kg/m <sup>3</sup> )	ρ0 (kg/m <sup>3</sup> )	IQ	IM	Fr	Z/l <sub>M</sub>	Z <sub>max</sub> /l <sub>M</sub>
31/10/2017- EXP193	0.5	9.24	47.07	998.73	1014.48	0.44	8.03	17.06	1.80	3.22
31/10/2017- EXP195	0.5	14.85	75.63	998.57	1014.48	0.44	12.84	27.27	2.21	2.91
31/10/2017- EXP196	0.5	17.65	89.91	998.82	1014.48	0.44	15.38	32.68	2.05	3.02
31/10/2017- EXP197	0.5	20.46	104.19	998.89	1014.48	0.44	17.87	37.96	2.08	-
3/11/2017- EXP199	0.5	14.85	75.63	998.77	1023.80	0.44	10.28	21.84	2.46	2.90
3/11/2017- EXP200	0.5	17.65	89.91	998.77	1023.80	0.44	12.22	25.97	2.06	2.61
22/11/2017- EXP201	0.5	9.24	47.07	999.27	1021.95	0.44	6.72	14.27	1.82	3.22
22/11/2017- EXP204	0.5	14.85	75.63	999.36	1021.95	0.44	10.81	22.97	1.72	2.61
23/11/2017- EXP205	0.5	9.24	47.07	999.17	1013.62	0.44	8.38	17.80	1.54	2.58
23/11/2017- EXP206	0.5	14.85	75.63	999.19	1013.62	0.44	13.47	28.62	1.98	2.61
23/11/2017- EXP207	0.5	20.46	104.19	999.26	1013.62	0.44	18.61	39.53	1.68	2.63
12/12/2017- EXP215	0.5	9.24	47.07	999.27	1013.89	0.44	8.33	17.70	1.82	2.97
12/12/2017- EXP216	0.5	12.05	61.35	999.32	1013.89	0.44	10.88	23.11	2.24	3.11
12/12/2017- EXP217	0.5	14.85	75.63	999.41	1013.89	0.44	13.45	28.58	1.82	2.52
12/12/2017- EXP218	0.5	17.65	89.91	999.41	1013.89	0.44	15.99	33.97	1.71	2.75
13/12/2017- EXP219	0.5	9.24	47.07	999.17	1026.42	0.44	6.14	13.04	1.94	3.15
13/12/2017- EXP220	0.5	12.05	61.35	999.19	1026.42	0.44	8.01	17.01	1.85	2.89
13/12/2017- EXP221	0.5	14.85	75.63	999.28	1026.42	0.44	9.88	21.00	1.83	2.79
13/12/2017- EXP222	0.5	17.65	89.91	999.35	1026.42	0.44	11.77	25.00	1.83	2.91
15/12/2017- EXP223	0.5	14.85	75.63	999.13	1024.89	0.44	10.14	21.55	1.83	2.82
15/12/2017- EXP224	0.5	17.65	89.91	999.24	1024.89	0.44	12.08	25.67	1.71	2.64
15/12/2017- EXP225	0.5	20.46	104.19	999.31	1024.89	0.44	14.02	29.79	1.69	2.77
15/12/2017- EXP226	0.5	23.26	118.47	999.40	1024.89	0.44	15.97	33.93	2.07	2.71
20/12/2017- EXP227	0.5	14.85	75.63	999.32	1026.11	0.44	9.95	21.14	1.85	2.89
20/12/2017- EXP228	0.5	17.65	89.91	999.41	1026.11	0.44	11.85	25.17	1.89	2.80
20/12/2017- EXP229	0.5	20.46	104.19	999.41	1026.11	0.44	13.73	29.17	1.82	2.77
20/12/2017- EXP230	0.5	23.26	118.47	999.49	1026.11	0.44	15.64	33.22	1.86	2.77
20/12/2017- EXP231	0.5	26.07	132.75	999.60	1026.11	0.44	17.56	37.30	1.73	2.71

**Πίνακας 4.2** Αρχικές συνθήκες πειραμάτων με τη τεχνική PLIF

ΠΕΙΡΑΜΑ	d (cm)	Q' (cm <sup>3</sup> /s)	W (cm/s)	$\rho_a$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_o$ (kg/m <sup>3</sup> )	C <sub>αποδ</sub> (μg/L)	C <sub>οροδ</sub> (μg/L)	I <sub>Q</sub>	I <sub>M</sub>	Fr	Z/I <sub>M</sub>	Z <sub>max</sub> /I <sub>M</sub>
22/5/2018-EXP263	0.5	14.85	75.63	998.0288	1019.103	0	37.5	0.44	11.18	23.76	1.69	2.57
22/5/2018-EXP265	0.5	20.46	104.19	998.0774	1019.103	0.09	37.5	0.44	15.43	32.78	1.61	2.58
22/5/2018-EXP267	0.5	26.07	132.75	998.1741	1019.103	0.24	37.5	0.44	19.71	41.87	1.66	-
18/7/2018-EXP268	0.5	12.75	64.92	996.8966	1020.612	1.785	37.5	0.44	9.06	19.24	3.35	-
18/7/2018-EXP269	0.5	16.25	82.77	996.8966	1020.612	1.855	37.5	0.44	11.55	24.53	1.81	2.70
18/7/2018-EXP270	0.5	23.26	118.47	997.0811	1020.612	2.055	37.5	0.44	16.60	35.26	2.01	2.64
19/7/2018-EXP272	0.5	10.36	52.78	996.7865	1028.053	1.785	42.85	0.44	6.44	13.67	1.78	2.70
19/7/2018-EXP273	0.5	14.85	75.63	996.8571	1028.053	1.87	42.85	0.44	9.23	19.61	1.68	2.63
19/7/2018-EXP275	0.5	20.46	104.19	996.9982	1028.053	1.99	42.85	0.44	12.75	27.09	1.54	2.36
19/7/2018-EXP277	0.5	26.07	132.75	997.2522	1028.053	2.19	42.85	0.44	16.32	34.66	1.79	2.79
19/7/2018-EXP279	0.5	31.67	161.31	997.5056	1028.053	2.44	42.85	0.44	19.91	42.31	1.94	-
23/7/2018-EXP280	0.5	7.84	39.93	996.6469	1014.817	0	37.5	0.44	6.35	13.48	1.76	-
23/7/2018-EXP281	0.5	12.05	61.35	996.7173	1014.817	0.03	37.5	0.44	9.77	20.76	1.72	3.54
23/7/2018-EXP283	0.5	14.85	75.63	996.7595	1014.817	0.126	37.5	0.44	12.06	25.62	1.69	2.89
23/7/2018-EXP285	0.5	17.65	89.91	996.999	1014.817	0.245	37.5	0.44	14.44	30.68	1.89	3.06
23/7/2018-EXP289	0.5	17.65	89.91	996.8582	1030.341	0	42.85	0.44	10.61	22.53	1.57	3.08
23/7/2018-EXP291	0.5	20.46	104.19	997.0693	1030.341	0.145	42.85	0.44	12.33	26.20	1.83	2.97
23/7/2018-EXP293	0.5	23.26	118.47	997.3506	1030.341	0.31	42.85	0.44	14.09	29.93	1.73	2.57
21/8/2018-EXP294	0.5	12.05	61.35	996.703	1024.728	1.785	42.85	0.44	7.89	16.76	1.75	3.08
21/8/2018-EXP295	0.5	13.45	68.49	996.7735	1024.728	1.85	42.85	0.44	8.82	18.73	1.77	2.87
21/8/2018-EXP296	0.5	13.45	68.49	996.844	1024.728	1.92	42.85	0.44	8.83	18.76	1.70	3.26
21/8/2018-EXP297	0.5	17.09	87.05	996.9145	1024.728	1.984	42.85	0.44	11.24	23.88	2.04	3.10
21/8/2018-EXP298	0.5	17.09	87.05	997.0554	1024.728	2.09	42.85	0.44	11.27	23.94	1.86	2.90
21/8/2018-EXP300	0.5	21.58	109.90	997.1258	1024.728	2.18	42.85	0.44	14.25	30.26	1.76	2.64
21/8/2018-EXP301	0.5	28.87	147.03	997.1258	1024.728	2.32	42.85	0.44	19.06	40.49	1.83	-

#### 4.1 Υπολογισμός μέγιστου ύψους $Z(t)$

Από το ψηφιακό υλικό που καταγράφηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος είναι δυνατόν να υπολογιστεί το τερματικό ύψος στο οποίο φτάνει η φλέβα σε κάθε χρονική στιγμή. Ο υπολογισμός αυτός επιτυγχάνεται μετά από κώδικα που καταστρώθηκε στο λογισμικό Matlab. Το βίντεο μετατρέπεται σε στιγμιότυπα (frames) και στη συνέχεια κάθε στιγμιότυπο αφαιρείται από το προηγούμενο δημιουργώντας έτσι μια νέα εικόνα η οποία ονομάζεται DDFm. Από την εικόνα αυτή εξετάζεται το τμήμα που περιέχει τη φλέβα. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω κάθε εικόνα αποτελείται από τα εικονοστοιχεία (pixels), όπου το κάθε εικονοστοιχείο (x,y) αντιστοιχεί σε μια τιμή που περιγράφεται από το συνδυασμό χρωμάτων, κόκκινο, πράσινο και μπλε. Σε κάθε διαφορά δύο στιγμιότυπων συγκρίνονται οι τιμές των εικονοστοιχείων του τμήματος που εξετάζεται με μια τιμή που έχει ορισθεί ως όριο. Το όριο αποτελεί τη μεταβλητή Thres και κυμαίνεται από 0.05 έως 0.20. Η σύγκριση αυτή γίνεται από το πάνω μέρος της εικόνας προς τα κάτω ανιχνεύοντας έτσι τις θέσεις (x,y) των pixels, οι τιμές των οποίων ξεπερνούν την τιμή του ορίου. Από τα σημεία αυτά επιλέγεται το υψηλότερο σημείο όπου ξεπερνά το όριο και θεωρείται η ανώτερη θέση της φλέβας. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται διαδοχικά για όλα τα στιγμιότυπα του βίντεο. Από τον κώδικα λαμβάνεται η θέση της φλέβας (x,y) για κάθε στιγμιότυπο frame του βίντεο.

Έχοντας πλέον τη θέση της φλέβας σε κάθε στιγμιότυπο δημιουργείται το διάγραμμα που απεικονίζει το τερματικό ύψος  $Z(\text{cm})$  συναρτήσεως του χρόνου  $t(\text{sec})$ . Ως χαρακτηριστικά σημεία στα διαγράμματα σημειώνονται το μέγιστο ύψος  $Z_{\text{max}}$  και το τερματικό ύψος  $Z$  γύρω από το οποίο σταθεροποιείται η ροή. Ταυτόχρονα, σημειώνονται το ελάχιστο και μέγιστο όριο γύρω από το οποίο ταλαντώνεται η φλέβα. Η διαδικασία αυτή εφαρμόζεται και στις δύο κατηγορίες πειραμάτων.

Ωστόσο πρέπει να σημειωθεί πως από την επεξεργασία της εικόνας τα αποτελέσματα αρχικά προκύπτουν σε πλήθος εικονοστοιχείων μετρούμενα από το στόμιο της φλέβας. Το πλήθος των pixels ανάγεται σε πραγματικά cm με διαφορετικό τρόπο ωστόσο για κάθε είδος πειράματος.

Όσον αφορά στην 1<sup>η</sup> σειρά πειραμάτων εισάγεται στο Matlab το βίντεο και εξάγεται από αυτό μια αρχική εικόνα της δεξαμενής όπου δεν έχει εισέλθει σε αυτή ακόμα η φλέβα. Στην εικόνα αυτή σχεδιάζονται οι προβολές των εμπρόσθιων και οπίσθιων κανάβων με μπλε και κόκκινο χρώμα αντίστοιχα. Από αυτούς τους δύο δημιουργείται ο μέσος κανάβος, ο οποίος απεικονίζεται με κίτρινο χρώμα και βρίσκεται στην πραγματικότητα στο επίπεδο της φλέβας (Σχ. 4.3). Στη συνέχεια μετρίεται το ύψος του κανάβου αυτού σε pixels και αντιστοιχίζεται σε 35cm που είναι στην πραγματικότητα. Από την αντιστοιχία αυτή προκύπτει ο συντελεστής  $f$  με τον οποίο πολλαπλασιάζονται τα αποτελέσματα και μετατρέπονται σε cm.

Στη 2<sup>η</sup> σειρά πειραμάτων, ωστόσο, δεν μπορεί να ακολουθηθεί η διαδικασία Shadowgraph και του μέσου κανάβου. Για τον λόγο αυτό μετρήθηκε το πλάτος του σωλήνα πάνω στον οποίο εφαρμόζεται το ακροφύσιο με παχύμετρο το οποίο προέκυψε ίσο με 6.07cm. Το ίδιο πλάτος μετράται σε pixels σε εικόνα η οποία έχει εξαχθεί από το λογισμικό Matlab, η οποία αφορά χρονική στιγμή πριν την έναρξη του πειράματος. Συνεπώς, υπολογίζεται και σε αυτή την περίπτωση ο συντελεστής  $f$  που πολλαπλασιάζει τον αριθμό των pixels μετατρέποντάς τα σε cm. Οι κώδικες που χρησιμοποιήθηκαν για το μέγιστο ύψος και το σχεδιασμό των κανάβων παρουσιάζονται στο παράρτημα. Στη συνέχεια ακολουθούν στιγμιότυπα και από τα

δύο είδη πειραμάτων, ενώ στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι αρχικές τους συνθήκες και τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

**Πίνακας 4.3** Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00195

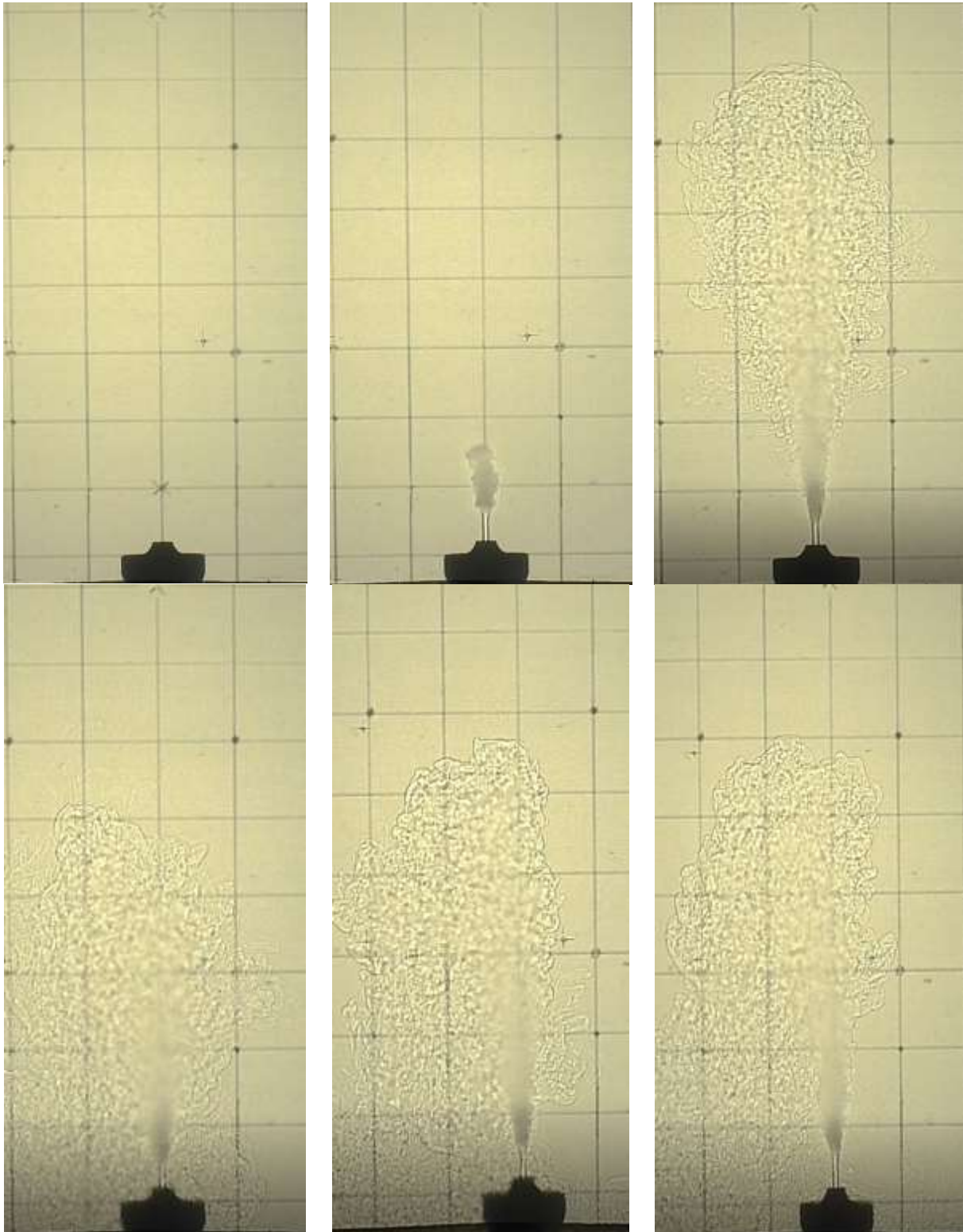
<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: 00195-ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 31/10/17</b>						
<b>T<sub>a</sub> (°C)</b>	<b>S<sub>a</sub> (ppt)</b>	<b>ρ<sub>a</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>T<sub>0</sub> (°C)</b>	<b>S<sub>0</sub> (ppt)</b>	<b>ρ<sub>0</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Q (l/h)</b>
20	0.5	998.570	17.6	21.9	1014.482	60
<b>W (cm/s)</b>	<b>Δρ/ρ<sub>0</sub></b>	<b>g<sub>0</sub>' (cm/s<sup>2</sup>)</b>	<b>M (cm<sup>4</sup>/s<sup>2</sup>)</b>	<b>B (cm<sup>4</sup>/s<sup>3</sup>)</b>	<b>I<sub>Q</sub></b>	<b>I<sub>M</sub></b>
75.629	0.0156	15.381	1123.097	228.413	0.443	12.836
<b>R<sub>0</sub></b>	<b>F<sub>0</sub></b>	<b>Z<sub>max</sub> (cm)</b>	<b>t<sub>max</sub> (sec)</b>	<b>t<sub>0</sub> (sec)</b>	<b>Z<sub>min</sub> (cm)</b>	<b>t<sub>min</sub> (sec)</b>
0.0345	27.271	37.404	18.852	7.941	21.641	36.136
<b>Z<sub>1</sub> (cm)</b>	<b>t<sub>1</sub> (sec)</b>	<b>Z (cm)</b>	<b>t<sub>end</sub>(sec)</b>	<b>Thres</b>	<b>lim<sub>max</sub> (cm)</b>	<b>lim<sub>min</sub> (cm)</b>
28.587	42.342	28.305	83.283	0.07	16.134	12.411

**Πίνακας 4.4** Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00263

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: 00263-ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 22/05/18</b>						
<b>T<sub>a</sub> (°C)</b>	<b>S<sub>a</sub> (ppt)</b>	<b>ρ<sub>a</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>T<sub>0</sub> (°C)</b>	<b>S<sub>0</sub> (ppt)</b>	<b>ρ<sub>0</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Q (l/h)</b>
22.5	0.5	998.028	25.5	31.2	1019.103	60
<b>W (cm/s)</b>	<b>Δρ/ρ<sub>0</sub></b>	<b>g<sub>0</sub>' (cm/s<sup>2</sup>)</b>	<b>M (cm<sup>4</sup>/s<sup>2</sup>)</b>	<b>B (cm<sup>4</sup>/s<sup>3</sup>)</b>	<b>I<sub>Q</sub></b>	<b>I<sub>M</sub></b>
75.629	0.0206	20.261	1123.097	300.877	0.443	11.184
<b>R<sub>0</sub></b>	<b>F<sub>0</sub></b>	<b>Z<sub>max</sub> (cm)</b>	<b>t<sub>max</sub> (sec)</b>	<b>t<sub>0</sub> (sec)</b>	<b>Z<sub>min</sub> (cm)</b>	<b>t<sub>min</sub> (sec)</b>
0.039	23.761	28.752	6.439	0.0033	16.612	15.849
<b>Z<sub>1</sub> (cm)</b>	<b>t<sub>1</sub> (sec)</b>	<b>Z (cm)</b>	<b>t<sub>end</sub>(sec)</b>	<b>Thres</b>	<b>lim<sub>max</sub> (cm)</b>	<b>lim<sub>min</sub> (cm)</b>
21.724	22.489	18.904	92.225	0.2	21.7241	15.654

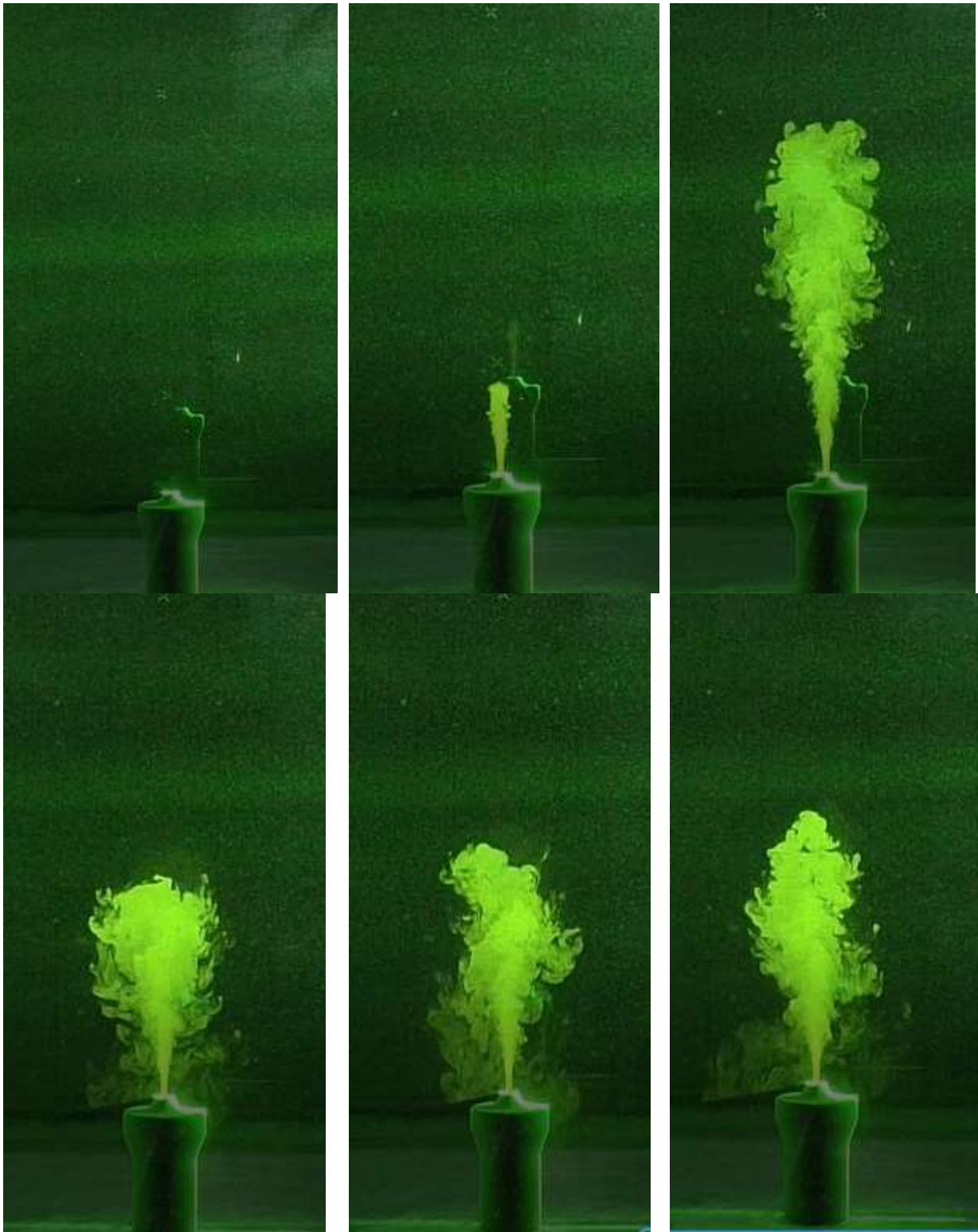
Στα σχήματα 4.1 και 4.2 παρουσιάζονται στιγμιότυπα για τα δύο πειράματα όπου απεικονίζεται η εξέλιξη της ροής της φλέβας. Αναλυτικότερα, και στις δύο περιπτώσεις στην 1<sup>η</sup> εικόνα παρουσιάζεται η δεξαμενή πριν την εισαγωγή της φλέβας, ενώ στην αμέσως επόμενη εικόνα απεικονίζεται η φλέβα λίγα δευτερόλεπτα μετά την είσοδο της στη δεξαμενή. Και στις δύο περιπτώσεις μπορούμε να διακρίνουμε τόσο τον πυρήνα εκεί που η ροή είναι στρωτή χωρίς την παρουσία τύρβης, όσο και την περιοχή μετάβασης της ροής σε τυρβώδη. Στην 3<sup>η</sup> φωτογραφία απεικονίζεται η φλέβα όταν φτάνει στο μέγιστο ύψος Z<sub>max</sub> και στη συνέχεια αναδιπλώνεται προς τα πίσω μέχρι το ελάχιστο ύψος, όπως απεικονίζεται στην αμέσως επόμενη φωτογραφία. Στη συνέχεια η φλέβα ταλαντώνεται με μικρές διακυμάνσεις γύρω από το τερματικό ύψος Z. Η τελευταία εικόνα απεικονίζει τη φλέβα στην ακραία θέση ταλάντωσής της. Και στις δύο περιπτώσεις είναι ευδιάκριτο πως ο άξονας της φλέβας

συνεχώς αποκλίνει από την κατακόρυφο, κυρίως λόγω αστάθειας της ροής που επιστρέφει προς τα πίσω.



Σχήμα 4.1 Στιγμιότυπα πειράματος Exp-00195

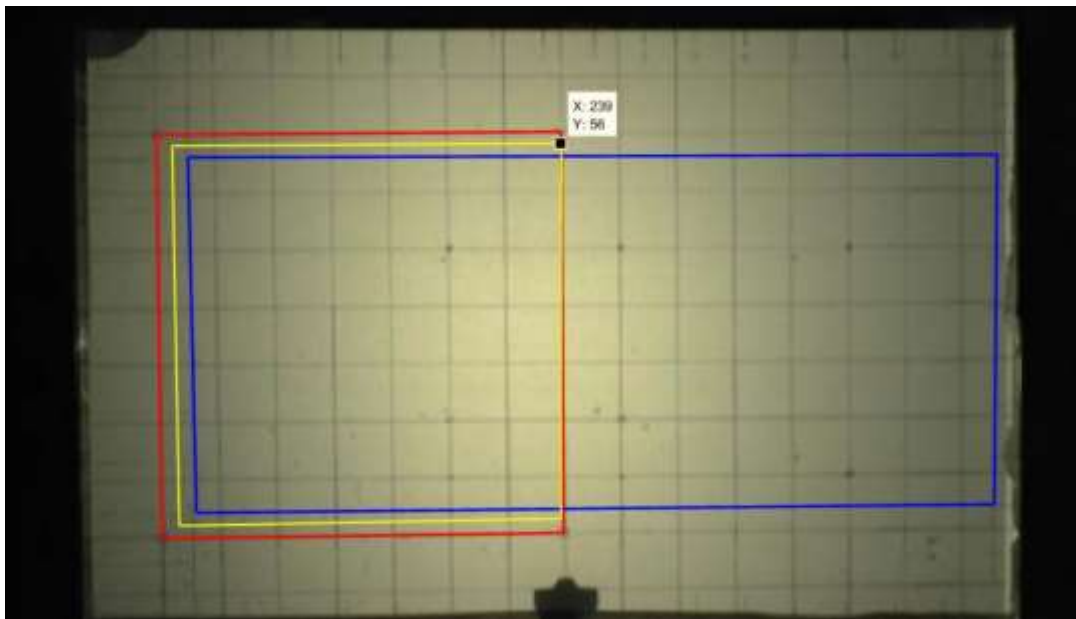




**Σχήμα 4.2** Στιγμιότυπα πειράματος Exr-00263

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, γίνεται επεξεργασία του ψηφιακού υλικού στο λογισμικό Matlab. Ωστόσο, πριν την παραγωγή των διαγραμμάτων υπολογίζεται η αντιστοιχία pixels σε cm. Για την 2<sup>η</sup> σειρά πειραμάτων μετριέται αντί του κανάβου το πλάτος του στομίου που αντιστοιχίζεται με pixels κάνοντας χρήση του ίδιου λογισμικού. Για την περίπτωση της τεχνικής Shadowgraph δημιουργείται πρώτα ο μέσος κανάβος όπως παρουσιάζεται στο

σχήμα 4.3. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται ο οπίσθιος κανάβος που προβάλλεται στη εμπρόσθια όψη της δεξαμενής. Με μπλέ χρώμα προβάλλεται ο εμπρόσθιος κανάβος και με κίτρινο χρώμα ο μέσος κανάβος. Οι συντεταγμένες των κορυφών σε pixels παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Το ύψος του μέσου κανάβου είναι ίσο με 131px το οποίο αντιστοιχεί στην πραγματικότητα σε 35 cm, δηλαδή κάθε pixel είναι ίσο με 2.67 mm. Θεωρήσαμε ότι αυτού του είδους η ακρίβεια είναι επαρκής για τους σκοπούς του πειράματος. Η camera είχε δυνατότητα πλήρους ανάλυσης (full high definition) όπου η ακρίβεια θα ήταν καλύτερη από 1 px/mm, αλλά η επεξεργασία των δεδομένων ήταν εξαιρετικά αργή σε αυτή την ανάλυση της φωτογραφίας. Η 1<sup>η</sup> στήλη του πίνακα που αναφέρεται ως DDF limits αποτελεί τις συντεταγμένες της περιοχής μελέτης.



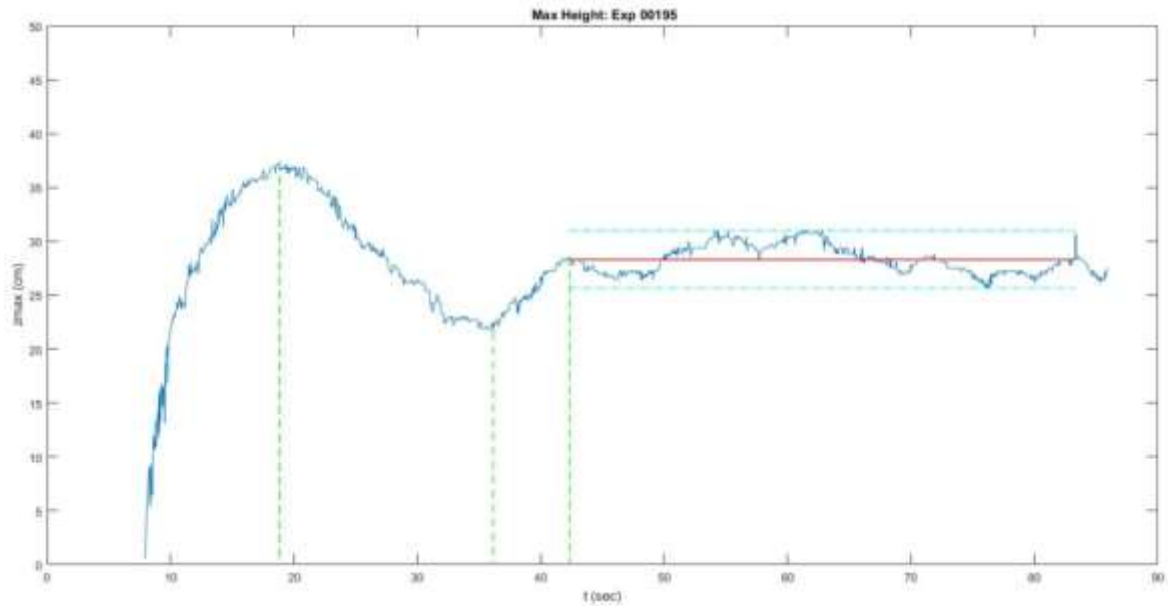
Σχήμα 4.3 Δημιουργία μέσου κανάβου

Πίνακας 4.5 Συντεταγμένες κανάβων

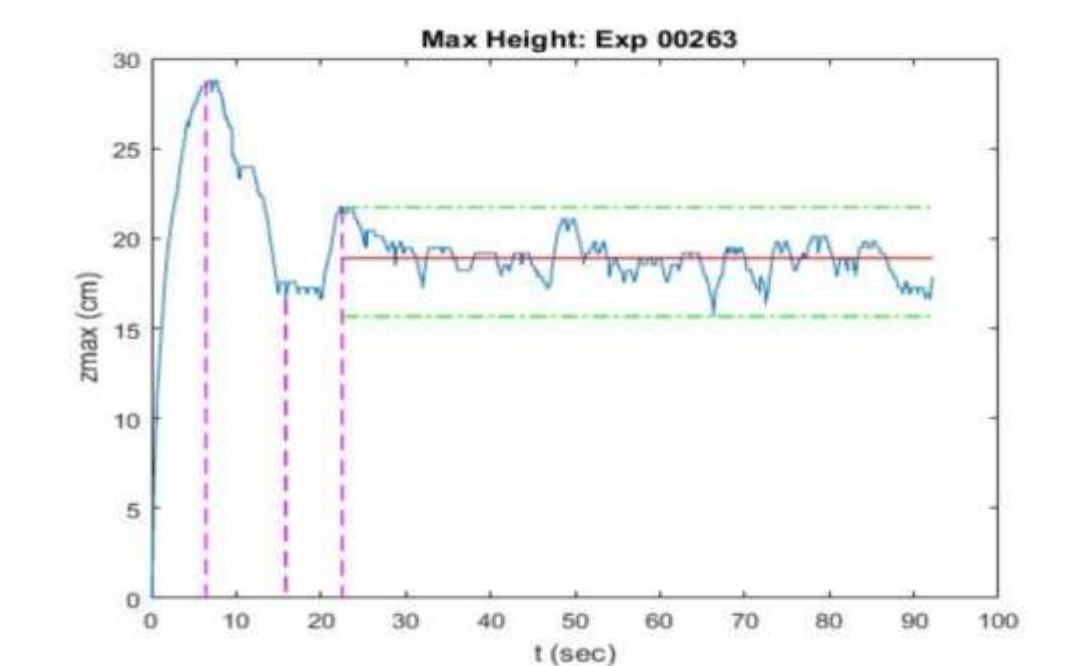
EXP: 00195													
DDFm limits		BACK GRID				FRONT GRID				MID GRID			
<b>I<sub>min</sub></b>	32	<b>x<sub>b1</sub></b>	98	<b>y<sub>b1</sub></b>	53	<b>x<sub>f1</sub></b>	109	<b>y<sub>f1</sub></b>	61	<b>x<sub>m1</sub></b>	103.5	<b>y<sub>m1</sub></b>	57
<b>I<sub>max</sub></b>	208	<b>x<sub>b2</sub></b>	239	<b>y<sub>b2</sub></b>	52	<b>x<sub>f2</sub></b>	391	<b>y<sub>f2</sub></b>	60	<b>x<sub>m2</sub></b>	239	<b>y<sub>m2</sub></b>	56
<b>J<sub>min</sub></b>	221	<b>x<sub>b3</sub></b>	240	<b>y<sub>b3</sub></b>	192	<b>x<sub>f3</sub></b>	390	<b>y<sub>f3</sub></b>	182	<b>x<sub>m3</sub></b>	239	<b>y<sub>m3</sub></b>	187
<b>J<sub>max</sub></b>	260	<b>x<sub>b4</sub></b>	100	<b>y<sub>b4</sub></b>	194	<b>x<sub>f4</sub></b>	112	<b>y<sub>f4</sub></b>	185	<b>x<sub>m4</sub></b>	106	<b>y<sub>m4</sub></b>	189.5

Τελικά, έχοντας πλέον όλα τα απαραίτητα δεδομένα δημιουργείται το διάγραμμα  $Z(t)$ , που περιγράφει όλη την κίνηση και την ταλάντωση της φλέβας. Σημειώνεται ότι το τερματικό ύψος  $Z$  υπολογίζεται ως η μέση τιμή από τη στιγμή που σταθεροποιείται η ροή και μετά και απεικονίζεται στα διαγράμματα με κόκκινο χρώμα. Με γαλάζιο και πράσινο χρώμα απεικονίζονται το μέγιστο και ελάχιστο εύρος ταλάντωσης της φλέβας. Συγχρόνως, σημειώνονται οι χρονικές στιγμές  $t_{max}$  όπου εμφανίζεται το μέγιστο ύψος  $Z_{max}$ , το ελάχιστο

$Z_{min}$ , καθώς και ως  $t_1$  εκεί όπου θεωρείται πως ξεκινά η σταθεροποίηση της ροής  $Z_1$ . Οι συμβολισμοί σε συνδυασμό με το διαγράμμα παρουσιάζονται αναλυτικά στο παράρτημα.



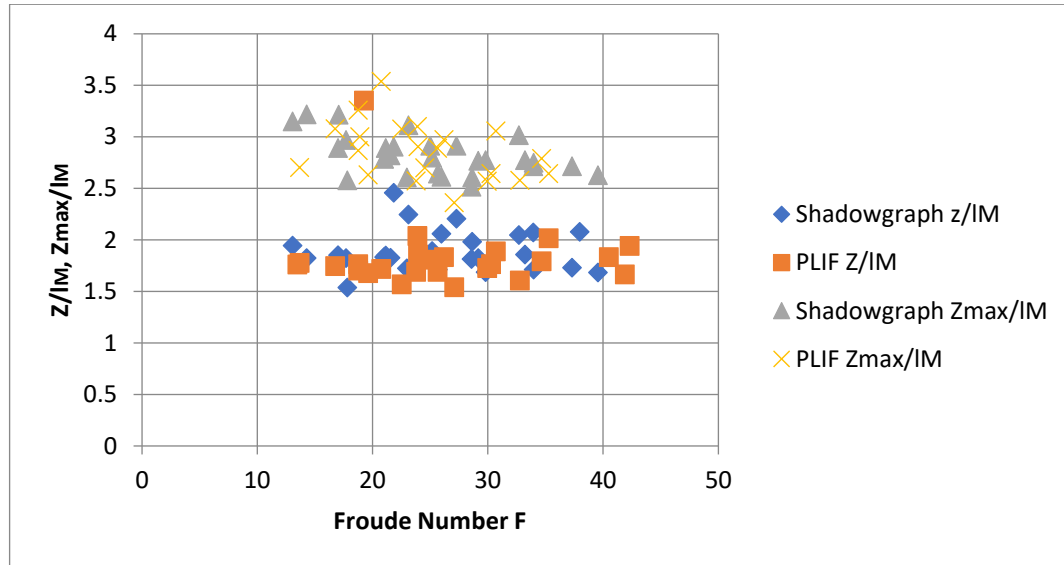
**Σχήμα 4.4** Πείραμα 00195-Ύψος της φλέβας συναρτήσει του χρόνου  $Z(t)$ .



**Σχήμα 4.5** Πείραμα 00263-Ύψος της φλέβας συναρτήσει του χρόνου  $Z(t)$ .

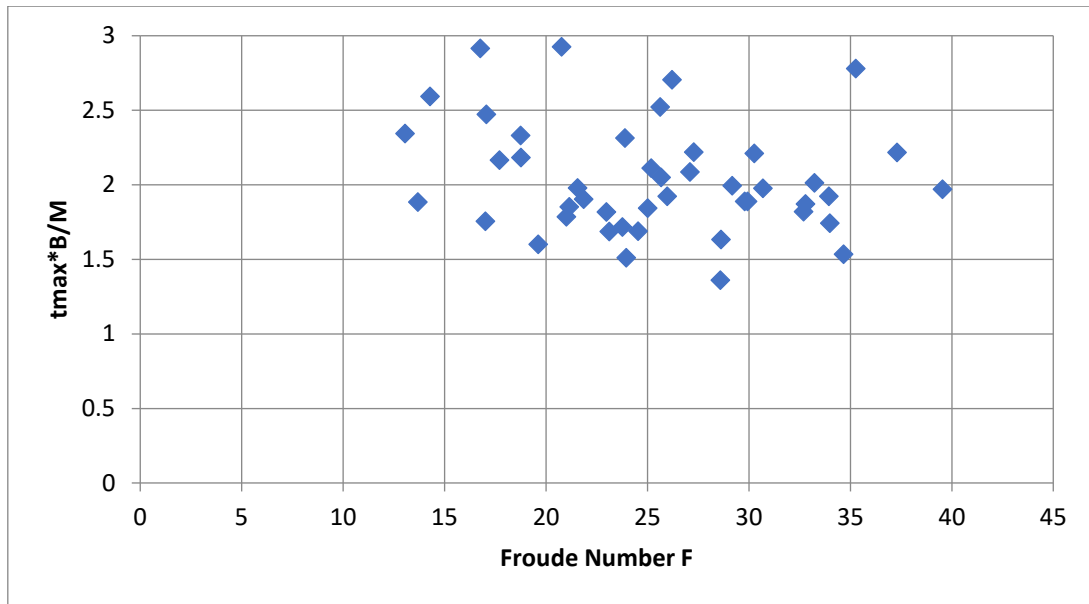
Συνολικά για όλα τα πειράματα δημιουργούνται τα διαγράμματα των αδιάστατων υψών  $Z_{max}/l_M$  και  $Z/l_M$  συναρτήσει του αριθμού Froude. Από το παρακάτω διάγραμμα, λοιπόν, γίνεται αντιληπτό ότι το τερματικό ύψος  $Z$  στην περίπτωση των πειραμάτων που

διεξήχθησαν με την τεχνική PLIF είναι μικρότερο από  $2 l_M$  και μάλιστα περίπου ίσο με  $1.70 l_M$ . Ωστόσο τα πειράματα όπου εφαρμόστηκε η τεχνική του Shadowgraph παρουσιάζουν περισσότερες τιμές μεταξύ  $1.70$  και  $2.00 l_M$ . Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και στην περίπτωση του μέγιστου ύψους  $Z_{max}$  το οποίο κυμαίνεται καθ' όμοιο τρόπο και για τις δυο σειρές πειραμάτων μεταξύ  $2.50$  και  $3.00 l_M$ .

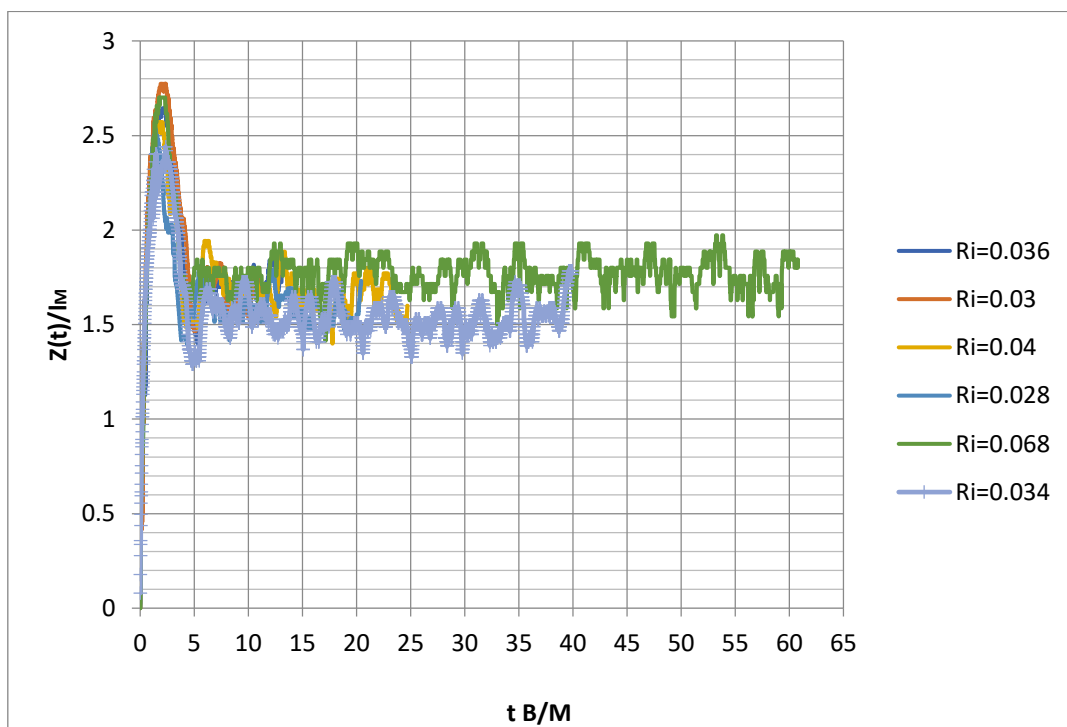


**Σχήμα 4.6** Αδιάστατα ύψη  $Z_{max}/l_M$  και  $Z/l_M$  συναρτήσει του αριθμού  $F_0$  για πειράματα με την τεχνική Shadowgraph και την PLIF.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα του αδιάστατου χρόνου  $t_{max} B/M$ , όπου παρουσιάζεται το μέγιστο ύψος συναρτήσει του αριθμού  $F_0$ . Τόσο από το διάγραμμα αυτό όσο και από το επόμενο γίνεται αντιληπτό ότι το μέγιστο ύψος παρουσιάζεται κυρίως γύρω από αδιάστατο χρόνο 2.5 έως 3 με την πλειονότητα των μετρήσεων να κυμαίνεται γύρω από το 2.50. Το ίδιο συμπέρασμα συνάγεται και από το διάγραμμα (Σχ 4.8) όπου παρουσιάζεται το αδιάστατο μέγιστο ύψος συναρτήσει του αδιάστατου χρόνου. Και στην περίπτωση αυτή επισημαίνεται ότι το μέγιστο ύψος εμφανίζεται για αδιάστατο χρόνο ίσο με 2.50.



Σχήμα 4.7 Αδιάστατος χρόνος ( $t_{\max} B/M$ ) συναρτήσει του αριθμού Froude.



Σχήμα 4.8 Αδιάστατο ύψος της φλέβας  $Z(t)/l_m$  συναρτήσει του αδιάστατου χρόνου  $t B/M$

#### 4.2 Υπολογισμός μέσης εικόνας και χρονοσειράς έντασης κόκκινου χρώματος

Για τον υπολογισμό της μέσης συγκέντρωσης και της έντασης της τύρβης επεξεργάζονται τα πειράματα της 2<sup>ης</sup> σειράς που διεξήχθησαν με τη μεθοδολογία PLIF. Αρχικά εισάγεται το βίντεο στο λογισμικό Matlab, το οποίο μετατρέπεται σε στιγμιότυπα και από τα οποία υπολογίζεται η μέση εικόνα μετά τη χρονική στιγμή όπου σταθεροποιείται η ροή γύρω από το τερματικό ύψος. Η μέση εικόνα υπολογίζεται ως το άθροισμα όλων αυτών των στιγμιότυπων

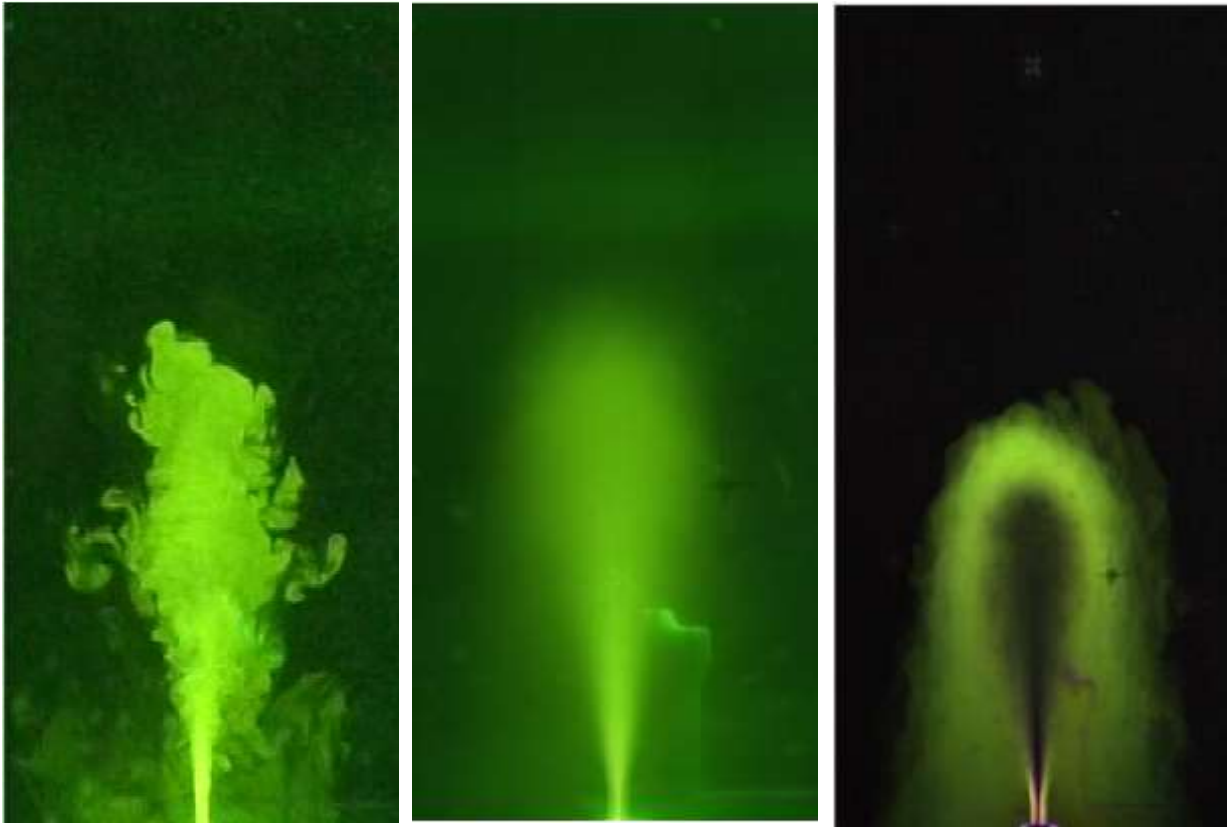
προς το αντίστοιχο πλήθος τους. Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, επιλέγεται η υπό-εικόνα που αντιστοιχεί στο κόκκινο χρώμα ώστε από την ένταση που εκπέμπει η ροδαμίνη όταν διεγείρεται από μονοχρωματική ακτινοβολία να υπολογιστεί η συγκέντρωση. Τα αποτελέσματα της μέσης εικόνας μεταφέρονται στο excel και δημιουργούνται τα διαγράμματα της αδιάστατης μέσης αραίωσης στον άξονα της φλέβας ( $S_c I_Q/z$ ) συναρτήσει του  $z/l_M$ , καθώς και η μέση αδιάστατη συγκέντρωση  $C/C_m$  εγκάρσια στη φλέβα για διάφορες τιμές του  $z/D$  καθώς και η αδιάστατη συγκέντρωση κατά μήκος του άξονα της φλέβας  $C_m/C_0$ . Ίδια διαδικασία ακολουθείται και για τον υπολογισμό της τυπικής απόκλισης της εικόνας, χρησιμοποιώντας ξανά το λογισμικό Matlab, ενώ στη συνέχεια δημιουργούνται τα αντίστοιχα διαγράμματα της έντασης της τύρβης  $C_{rms}/C_m$  εγκάρσια στη φλέβα και κατά μήκος του άξονα της φλέβας.

Ωστόσο στην περίπτωση της μέσης συγκέντρωσης της φλέβας, που προκύπτει από τη χρονοσειρά του κόκκινου χρώματος η διαδικασία διαφέρει. Στην περίπτωση αυτή η ένταση του κόκκινου χρώματος κατά μήκος του άξονα υπολογίζεται σε κάθε στιγμιότυπο, από τη χρονική στιγμή που σταθεροποιείται η ροή και μετά. Τα δεδομένα στη συνέχεια μεταφέρονται στο excel και εκεί υπολογίζεται η μέση χρονικά συγκέντρωση και από αυτή η αντίστοιχη τυπική απόκλιση.

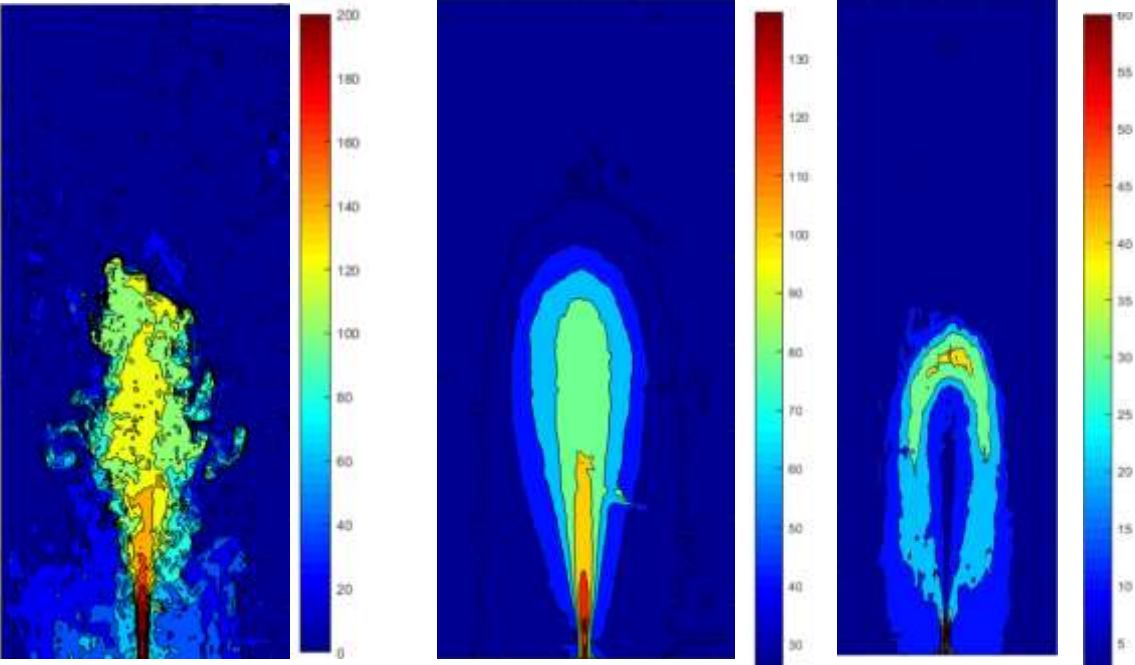
Οι κώδικες που καταστρώθηκαν για τις παραπάνω διαδικασίες παρουσιάζονται εκτενώς στο παράρτημα.

#### *4.2.1 Μέση Εικόνα*

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το πείραμα 00263 που αναφέρεται και στην παραπάνω ενότητα. Αρχικά παρουσιάζεται μια εικόνα ενός στιγμιότυπου της φλέβας, η μέση εικόνα και η τυπική απόκλιση αυτής. Έπειτα παρουσιάζονται οι χρωματικοί χάρτες των εικόνων αυτών, όπου ανάλογα με την χρωματική διαβάθμιση απεικονίζεται η ένταση του κόκκινου χρώματος.



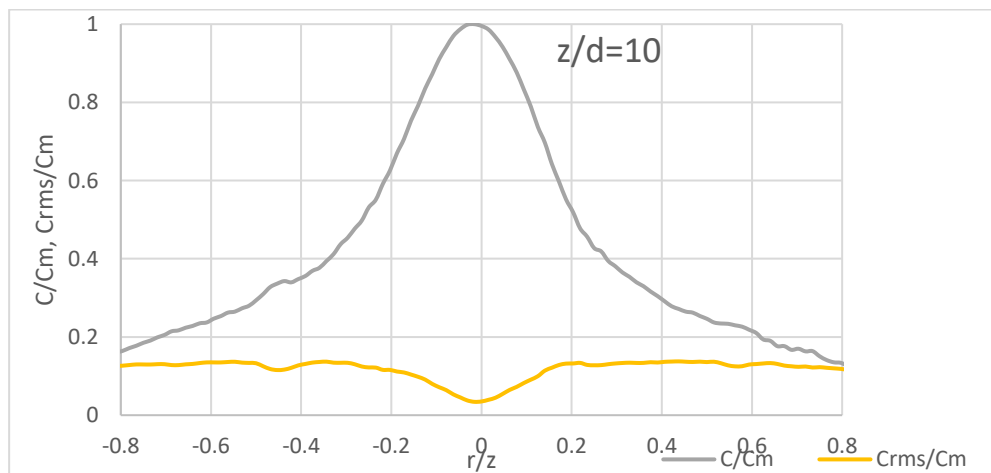
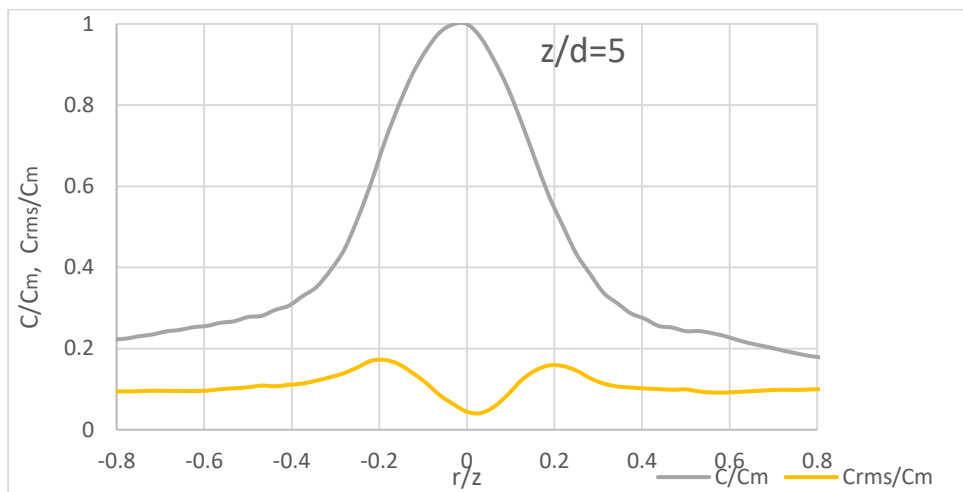
**Σχήμα 4.9** Στιγμιότυπο  $t = 110$  sec, μέση εικόνα μετά τη σταθεροποίηση της ροής, αντίστοιχη rms εικόνα.



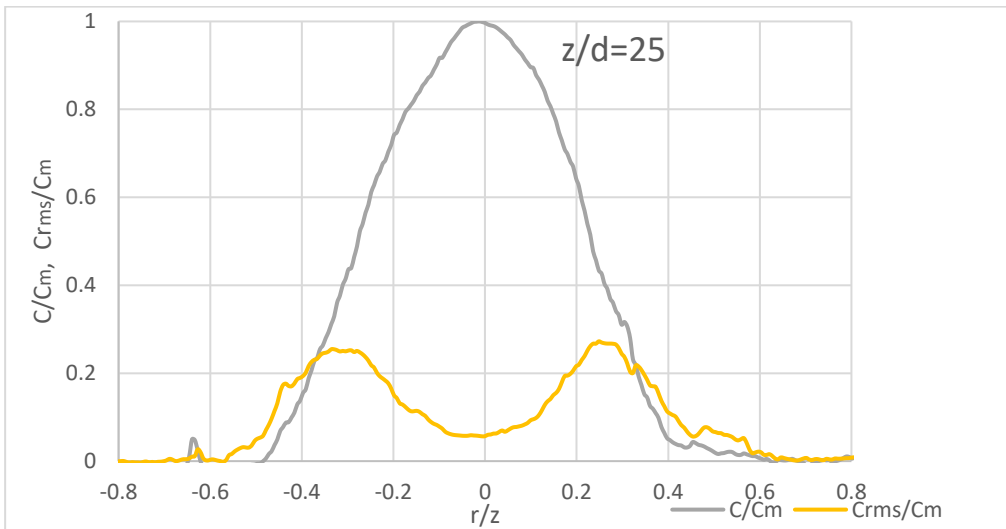
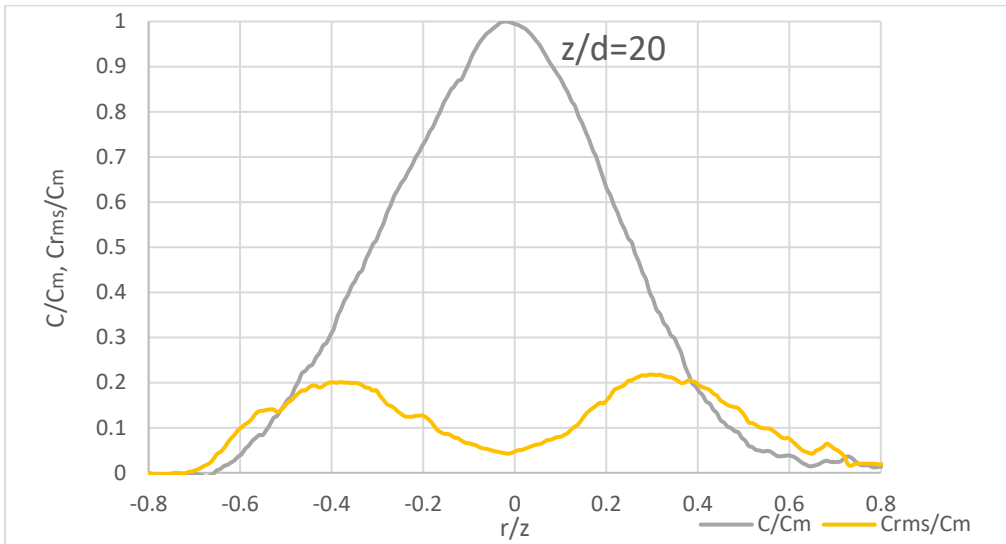
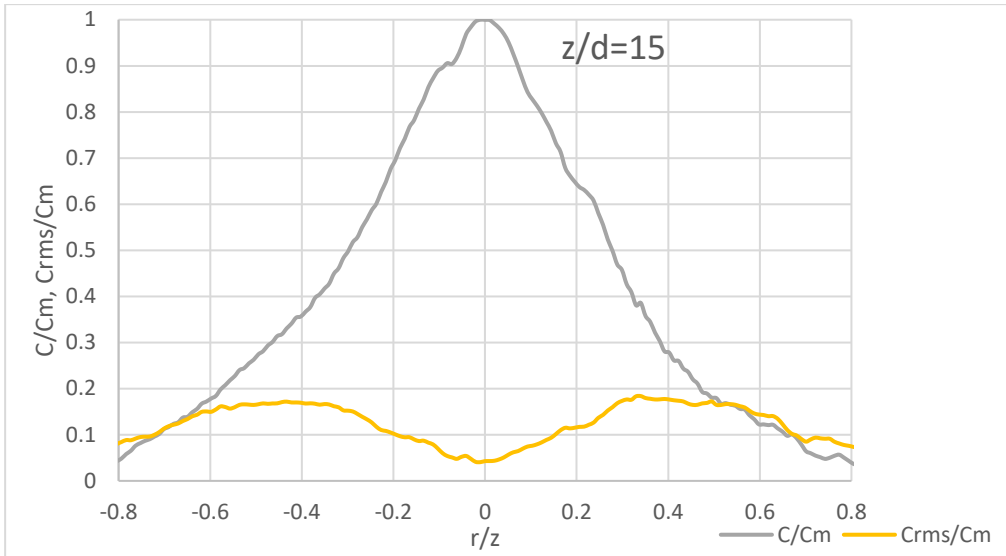
**Σχήμα 4.10** Χρωματικοί χάρτες της έντασης τους κόκκινου χρώματος ,στιγμιότυπο  $t = 110$  sec, μέση εικόνα μετά τη σταθεροποίηση της ροής, αντίστοιχη rms εικόνα.

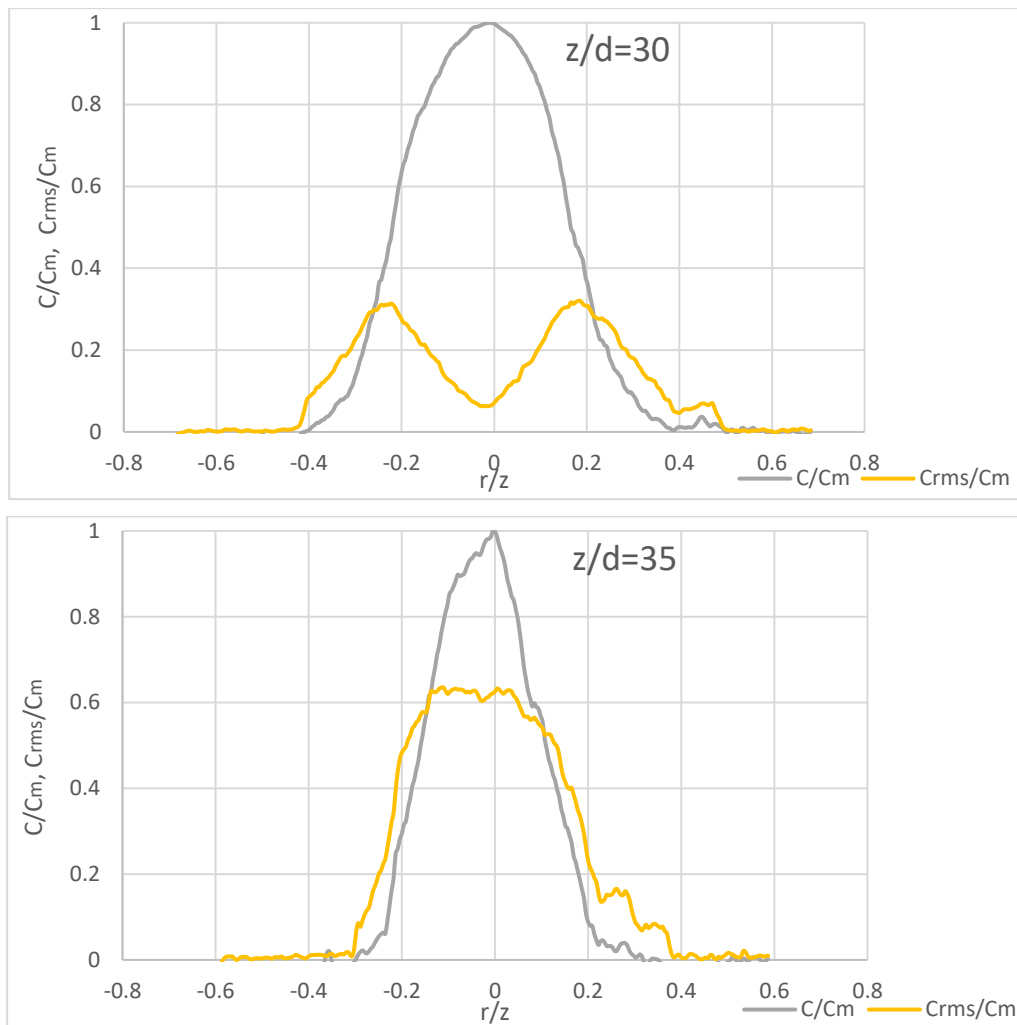
Από τη μέση και την rms εικόνα, εξάγονται τα διαγράμματα της αδιάστατης μέσης συγκέντρωσης  $C/C_m$  και της έντασης της τύρβης  $C_{rms}/C_m$  καθ' ύψος της φλέβας ανά 5 διαμέτρους.

Από τα σχήματα που ακολουθούν γίνεται αντιληπτό οι κορυφές του διαγράμματος της έντασης τύρβης πλησιάζουν μεταξύ τους όσο το ύψος της φλέβας πλησιάζει στο τερματικό. Στο μέσο ύψος μάλιστα οι κορυφές είναι πλέον ενωμένες, η τιμή της έντασης τύρβης αυξάνεται ενώ αντίστοιχα η μέση αδιάστατη συγκέντρωση μειώνεται. Επίσης παρατηρείται ότι όσο πιο κοντά βρισκόμαστε στον πυρήνα η αδιάστατη συγκέντρωση και η ένταση της τύρβης έχουν μεγαλύτερο εύρος, ενώ όσο απομακρυνόμαστε από αυτόν το εύρος μειώνεται. Σε απόσταση 5 διαμέτρων από το στόμιο το προφίλ της συγκέντρωσης παρουσιάζει εύρος ίσο με 0.8 ενώ σε απόσταση 35 διαμέτρων έχει την τιμή 0.2.







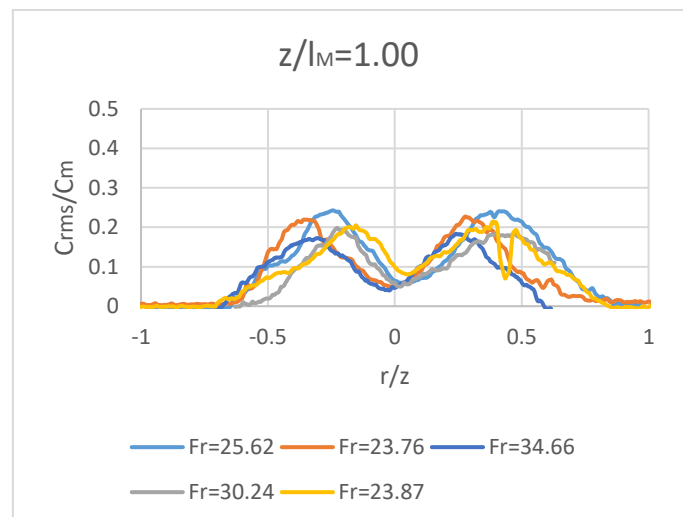
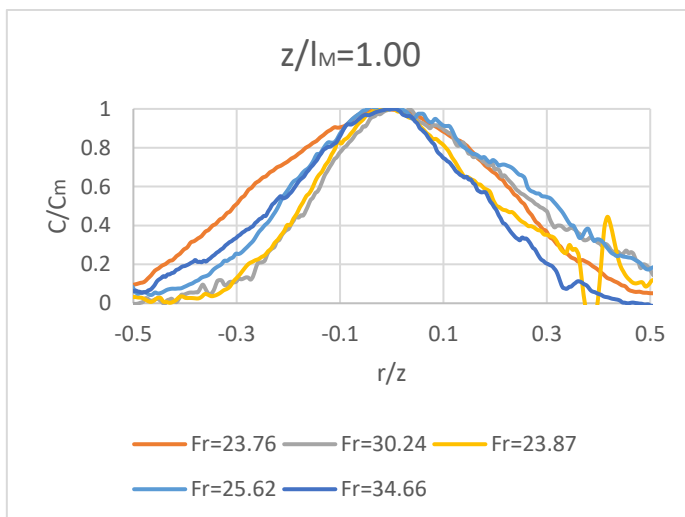
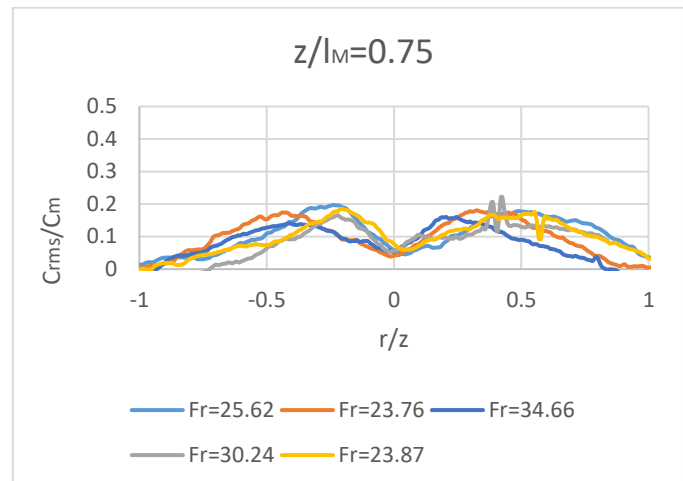
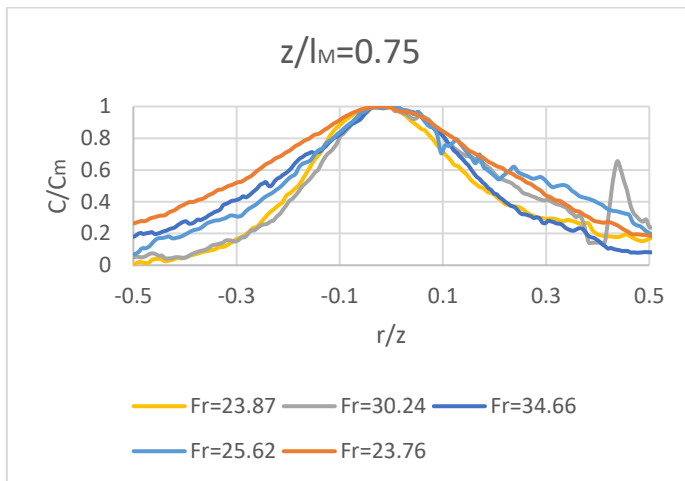
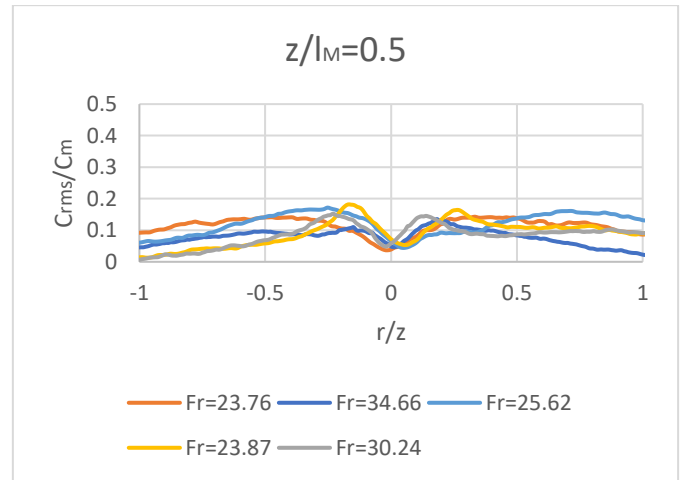
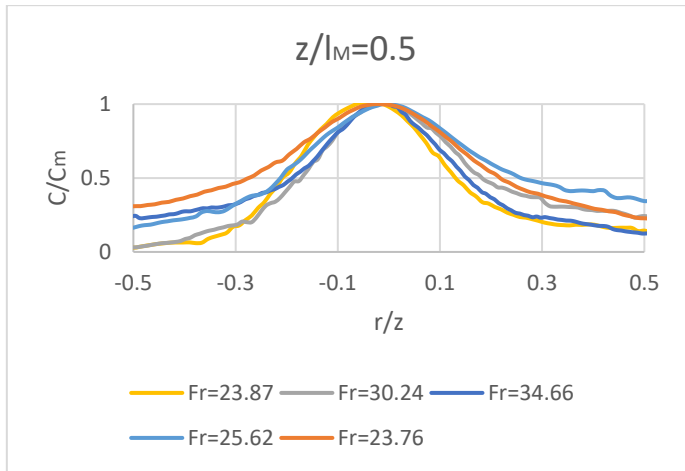


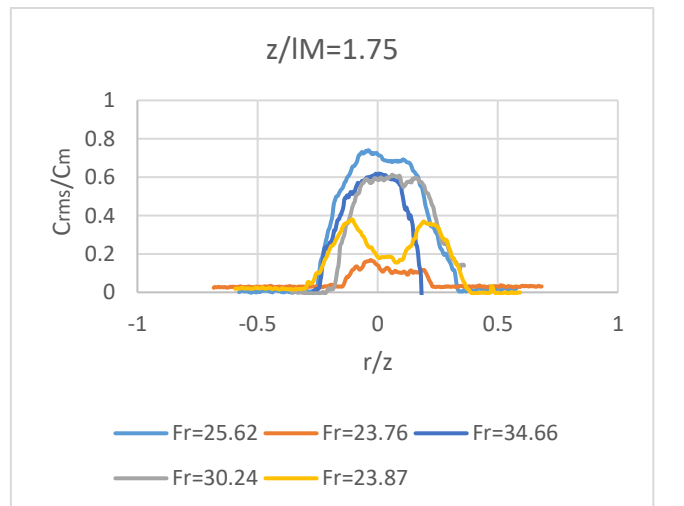
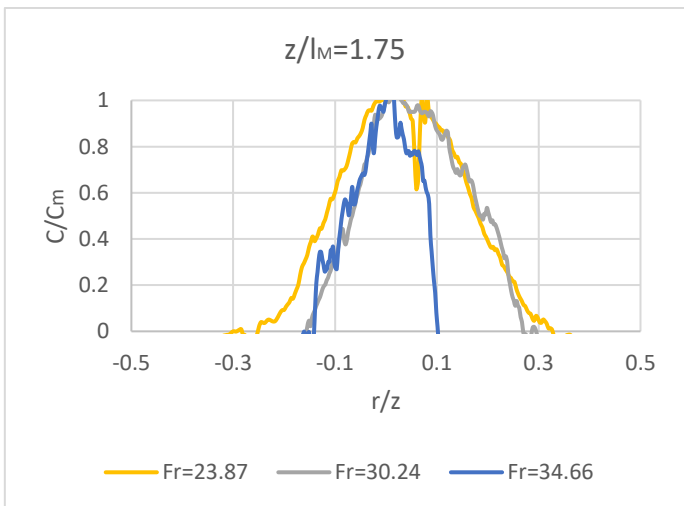
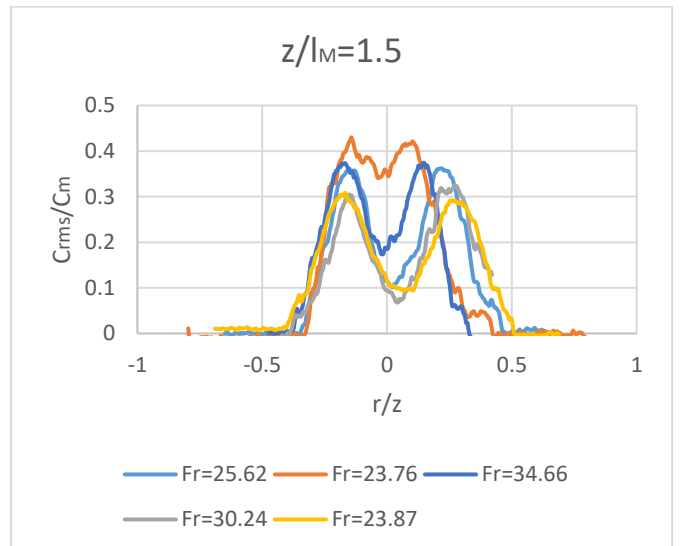
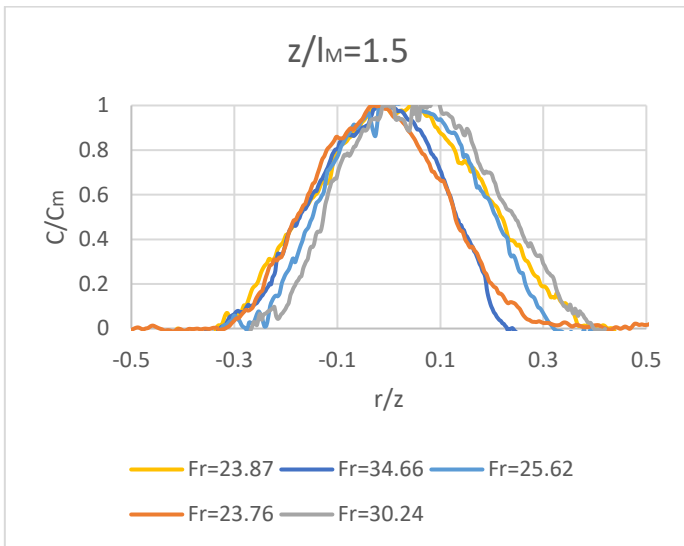
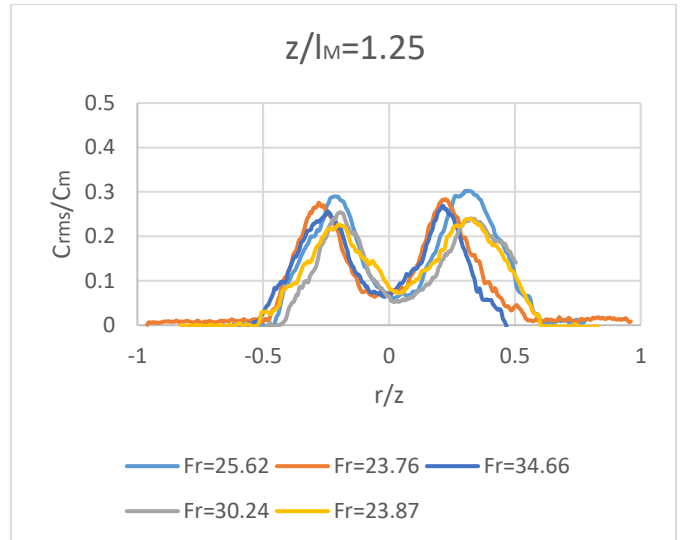
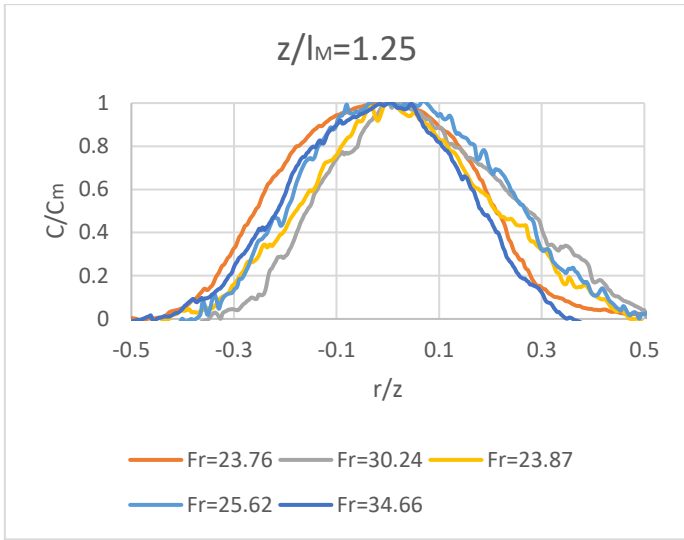
**Σχήμα 4.11** Αδιάστατα προφίλ συγκέντρωσης και έντασης τύρβης καθ' ύψος της φλέβας ανά 5 διαμέτρους  $d$

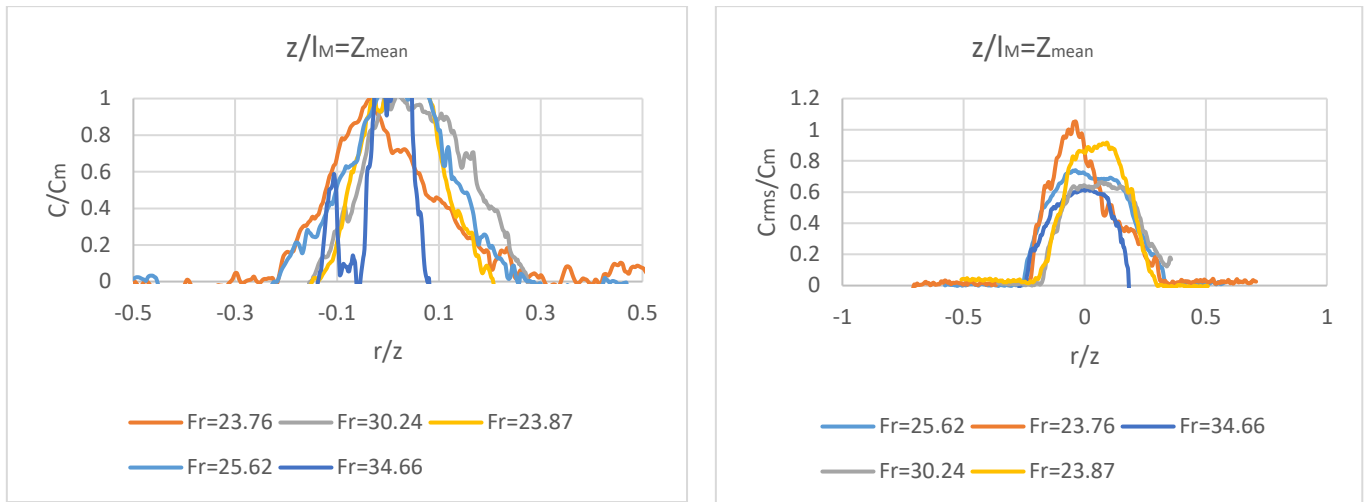
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα για 5 ακόμα πειράματα, κατηγοριοποιημένα με την αδιάστατη απόσταση  $l_M$  για τιμές ίσες με  $0.5 l_M$ ,  $0.75 l_M$ ,  $1.00 l_M$ ,  $1.5 l_M$  και  $1.75 l_M$ .

Αρχικά σε απόσταση  $0.5 l_M$  παρατηρείται ξανά πως τόσο η αδιάστατη συγκέντρωση  $C/C_m$  όσο και η ένταση της τύρβης  $C_{rms}/C_m$  έχουν μεγαλύτερο εύρος από αυτό που παρατηρείται σε φλέβες θετικής άνωσης. Οι ασυμμετρίες που παρουσιάζουν οι καμπύλες οφείλονται σε κάποιο σφάλμα κατά τον υπολογισμό της βαθμονόμησης αλλά και στο γεγονός ότι ο άξονας της φλέβας δεν μπορεί να παραμένει κατακόρυφος λόγω αστάθειας της ροής. Ορισμένες καμπύλες παρουσιάζουν και άλματα, τα οποία πιθανόν οφείλονται σε στίγματα που εμφανίζονται στο τζάμι της δεξαμενής. Όσο η απόσταση αυξάνεται παρατηρείται σε όλα τα πειράματα ότι το εύρος των καμπυλών μειώνεται. Στα διαγράμματα της έντασης της τύρβης  $C_{rms}/C_m$  όσο αυξάνεται η απόσταση οι κορυφές πλησιάζουν και αυξάνονται παίρνοντας την τιμή 0.4 από 0.2 που είχαν αρχικά. Σε απόσταση  $1.75 l_M$  οι κορυφές για τα περισσότερα διαγράμματα έχουν ήδη ενωθεί καθώς είναι πολύ κοντά στο μέσο ύψος σταθεροποίησης της ροής εμφανίζοντας πλέον τιμή ίση με 0.6. Η τιμή αυτή, ωστόσο, είναι πολύ μεγάλη και μάλλον οφείλεται στο γεγονός ότι η μέση συγκέντρωση στον άξονα έχει υπολογιστεί περιλαμβάνοντας και τις διαλείψεις της ροής στο σημείο του μέγιστου ύψους κατά τη

διάρρκεια των οποίων η συγκέντρωση είναι μηδενική μειώνοντας την τελική τιμή της μέσης χρονικά συγκέντρωσης στον άξονα.





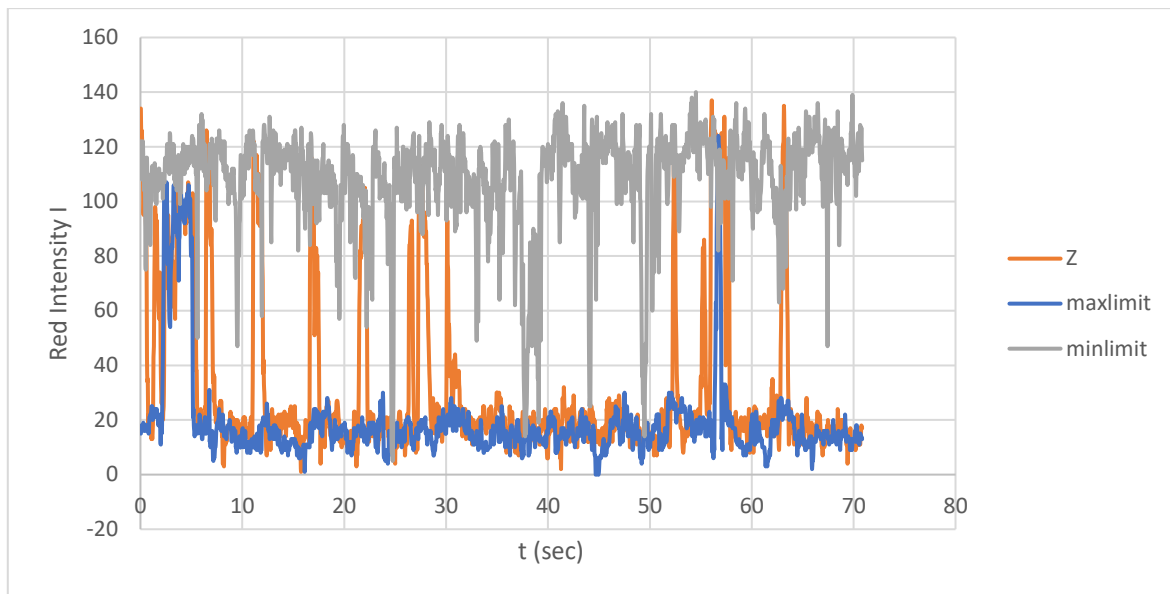


**Σχήμα 4.12** Αδιάστατα προφίλ μέσης συγκέντρωσης  $C/C_m$  και έντασης τύρβης  $C_{rms}/C_m$  συναρτήσει της αδιάστατης απόστασης  $r/z$  σε βάθη  $0.5 l_M$ ,  $0.75 l_M$ ,  $1 l_M$ ,  $1.5 l_M$ ,  $1.75 l_M$ .

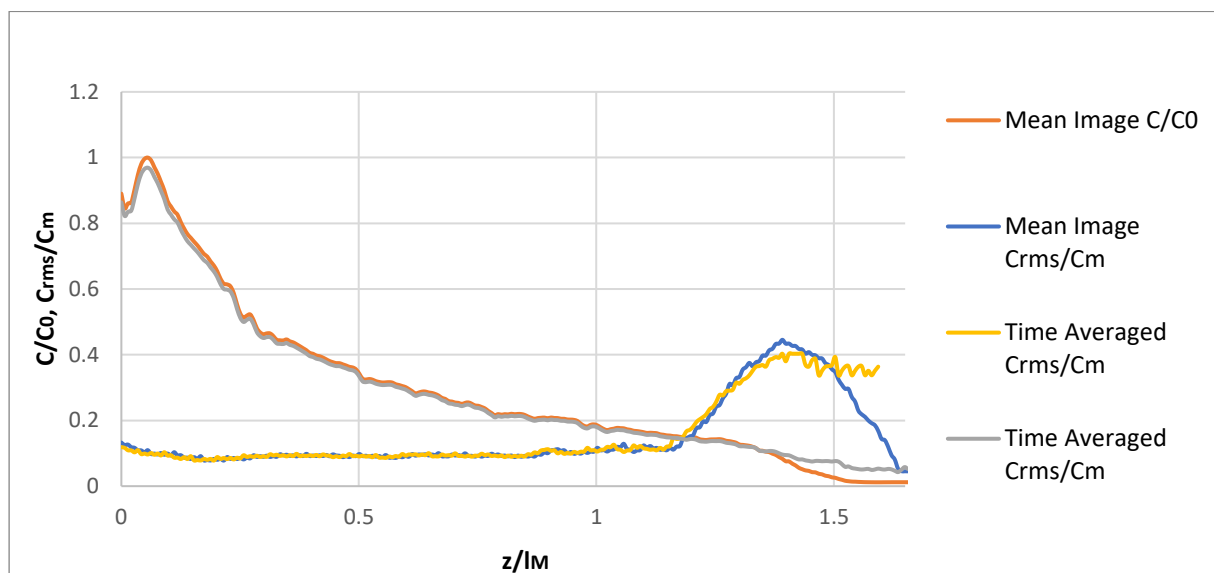
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται η αδιάστατη μέση συγκέντρωση  $C/C_0$  και η έντασης της τύρβης  $C_{rms}/C_m$  κατά μήκος του άξονα της φλέβας. Οι υπολογισμοί για τη δημιουργία των διαγραμμάτων αυτών γίνονται αρχικά από τη μέση εικόνα και έπειτα από τη χρονικά μέση εικόνα.

#### 4.2.2 Μέση Χρονικά Εικόνα - Χρονοσειρά έντασης κόκκινου χρώματος

Για τον προσδιορισμό της μέσης συγκέντρωσης και τύρβης κατά μήκος του άξονα της φλέβας σε κάθε frame υπολογίζεται η ένταση του κόκκινου χρώματος σε όλο το ύψος του. Από τα δεδομένα αυτά, δημιουργείται μια χρονοσειρά της έντασης του κόκκινου για 3 χαρακτηριστικά ύψη στη φλέβα: το τερματικό ύψος  $Z$  όπου σταθεροποιείται η ροή, και για τις ακραίες θέσης της ταλάντωσης αυτής. Από τη χρονοσειρά αυτή, γίνεται αντιληπτό πως εξαιτίας της ταλάντωσης η φλέβα δεν φτάνει συνέχεια το τερματικό ύψος, ενώ λιγότερο συχνά εμφανίζεται να φτάνει το ανώτερο όριο. Εφαρμόζοντας κάποιο κατώτερο όριο στη συγκέντρωση (κατώφλι), επιλέγονται μόνο οι τιμές όπου εμφανίζεται η φλέβα, απομακρύνονται δηλαδή οι «διαλείψεις» και δημιουργείται το διάγραμμα της μέσης χρονικά συγκέντρωσης της φλέβας.



**Σχήμα 4.13** Χρονοσειρά έντασης κόκκινου χρώματος για 3 διαφορετικά ύψη στην φλέβα.

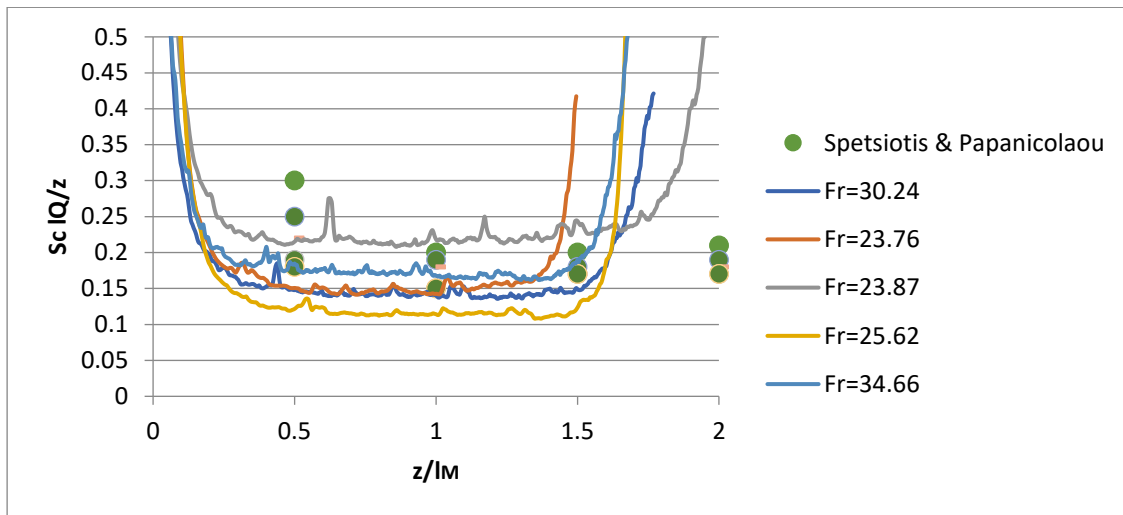


**Σχήμα 4.14** Αδιάστατη συγκέντρωση  $C/C_0$  και ένταση τύρβης  $C_{rms}/C_m$  από τη μέση εικόνα και τη χρονοσειρά (Exp-263)

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι η συγκέντρωση που υπολογίζεται η μέση εικόνα μηδενίζεται ενώ σε απόσταση  $1.6 l_M$ , σε αντίθεση με αυτή που υπολογίζεται από τη χρονοσειρά η οποία διατηρείται. Όμοια συμπεριφορά παρουσιάζουν και τα διαγράμματα της έντασης της τύρβης, όπου στην περίπτωση της μέσης εικόνας η ένταση της τύρβης έχει τιμή ίση με 0.044 και στη συνέχεια μηδενίζεται, ενώ στην περίπτωση της έντασης της τύρβης που υπολογίστηκε μετά την επεξεργασία της χρονοσειράς διατηρείται στην τιμή αυτή (Σχ.4.14 – λαθος σχήμα Time Averaged  $C_{rms}/C_m$ ).

Τέλος από όλα τα παραπάνω πειράματα δημιουργείται το διάγραμμα της μέσης αδιάστατης αραίωσης ( $S_{clQ}/z$ ) συναρτήσει της αδιάστατης απόστασης  $z/l_M$ . Για τιμές μεγαλύτερες από

$0.5l_M$  η αδιάστατη αραίωση κυμαίνεται μεταξύ  $0.10 - 0.20$ . Οι τιμές αυτές προσεγγίζουν ικανοποιητικά τις τιμές που υπολόγισαν οι Spetsiotis & Papanicolaou (2008). Το όριο αυτό εμπεριέχει και την τιμή  $0.165$  που υπολογίστηκε σε θερμή φλέβα θετικής άνωσης από τους Papanicolaou & List (1987). Στο παρακάτω σχήμα παρατηρείται ότι οι καμπύλες από ένα συγκεκριμένο ύψος και έπειτα απειρίζονται. Το ύψος στο οποίο συμβαίνει αυτό είναι το αντίστοιχο τερματικό ύψος  $Z$  όπου φτάνει η κάθε φλέβα. Ψηλότερα από το τερματικό ύψος δεν εμφανίζεται ρευστό της φλέβας και για το λόγο αυτό οι καμπύλες παρουσιάζουν απότομη αύξηση.



**Σχήμα 4.15** Μέση αδιάστατη αραίωση στον άξονα της φλέβας.

## 5. Συμπεράσματα

Έγιναν δύο σειρές πειραμάτων σε κατακόρυφες κυκλικές φλέβες αρνητικής άνωσης, η πρώτη όπου μελετήθηκαν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της φλέβας με μεθοδολογία σκιαγραφήματος (shadowgraph) και η δεύτερη όπου μελετήθηκε η γεωμετρία και μετρήθηκε η συγκέντρωση ροδαμίνης 6G με μεθοδολογία PLIF. Η ανάλυση αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία οδήγησε στα συμπεράσματα που ακολουθούν.

Όσον αφορά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά παρατηρήθηκε ότι το τερματικό ύψος  $Z$  στο οποίο σταθεροποιείται η ροή κυμαίνεται από  $1.70 l_M$  έως  $2.00 l_M$ . Η τιμή του ύψους σταθεροποίησης κυμαίνεται από  $1.70 l_M$  έως  $1.80 l_M$ , κυρίως στα πειράματα που διεξήχθησαν με τη μέθοδο PLIF. Στα πειράματα που διεξήχθησαν με τη μέθοδο PLIF η εικόνα παρουσιάζει όχι μόνο μεγαλύτερη ευκρίνεια αλλά και ένταση χρωμάτων λόγω της ροδαμίνης που περιέχεται στο διάλυμα, γεγονός που εξυπηρετεί τη διαδικασία ανίχνευσης της θέσης του ρευστού. Ωστόσο, και οι δύο μέθοδοι τόσο για το μέγιστο ύψος  $Z_{max}$  όσο και για το τερματικό ύψος  $Z$  συμφωνούν μεταξύ τους.

Ανάλογη συμπεριφορά παρατηρείται και στην περίπτωση του μέγιστου ύψους  $Z_{max}$  όπου οι τιμές του μέγιστου ύψους κυμαίνονται από  $2.70 l_M$  έως  $3.00 l_M$ .

Ο αδιάστατος χρόνος  $tM/B$  που απαιτείται για να φτάσει μια ανωστική φλέβα αρνητικής άνωσης το μέγιστο ύψος προέκυψε περίπου ίσος με 2.50.

Όσον αφορά τις μετρήσεις της συγκέντρωσης και τη μέθοδο PLIF, γίνεται αντιληπτό ότι με διάφορες μεθόδους επεξεργασίας εικόνας διεξάγονται συμπεράσματα και δεδομένα για όλο το πεδίο ροής. Το γεγονός αυτό είναι πολύ σημαντικό, καθώς με τον τρόπο αυτό έχουμε σαφέστερη εικόνα για όλο το πεδίο ροής και όχι σημειακές μετρήσεις όπως συμβαίνει για παράδειγμα στην περίπτωση μέτρησης της θερμοκρασίας σημειακά (όπως π.χ. με θερμίστορες).

Τα προφίλ της αδιάστατης μέσης συγκέντρωσης  $C/C_m$  αλλά και της έντασης της τύρβης  $C_{rms}/C_m$  παρουσιάζουν αρκετά μεγαλύτερο εύρος από αυτό που εμφανίζεται στις φλέβες θετικής άνωσης. Καθώς η ροή αναπτύσσεται, παρατηρείται ότι οι κορυφές που παρουσιάζονται στο προφίλ της έντασης της τύρβης πλησιάζουν αρκετά, με αποτέλεσμα να ενώνονται καθώς η φλέβα πλησιάζει στο τερματικό ύψος. Συγχρόνως, οι κορυφές αυξάνονται και παίρνουν τιμή από 0.25 που είχαν αρχικά έως και 0.60. Η τιμή αυτή, ωστόσο, είναι αρκετά μεγάλη και πιθανόν οφείλεται είτε στις διαλείψεις που παρουσιάζει η ροή επειδή



συνυπολογίζονται στη μέση χρονικά συγκέντρωση στον άξονα της φλέβας. Το εύρος στο προφίλ της μέσης συγκέντρωσης μειώνεται όσο το ύψος αυξάνεται. Σε κάθε περίπτωση όμως το προφίλ της έντασης τύρβης παρουσιάζει μεγαλύτερο εύρος από αυτό της συγκέντρωσης.

Η μέση αδιάστατη αραίωση στον άξονα κυμαίνεται από 0.11 έως 0.20. Το αποτέλεσμα αυτό προσεγγίζει αρκετά τα αποτελέσματα των Spetsiotis & Papanicolaou (2008), ενώ στην περίπτωση αυτή απεικονίζεται η αραίωση όχι σημειακά αλλά κατά μήκος του άξονα της φλέβας και γίνεται αντιληπτό ότι για αδιάστατό ύψος ίσο με  $z/l_M > 0.5$ , η μέση αραίωση στον άξονα διατηρείται σταθερή μέχρι η φλέβα να φτάσει το τερματικό ύψος. Υψηλότερα από το τερματικό ύψος δεν εμφανίζεται ροή, συνεπώς και φαίνεται ότι οι καμπύλες απειρίζονται.

### **Προτάσεις για μελλοντική έρευνα**

Από παρατηρήσεις μας στην επεξεργασία της εικόνας RGB, παρατηρήσαμε ότι εάν χρησιμοποιήσουμε το μπλέ (B) αντί του ερυθρού (R), μάλλον δεν υπάρχει θέμα απορρόφησης της ακτινοβολίας από τη ροδαμίνη, επομένως δεν υπάρχει ανάγκη ρύθμισης (calibration) κατά την επεξεργασία της εικόνας. Αυτό μπορεί να ελεγχθεί σε φλέβες με αλατόνερο σε μελλοντικό πείραμα όσον αφορά στην κατανομή των συγκεντρώσεων στο πεδίο ροής της φλέβας.

## Αναφορές

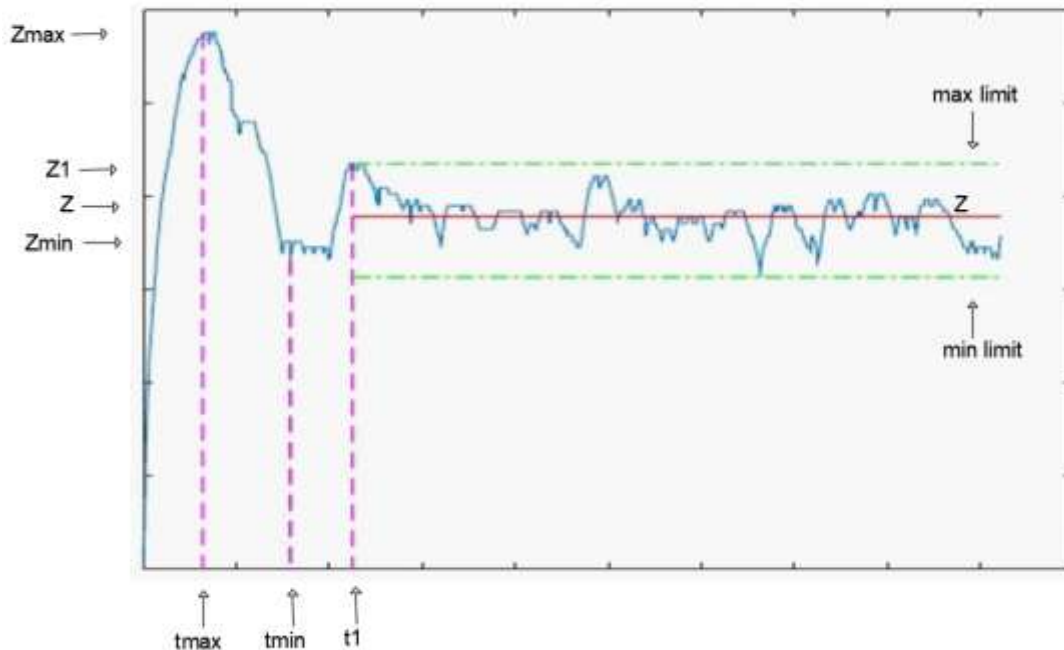
- Abraham G. (1967): Jets with Negative Buoyancy In Homogeneous Fluid, *Journal of Hydraulic Research*, 5:4, 235-248
- Baines W. D., J. S. Turner and I. H. Campbell, Turbulent fountains in an open chamber, in *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, vol. 212, March 1990, pp. 557-592.
- Baines W. D., J. S. Turner and I. H. Campbell, Turbulent fountains in an open chamber, in *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, vol. 212, March 1990, pp. 557-592.
- Baddour R. E., M. ASCE and H. Zhang, Density Effect on Round Turbulent Hypersaline Fountain, in *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 135, no. 1, Jan. 2009.
- Crimaldi J. P., and M. A. Soltys, A two-color planar laser induced fluorescence technique for two-scalar mixing and reaction experiments, in *Proceedings of the Sixth International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer*, pp. 1-4, Rome, Italy, 2009, Sept. 14-18.
- Crimaldi J. P., Planar laser induced fluorescence in aqueous flows, in *Experiments in Fluids*, vol. 44, no. 6, June 2008, pp. 851-863.
- Dimitriadis P. , Hurst-Kolmogorov dynamics in hydroclimatic processes and in the microscale of turbulence, PhD Thesis, School of Civil Engineering, National Technical University of Athens, Athens, 2017.
- Ferrier, D. R., Funk, and P. J. W. Roberts, Application of optical techniques to the study of plumes A. J. in stratified fluids, in *Elsevier Dynamics of Atmospheres and Oceans*, vol. 20, no. 1-2, Nov. 1993, pp. 155-183.
- Kokkalis T. J. and P. N. Papanicolaou, Vertical turbulent fountains in a uniform calm ambient, *Proceedings of the 2006 IASME/WSEAS Int. Conf. On Water Resources, Hydraulics and Hydrology*, pp. 98-105, Chalkida, Greece, 2006, May 11-13.
- McLellan T. N., & R. E. Randall, Measurement of Brine Jet Height and Dilution. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 112(2), 200–216, March 1986.

- Pantzlaff L., and R. M. Lueptow, Transient positively and negatively buoyant turbulent round jets, in *Experiments in Fluids*, vol. 27, no. 2, July 1999, pp. 117-125.
- Papanicolaou P. N., T. J. Kokkalis, Vertical buoyancy preserving and non-preserving fountains, in a homogeneous calm ambient, in *Elsevier International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 51, no. 15-16, July 2008, pp. 4109–4120.
- Papanicolaou P. N. and E. J. List, Statistical and spectral properties of tracer concentration in round buoyant jets, in *Elsevier International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 30, no. 10, Oct. 1987, pp. 2059-2071.
- Papanicolaou P. N. and E. J. List, Investigation of round vertical turbulent buoyant jets, in *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, vol. 195, Oct. 1988, pp. 341-391.
- Papanicolaou P. N, 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, May 1984.
- Spetsiotis D. N., and P. N. Papanicolaou, Measurements in a hot, negatively buoyant jet, discharged in homogenous calm, in *Conference of Protection & Restorstion of the Environment*, vol. 8, June 2008, pp. 1-8.
- Turner J. S., Jets and plumes with negative or reversing buoyancy, in *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, vol. 26, no. 4, Dec. 1966, pp. 779-792.
- Zhang H., Saline, Thermal and Thermal-Saline Buoyant Jets, PhD Thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering Science, University of Western Ontario, London, Ontario, Canada, 1996.

- Δημητρίου Ι.Δ., Τυρβώδης Διάχυση Κατακόρυφων Υδάτινων Φλεβών Αρνητικής Άνωσης, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1978.
- Μίχας Σ. Ν., Πειραματική διερεύνηση οριζόντιων κυκλικών και μη αξονοσυμμετρικών ανωστικών φλεβών, σε ομογενή ακίνητο αποδέκτη, Διδακτορική Διατριβή, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος, 2008.
- Μυλωνάκου Ε. Α., Πειραματική Διερεύνηση Διδιάστατων Τυρβώδων Φλεβών Αρνητικής Άνωσης, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ιούνιος 2018.
- Παπακωνσταντής Η. Γ., Τυρβώδεις κυκλικές φλέβες αρνητικής άνωσης υπό γωνία σε ακίνητο ομογενή αποδέκτη, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2009.
- Παναγιώτης Ν. Παπανικολάου, Τυρβώδεις ανωστικές φλέβες, Διδακτικές Σημειώσεις στα πλαίσια του μαθήματος «Περιβαλλοντική Υδραυλική» του ΔΠΜΣ Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, Ακ. Έτος 201-2017.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα σύντομο υπόμνημα για τους συμβολισμούς στους πίνακες και τα διαγράμματα που ακολουθούν, σχετικά με τον υπολογισμό του μέγιστου και του μέσου ύψους.



$Z_{max}$ : το μέγιστο ύψος της φλέβας σε cm

$t_{max}$ : η χρονική στιγμή χρόνος όπου εμφανίζεται το μέγιστο ύψος της φλέβας

$Z_{min}$ : το ελάχιστο ύψος της φλέβας

$t_{min}$ : η χρονική στιγμή χρόνος όπου εμφανίζεται το ελάχιστο ύψος της φλέβας

$Z_1$ : το ύψος από το οποίο θεωρείται πως ξεκινά να σταθεροποιείται η ροή και από το οποίο και έπειτα υπολογίζεται η μέση τιμή – τερματικό ύψος

$t_1$ : η χρονική στιγμή από τον οποία ξεκινά ο υπολογισμός της μέσης τιμής – τερματικό ύψος

$Z_{mean}$ : το τερματικό ύψος στο οποίο σταθεροποιείται η ροή

Min limit: το ελάχιστο όριο της της ταλάντωσης γύρω από το  $Z_{mean}$

Max limit: το μέγιστο όριο της της ταλάντωσης γύρω από το  $Z_{mean}$

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι αρχικές συνθήκες των πειραμάτων και τα αντίστοιχα αποτελέσματα.

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00193

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 193 - ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 31/10/17 – Πείραμα 1</b>						
$T_a (^{\circ}C)$	$S_a (ppt)$	$\rho_{wa} (T)$	$\rho_a (S,T)$	$\rho_a$	$T_0 (^{\circ}C)$	$S_0 (ppt)$
19.2	0.5	998.37	998.75	998.73	17.60	21.90
$\rho_0 (T)$	$\rho_0 (S,T)$	$\rho_0$	$Q (l/h)$	$Q' (cm^3/s)$	$W (cm/s)$	$\Delta\rho/\rho_0$
998.67	1015.35	1014.48	40.00	9.24	47.07	0.02
$g_0'(cm/s^2)$	$M (cm^4/s^2)$	$B (cm^4/s^3)$	$l_Q$	$l_M$	$R_o$	$F_0$
15.23	435.00	140.73	0.44	8.03	0.06	17.06
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
15.23	435.00	140.73	0.44	8.03	0.06	17.06
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
37.37	14.43	77.78	0.07	16.13	12.41	7.64
$t_1-t_{max}$						
16.92						

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00195

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 195 - ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 31/10/17 – Πείραμα 2</b>						
$T_a (^{\circ}C)$	$S_a (ppt)$	$\rho_{wa} (T)$	$\rho_a (S,T)$	$\rho_a$	$T_0 (^{\circ}C)$	$S_0 (ppt)$
20	0.5	998.21	998.59	998.57	17.60	21.90
$\rho_0 (T)$	$\rho_0 (S,T)$	$\rho_0$	$Q (l/h)$	$Q' (cm^3/s)$	$W (cm/s)$	$\Delta\rho/\rho_0$
998.67	1015.35	1014.48	60.00	14.85	75.63	0.02
$g_0'(cm/s^2)$	$M (cm^4/s^2)$	$B (cm^4/s^3)$	$l_Q$	$l_M$	$R_o$	$F_0$
15.38	1123.10	228.41	0.44	12.84	0.03	27.27
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
38.51	37.40	18.85	7.94	21.64	36.14	28.59
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
42.34	28.31	83.28	0.07	16.13	12.41	10.91
$t_1-t_{max}$						
23.49						

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00196

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 196 - ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 31/10/17 – Πείραμα 3</b>						
$T_a (^{\circ}C)$	$S_a (ppt)$	$\rho_{wa} (T)$	$\rho_a (S,T)$	$\rho_a$	$T_0 (^{\circ}C)$	$S_0 (ppt)$
19.1	0.6	998.39	998.85	998.82	17.60	21.90
$\rho_0 (T)$	$\rho_0 (S,T)$	$\rho_0$	$Q (l/h)$	$Q' (cm^3/s)$	$W (cm/s)$	$\Delta\rho/\rho_0$
998.67	1015.35	1014.48	70.00	17.65	89.91	0.02
$g_0'(cm/s^2)$	$M (cm^4/s^2)$	$B (cm^4/s^3)$	$l_Q$	$l_M$	$R_o$	$F_0$
15.14	1587.27	267.25	0.44	15.38	0.03	32.68
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
46.15	46.40	19.29	8.48	22.26	41.54	30.84
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
50.82	31.48	88.82	0.07	16.13	12.41	10.81
$t_1-t_{max}$						
31.53						

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00197

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 197 - ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 31/10/17 – Πείραμα 4</b>						
$T_a (^{\circ}C)$	$S_a (ppt)$	$\rho_{wa} (T)$	$\rho_a (S,T)$	$\rho_a$	$T_0 (^{\circ}C)$	$S_0 (ppt)$
19.1	0.7	998.39	998.92	998.89	17.60	21.90
$\rho_0 (T)$	$\rho_0 (S,T)$	$\rho_0$	$Q (l/h)$	$Q' (cm^3/s)$	$W (cm/s)$	$\Delta\rho/\rho_0$
998.67	1015.35	1014.48	80.00	20.46	104.19	0.02
$g_0'(cm/s^2)$	$M (cm^4/s^2)$	$B (cm^4/s^3)$	$l_Q$	$l_M$	$R_o$	$F_0$
15.07	2131.53	308.27	0.44	17.87	0.02	37.96
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
53.60	-	-	-	-	-	-
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
-	37.12	-	0.10	43.07	32.66	-
$t_1-t_{max}$						
-						

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00199

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 199 - ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 03/11/17 – Πείραμα 1</b>						
$T_a$ ( $^{\circ}C$ )	$S_a$ (ppt)	$\rho_{wa}$ (T)	$\rho_a$ (S,T)	$\rho_a$	$T_0$ ( $^{\circ}C$ )	$S_0$ (ppt)
19	0.5	998.41	998.79	998.77	18.60	35.10
$\rho_0$ (T)	$\rho_0$ (S,T)	$\rho_0$	$Q$ (l/h)	$Q'$ ( $cm^3/s$ )	$W$ (cm/s)	$\Delta\rho/\rho_0$
998.48	1025.20	1023.80	60.00	14.85	75.63	0.02
$g_0'$ ( $cm/s^2$ )	$M$ ( $cm^4/s^2$ )	$B$ ( $cm^4/s^3$ )	$l_Q$	$l_M$	$R_o$	$F_0$
23.98	1123.10	356.07	0.44	10.28	0.04	21.84
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
30.84	29.86	6.07	0.07	19.67	15.08	22.82
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
19.72	25.25	45.81	0.10	27.68	22.09	6.01
$t_1-t_{max}$						
13.65						

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00200

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 200 - ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 03/11/17 – Πείραμα 2</b>						
$T_a$ ( $^{\circ}C$ )	$S_a$ (ppt)	$\rho_{wa}$ (T)	$\rho_a$ (S,T)	$\rho_a$	$T_0$ ( $^{\circ}C$ )	$S_0$ (ppt)
19	0.5	998.41	998.79	998.77	18.60	35.10
$\rho_0$ (T)	$\rho_0$ (S,T)	$\rho_0$	$Q$ (l/h)	$Q'$ ( $cm^3/s$ )	$W$ (cm/s)	$\Delta\rho/\rho_0$
998.48	1025.20	1023.80	70.00	17.65	89.91	0.02
$g_0'$ ( $cm/s^2$ )	$M$ ( $cm^4/s^2$ )	$B$ ( $cm^4/s^3$ )	$l_Q$	$l_M$	$R_o$	$F_0$
23.98	1587.27	423.31	0.44	12.22	0.04	25.97
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
36.67	31.92	20.55	13.35	18.49	32.67	23.55
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
36.70	25.16	64.83	0.07	31.26	22.23	7.21
$t_1-t_{max}$						
16.15						



Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00201

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 201 - ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 22/11/17 – Πείραμα 1</b>						
$T_a$ ( $^{\circ}C$ )	$S_a$ (ppt)	$\rho_{wa}$ (T)	$\rho_a$ (S,T)	$\rho_a$	$T_o$ ( $^{\circ}C$ )	$S_o$ (ppt)
16.2	0.5	998.90	999.29	999.27	14.60	31.30
$\rho_o$ (T)	$\rho_o$ (S,T)	$\rho_o$	$Q$ (l/h)	$Q'$ ( $cm^3/s$ )	$W$ (cm/s)	$\Delta\rho/\rho_o$
999.15	1023.19	1021.95	40.00	9.24	47.07	0.02
$g_o'$ ( $cm/s^2$ )	$M$ ( $cm^4/s^2$ )	$B$ ( $cm^4/s^3$ )	$l_Q$	$l_M$	$R_o$	$F_o$
21.76	435.00	201.13	0.44	6.72	0.07	14.27
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
20.15	21.61	5.64	0.03	10.68	13.38	13.60
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
16.68	12.25	53.29	0.10	13.84	10.93	5.61
$t_1-t_{max}$						
11.04						

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00204

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 204 - ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 22/11/17 – Πείραμα 2</b>						
$T_a$ ( $^{\circ}C$ )	$S_a$ (ppt)	$\rho_{wa}$ (T)	$\rho_a$ (S,T)	$\rho_a$	$T_o$ ( $^{\circ}C$ )	$S_o$ (ppt)
16.1	0.6	998.92	999.38	999.36	14.60	31.30
$\rho_o$ (T)	$\rho_o$ (S,T)	$\rho_o$	$Q$ (l/h)	$Q'$ ( $cm^3/s$ )	$W$ (cm/s)	$\Delta\rho/\rho_o$
999.15	1023.19	1021.95	60.00	14.85	75.63	0.02
$g_o'$ ( $cm/s^2$ )	$M$ ( $cm^4/s^2$ )	$B$ ( $cm^4/s^3$ )	$l_Q$	$l_M$	$R_o$	$F_o$
21.68	1123.10	321.91	0.44	10.81	0.04	22.97
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
32.44	28.19	28.29	21.96	15.03	39.54	19.97
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
45.28	18.63	95.36	0.07	20.67	16.44	6.34
$t_1-t_{max}$						
16.98						

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00205

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 205 - ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 23/11/17 – Πείραμα 1</b>						
$T_a (^{\circ}C)$	$S_a (ppt)$	$\rho_{wa} (T)$	$\rho_a (S,T)$	$\rho_a$	$T_0 (^{\circ}C)$	$S_0 (ppt)$
16.8	0.5	998.80	999.19	999.17	14.70	19.90
$\rho_0 (T)$	$\rho_0 (S,T)$	$\rho_0$	$Q (l/h)$	$Q' (cm^3/s)$	$W (cm/s)$	$\Delta\rho/\rho_0$
999.13	1014.41	1013.62	40.00	9.24	47.07	0.01
$g_0'(cm/s^2)$	$M (cm^4/s^2)$	$B (cm^4/s^3)$	$l_Q$	$l_M$	$R_0$	$F_0$
13.98	435.00	129.20	0.44	8.38	0.05	17.80
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
25.14	21.61	49.05	0.03	10.68	8.51	13.35
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
10.71	12.89	58.22	0.10	14.81	11.65	49.02
$t_1-t_{max}$						
-38.34						

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00206

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 206 - ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 23/11/17 – Πείραμα 2</b>						
$T_a (^{\circ}C)$	$S_a (ppt)$	$\rho_{wa} (T)$	$\rho_a (S,T)$	$\rho_a$	$T_0 (^{\circ}C)$	$S_0 (ppt)$
16.7	0.5	998.82	999.21	999.19	14.70	19.90
$\rho_0 (T)$	$\rho_0 (S,T)$	$\rho_0$	$Q (l/h)$	$Q' (cm^3/s)$	$W (cm/s)$	$\Delta\rho/\rho_0$
999.13	1014.41	1013.62	60.00	14.85	75.63	0.01
$g_0'(cm/s^2)$	$M (cm^4/s^2)$	$B (cm^4/s^3)$	$l_Q$	$l_M$	$R_0$	$F_0$
13.96	1123.10	207.36	0.44	13.47	0.03	28.62
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
40.42	35.11	26.73	17.88	20.03	40.84	23.86
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
46.05	26.69	91.16	0.07	33.09	22.28	8.84
$t_1-t_{max}$						
19.32						

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00207

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 207 - ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 23/11/17 – Πείραμα 3</b>						
$T_a (^{\circ}C)$	$S_a (ppt)$	$\rho_{wa} (T)$	$\rho_a (S,T)$	$\rho_a$	$T_o (^{\circ}C)$	$S_o (ppt)$
16.7	0.6	998.82	999.28	999.26	14.70	19.90
$\rho_o (T)$	$\rho_o (S,T)$	$\rho_o$	$Q (l/h)$	$Q' (cm^3/s)$	$W (cm/s)$	$\Delta\rho/\rho_o$
999.13	1014.41	1013.62	80.00	20.46	104.19	0.01
$g_o'(cm/s^2)$	$M (cm^4/s^2)$	$B (cm^4/s^3)$	$l_Q$	$l_M$	$R_o$	$F_o$
13.89	2131.53	284.23	0.44	18.61	0.02	39.53
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
55.82	48.91	38.30	23.52	25.58	61.56	32.08
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
67.90	31.33	102.50	0.07	35.45	28.49	14.78
$t_1-t_{max}$						
29.60						

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00215

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 215 – ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 12/12/17 – Πείραμα 1</b>						
$T_a (^{\circ}C)$	$S_a (ppt)$	$\rho_{wa} (T)$	$\rho_a (S,T)$	$\rho_a$	$T_o (^{\circ}C)$	$S_o (ppt)$
16.2	0.5	998.90	999.29	999.27	15.20	20.40
$\rho_o (T)$	$\rho_o (S,T)$	$\rho_o$	$Q (l/h)$	$Q' (cm^3/s)$	$W (cm/s)$	$\Delta\rho/\rho_o$
999.06	1014.70	1013.89	40.00	9.24	47.07	0.01
$g_o'(cm/s^2)$	$M (cm^4/s^2)$	$B (cm^4/s^3)$	$l_Q$	$l_M$	$R_o$	$F_o$
14.14	435.00	130.68	0.44	8.33	0.05	17.70
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
25.00	24.75	27.29	20.09	13.43	41.91	18.15
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
45.58	15.20	76.88	0.07	18.15	13.20	7.21
$t_1-t_{max}$						
18.28						

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00216

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 216 – ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 12/12/17 – Πείραμα 2</b>						
$T_a (^{\circ}C)$	$S_a (ppt)$	$\rho_{wa} (T)$	$\rho_a (S,T)$	$\rho_a$	$T_0 (^{\circ}C)$	$S_0 (ppt)$
15.9	0.5	998.95	999.34	999.32	15.20	20.40
$\rho_0 (T)$	$\rho_0 (S,T)$	$\rho_0$	$Q (l/h)$	$Q' (cm^3/s)$	$W (cm/s)$	$\Delta\rho/\rho_0$
999.06	1014.70	1013.89	50.00	12.05	61.35	0.01
$g_0'(cm/s^2)$	$M (cm^4/s^2)$	$B (cm^4/s^3)$	$l_Q$	$l_M$	$R_o$	$F_0$
14.09	739.01	169.77	0.44	10.88	0.04	23.11
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
32.63	33.84	23.86	16.52	21.40	37.64	23.72
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
42.34	24.42	64.06	0.07	25.74	22.56	7.34
$t_1-t_{max}$						
18.49						

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00217

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 217 – ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 12/12/17 – Πείραμα 3</b>						
$T_a (^{\circ}C)$	$S_a (ppt)$	$\rho_{wa} (T)$	$\rho_a (S,T)$	$\rho_a$	$T_0 (^{\circ}C)$	$S_0 (ppt)$
15.8	0.6	998.97	999.43	999.41	15.20	20.40
$\rho_0 (T)$	$\rho_0 (S,T)$	$\rho_0$	$Q (l/h)$	$Q' (cm^3/s)$	$W (cm/s)$	$\Delta\rho/\rho_0$
999.06	1014.70	1013.89	60.00	14.85	75.63	0.01
$g_0'(cm/s^2)$	$M (cm^4/s^2)$	$B (cm^4/s^3)$	$l_Q$	$l_M$	$R_o$	$F_0$
14.01	1123.10	208.01	0.44	13.45	0.03	28.58
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
40.35	33.84	23.86	16.52	21.40	37.64	23.72
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
42.34	24.42	64.06	0.07	25.74	22.56	7.34
$t_1-t_{max}$						
18.49						

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00218

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 218 – ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 12/12/17 – Πείραμα 4</b>						
$T_a (^{\circ}C)$	$S_a (ppt)$	$\rho_{wa} (T)$	$\rho_a (S,T)$	$\rho_a$	$T_0 (^{\circ}C)$	$S_0 (ppt)$
15.8	0.6	998.97	999.43	999.41	15.20	20.40
$\rho_0 (T)$	$\rho_0 (S,T)$	$\rho_0$	$Q (l/h)$	$Q' (cm^3/s)$	$W (cm/s)$	$\Delta\rho/\rho_0$
999.06	1014.70	1013.89	70.00	17.65	89.91	0.01
$g_0'(cm/s^2)$	$M (cm^4/s^2)$	$B (cm^4/s^3)$	$l_Q$	$l_M$	$R_o$	$F_0$
14.01	1587.27	247.28	0.44	15.99	0.03	33.97
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
47.97	43.97	27.09	15.92	23.14	46.65	26.90
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
49.05	27.36	75.81	0.07	30.08	24.88	11.18
$t_1-t_{max}$						
21.96						

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00219

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 219 – ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 13/12/17 – Πείραμα 1</b>						
$T_a (^{\circ}C)$	$S_a (ppt)$	$\rho_{wa} (T)$	$\rho_a (S,T)$	$\rho_a$	$T_0 (^{\circ}C)$	$S_0 (ppt)$
15.8	0.6	998.97	999.43	999.41	15.20	20.40
$\rho_0 (T)$	$\rho_0 (S,T)$	$\rho_0$	$Q (l/h)$	$Q' (cm^3/s)$	$W (cm/s)$	$\Delta\rho/\rho_0$
999.20	1027.91	1026.42	40.00	9.24	47.07	0.03
$g_0'(cm/s^2)$	$M (cm^4/s^2)$	$B (cm^4/s^3)$	$l_Q$	$l_M$	$R_o$	$F_0$
26.04	435.00	240.68	0.44	6.14	0.07	13.04
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
18.42	19.33	22.42	18.18	11.13	28.83	12.59
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
31.16	11.93	60.06	0.07	13.18	10.54	4.24
$t_1-t_{max}$						
8.74						

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00220

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 220 – ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 13/12/17 – Πείραμα 2</b>						
$T_a (^{\circ}C)$	$S_a (ppt)$	$\rho_{wa} (T)$	$\rho_a (S,T)$	$\rho_a$	$T_0 (^{\circ}C)$	$S_0 (ppt)$
16.7	0.5	998.82	999.21	999.19	14.20	37.30
$\rho_0 (T)$	$\rho_0 (S,T)$	$\rho_0$	$Q (l/h)$	$Q' (cm^3/s)$	$W (cm/s)$	$\Delta\rho/\rho_0$
999.20	1027.91	1026.42	50.00	12.05	61.35	0.03
$g_0'(cm/s^2)$	$M (cm^4/s^2)$	$B (cm^4/s^3)$	$l_Q$	$l_M$	$R_o$	$F_0$
26.03	739.01	313.50	0.44	8.01	0.06	17.01
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
24.02	23.14	26.16	22.02	13.18	34.60	17.28
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
40.67	14.82	71.07	0.07	17.28	13.47	4.14
$t_1-t_{max}$						
14.51						

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00221

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 221 – ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 13/12/17 – Πείραμα 3</b>						
$T_a (^{\circ}C)$	$S_a (ppt)$	$\rho_{wa} (T)$	$\rho_a (S,T)$	$\rho_a$	$T_0 (^{\circ}C)$	$S_0 (ppt)$
16.6	0.6	998.84	999.30	999.28	14.20	37.30
$\rho_0 (T)$	$\rho_0 (S,T)$	$\rho_0$	$Q (l/h)$	$Q' (cm^3/s)$	$W (cm/s)$	$\Delta\rho/\rho_0$
999.20	1027.91	1026.42	60.00	14.85	75.63	0.03
$g_0'(cm/s^2)$	$M (cm^4/s^2)$	$B (cm^4/s^3)$	$l_Q$	$l_M$	$R_o$	$F_0$
25.94	1123.10	385.20	0.44	9.88	0.04	21.00
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
29.65	27.53	24.72	19.52	15.82	34.80	18.45
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
39.17	18.10	74.41	0.07	19.92	15.82	5.21
$t_1-t_{max}$						
14.45						

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00222

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 222 – ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 13/12/17 – Πείραμα 4</b>						
$T_a (^{\circ}C)$	$S_a (ppt)$	$\rho_{wa} (T)$	$\rho_a (S,T)$	$\rho_a$	$T_0 (^{\circ}C)$	$S_0 (ppt)$
16.6	0.7	998.84	999.38	999.35	14.20	37.30
$\rho_0 (T)$	$\rho_0 (S,T)$	$\rho_0$	$Q (l/h)$	$Q' (cm^3/s)$	$W (cm/s)$	$\Delta\rho/\rho_0$
999.20	1027.91	1026.42	70.00	17.65	89.91	0.03
$g_0'(cm/s^2)$	$M (cm^4/s^2)$	$B (cm^4/s^3)$	$l_Q$	$l_M$	$R_o$	$F_0$
25.87	1587.27	456.71	0.44	11.77	0.04	25.00
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
35.30	34.27	22.49	16.08	18.45	34.17	20.79
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
38.14	21.51	66.73	0.07	22.85	19.33	6.41
$t_1-t_{max}$						
15.65						

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00223

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 223 – ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 15/12/17 – Πείραμα 1</b>						
$T_a (^{\circ}C)$	$S_a (ppt)$	$\rho_{wa} (T)$	$\rho_a (S,T)$	$\rho_a$	$T_0 (^{\circ}C)$	$S_0 (ppt)$
17	0.5	998.77	999.15	999.13	15.20	35.50
$\rho_0 (T)$	$\rho_0 (S,T)$	$\rho_0$	$Q (l/h)$	$Q' (cm^3/s)$	$W (cm/s)$	$\Delta\rho/\rho_0$
999.06	1026.30	1024.89	60.00	14.85	75.63	0.03
$g_0'(cm/s^2)$	$M (cm^4/s^2)$	$B (cm^4/s^3)$	$l_Q$	$l_M$	$R_o$	$F_0$
24.64	1123.10	365.96	0.44	10.14	0.04	21.55
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
30.42	28.61	29.80	23.72	15.28	40.54	19.72
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
45.91	18.52	78.28	0.10	21.11	16.39	6.07
$t_1-t_{max}$						
16.12						

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00224

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 224 – ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 15/12/17 – Πείραμα 2</b>						
$T_a (^{\circ}C)$	$S_a (ppt)$	$\rho_{wa} (T)$	$\rho_a (S,T)$	$\rho_a$	$T_0 (^{\circ}C)$	$S_0 (ppt)$
16.8	0.6	998.80	999.27	999.24	15.20	35.50
$\rho_0 (T)$	$\rho_0 (S,T)$	$\rho_0$	$Q (l/h)$	$Q' (cm^3/s)$	$W (cm/s)$	$\Delta\rho/\rho_0$
999.06	1026.30	1024.89	70.00	17.65	89.91	0.03
$g_0'(cm/s^2)$	$M (cm^4/s^2)$	$B (cm^4/s^3)$	$l_Q$	$l_M$	$R_o$	$F_0$
24.54	1587.27	433.25	0.44	12.08	0.04	25.67
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
36.24	31.94	27.06	19.55	16.94	38.91	20.56
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
43.01	20.67	67.70	0.10	22.22	18.89	7.51
$t_1-t_{max}$						
15.95						

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00225

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 225 – ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 15/12/17 – Πείραμα 3</b>						
$T_a (^{\circ}C)$	$S_a (ppt)$	$\rho_{wa} (T)$	$\rho_a (S,T)$	$\rho_a$	$T_0 (^{\circ}C)$	$S_0 (ppt)$
16.8	0.7	998.80	999.34	999.31	15.20	35.50
$\rho_0 (T)$	$\rho_0 (S,T)$	$\rho_0$	$Q (l/h)$	$Q' (cm^3/s)$	$W (cm/s)$	$\Delta\rho/\rho_0$
999.06	1026.30	1024.89	80.00	20.46	104.19	0.02
$g_0'(cm/s^2)$	$M (cm^4/s^2)$	$B (cm^4/s^3)$	$l_Q$	$l_M$	$R_o$	$F_0$
24.47	2131.53	500.64	0.44	14.02	0.03	29.79
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
36.24	31.94	27.06	19.55	16.94	38.91	20.56
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
42.06	38.89	27.09	19.05	20.56	40.41	25.28
$t_1-t_{max}$						
45.35						



Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00226

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 226 – ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 15/12/17 – Πείραμα 4</b>						
$T_a (^{\circ}C)$	$S_a (ppt)$	$\rho_{wa} (T)$	$\rho_a (S,T)$	$\rho_a$	$T_0 (^{\circ}C)$	$S_0 (ppt)$
16.7	0.8	998.82	999.44	999.40	15.20	35.50
$\rho_0 (T)$	$\rho_0 (S,T)$	$\rho_0$	$Q (l/h)$	$Q' (cm^3/s)$	$W (cm/s)$	$\Delta\rho/\rho_0$
999.06	1026.30	1024.89	90.00	23.26	118.47	0.02
$g_0'(cm/s^2)$	$M (cm^4/s^2)$	$B (cm^4/s^3)$	$l_Q$	$l_M$	$R_0$	$F_0$
24.39	2755.88	567.26	0.44	15.97	0.03	33.93
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
47.91	43.33	36.64	27.29	23.33	53.05	33.89
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
63.40	33.07	78.28	0.10	34.44	30.00	9.34
$t_1-t_{max}$						
26.76						

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00227

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 227 – ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 20/12/17 – Πείραμα 1</b>						
$T_a (^{\circ}C)$	$S_a (ppt)$	$\rho_{wa} (T)$	$\rho_a (S,T)$	$\rho_a$	$T_0 (^{\circ}C)$	$S_0 (ppt)$
15.9	0.5	998.95	999.34	999.32	12.90	36.50
$\rho_0 (T)$	$\rho_0 (S,T)$	$\rho_0$	$Q (l/h)$	$Q' (cm^3/s)$	$W (cm/s)$	$\Delta\rho/\rho_0$
999.38	1027.56	1026.11	60.00	14.85	75.63	0.03
$g_0'(cm/s^2)$	$M (cm^4/s^2)$	$B (cm^4/s^3)$	$l_Q$	$l_M$	$R_0$	$F_0$
25.61	1123.10	380.23	0.44	9.95	0.04	21.14
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
29.85	28.78	28.93	23.46	15.66	39.07	20.49
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
46.25	18.40	62.43	0.10	20.49	16.81	5.47
$t_1-t_{max}$						
17.32						

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00228

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 228 – ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 20/12/17 – Πείραμα 2</b>						
$T_a (^{\circ}C)$	$S_a (ppt)$	$\rho_{wa} (T)$	$\rho_a (S,T)$	$\rho_a$	$T_0 (^{\circ}C)$	$S_0 (ppt)$
15.8	0.6	998.97	999.43	999.41	12.90	36.50
$\rho_0 (T)$	$\rho_0 (S,T)$	$\rho_0$	$Q (l/h)$	$Q' (cm^3/s)$	$W (cm/s)$	$\Delta\rho/\rho_0$
999.38	1027.56	1026.11	70.00	17.65	89.91	0.03
$g_0'(cm/s^2)$	$M (cm^4/s^2)$	$B (cm^4/s^3)$	$l_Q$	$l_M$	$R_0$	$F_0$
25.52	1587.27	450.53	0.44	11.85	0.04	25.17
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
35.54	33.16	26.19	18.75	18.65	37.24	23.72
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
44.01	22.43	62.60	0.10	24.64	20.03	7.44
$t_1-t_{max}$						
17.82						

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00229

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 229 – ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 20/12/17 – Πείραμα 3</b>						
$T_a (^{\circ}C)$	$S_a (ppt)$	$\rho_{wa} (T)$	$\rho_a (S,T)$	$\rho_a$	$T_0 (^{\circ}C)$	$S_0 (ppt)$
15.8	0.6	998.97	999.43	999.41	12.90	36.50
$\rho_0 (T)$	$\rho_0 (S,T)$	$\rho_0$	$Q (l/h)$	$Q' (cm^3/s)$	$W (cm/s)$	$\Delta\rho/\rho_0$
999.38	1027.56	1026.11	80.00	20.46	104.19	0.03
$g_0'(cm/s^2)$	$M (cm^4/s^2)$	$B (cm^4/s^3)$	$l_Q$	$l_M$	$R_0$	$F_0$
25.52	2131.53	522.08	0.44	13.73	0.03	29.17
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
41.19	37.99	31.60	23.46	19.34	44.28	25.10
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
48.52	25.02	62.13	0.10	26.25	23.72	8.14
$t_1-t_{max}$						
16.92						

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00230

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 230 – ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 20/12/17 – Πείραμα 4</b>						
$T_a$ ( $^{\circ}C$ )	$S_a$ (ppt)	$\rho_{wa}$ (T)	$\rho_a$ (S,T)	$\rho_a$	$T_0$ ( $^{\circ}C$ )	$S0$ (ppt)
15.7	0.7	998.98	999.52	999.49	12.90	36.50
$\rho_0$ (T)	$\rho_0$ (S,T)	$\rho_0$	$Q$ (l/h)	$Q'$ ( $cm^3/s$ )	$W$ (cm/s)	$\Delta\rho/\rho_0$
999.38	1027.56	1026.11	90.00	23.26	118.47	0.03
$g_0'$ ( $cm/s^2$ )	$M$ ( $cm^4/s^2$ )	$B$ ( $cm^4/s^3$ )	$l_Q$	$l_M$	$R_0$	$F_0$
25.43	2755.88	591.67	0.44	15.64	0.03	33.22
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
46.91	43.38	26.39	17.02	24.23	42.21	28.12
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
47.31	29.05	77.78	0.10	31.41	25.43	9.38
$t_1-t_{max}$						
20.92						

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00231

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 231 – ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 20/12/17 – Πείραμα 5</b>						
$T_a$ ( $^{\circ}C$ )	$S_a$ (ppt)	$\rho_{wa}$ (T)	$\rho_a$ (S,T)	$\rho_a$	$T_0$ ( $^{\circ}C$ )	$S_0$ (ppt)
15.5	0.8	999.01	999.63	999.60	12.90	36.50
$\rho_0$ (T)	$\rho_0$ (S,T)	$\rho_0$	$Q$ (l/h)	$Q'$ ( $cm^3/s$ )	$W$ (cm/s)	$\Delta\rho/\rho_0$
999.38	1027.56	1026.11	100.00	26.07	132.75	0.03
$g_0'$ ( $cm/s^2$ )	$M$ ( $cm^4/s^2$ )	$B$ ( $cm^4/s^3$ )	$l_Q$	$l_M$	$R_0$	$F_0$
25.34	3460.31	660.38	0.44	17.56	0.03	37.30
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
52.67	47.66	28.53	16.92	26.02	43.81	30.16
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
46.78	30.35	77.78	0.10	34.08	26.71	11.61
$t_1-t_{max}$						
18.25						

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00263

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 263 - ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 22/05/18 – Πείραμα 1</b>						
$T_a (^{\circ}C)$	$S_a (ppt)$	$\rho_{wa} (T)$	$\rho_a (S,T)$	$\rho_a$	$T_0 (^{\circ}C)$	$S_0 (ppt)$
22.5	0.5	997.6699	998.049	998.0288	25.5	31.2
$\rho_0 (T)$	$\rho_0 (S,T)$	$\rho_0$	$Q (l/h)$	$Q' (cm^3/s)$	$W (cm/s)$	$\Delta\rho/\rho_0$
996.94	1020.35	1019.1	60	14.8499	75.6299	0.02066
$g_0'(cm/s^2)$	$M (cm^4/s^2)$	$B (cm^4/s^3)$	$l_Q$	$l_M$	$R_o$	$F_0$
20.261247	1123.0967	300.8775	0.4431	11.185	0.04	23.762
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
33.5536	28.752632	6.4398	0.0334	16.613	15.8492	21.7242
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
22.4892	18.904	92.226	0.2	21.724	15.654	6.40641
$t_1-t_{max}$	$C_{\rho\delta} (\mu g/L)$					
16.049	37.5					

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00265

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 265 - ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 22/05/18 – Πείραμα 2</b>						
$T_a (^{\circ}C)$	$S_a (ppt)$	$\rho_{wa} (T)$	$\rho_a (S,T)$	$\rho_a$	$T_0 (^{\circ}C)$	$S_0 (ppt)$
22.6	0.6	997.647	998.101	998.0774	25.5	31.2
$\rho_0 (T)$	$\rho_0 (S,T)$	$\rho_0$	$Q (l/h)$	$Q' (cm^3/s)$	$W (cm/s)$	$\Delta\rho/\rho_0$
996.94	1020.35	1019.1	60	14.8499	75.6299	0.02066
$g_0'(cm/s^2)$	$M (cm^4/s^2)$	$B (cm^4/s^3)$	$l_Q$	$l_M$	$R_o$	$F_0$
20.210631	2131.5337	413.4671	0.4431	15.428	0.029	32.776
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
46.2828	39.7585	9.643	0	21.852	25.0584	27.922
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
33.5335	24.791	110.74	0.15	27.922	22.156	9.64298
$t_1-t_{max}$	$C_{\rho\delta} (\mu g/L)$					
23.891	37.5					

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00267

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 267 - ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 22/05/18 – Πείραμα 3</b>						
$T_a (^{\circ}C)$	$S_a (ppt)$	$\rho_{wa} (T)$	$\rho_a (S,T)$	$\rho_a$	$T_0 (^{\circ}C)$	$S_0 (ppt)$
22.8	0.8	997.6009	998.206	998.1741	25.5	31.2
$\rho_0 (T)$	$\rho_0 (S,T)$	$\rho_0$	$Q (l/h)$	$Q' (cm^3/s)$	$W (cm/s)$	$\Delta\rho/\rho_0$
996.94	1020.35	1019.1	100	26.0659	132.753	0.020506
$g_0'(cm/s^2)$	$M (cm^4/s^2)$	$B (cm^4/s^3)$	$l_Q$	$l_M$	$R_0$	$F_0$
20.1099	3460.3144	524.1826	0.4431	19.706	0.022	41.865
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
59.1176	-	-	0.0334	26.404	36.4031	31.8675
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
39.3727	32.779	113.28	0.2	37.331	27.315	-
$t_1-t_{max}$	$C_{\rho\delta} (\mu g/L)$					
-	37.5					

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00268

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 268 - ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 18/07/18 – Πείραμα 1</b>						
$T_a (^{\circ}C)$	$S_a (ppt)$	$\rho_{wa} (T)$	$\rho_a (S,T)$	$\rho_a$	$T_0 (^{\circ}C)$	$S_0 (ppt)$
27	0.5	996.5425	996.916	996.8966	29.7	35.2
$\rho_0 (T)$	$\rho_0 (S,T)$	$\rho_0$	$Q (l/h)$	$Q' (cm^3/s)$	$W (cm/s)$	$\Delta\rho/\rho_0$
995.774	1022.01	1020.61	52.5	12.7469	64.9194	0.023217
$g_0'(cm/s^2)$	$M (cm^4/s^2)$	$B (cm^4/s^3)$	$l_Q$	$l_M$	$R_0$	$F_0$
22.769366	827.52146	290.2388	0.4431	9.0564	0.049	19.24
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
27.1693	47.664474	28.529	16.917	26.02	43.8105	30.1645
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
46.7801	30.352	77.778	0.1	34.079	26.711	11.6116
$t_1-t_{max}$	$C_{\rho\delta} (\mu g/L)$					
18.252	37.5					

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00269

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 269 - ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 18/07/18 – Πείραμα 2</b>						
$T_a (^{\circ}C)$	$S_a (ppt)$	$\rho_{wa} (T)$	$\rho_a (S,T)$	$\rho_a$	$T_0 (^{\circ}C)$	$S_0 (ppt)$
27	0.5	996.5425	996.916	996.8966	29.7	35.2
$\rho_0 (T)$	$\rho_0 (S,T)$	$\rho_0$	$Q (l/h)$	$Q' (cm^3/s)$	$W (cm/s)$	$\Delta\rho/\rho_0$
995.774	1022.01	1020.61	65	16.2519	82.7702	0.023217
$g_0'(cm/s^2)$	$M (cm^4/s^2)$	$B (cm^4/s^3)$	$l_Q$	$l_M$	$R_0$	$F_0$
22.769366	1345.1738	370.0455	0.4431	11.547	0.038	24.531
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
34.64	31.177727	6.1728	0.0334	17.106	17.6176	20.9691
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
23.6904	20.887	140.04	0.1	23.452	17.934	6.13947
$t_1-t_{max}$	$C_{\rho\delta} (\mu g/L)$					
17.518	37.5					

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00270

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 270 - ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 18/07/18 – Πείραμα 3</b>						
$T_a (^{\circ}C)$	$S_a (ppt)$	$\rho_{wa} (T)$	$\rho_a (S,T)$	$\rho_a$	$T_0 (^{\circ}C)$	$S_0 (ppt)$
27.1	0.8	996.5152	997.113	997.0811	29.7	35.2
$\rho_0 (T)$	$\rho_0 (S,T)$	$\rho_0$	$Q (l/h)$	$Q' (cm^3/s)$	$W (cm/s)$	$\Delta\rho/\rho_0$
995.774	1022.01	1020.61	90	23.2619	118.472	0.023025
$g_0'(cm/s^2)$	$M (cm^4/s^2)$	$B (cm^4/s^3)$	$l_Q$	$l_M$	$R_0$	$F_0$
22.580597	2755.8811	525.2676	0.4431	16.596	0.027	35.258
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
49.7882	43.869545	14.615	0.0334	26.211	31.5315	33.9368
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
35.1351	33.433	122.92	0.1	38.351	26.487	14.5812
$t_1-t_{max}$	$C_{\rho\delta} (\mu g/L)$					
20.521	37.5					

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00272

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 272 - ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 19/07/18 – Πείραμα 1</b>						
$T_a$ ( $^{\circ}C$ )	$S_a$ (ppt)	$\rho_{wa}$ (T)	$\rho_a$ (S,T)	$\rho_a$	$T_0$ ( $^{\circ}C$ )	$S_0$ (ppt)
27.4	0.5	996.4329	996.806	996.7865	29	45.3
$\rho_0$ (T)	$\rho_0$ (S,T)	$\rho_0$	$Q$ (l/h)	$Q'$ ( $cm^3/s$ )	$W$ (cm/s)	$\Delta\rho/\rho_0$
995.98	1029.86	1028.05	44	10.3635	52.7809	0.030394
$g_0'$ ( $cm/s^2$ )	$M$ ( $cm^4/s^2$ )	$B$ ( $cm^4/s^3$ )	$l_Q$	$l_M$	$R_0$	$F_0$
29.807279	546.99457	308.9077	0.4431	6.4354	0.069	13.672
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
19.3061	17.382273	3.3367	0	9.9327	7.50751	11.8641
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
10.2102	11.436	107.64	0.3	12.692	9.105	3.33667
$t_1-t_{max}$	$C_{\rho\delta}$ ( $\mu g/L$ )					
6.8735	42.85					

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00273

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 273 - ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 19/07/18 – Πείραμα 2</b>						
$T_a$ ( $^{\circ}C$ )	$S_a$ (ppt)	$\rho_{wa}$ (T)	$\rho_a$ (S,T)	$\rho_a$	$T_0$ ( $^{\circ}C$ )	$S_0$ (ppt)
27.4	0.6	996.4329	996.881	996.8571	29	45.3
$\rho_0$ (T)	$\rho_0$ (S,T)	$\rho_0$	$Q$ (l/h)	$Q'$ ( $cm^3/s$ )	$W$ (cm/s)	$\Delta\rho/\rho_0$
995.98	1029.86	1028.05	60	14.8499	75.6299	0.030321
$g_0'$ ( $cm/s^2$ )	$M$ ( $cm^4/s^2$ )	$B$ ( $cm^4/s^3$ )	$l_Q$	$l_M$	$R_0$	$F_0$
29.736142	1123.0967	441.5787	0.4431	9.2323	0.048	19.614
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
27.6968	24.28	4.1041	0.0334	13.52	14.1475	17.9341
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
19.7197	15.486	112.58	0.15	17.934	13.52	4.07074
$t_1-t_{max}$	$C_{\rho\delta}$ ( $\mu g/L$ )					
15.616	42.85					

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00275

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 275 - ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 19/07/18 – Πείραμα 3</b>						
$T_a$ ( $^{\circ}C$ )	$S_a$ (ppt)	$\rho_{wa}$ (T)	$\rho_a$ (S,T)	$\rho_a$	$T_0$ ( $^{\circ}C$ )	$S_0$ (ppt)
27.4	0.8	996.4329	997.03	996.9982	29	45.3
$\rho_0$ (T)	$\rho_0$ (S,T)	$\rho_0$	$Q$ (l/h)	$Q'$ ( $cm^3/s$ )	$W$ (cm/s)	$\Delta\rho/\rho_0$
995.98	1029.86	1028.05	80	20.4579	104.191	0.030176
$g_0'$ ( $cm/s^2$ )	$M$ ( $cm^4/s^2$ )	$B$ ( $cm^4/s^3$ )	$l_Q$	$l_M$	$R_0$	$F_0$
29.593954	2131.5337	605.4301	0.4431	12.749	0.035	27.086
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
38.248	30.097083	10.644	3.3033	16.44	20.5205	21.4979
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
24.9917	19.637	143.81	0.15	22.763	16.945	7.34067
$t_1-t_{max}$	$C_{\rho\delta}$ ( $\mu g/L$ )					
14.348	42.85					

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00277

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 277 - ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 19/07/18 – Πείραμα 4</b>						
$T_a$ ( $^{\circ}C$ )	$S_a$ (ppt)	$\rho_{wa}$ (T)	$\rho_a$ (S,T)	$\rho_a$	$T_0$ ( $^{\circ}C$ )	$S_0$ (ppt)
27.5	1.2	996.4052	997.3	997.2522	29	45.3
$\rho_0$ (T)	$\rho_0$ (S,T)	$\rho_0$	$Q$ (l/h)	$Q'$ ( $cm^3/s$ )	$W$ (cm/s)	$\Delta\rho/\rho_0$
995.98	1029.86	1028.05	100	26.0659	132.753	0.029914
$g_0'$ ( $cm/s^2$ )	$M$ ( $cm^4/s^2$ )	$B$ ( $cm^4/s^3$ )	$l_Q$	$l_M$	$R_0$	$F_0$
29.336466	3460.3144	764.6814	0.4431	16.315	0.027	34.662
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
48.9461	45.525	10.143	3.2032	25.384	24.1909	31.4536
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
30.0968	29.255	140.67	0.15	32.005	25.108	6.94027
$t_1-t_{max}$	$C_{\rho\delta}$ ( $\mu g/L$ )					
19.953	42.85					



Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00279

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 279 - ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 19/07/18 – Πείραμα 5</b>						
$T_a (^{\circ}C)$	$S_a (ppt)$	$\rho_{wa} (T)$	$\rho_a (S,T)$	$\rho_a$	$T_0 (^{\circ}C)$	$S_0 (ppt)$
27.6	1.6	996.3775	997.569	997.5056	29	45.3
$\rho_0 (T)$	$\rho_0 (S,T)$	$\rho_0$	$Q (l/h)$	$Q' (cm^3/s)$	$W (cm/s)$	$\Delta\rho/\rho_0$
995.98	1029.86	1028.05	120	31.6739	161.314	0.029652
$g_0'(cm/s^2)$	$M (cm^4/s^2)$	$B (cm^4/s^3)$	$l_Q$	$l_M$	$R_o$	$F_0$
29.079524	5109.4387	921.062	0.4431	19.913	0.022	42.305
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
59.7388	-	-	-	-	-	36.7235
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
38.4718	38.631	142.94	0.1	44.008	31.868	-
$t_1-t_{max}$	$C_{\rho\delta} (\mu g/L)$					
-	42.85					

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00280

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 280 - ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 23/07/18 – Πείραμα 1</b>						
$T_a (^{\circ}C)$	$S_a (ppt)$	$\rho_{wa} (T)$	$\rho_a (S,T)$	$\rho_a$	$T_0 (^{\circ}C)$	$S_0 (ppt)$
27.9	0.5	996.2938	996.667	996.6469	29	26.7
$\rho_0 (T)$	$\rho_0 (S,T)$	$\rho_0$	$Q (l/h)$	$Q' (cm^3/s)$	$W (cm/s)$	$\Delta\rho/\rho_0$
995.98	1015.88	1014.82	35	7.8399	39.9283	0.017885
$g_0'(cm/s^2)$	$M (cm^4/s^2)$	$B (cm^4/s^3)$	$l_Q$	$l_M$	$R_o$	$F_0$
17.540105	313.03374	137.5127	0.4431	6.3463	0.07	13.483
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
19.039	-	-	-	-	-	10.2086
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
0.03337	11.168	43.544	0.15	12.14	9.9327	-
$t_1-t_{max}$	$C_{\rho\delta} (\mu g/L)$					
-	37.5					

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00281

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 281 - ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 23/07/18 – Πείραμα 2</b>						
$T_a (^{\circ}C)$	$S_a (ppt)$	$\rho_{wa} (T)$	$\rho_a (S,T)$	$\rho_a$	$T_0 (^{\circ}C)$	$S_0 (ppt)$
27.9	0.6	996.2938	996.741	996.7173	29	26.7
$\rho_0 (T)$	$\rho_0 (S,T)$	$\rho_0$	$Q (l/h)$	$Q' (cm^3/s)$	$W (cm/s)$	$\Delta\rho/\rho_0$
995.98	1015.88	1014.82	50	12.0459	61.3493	0.017812
$g_0'(cm/s^2)$	$M (cm^4/s^2)$	$B (cm^4/s^3)$	$l_Q$	$l_M$	$R_0$	$F_0$
17.468147	739.00711	210.4195	0.4431	9.7711	0.045	20.759
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
29.3133	34.572609	10.344	0.0667	13.987	20.4538	17.1543
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
27.8278	16.796	117.72	0.1	19.002	14.515	10.2769
$t_1-t_{max}$	$C_{\rho\delta} (\mu g/L)$					
17.484	37.5					

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00283

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 283 - ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 23/07/18 – Πείραμα 3</b>						
$T_a (^{\circ}C)$	$S_a (ppt)$	$\rho_{wa} (T)$	$\rho_a (S,T)$	$\rho_a$	$T_0 (^{\circ}C)$	$S_0 (ppt)$
28	0.7	996.2657	996.787	996.7595	29	26.7
$\rho_0 (T)$	$\rho_0 (S,T)$	$\rho_0$	$Q (l/h)$	$Q' (cm^3/s)$	$W (cm/s)$	$\Delta\rho/\rho_0$
995.98	1015.88	1014.82	60	14.8499	75.6299	0.017766
$g_0'(cm/s^2)$	$M (cm^4/s^2)$	$B (cm^4/s^3)$	$l_Q$	$l_M$	$R_0$	$F_0$
17.423521	1123.0967	258.7375	0.4431	12.061	0.037	25.624
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
36.183	34.836522	14.515	3.5702	18.21	28.3283	20.0574
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
32.1321	20.38	127.09	0.1	22.96	18.21	10.9443
$t_1-t_{max}$	$C_{\rho\delta} (\mu g/L)$					
17.618	37.5					

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00285

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 285 - ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 23/07/18 – Πείραμα 4</b>						
$T_a$ ( $^{\circ}C$ )	$S_a$ (ppt)	$\rho_{wa}$ (T)	$\rho_a$ (S,T)	$\rho_a$	$T_0$ ( $^{\circ}C$ )	$S_0$ (ppt)
27.9	1	996.2938	997.039	996.999	29	26.7
$\rho_0$ (T)	$\rho_0$ (S,T)	$\rho_0$	$Q$ (l/h)	$Q'$ ( $cm^3/s$ )	$W$ (cm/s)	$\Delta\rho/\rho_0$
995.98	1015.88	1014.82	70	17.6539	89.9106	0.017519
$g_0'$ ( $cm/s^2$ )	$M$ ( $cm^4/s^2$ )	$B$ ( $cm^4/s^3$ )	$l_Q$	$l_M$	$R_0$	$F_0$
17.180583	1587.2723	303.3043	0.4431	14.439	0.031	30.677
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
43.3182	44.1455	10.477	0.1335	22.349	32.2656	26.4873
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
38.2716	27.277	134.47	0.1	31.178	22.349	10.3436
$t_1-t_{max}$	$C_{\rho\delta}$ ( $\mu g/L$ )					
27.795	37.5					

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00289

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 289 - ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 23/07/18 – Πείραμα 2</b>						
$T_a$ ( $^{\circ}C$ )	$S_a$ (ppt)	$\rho_{wa}$ (T)	$\rho_a$ (S,T)	$\rho_a$	$T_0$ ( $^{\circ}C$ )	$S_0$ (ppt)
27.9	0.8	996.2938	996.89	996.8582	28.6	48.3
$\rho_0$ (T)	$\rho_0$ (S,T)	$\rho_0$	$Q$ (l/h)	$Q'$ ( $cm^3/s$ )	$W$ (cm/s)	$\Delta\rho/\rho_0$
996.095	1032.26	1030.34	70	17.6539	89.9106	0.032466
$g_0'$ ( $cm/s^2$ )	$M$ ( $cm^4/s^2$ )	$B$ ( $cm^4/s^3$ )	$l_Q$	$l_M$	$R_0$	$F_0$
31.839552	1587.2723	562.0923	0.4431	10.607	0.042	22.534
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
31.8204	32.62625	10.043	0.0334	14.669	16.9503	18.4629
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
22.1221	16.649	90.357	0.15	18.716	14.669	10.01
$t_1-t_{max}$	$C_{\rho\delta}$ ( $\mu g/L$ )					
12.079	42.85					

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00291

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 291 - ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 23/07/18 – Πείραμα 3</b>						
$T_a (^{\circ}C)$	$S_a (ppt)$	$\rho_{wa} (T)$	$\rho_a (S,T)$	$\rho_a$	$T_0 (^{\circ}C)$	$S_0 (ppt)$
27.9	1.1	996.2938	997.113	997.0693	28.6	48.3
$\rho_0 (T)$	$\rho_0 (S,T)$	$\rho_0$	$Q (l/h)$	$Q' (cm^3/s)$	$W (cm/s)$	$\Delta\rho/\rho_0$
996.095	1032.26	1030.34	80	20.4579	104.191	0.03225
$g_0'(cm/s^2)$	$M (cm^4/s^2)$	$B (cm^4/s^3)$	$l_Q$	$l_M$	$R_0$	$F_0$
31.627233	2131.5337	647.0268	0.4431	12.333	0.036	26.201
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
36.9981	36.672917	9.2759	0.367	18.21	21.5215	23.7742
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
27.9279	22.606	101.84	0.15	26.556	18.463	8.90891
$t_1-t_{max}$	$C_{\rho\delta} (\mu g/L)$					
18.652	42.85					

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00293

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 293 - ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 23/07/18 – Πείραμα 4</b>						
$T_a (^{\circ}C)$	$S_a (ppt)$	$\rho_{wa} (T)$	$\rho_a (S,T)$	$\rho_a$	$T_0 (^{\circ}C)$	$S_0 (ppt)$
27.9	1.5	996.2938	997.41	997.3506	28.6	48.3
$\rho_0 (T)$	$\rho_0 (S,T)$	$\rho_0$	$Q (l/h)$	$Q' (cm^3/s)$	$W (cm/s)$	$\Delta\rho/\rho_0$
996.095	1032.26	1030.34	90	23.2619	118.472	0.031961
$g_0'(cm/s^2)$	$M (cm^4/s^2)$	$B (cm^4/s^3)$	$l_Q$	$l_M$	$R_0$	$F_0$
31.344405	2755.8811	729.1304	0.4431	14.086	0.031	29.926
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
42.2585	36.167083	7.2072	0.0667	19,4745833	22.2222	22.5096
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
31.8318	24.327	114.21	0.15	28.327		36.1003
$t_1-t_{max}$	$C_{\rho\delta} (\mu g/L)$					
-4.335	42.85					

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00294

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 294 - ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 21/08/18 – Πείραμα 1</b>						
$T_a (^{\circ}C)$	$S_a (ppt)$	$\rho_{wa} (T)$	$\rho_a (S,T)$	$\rho_a$	$T_0 (^{\circ}C)$	$S_0 (ppt)$
27.9	1.5	996.2938	997.41	997.3506	28.6	48.3
$\rho_0 (T)$	$\rho_0 (S,T)$	$\rho_0$	$Q (l/h)$	$Q' (cm^3/s)$	$W (cm/s)$	$\Delta\rho/\rho_0$
996.677	1026.3	1024.73	50	12.0459	61.3493	0.027329
$g_0'(cm/s^2)$	$M (cm^4/s^2)$	$B (cm^4/s^3)$	$l_Q$	$l_M$	$R_0$	$F_0$
26.801547	739.00711	322.8488	0.4431	7.8884	0.056	16.759
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
23.6651	24.28	6.7067	0.0334	11.876	14.0807	14.2513
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
16.5832	13.77	83.717	0.1	15.571	12.404	6.67334
$t_1-t_{max}$	$C_{\rho\delta} (\mu g/L)$					
9.8765	42.85					

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00295

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 295 - ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 21/08/18 – Πείραμα 2</b>						
$T_a (^{\circ}C)$	$S_a (ppt)$	$\rho_{wa} (T)$	$\rho_a (S,T)$	$\rho_a$	$T_0 (^{\circ}C)$	$S_0 (ppt)$
27.7	0.6	996.3497	996.797	996.7735	26.5	39.5
$\rho_0 (T)$	$\rho_0 (S,T)$	$\rho_0$	$Q (l/h)$	$Q' (cm^3/s)$	$W (cm/s)$	$\Delta\rho/\rho_0$
996.677	1026.3	1024.73	55	13.4479	68.4896	0.027256
$g_0'(cm/s^2)$	$M (cm^4/s^2)$	$B (cm^4/s^3)$	$l_Q$	$l_M$	$R_0$	$Fr$
26.730243	921.04119	359.4656	0.4431	8.8182	0.05	18.734
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
26.4546	25.291667	6.006	0.0334	12.899	14.1475	15.9338
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
20.0868	15.566	75.509	0.1	18.463	13.152	5.97264
$t_1-t_{max}$	$C_{\rho\delta} (\mu g/L)$					
14.081	42.85					

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00296

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 296 - ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 21/08/18 – Πείραμα 3</b>						
$T_a$ ( $^{\circ}C$ )	$S_a$ (ppt)	$\rho_{wa}$ (T)	$\rho_a$ (S,T)	$\rho_a$	$T_0$ ( $^{\circ}C$ )	$S_0$ (ppt)
27.7	0.7	996.3497	996.872	996.844	26.5	39.5
$\rho_0$ (T)	$\rho_0$ (S,T)	$\rho_0$	$Q$ (l/h)	$Q'$ ( $cm^3/s$ )	$W$ (cm/s)	$\Delta\rho/\rho_0$
996.677	1026.3	1024.73	55	13.4479	68.4896	0.027184
$g_0'$ ( $cm/s^2$ )	$M$ ( $cm^4/s^2$ )	$B$ ( $cm^4/s^3$ )	$l_Q$	$l_M$	$R_0$	$F_0$
26.658967	921.04119	358.5071	0.4431	8.83	0.05	18.759
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
26.49	28.766522	5.639	0.0334	13.46	16.1828	15.307
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
21.4214	15.022	95.229	0.1	16.89	12.932	5.60561
$t_1-t_{max}$	$C_{\rho\delta}$ ( $\mu g/L$ )					
15.782	42.85					

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00297

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 297 - ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 21/08/18 – Πείραμα 4</b>						
$T_a$ ( $^{\circ}C$ )	$S_a$ (ppt)	$\rho_{wa}$ (T)	$\rho_a$ (S,T)	$\rho_a$	$T_0$ ( $^{\circ}C$ )	$S_0$ (ppt)
27.7	0.8	996.3497	996.946	996.9145	26.5	39.5
$\rho_0$ (T)	$\rho_0$ (S,T)	$\rho_0$	$Q$ (l/h)	$Q'$ ( $cm^3/s$ )	$W$ (cm/s)	$\Delta\rho/\rho_0$
996.677	1026.3	1024.73	68	17.0931	87.0544	0.027111
$g_0'$ ( $cm/s^2$ )	$M$ ( $cm^4/s^2$ )	$B$ ( $cm^4/s^3$ )	$l_Q$	$l_M$	$R_0$	$Fr$
26.587719	1488.0303	454.4665	0.4431	11.238	0.039	23.876
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
33.7155	34.836522	7.6076	0.0334	16.627	15.4488	24.5439
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
29.1291	22.889	91.158	0.1	25.336	19.266	7.57424
$t_1-t_{max}$	$C_{\rho\delta}$ ( $\mu g/L$ )					
21.522	42.85					

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00298

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 298 - ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 21/08/18 – Πείραμα 5</b>						
$T_a$ ( $^{\circ}C$ )	$S_a$ (ppt)	$\rho_{wa}$ (T)	$\rho_a$ (S,T)	$\rho_a$	$T_0$ ( $^{\circ}C$ )	$S_0$ (ppt)
27.7	1	996.3497	997.095	997.0554	26.5	39.5
$\rho_0$ (T)	$\rho_0$ (S,T)	$\rho_0$	$Q$ (l/h)	$Q'$ ( $cm^3/s$ )	$W$ (cm/s)	$\Delta\rho/\rho_0$
996.677	1026.3	1024.73	68	17.0931	87.0544	0.026966
$g_0'$ ( $cm/s^2$ )	$M$ ( $cm^4/s^2$ )	$B$ ( $cm^4/s^3$ )	$l_Q$	$l_M$	$R_0$	$F_0$
26.445292	1488.0303	452.032	0.4431	11.269	0.039	23.94
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
33.8061	32.725217	10.244	5.2719	14.779	23.5903	20.5852
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
26.2262	20.937	86.653	0.1	24.544	17.418	4.97164
$t_1-t_{max}$	$C_{\rho\delta}$ ( $\mu g/L$ )					
15.983	42.85					

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00300

<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 300 - ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 21/08/18 – Πείραμα 6</b>						
$T_a$ ( $^{\circ}C$ )	$S_a$ (ppt)	$\rho_{wa}$ (T)	$\rho_a$ (S,T)	$\rho_a$	$T_0$ ( $^{\circ}C$ )	$S_0$ (ppt)
27.7	1.1	996.3497	997.17	997.1258	26.5	39.5
$\rho_0$ (T)	$\rho_0$ (S,T)	$\rho_0$	$Q$ (l/h)	$Q'$ ( $cm^3/s$ )	$W$ (cm/s)	$\Delta\rho/\rho_0$
996.677	1026.3	1024.73	84	21.5795	109.903	0.026893
$g_0'$ ( $cm/s^2$ )	$M$ ( $cm^4/s^2$ )	$B$ ( $cm^4/s^3$ )	$l_Q$	$l_M$	$R_0$	$F_0$
26.37411	2371.6624	569.1401	0.4431	14.246	0.031	30.265
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
42.7367	37.634	9.2426	0.0334	18.938	18.7187	25.0084
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
25.2252	25.12	95.295	0.1	28.165	20.881	9.20921
$t_1-t_{max}$	$C_{\rho\delta}$ ( $\mu g/L$ )					
15.983	42.85					

Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειράματος 00301

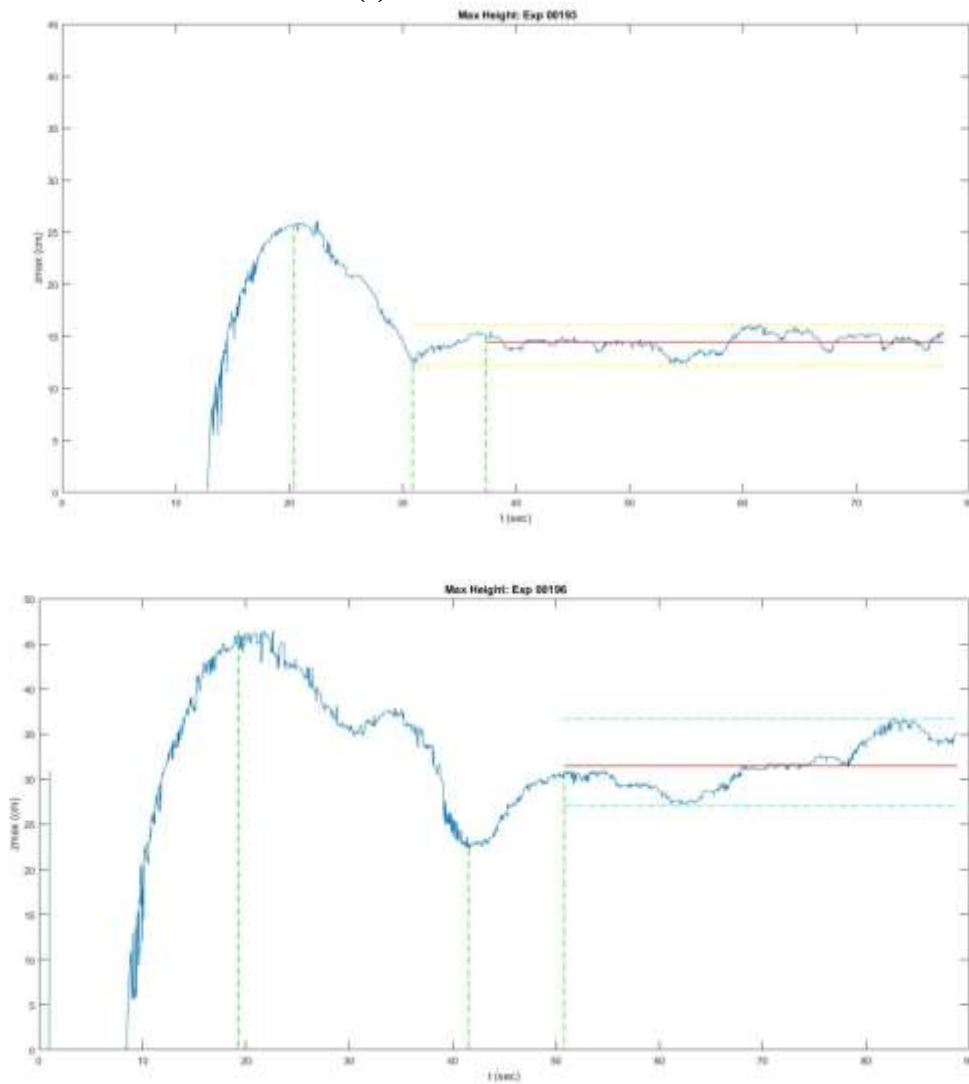
<b>ΠΕΙΡΑΜΑ: Βίντεο 301 - ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 21/08/18 – Πείραμα 7</b>						
$T_a$ ( $^{\circ}C$ )	$S_a$ (ppt)	$\rho_{wa}$ (T)	$\rho_a$ (S,T)	$\rho_a$	$T_0$ ( $^{\circ}C$ )	$S_0$ (ppt)
27.7	1.1	996.3497	997.17	997.1258	26.5	39.5
$\rho_0$ (T)	$\rho_0$ (S,T)	$\rho_0$	$Q$ (l/h)	$Q'$ ( $cm^3/s$ )	$W$ (cm/s)	$\Delta\rho/\rho_0$
996.677	1026.3	1024.73	110	28.8699	147.033	0.026893
$g_0'$ ( $cm/s^2$ )	$M$ ( $cm^4/s^2$ )	$B$ ( $cm^4/s^3$ )	$l_Q$	$l_M$	$R_o$	$F_0$
26.37411	4244.8336	761.4179	0.4431	19.058	0.023	40.489
$3 l_M$	$Z_{max}$	$t_{max}$	$t_0$	$Z_{min}$	$t_{min}$	$Z_1$
57.1749	-	-	-	-	-	38.0035
$t_1$	$Z$	$t_{end}$	$Thres$	$lim_{max}$	$lim_{min}$	$t_{max}-t_0$
11.9119	34.937	94.228	0.1	39.851	28.239	-
$t_1-t_{max}$	$C_{\rho\delta}$ ( $\mu g/L$ )					
-	42.85					

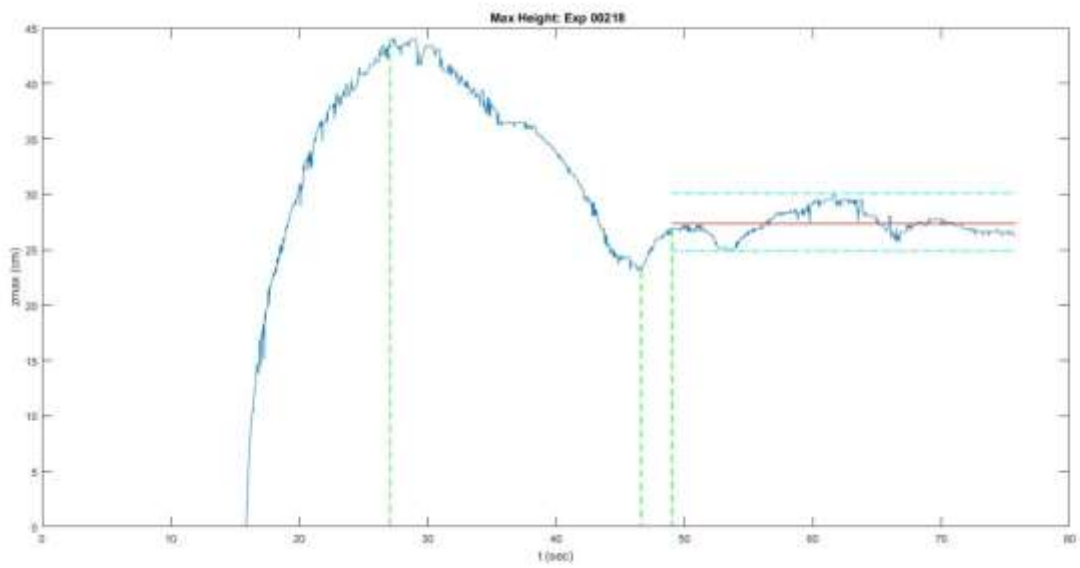
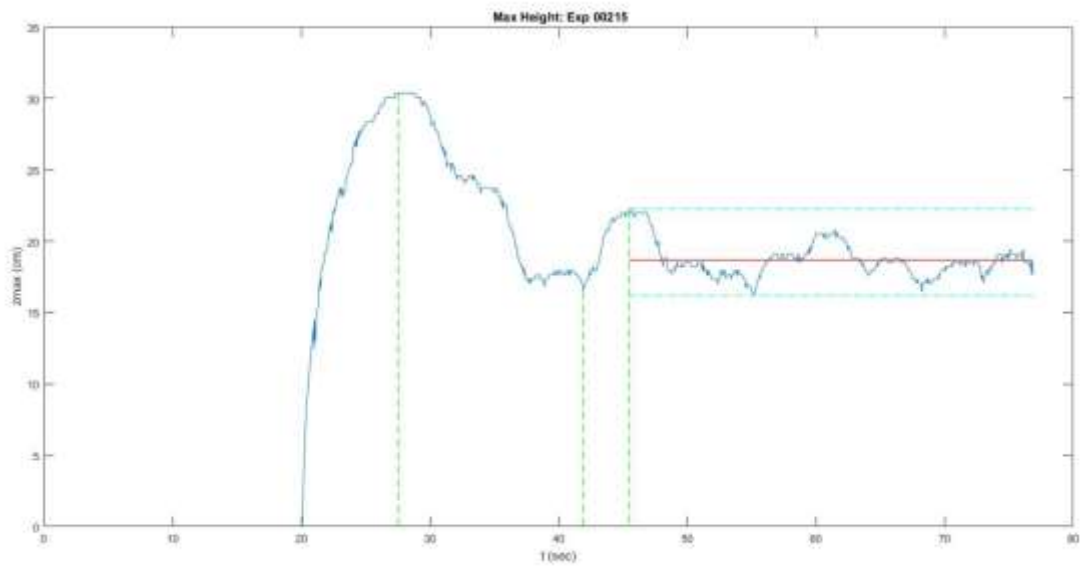
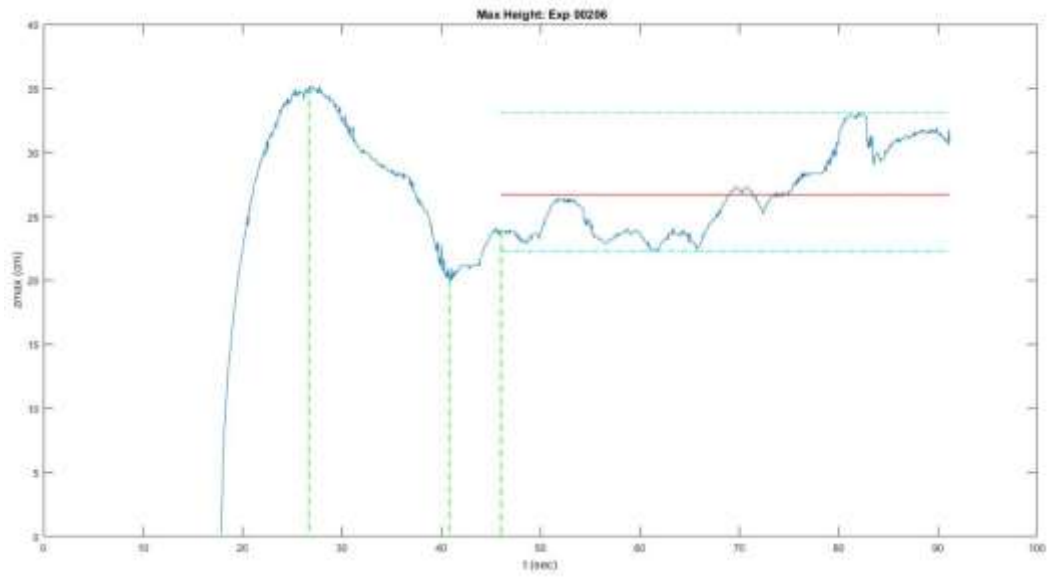


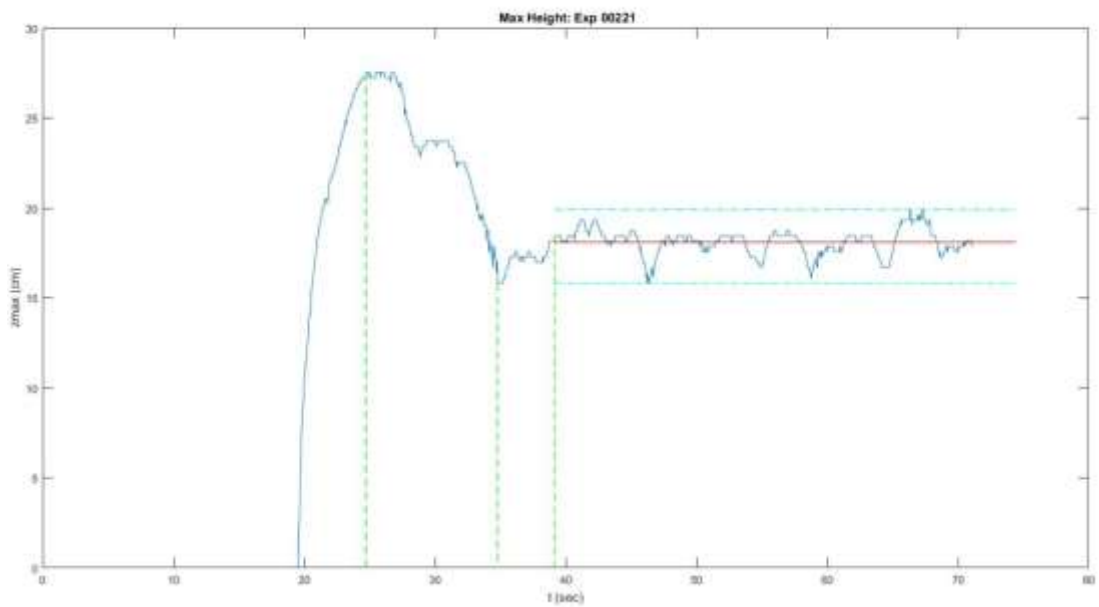
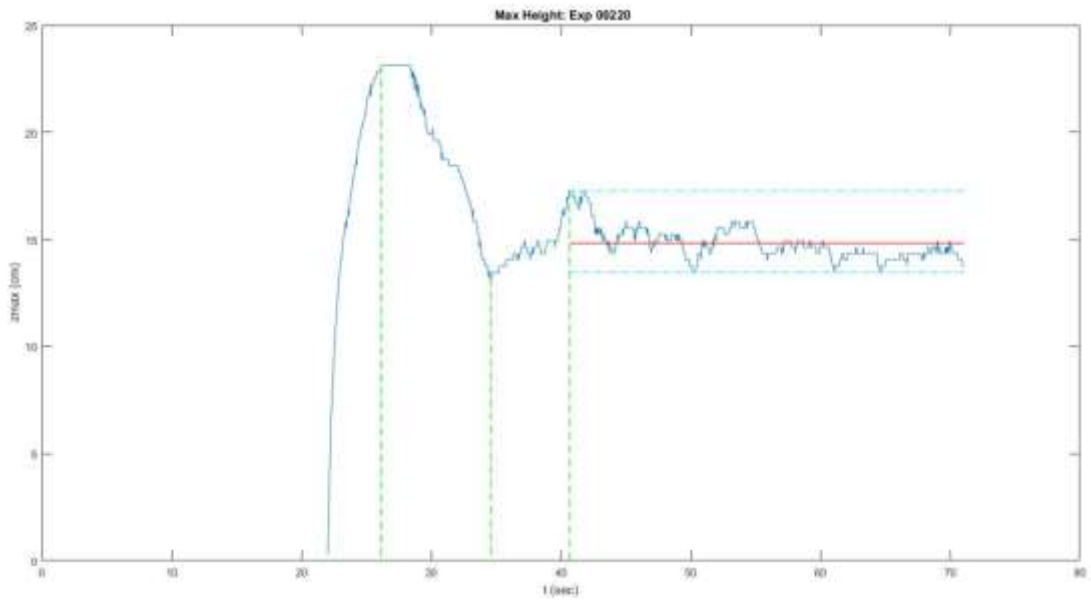
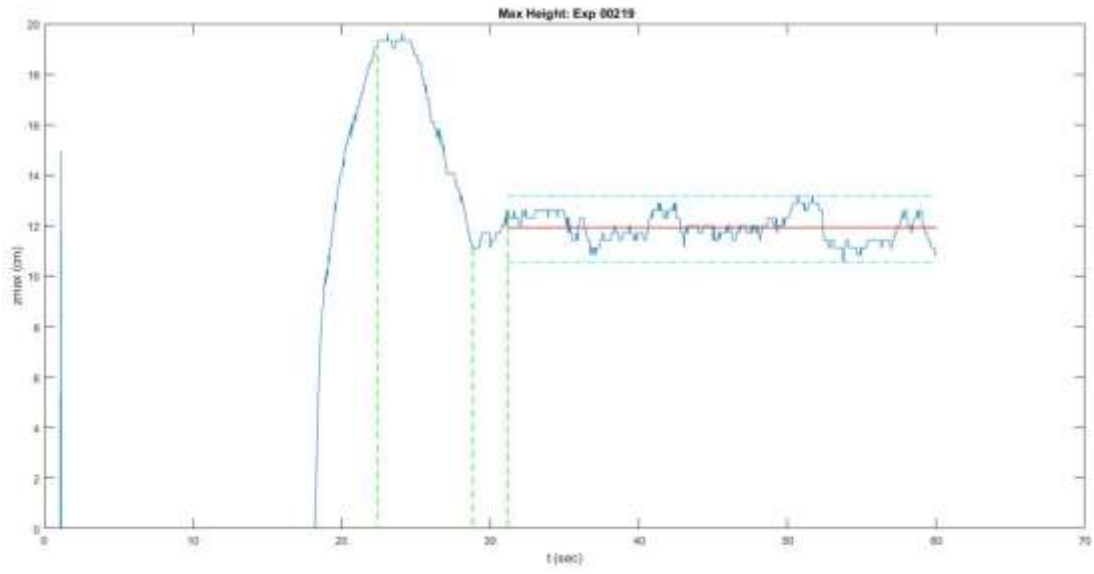
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

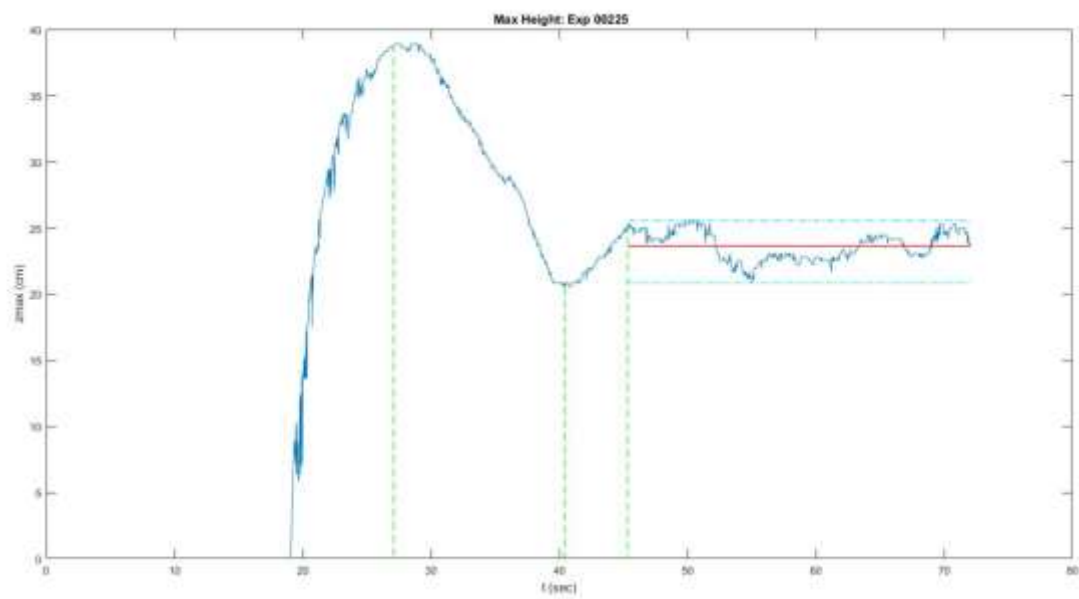
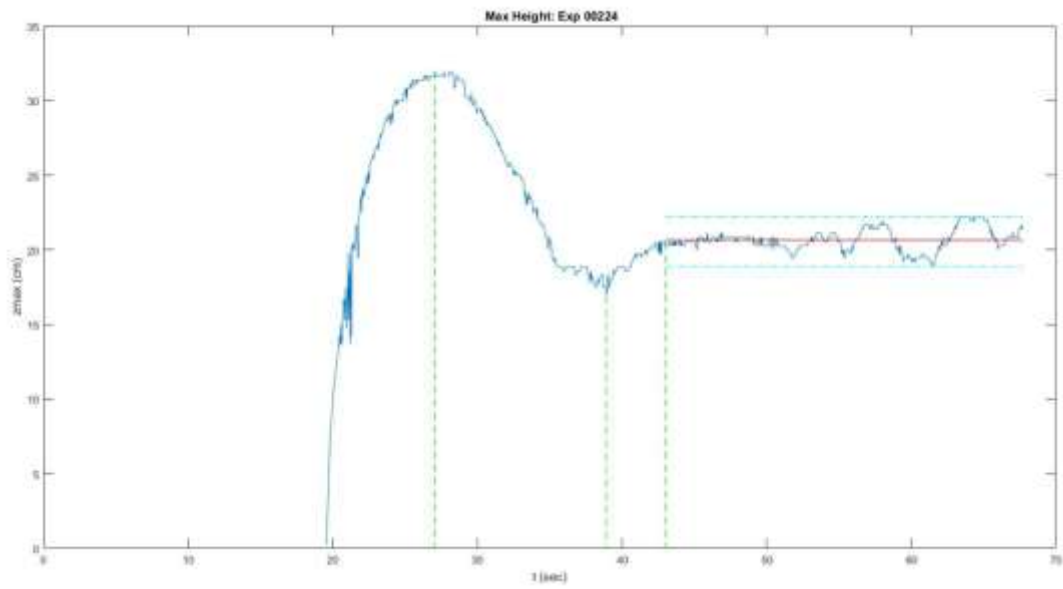
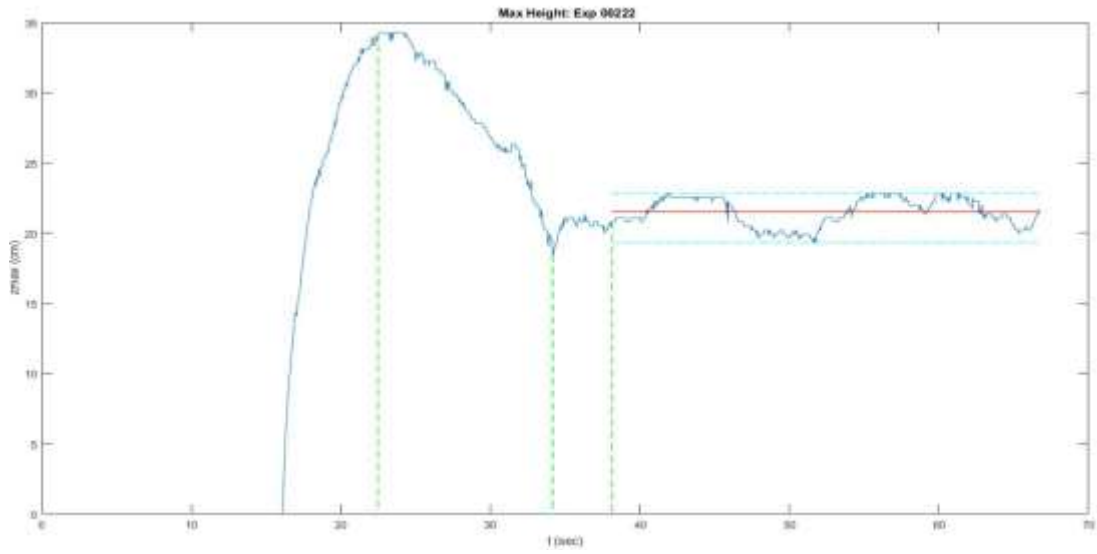
Στο σημείο αυτό παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα περισσότερα διαγράμματα του ύψους  $z(t)$  και από τις δύο τεχνικές.

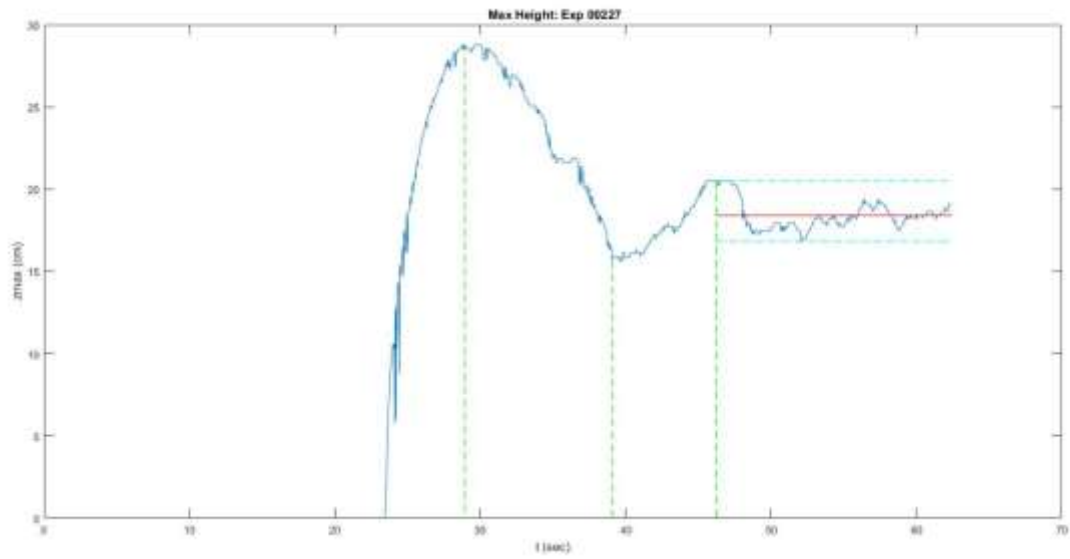
### ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΥΨΟΥΣ $Z(t)$ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΟΥ ΣΚΙΑΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ



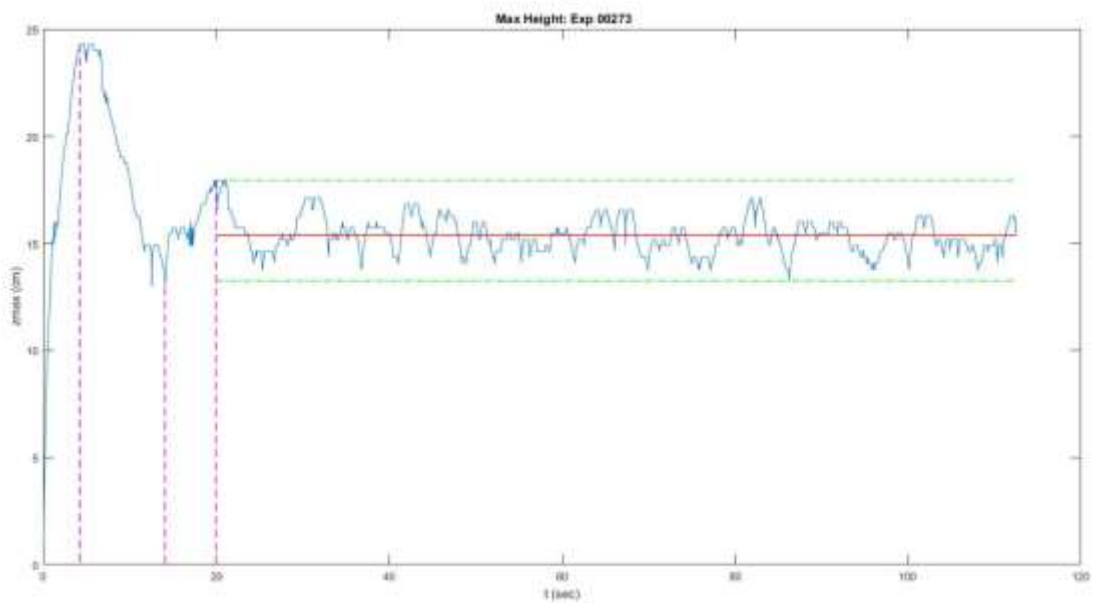
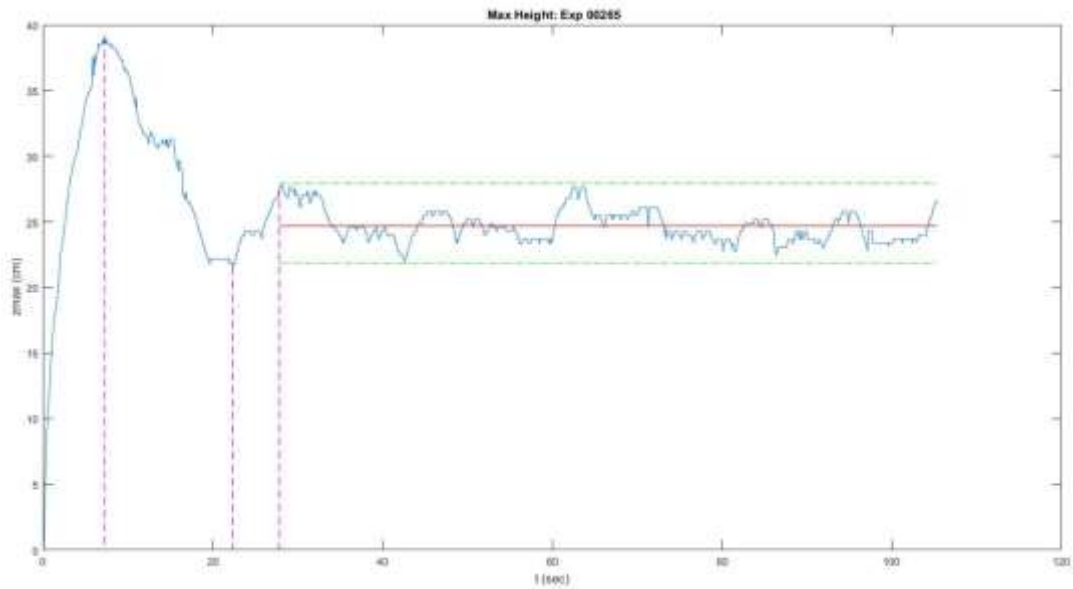


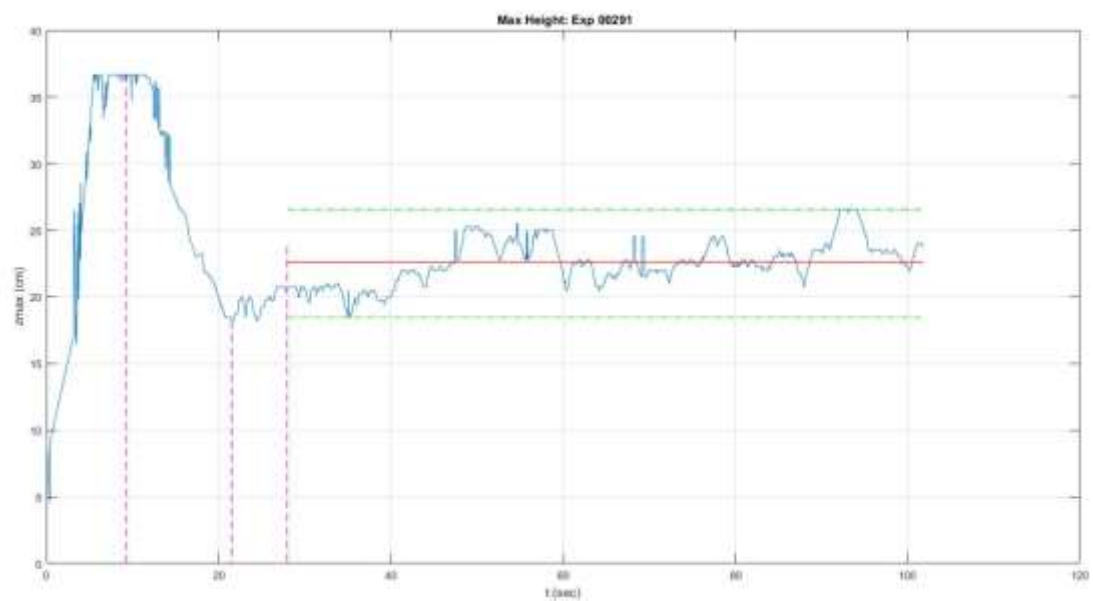
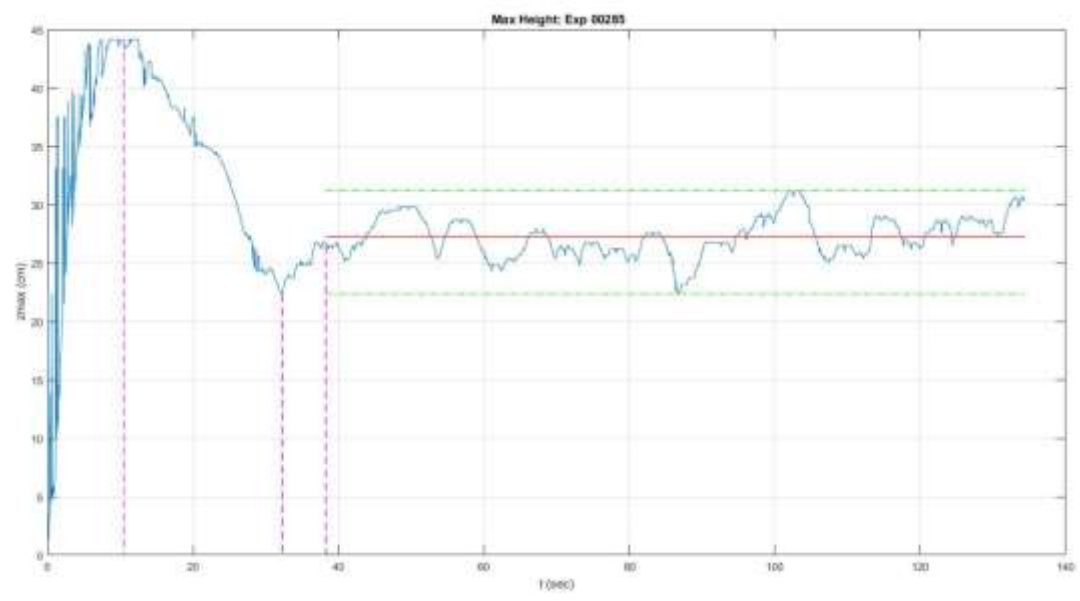
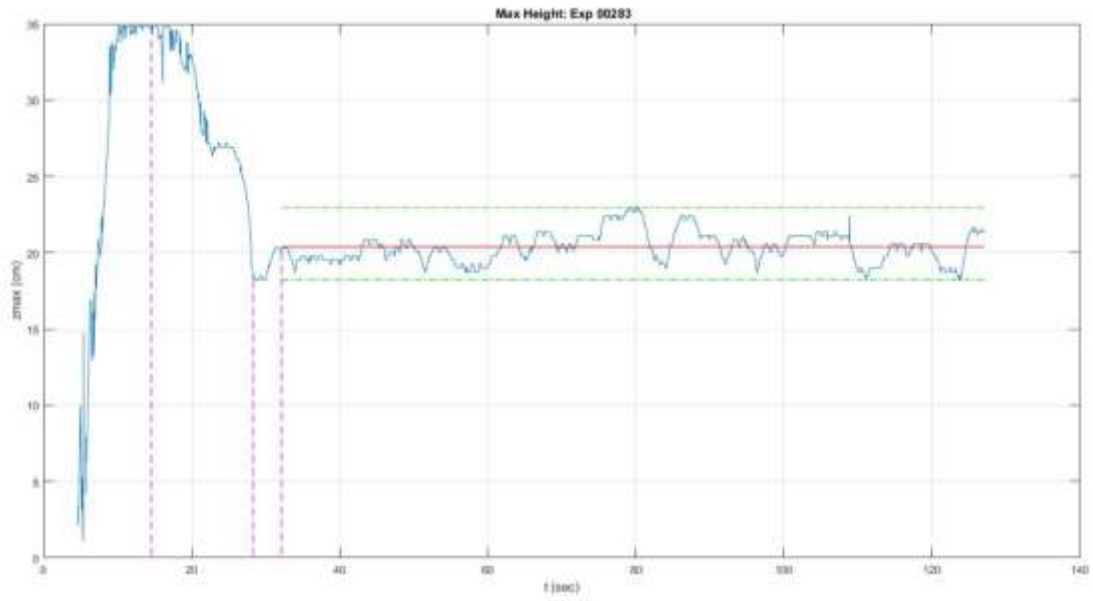


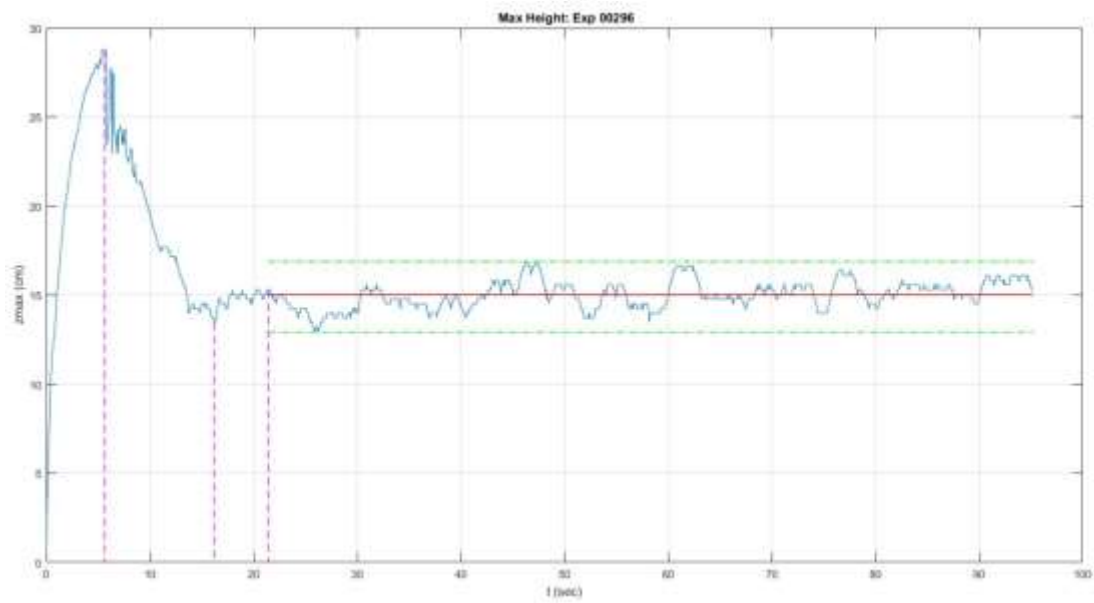
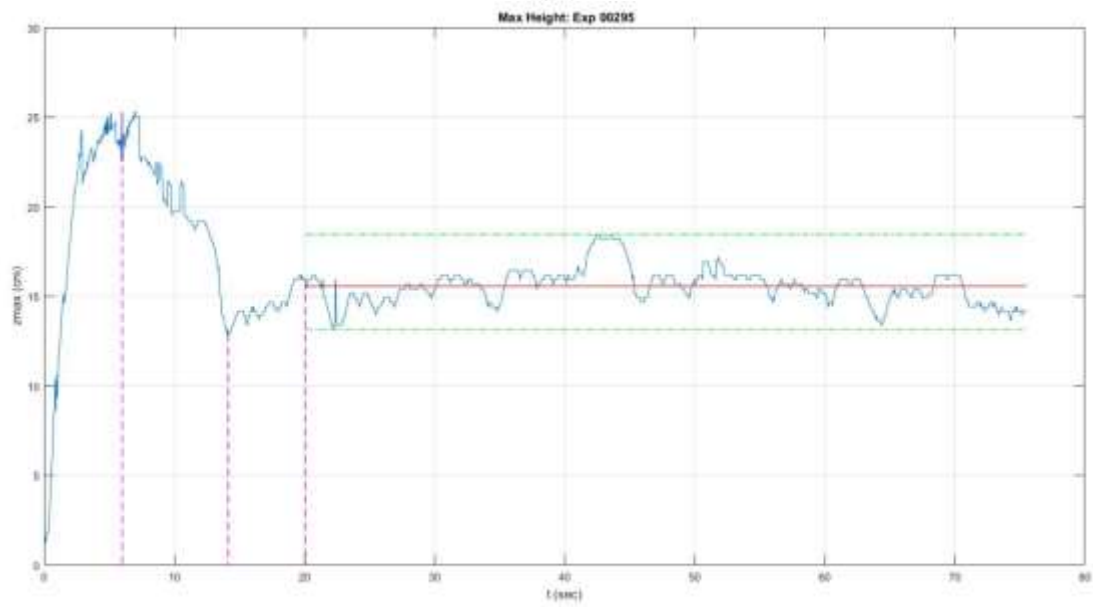
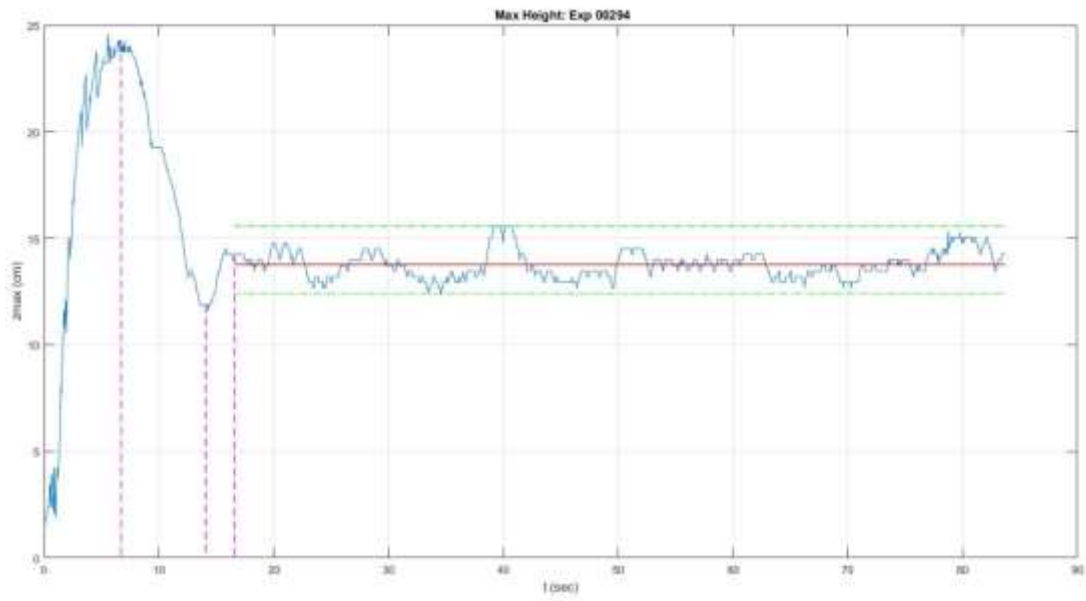


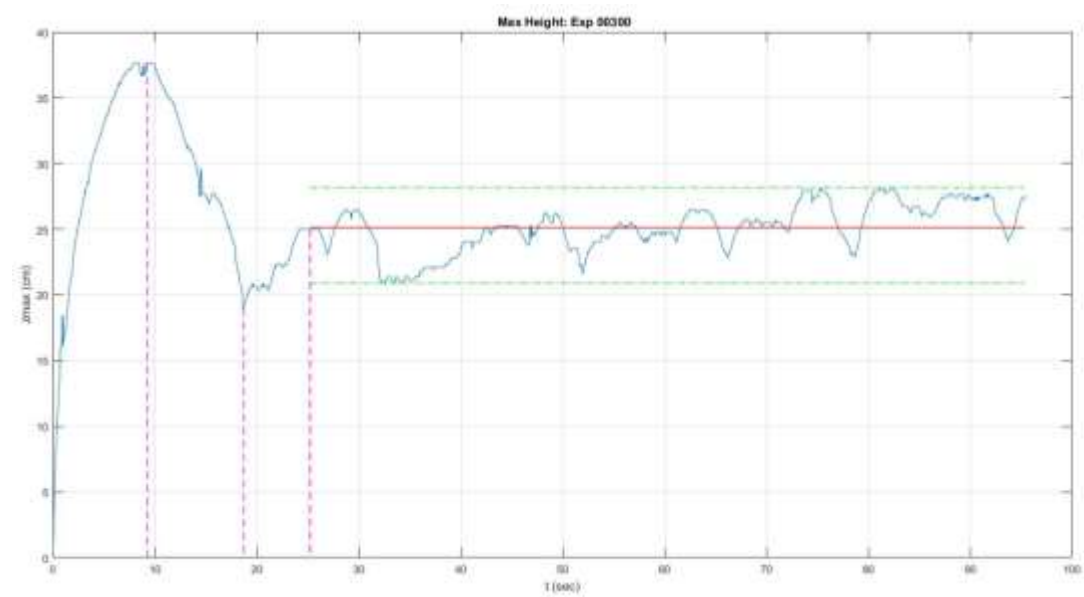
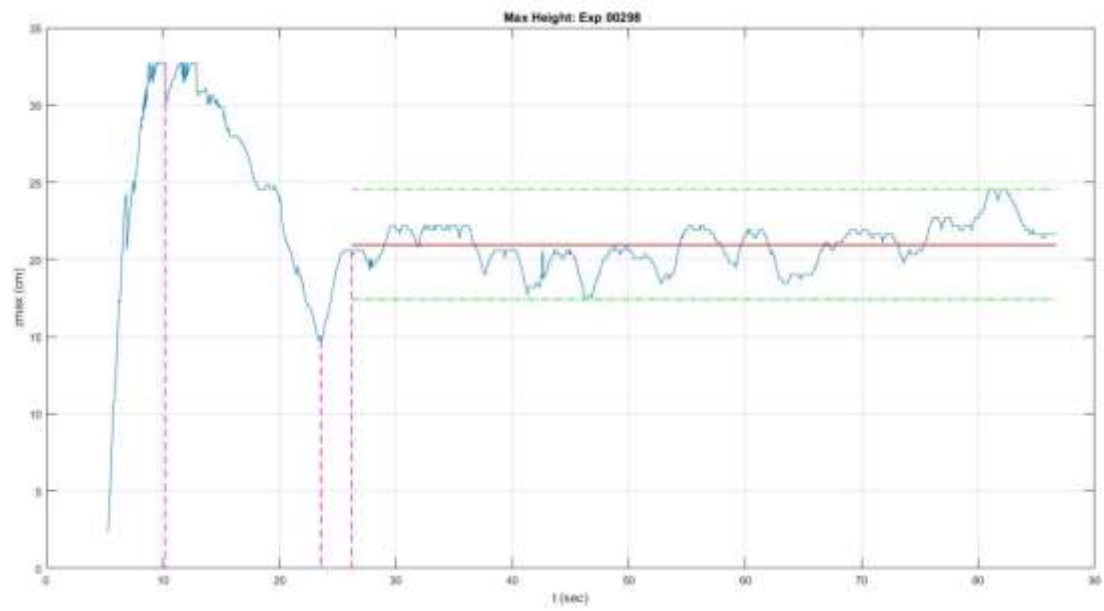
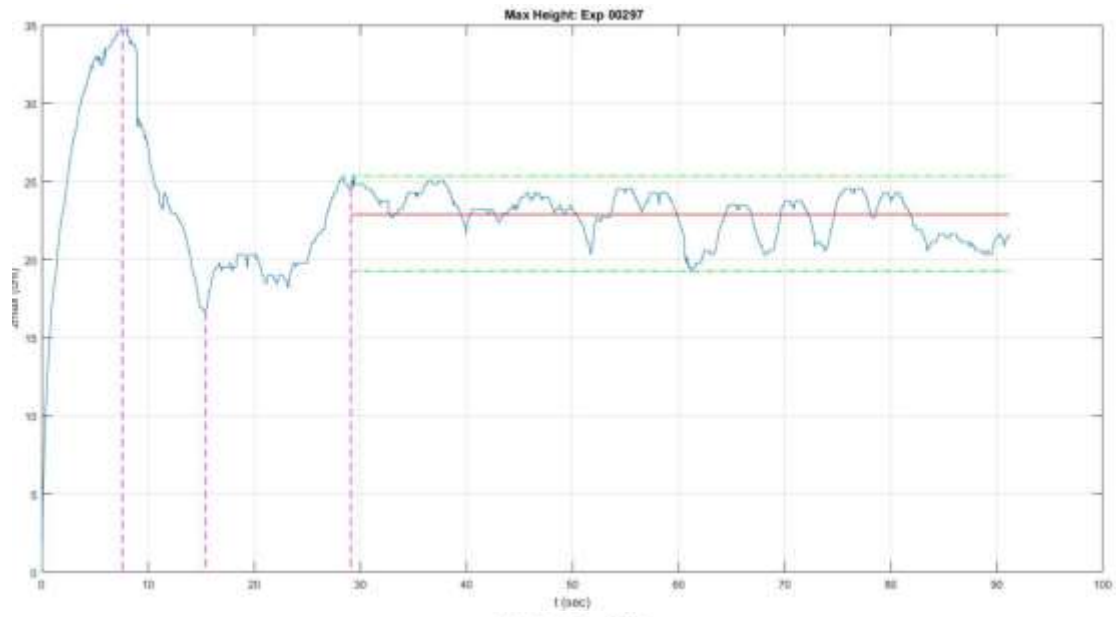


**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΥΨΟΥΣ  $Z(t)$  ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΡΛΙΦ**





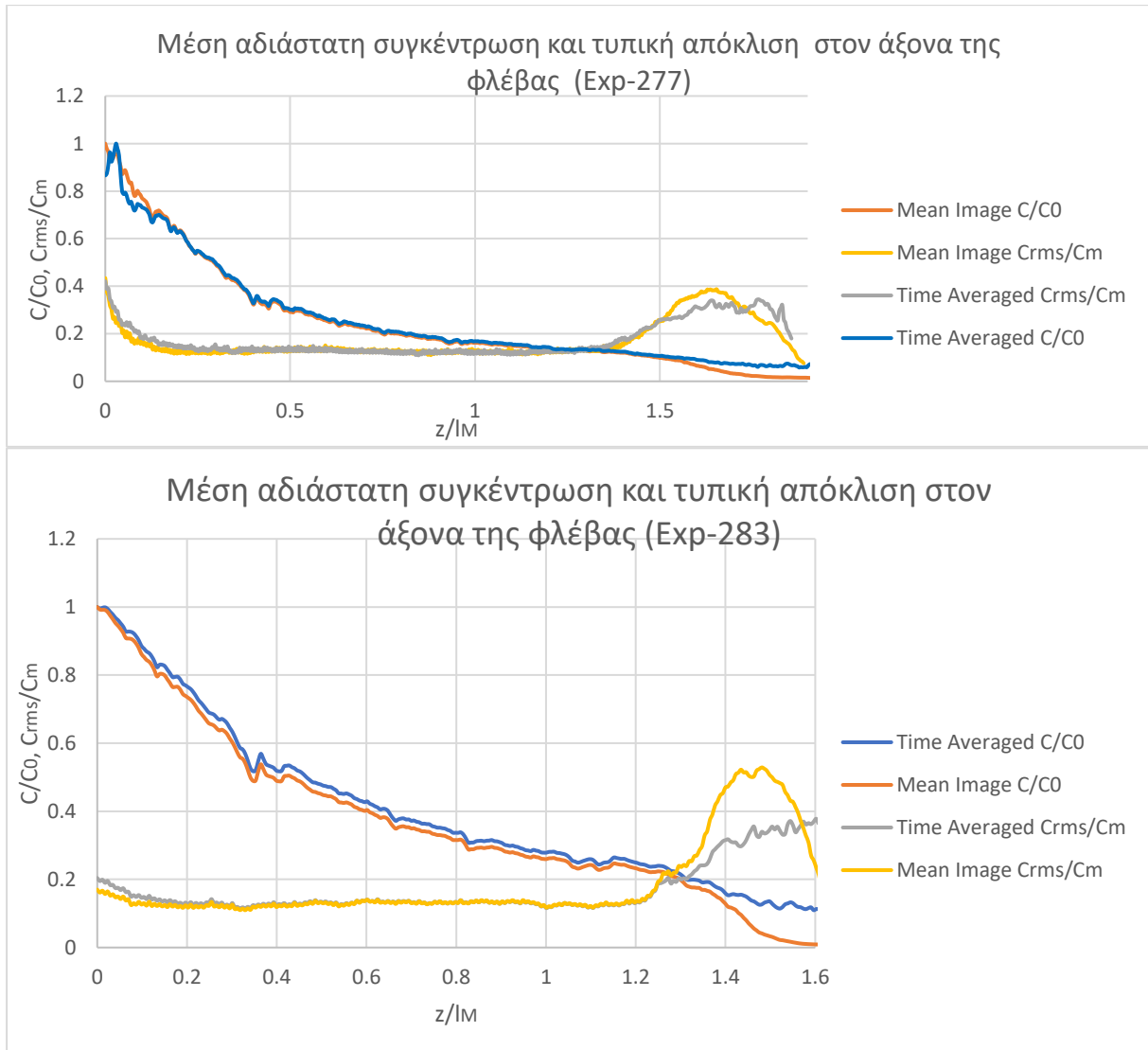




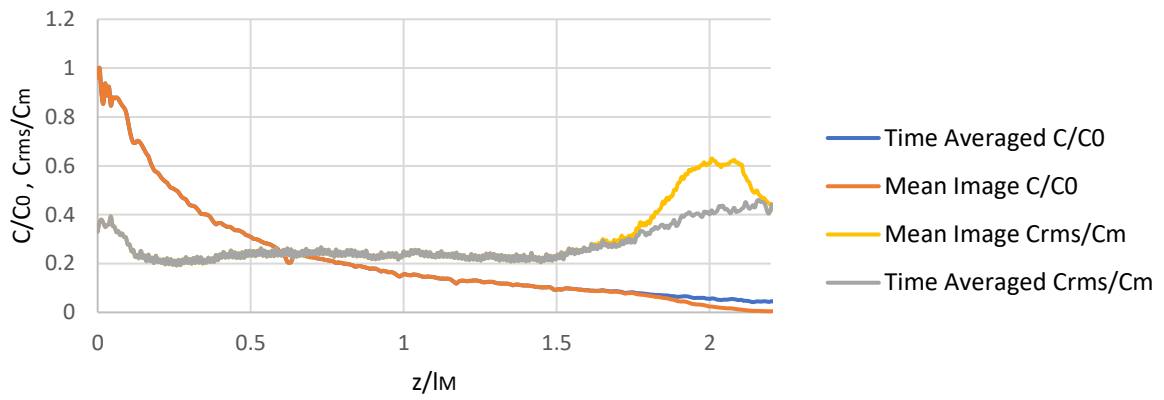


## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

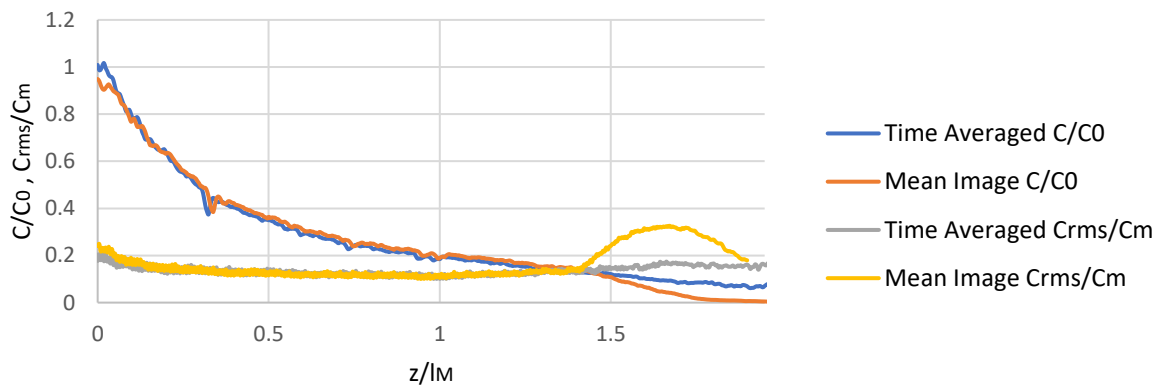
Στο μέρος αυτό παρουσιάζονται τα διαγράμματα της μέσης αδιάστατης συγκέντρωσης και έντασης της τύρβης στον άξονα της φλέβας, ενδεικτικά για τα πειράματα που αναφέρονται στο κυρίως κείμενο. Στη συνέχεια παρουσιάζονται και τα διαγράμματα των χρονοσειρών της έντασης του κόκκινου χρώματος.



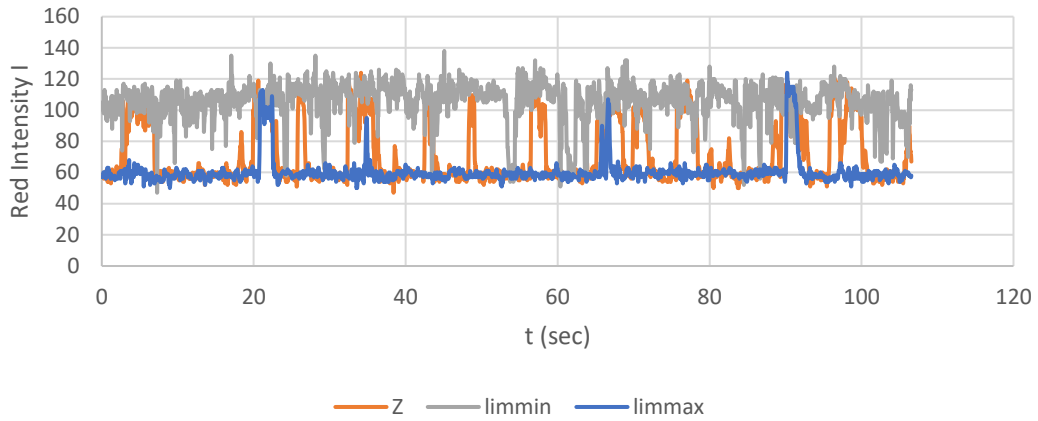
Μέση αδιάστατη συγκέντρωση και τυπική απόκλιση στον άξονα της φλέβας (Exp-297)



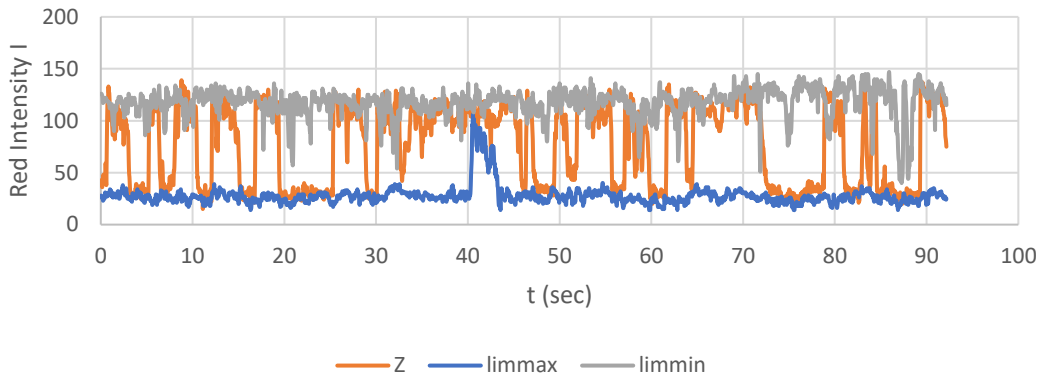
Μέση αδιάστατη συγκέντρωση και τυπική απόκλιση στον άξονα της φλέβας (exp-300)



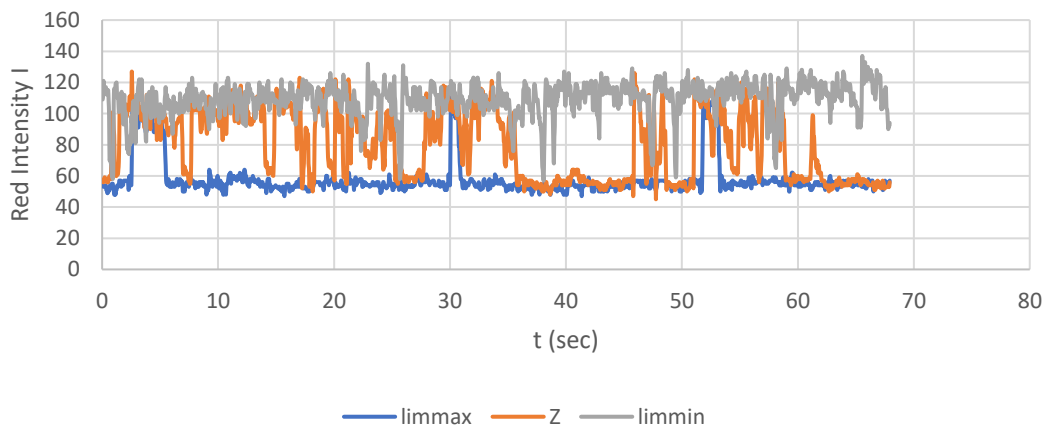
Χρονοσειρά έντασης κόκκινου χρώματος I στον άξονα της φλέβας  
(Exp-277)



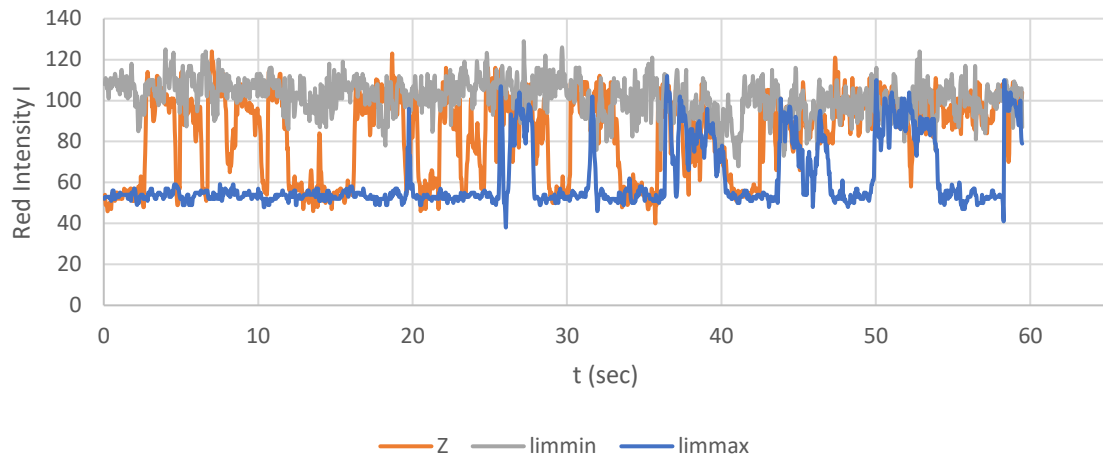
Χρονοσειρά έντασης κόκκινου χρώματος I στον άξονα της φλέβας  
(Exp-283)



Χρονοσειρά έντασης κόκκινου χρώματος στον άξονα της φλέβας  
(Exp-297)



Χρονοσειρά έντασης κόκκινου χρώματος I στον άξονα της φλέβας  
(Exp-300)



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

Στο μέρος αυτό παρουσιάζονται οι κώδικες που καταστρώθηκαν για την επεξεργασία των δεδομένων

- **ΚΩΔΙΚΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΕΣΟΥ ΚΑΝΑΒΟΥ**

```
% Open the video viewer and export the image you would like to process to image
% tool. Choose the appropriate coordinates in order to form the grid.
clc; clear all;
```

```
% BACK GRID (red color).
% Coordinates for back grid.
xb1=88;xb2=250;xb3=251;xb4=88;
yb1=62;yb2=62;yb3=224;yb4=225;
% Back upper line back1.
back1=line([xb1,xb2],[yb1,yb2],'Color','r','LineWidth',2);
% Back right line back2.
back2=line([xb2,xb3],[yb2,yb3],'Color','r','LineWidth',2);
% Back down line back3.
back3=line([xb3,xb4],[yb3,yb4],'Color','r','LineWidth',2);
% Back left line back3.
back4=line([xb1,xb4],[yb1,yb4],'Color','r','LineWidth',2);
% FRONT GRID (blue color).
% Coordinates for front grid.
xf1=101;xf2=425;xf3=426;xf4=100;
yf1=72;yf2=70;yf3=212;yf4=214;
% Front upper line front1.
front1=line([xf1,xf2],[yf1,yf2],'Color','b','LineWidth',2);
% Front right line front2.
front2=line([xf2,xf3],[yf2,yf3],'Color','b','LineWidth',2);
% Front down line front3.
front3=line([xf3,xf4],[yf3,yf4],'Color','b','LineWidth',2);
% Front left line front4.
front4=line([xf1,xf4],[yf1,yf4],'Color','b','LineWidth',2);
% MID GRID (blue color).
% Coordinates for front grid.
xm1=(xf1+xb1)/2;xm2=xb2;xm3=xb2;xm4=(xf4+xb4)/2;
ym1=(yf1+yb1)/2;ym2=(yf2+yb2)/2;ym3=(yf3+yb3)/2;ym4=(yf4+yb4)/2;
% Mid upper line front1.
mid1=line([xm1,xm2],[ym1,ym2],'Color','y','LineWidth',1.5);
% Mid right line front2.
mid2=line([xm2,xm3],[ym2,ym3],'Color','y','LineWidth',1.5);
% Mid down line front3.
mid3=line([xm3,xm4],[ym3,ym4],'Color','y','LineWidth',1.5);
```

```
%Mid left line front4.  
mid4=line([xm1,xm4],[ym1,ym4],'Color','y','LineWidth',1.5);
```

```
%Lenght of mid- grid in pixels  
Lvert=(ym3-ym2);
```

- **ΚΩΔΙΚΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΥΨΟΥΣ Z(t)**

```

clc; clear all; format long;
Thres=0.07; FrD=30; ReS=1; Step=1;
path='C:\Users\kapojohn\Desktop\video-mp4\shadowgraph';
tic; name='00197';
VID=VideoReader([path '\' name '.mp4']); % Video Image Data
NoF=VID.NumberOfFrames;          DRT=VID.Duration;          FpS=VID.FrameRate;
ViFo=VID.VideoFormat; %Number of Frames, Duration of Video (sec), Frames Rate
(Frames per secs), Video Format (in RGB)
MaxHeight(1:FrD-1,1)=NaN;
for K=1+FrD:Step:NoF
Frame=read(VID,K-FrD); DF0=double(rgb2gray(Frame));
Frame=read(VID,K); DF=double(rgb2gray(Frame));
DDF=abs(DF-DF0); Imin=30; Imax=210; Jmin=205; Jmax=285;
DDFm=NaN(numel(DDF(:,1)),numel(DDF(1,:)));
if ReS>1
for I=Imin:Imax; for J=Jmin:Jmax; DDFm(I,J)=nanmean(nanmean(DDF(I-
floor(ReS/2):I+floor(ReS/2),J-floor(ReS/2):J+floor(ReS/2)))); end; end
else DDFm=DDF(Imin:Imax,Jmin:Jmax);
end
[DI,DJ]=find(DDFm/256>Thres); DIJ=[DI DJ];
if numel(DJ)>0
for I=1:max(DJ)-min(DJ)+1
if numel(find(I+min(DJ)-1==DJ))>0
Height{K}(I,1)=min(DIJ(DIJ(:,2)==I+min(DJ)-1)); else Height{K}(I,1)=NaN;
end
Height{K}(I,2)=I+min(DJ)-1;
end
MaxHeight(K,1)=Imax-Imin-min(Height{K}(:,1)); else MaxHeight(K,1)=NaN;
end

```

```
Executed=[num2str(K) ' of ' num2str(NoF) ']; dt = ' num2str(toc) ' MaxHeight = '
num2str(MaxHeight(K,1)); Executed
end
plot(MaxHeight);
title('MaxHeight');
xlabel('K (frames)');
ylabel('Max Height (pixels)');
[Y,I]=max(MaxHeight)
save(['C:\Users\kapjohn\Desktop\expmat\MAX-RES\MAX' name '.mat'],'MaxHeight','Y','I');
save(['C:\Users\kapjohn\Desktop\expmat\MAX-RES\plot\plot' name '.fig'],'MaxHeight');
```



- **ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΥΨΟΥΣ  $Z(t)$**

```

name='00263';
figure,plot(t,zmax);
str=sprintf(' Max Height: Exp %s',name);
title(str);
xlabel('t (sec)');
ylabel('zmax (cm)');
X0=87;%Start time in frames
Xmax=296;%Χρονική στιγμή όπου το ύψος είναι μέγιστο
Ymax=90;%Μέγιστο ύψος σε (px)
Xmin=583;%Χρονική στιγμή στην οποία εμφανίζεται το ελάχιστο ύψος
Ymin=53;%Ελάχιστο ύψος
X1=824;% χρονικη στιγμή στην οποια υπολογιζεται η μεση τιμη
Y1=67; %η τιμη του z απ την οποια αρχιζει ο υπολογισμος της μεσης τιμης
Xend=2899;%End time
t0=X0/FpS;%Start time in sec
Zmax=Ymax*f;% Max height zmax in cm
tmax=Xmax/FpS;
Zmin=Ymin*f;
tmin=Xmin/FpS;
Z1=Y1*f;
t1=X1/FpS;
tend=Xend/FpS;
d0=t1-t0; % Χρονικη διαρκεια απο την εναρξη εως τη χρονικη στιγμή που θεωρω το steady
state
dmax=tmax-t0; % Χρονικη διαρκεια απο την εναρξη εως το μεγιστο
dmin=tmin-t0;% Χρονικη διαρκεια απο την εναρξη εως το ελαχιστο
d1=t1-tmax;% Χρονικη διαρκεια απο το μεγιστο εως το steady state
dmaxmin=tmin-tmax;% Χρονικη διαρκεια απο το μεγιστο εως το ελαχιστο

```

```
linetmax=line([tmax,tmax],[Zmax,0],'Color','m','LineWidth',1,'LineStyle','--');
```

```
linetmin=line([tmin,tmin],[Zmin,0],'Color','m','LineWidth',1,'LineStyle','--');
```

```
linet1=line([t1,t1],[Z1,0],'Color','m','LineWidth',1,'LineStyle','--');
```

```
Zmean=mean(zmax(X1:Xend)); % Mean value of height z
```

```
maxlimit=max(zmax(X1:Xend)); % Max value of height z
```

```
minlimit=min(zmax(X1:Xend));
```

```
linemean=line([t1,tend],[Zmean,Zmean],'Color','r','LineWidth',1,'LineStyle','-');
```

```
linemaxlim=line([t1,tend],[maxlimit,maxlimit],'Color','g','LineWidth',1,'LineStyle','-');
```

```
linemaxlim=line([t1,tend],[minlimit,minlimit],'Color','g','LineWidth',1,'LineStyle','-');
```

- **ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΣΗΣ ΚΑΙ RMS ΕΙΚΟΝΑΣ**

```

clc;clear all;

DF2=zeros(1080,1920,3);
DFrms=zeros(1080,1920,3);
K22=1250;
path2='C:\Users\kapjohn\Desktop\video-mp4\LIF - exp\23-7-18';
tic; name2='00283';
VID2=VideoReader([path2 '\ name2 '.mp4]); %Video Image Data
NoF2=VID2.NumberOfFrames;      DRT1=VID2.Duration;      FpS2=VID2.FrameRate;
ViFo2=VID2.VideoFormat; %Number of Frames, Duration of Video (sec), Frames Rate
(Frames per secs), Video Format (in RGB)
for K2=K22:NoF2
Frame2=read(VID2,K2); %Store Frame
DF2=DF2+double(Frame2);
Executed=[num2str(K2) ' of ' num2str(NoF2) '; dt = ' num2str(toc)]; Executed
end
DF2m=DF2./(NoF2-K22);
%DF2m=DF2./(10);
DF=DF2m(:, :, 1);
xlswrite('EXP283.xlsx',DF,'1','C4');
for K2=K22:NoF2
Framerms=read(VID2,K2); %Store Frame
DFrms=((double(Framerms)-DF2m).^2)+DFrms;
Executed=[num2str(K2) ' of ' num2str(NoF2) '; dt = ' num2str(toc)]; Executed
end
xrms=sqrt((1/(NoF2-K22)).*DFrms);
DFstdev=xrms(:, :, 1);
xlswrite('EXP283.xlsx',DFstdev,'2','C4');

```

## • ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΙΜΩΝ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑΣ

```
clc;clear all;
K11=1250;
J1=866;
J2=885;
J3=904;
J4=922;
J5=941;
path1='C:\Users\kapojohn\Desktop\video-mp4\LIF - exp\22-5-2018';
tic; name1='00263';
VID1=VideoReader([path1 '\' name1 '.mp4']); % Video Image Data
NoF1=VID1.NumberOfFrames;    DRT1=VID1.Duration;    FpS1=VID1.FrameRate;
ViFo1=VID1.VideoFormat; %Number of Frames, Duration of Video (sec), Frames Rate
(Frames per secs), Video Format (in RGB)
I1=NaN(NoF1-K11+1,1080);
I2=NaN(NoF1-K11+1,1080);
I3=NaN(NoF1-K11+1,1080);
I4=NaN(NoF1-K11+1,1080);
I5=NaN(NoF1-K11+1,1080);
for K1=K11:NoF1
Frame1=read(VID1,K1); DF1=double(Frame1);
Imean1=DF1(:,J1);
Imean2=DF1(:,J2);
Imean3=DF1(:,J3);
Imean4=DF1(:,J4);
Imean5=DF1(:,J5);
I1(K1-K11+1,:)=Imean1;
I2(K1-K11+1,:)=Imean2;
I3(K1-K11+1,:)=Imean3;
I4(K1-K11+1,:)=Imean4;
I5(K1-K11+1,:)=Imean5;
```

```
Executed=[num2str(K1) ' of ' num2str(NoF1) ' ; dt = ' num2str(toc)]; Executed
end
I1x1=I1(:, :, 1);
I2x1=I2(:, :, 1);
I3x1=I3(:, :, 1);
I4x1=I4(:, :, 1);
I5x1=I5(:, :, 1);
xlswrite('timeav300.xlsx',I1x1,'1','C4');
xlswrite('timeav300.xlsx',I2x1,'2','C4');
xlswrite('timeav300.xlsx',I3x1,'3','C4');
xlswrite('timeav300.xlsx',I4x1,'4','C4');
xlswrite('timeav300.xlsx',I5x1,'5','C4');
```