



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF WATER RESOURCES
AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΔΙΠΛΗΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΚΑΙ ΕΠΑΚΟΛΟΥΘΗΣ ΣΥΝΑΓΩΓΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΧΡΗΣΤΟΣ Ε. ΚΟΤΣΑΛΟΣ

Επιβλέπων: Παναγιώτης Παπανικολάου

Επίκουρος Καθηγητής Σχολής Πολιτικών Μηχανικών

Αθήνα, Ιούλιος 2012

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΔΙΠΛΗΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΚΑΙ ΕΠΑΚΟΛΟΥΘΗΣ ΣΥΝΑΓΩΓΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΧΡΗΣΤΟΥ Ε. ΚΟΤΣΑΛΟΥ / Αριθμός Μητρώου: 01107018

Επιβλέπων: Παναγιώτης Παπανικολάου

Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής

Τομέας Υδατικών πόρων και περιβάλλοντος

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Το περιεχόμενο της ανά χείρας διπλωματικής εργασίας αποτελεί προϊόν της δικής μου πνευματικής προσπάθειας. Η ενσωμάτωση σε αυτήν υλικού τρίτων, δημοσιευμένου ή μη, γίνεται με δόκιμη αναφορά στις πηγές, που δεν επιτρέπει ασάφειες ή παρερμηνείες.

Αθήνα, Ιούλιος 2012

*Πάνω δουλειά, μόλις χαράζει η μέρα
και ξαποσταίνω, μόλις βασιλέψει.
Για να πίνω νερό, πηγάδι ανοίγω
κι οργώνω το χωράφι για να τρώγω.
Κι αψηφώ τον μεγάλο αυτοκράτορα*

Κινέζικο δημώδες, Μετάφραση Κ. Βάρναλη

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Μου φαίνεται ανούσια και εντελώς τυπική η ευχαριστία ατόμων. Άλλωστε αυτή η εργασία δεν είναι το τέλος κάποιου κεφαλαίου, παρά μόνο η αρχή. Ελπίζω τα άτομα που με ξέρουν να κατανοούν το πόσο τα ευγνωμονώ μέσα από το σεβασμό, την αγάπη και το χαμόγελο που τους δίνω.

Παρόλα αυτά θα ήθελα να ευχαριστήσω το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, την Ιδέα του Πολυτεχνείου και όχι την υλικοτεχνική υποδομή. Για πέντε χρόνια ήταν οδηγός και σιωπηλός δάσκαλος. Η επιρροή του τρομερή στη ζωή μου. Με καθόρισε και με σημάδεψε. Άλλαξα, ωρίμασα, μορφώθηκα, έμαθα να κρίνω και να με κρίνουν, δούλεψα, πειθαρχήθηκα, σκληραγωγήθηκα, έμαθα περί δίκαιου και αδίκου και κατά παράξενο τρόπο ενώ ήρθαμε εδώ για να γίνουμε μηχανικοί τελικά γίναμε και καλύτεροι άνθρωποι. Αυτά βέβαια, ισχύουν για όσους ακολούθησαν τις Ιδέες και όχι απλά και παραταξιακά το δρόμο για το δίπλωμα. Το Πολυτεχνείο αποτελεί μετά την γέννηση μου το σημαντικότερο στάδιο της μόρφωσής μου, μιας που για το σχολείο δεν έχω και τις καλύτερες εντυπώσεις. Όπου και να βρεθώ από εδώ και πέρα, για το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο θα λέω ότι ακολουθώντας την Ιδέα βλέπεις την αληθινή Ελλάδα, γιατί εκεί γύρω υπάρχουν δάσκαλοι (σαν το δάσκαλό μου, κ. Πάνο Παπανικολάου), υπάρχουν παιδιά (σαν τα παιδιά της παρέας μου), υπάρχουν άτομα (σαν τους διδακτορικούς που γνώρισα, τον κ. Μανώλη, τον Γιάννη), υπάρχουν γονείς (σαν τους γονείς μου) που όμοιούς τους δύσκολα θα συναντήσεις σε όποιο τόπο και να βρεθείς.

Με απέραντη αγάπη για το
Ε.Μ.Π. και τιμή που κάθισα στα
θρανία του, Κότσαλος Χρήστος.

Αθήνα, 11/7/2012

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται πειραματικά το φαινόμενο της διπλής διάχυσης και της επακόλουθης συναγωγής (Double-Diffusive Convection). Αναλυτικότερα, η ύπαρξη δύο παραγόντων που επηρεάζουν την πυκνότητα συστήματος υγρών σε συνδυασμό με την διαφορετική ταχύτητα μοριακής διάχυσης αυτών, δύναται να προκαλέσει ροές σε βαρυτικά ευσταθές σύστημα. Η αστάθεια αυτή εκδηλώνεται με δομές που ομοιάζουν με δάκτυλα τα αποκαλούμενα στην διεθνή βιβλιογραφία ως Salt Fingers ή Fingers. Εν προκειμένω, εξετάσθηκε το φαινόμενο χρησιμοποιώντας συνδυασμούς διαλυμάτων αλατόνευρου και ζαχαρόνευρου. Η οπτικοποίηση του φαινομένου έγινε με την εφαρμογή της τεχνικής Laser-Induced Fluorescence (LIF) και με χρήση ροδαμίνης 6G (R6G). Η παρούσα πειραματική εργασία εστιάζει στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δομής των Fingers και της ευρύτερης γεωμετρίας του αναπτυσσόμενου φαινομένου συναρτήσει του χρόνου εξέλιξής του. Με σκοπό την διεξοδική ανάλυση του φαινομένου εκτελέσθηκαν τρεις τύποι πειραμάτων και συνολικά 30 μετρήσιμα πειράματα. Στον πρώτο τύπο πειραμάτων το φαινόμενο εξελίσσεται σε σύστημα δύο στρώσεων ("The Two Layer System"). Η άνω και ελαφρύτερη στρώση είναι διάλυμα ζαχαρόνευρου και η κάτω στρώση διάλυμα αλατόνευρου. Τα πάχη των Salt Fingers κυμάνθηκαν περί το 1 mm και η περιοχή ανάπτυξης του φαινομένου περί την διαχωριστική επιφάνεια των δύο στρώσεων κυμάνθηκε από 5 έως 35 mm για χρόνους παρακολούθησης του φαινομένου στα 180 min. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι οι ανοδικές και καθοδικές ροές σε αυτό το διάστημα εξελίσσονται ασύμμετρα. Στο δεύτερο τύπο πειραμάτων το φαινόμενο εξελίσσεται με την διάχυση διαλύματος μιας ουσίας σε γραμμική πυκνομετρική στρωμάτωση άλλης με διαφορετική ταχύτητα μοριακής διάχυσης. Στην πειραματική δεξαμενή δημιουργείται γραμμική πυκνομετρική στρωμάτωση εφαρμόζοντας την τεχνική των Oster & Yamamoto (1963) και ακολούθως εγχέεται ρευστό από επάνω υπό μορφή τυρβώδους ανωστικής φλέβας. Μετρήθηκαν τα πάχη και τα μήκη των Fingers για εξέλιξη του φαινομένου σε 180 min. Οι τιμές του πάχους κυμαίνονται στο διάστημα 1 έως 2.5 mm και το μήκος στο διάστημα 0 έως 9 mm. Ο μηχανισμός των Fingers φαίνεται να ομογενοποιεί το πεδίο αποβλήτων και ως αποτέλεσμα να αποτελεί έναν επικουρικό μηχανισμό αραίωσης. Στον τρίτο τύπο πειραμάτων δημιουργείται γραμμική πυκνομετρική στρωμάτωση με ρευστό που προκύπτει από την ανάμειξη ζαχαρόνευρου και αλατόνευρου ("The Double Gradient System"). Η συγκέντρωση ζαχαρόνευρου μειώνεται γραμμικά από την επιφάνεια προς τον πυθμένα, ενώ η συγκέντρωση αλατόνευρου αυξάνεται γραμμικά από την επιφάνεια προς τον πυθμένα. Μετρήθηκαν τα πάχη των Fingers στο υπό εξέταση στρώμα και αυτά κυμάνθηκαν από 1 έως 2.5 mm. Παρατηρήθηκε ότι στις μικρές πυκνομετρικές κλίσεις το φαινόμενο εξελίσσεται ταχύτατα και το μελετώμενο στρώμα 25 cm ομογενοποιείται σε χρόνους περί των 100 min. Από την άλλη, στις περιπτώσεις μεγάλων πυκνομετρικών κλίσεων το φαινόμενο εξελίσσεται πολύ αργά και οι αντίστοιχοι χρόνοι ομογενοποίησης αγγίζουν τα 300 min. Η συνύπαρξη των άνω υγρών, σε όλα τα παραπάνω συστήματα, εκκινεί το φαινόμενο της διπλής διάχυσης και εμφανίζονται ροές σε φαινομενικά ευσταθή συστήματα.

ABSTRACT

The double-diffusive convection phenomenon is investigated experimentally in the present diploma thesis. More precisely, the existence of two density affecting components in a system of fluids with different molecular diffusion coefficients can cause baroclinic instabilities in a gravitationally stable system. The aforementioned instabilities appear with thread-like streams which are called Salt Fingers or (simply) Fingers. The thesis is focused on the geometrical characteristics of Fingers structure and generally on the geometry of the Finger phenomenon as a function of time. The phenomenon was examined using combinations of salt and sugar solutions. The visualization of Salt Fingers was obtained by the implementation of Laser-Induced Fluorescence technique (LIF) using rhodamine 6G (R6G). In order to understand double-diffusive convection, we performed three different types and a total number of 30 experiments. In the first type of experiments, Salt Fingers were developed in a two layer system. The upper and lighter layer is sugar solution and the down layer is salt solution. The width of Salt Fingers in this experiment is around 1 mm and the thickness of the interface thickness ranges from 5 to 35 mm for 180 min of observation. Additionally, we observed that the ascending and descending flows developed asymmetrically. In the second type of experiments, the phenomenon is developed through the diffusion of a component inside a linearly density-stratified ambient with a component of different molecular diffusion coefficient. Practically, inside the experimental tank a linear stratification is created using the two tank technique proposed by Oster & Yamamoto (1963), then a turbulent buoyant jet is injected from above in the tank. The width and length of Fingers were measured for 180 min of observation. The width ranged from 1 to 2.5 mm and the length from 0 to 9 mm. The Salt Fingers mechanism seems to homogenize the waste field and as a result to be an additional mechanism of dilution. In the third type of experiments, a linear stratification was created by a fluid from the combination of salt and sugar solutions ("The Double Gradient System"). Particularly, sugar concentration decreased from the surface of the experimental tank to the bottom, while salt concentration increased from the free surface to the bottom. We measured the width of Salt Fingers which ranged from 1 to 2.5 mm. Also, it is observed that in experiments with small gradient of density stratification, Salt Fingers developed quickly and the stratified layer (25 cm) became homogeneous in approximately 100 min. On the other hand, in experiments with steep gradient of density stratification, the phenomenon developed slowly and the time for the stratified layer to be homogeneous was approximately 300 min. The coexistence of these solutions, in all the above mentioned systems, started double-diffusive convection in an apparent stable system.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

Λατινικά σύμβολα

Down	=	Κατακόρυφο μήκος περιοχής ανάπτυξης καθοδικών ροών, κάτω από την αρχική διαχωριστική επιφάνεια
h	=	Πάχος διεπιφάνειας ή πάχος στρώσης ροδαμίνης
K	=	Συντελεστής μοριακής διάχυσης
L	=	Πλάτος των Salt Fingers
N	=	Συχνότητα Brunt – Vaisala
R_p	=	Δείκτης πυκνότητας
S	=	Συγκέντρωση αργότερα διαχεόμενου παράγοντα (ζάχαρη)
T	=	Συγκέντρωση ταχύτερα διαχεόμενου παράγοντα (αλάτι)
t	=	χρόνος
U_p	=	Κατακόρυφο μήκος περιοχής ανάπτυξης ανοδικών ροών, πάνω από την αρχική διαχωριστική επιφάνεια
w	=	Κατακόρυφη ταχύτητα των Salt Fingers

Ελληνικά σύμβολα

β	=	Συντελεστής ογκομετρικής μεταβολής
$\Delta\rho$	=	Διαφορά πυκνοτήτων
θ	=	Θερμοκρασία
λ	=	μήκος των Salt Fingers
ν	=	Κινηματική συνεκτικότητα
ρ	=	Πυκνότητα
τ	=	Λόγος συντελεστών μοριακής διάχυσης αργότερα προς ταχύτερα διαχεόμενου παράγοντα

Εκθέτες

0 = αρχική τιμή

20 = τιμή με αναγωγή στους $20\text{ }^{\circ}\text{C}$

25 = τιμή με αναγωγή στους $25\text{ }^{\circ}\text{C}$

Δείκτες

s = αργότερα διαχεόμενος παράγοντας (ζάχαρη)

τ = ταχύτερα διαχεόμενος παράγοντας (αλάτι)

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Βασικοί ορισμοί.....	1
1.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των Salt Fingers.....	5
1.3 Θεωρητική προσέγγιση φαινομένου	7
1.4 Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	8
1.5 Πρακτικές εφαρμογές του φαινομένου της διπλής διάχυσης	15
1.6 Σκοπός της παρούσας πειραματικής εργασίας	19
1.7 Παράρτημα Κεφαλαίου	20
2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ.....	21
2.1 Παράμετροι σχεδιασμού της πειραματικής διάταξης.....	21
2.2 Γενική περιγραφή.....	21
2.3 Περιγραφή επιμέρους στοιχείων εργαστηριακού χώρου	23
2.3.1 Πειραματική Δεξαμενή	23
2.3.2 Σύστημα Laser – Τεχνική οπτικοποίησης LIF	24
2.3.3 Μετρητής παροχής.....	26
2.3.4 Ροδαμίνη 6G (R6G).....	27
2.3.5 Θειώδες Νάτριο	27
2.3.6 Ζυγαριά ακριβείας εργαστηρίου	27
2.3.7 Ψηφιακό Θερμόμετρο εργαστηρίου	28
2.3.8 Αναδευτήρας δεξαμενής 2 (Tank_2)	28
2.4 Μέτρηση πυκνότητας διαλυμάτων	28
2.4.1 Πυκνόμετρο ή Αραιόμετρο (Hydrometer)	28
2.4.2 Οπτικό Διαθλασίμετρο.....	29
2.4.3 Ψηφιακό Διαθλασίμετρο	30
2.5 Υπολογισμός Πυκνότητας διαλυμάτων	31
2.6 Βιντεοσκόπηση.....	32
2.6.1 Κάμερα εργαστηρίου	33
2.6.2 Λήψη Κλίμακας Μήκους	33
2.7 Παράρτημα εικόνων.....	34
3. ΠΡΩΤΟΣ ΤΥΠΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	35

3.1 Γενική περιγραφή.....	35
3.2 Περιγραφή τυπικού πειράματος	35
3.3 Επισημάνσεις επί της πειραματικής διαδικασίας	38
3.4 Συγκεντρωτικά στοιχεία των πειραμάτων	38
3.5 Εξέλιξη φαινομένου σε ένα τυπικό πείραμα	42
3.6 Επεξεργασία βιντεοσκοπημένου υλικού	43
3.7 Συγκεντρωτικά διαγράμματα από την επεξεργασία του βιντεοσκοπημένου υλικού ..	47
3.8 Συμπεράσματα	51
4. ΔΕΥΤΕΡΟΣ ΤΥΠΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	55
4.1 Γενική περιγραφή.....	55
4.2 Περιγραφή ενός τυπικού πειράματος	56
4.3 Τεχνική δημιουργίας γραμμικής πυκνομετρικής στρωμάτωσης από την εργασία των Gerald Oster and Masahide Yamamoto (1963)	59
4.4 Συγκεντρωτικά στοιχεία εκτελεσθέντων πειραμάτων	62
4.5 Εξέλιξη φαινομένου σε ένα τυπικό πείραμα	66
4.5.1 Εξέλιξη φαινομένου σε στρωμάτωση με αλατόνερο και έγχυση ζαχαρόνερου	66
4.5.2 Εξέλιξη φαινομένου σε στρωμάτωση με ζαχαρόνερο και έγχυση αλατόνερου	67
4.6 Επεξεργασία βιντεοσκοπημένου υλικού	68
4.7 Συγκεντρωτικά διαγράμματα από την επεξεργασία του βιντεοσκοπημένου υλικού ..	70
4.8 Συμπεράσματα	73
4.9 Ευαισθησία της συχνότητας πυκνομετρικής στρωμάτωσης N (Brunt – Vaisala) σε μεταβολές θερμοκρασίας	74
5. ΤΡΙΤΟΣ ΤΥΠΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	77
5.1 Γενική περιγραφή.....	77
5.2 Περιγραφή τυπικού πειράματος	77
5.3 Επισημάνσεις επί της πειραματικής διαδικασίας	80
5.4 Πυκνομετρική στρωμάτωση και κατανομές συγκεντρώσεων εντός της πειραματικής δεξαμενής των πειραμάτων τρίτου τύπου	81
5.5 Συγκεντρωτικά στοιχεία εκτελεσθέντων πειραμάτων	84
5.6 Εξέλιξη φαινομένου σε ένα τυπικό πείραμα	85
5.7 Επεξεργασία βιντεοσκοπημένου υλικού	86
5.8 Συγκεντρωτικά γραφήματα από την επεξεργασία του βιντεοσκοπημένου υλικού	89
5.9 Συμπεράσματα	92

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	95
6.1 Συμπεράσματα και προβληματισμοί.....	95
6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	97
7. ΑΝΑΦΟΡΕΣ	99
7.1 Βιβλία	99
7.2 Άρθρα.....	99
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α - APPENDIX A / ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ – EXPERIMENTS	101
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – APPENDIX B / Βαθμονόμηση ροομέτρου – Flow meter calibration.....	163
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ – APPENDIX C / Κλίμακα μήκους και στρέβλωση εικόνας – Length Scale and Image distortion	165
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ – APPENDIX D / Ιδιότητες υδατικών διαλυμάτων – Properties of aqueous solutions	169

ΣΧΗΜΑΤΑ

Σχήμα 1.1 Δίστρωτο σύστημα αποτελούμενο από αλατόνερο και ζαχαρόνερο.....	2
Σχήμα 1.2 Εικόνα σε μοριακό επίπεδο και επιτελούμενη μοριακή διάχυση	2
Σχήμα 1.3 Ανάπτυξη και εξέλιξη των τοπικών ασταθειών (<i>Salt Fingers</i>), κοντινό πλάνο (αριστερά), μακρινό πλάνο (δεξιά).....	2
Σχήμα 1.4 Στιγμιότυπο διάθεσης “αποβλήτων” (αριστερά) και επακόλουθος σχηματισμός <i>Salt Fingers</i> (δεξιά).	3
Σχήμα 1.5 Προκαλούμενα <i>Fingers</i> σε περιβάλλον αντιτιθέμενων κατανομών αλατότητας και ζάχαρης	4
Σχήμα 1.6 Μήκος και πάχος <i>Salt Finger</i>	6
Σχήμα 1.7 Πάχος διεπιφάνειας.....	6
Σχήμα 1.8 Διατομή των <i>Salt Fingers</i>	6
Σχήμα 1.9 Κατακόρυφη ανάπτυξη <i>Salt Fingers</i> και παρουσίαση από shadowgraph	10
Σχήμα 1.10 Διάθεση υπό μορφή φλέβας από πείραμα Fischer	13
Σχήμα 1.11 The Double Gradient System από Turner and Stern (1969).....	14
Σχήμα 1.12 Διαδικασία δημιουργίας του Double – Gradient System	15
Σχήμα 1.13 Διάθεση λυμάτων και περιοχές ανάπτυξης <i>Salt Fingers</i>	16

Σχήμα 1.14 Διάθεση παραπροϊόντος εργοστασίου αφαλάτωσης.....	17
Σχήμα 1.15 Σε τομή η περιοχή συνάντησης υγρών διαφορετικών χαρακτηριστικών	18
Σχήμα 1.16 Salt Fingers σε σύστημα δύο στρώσεων με συστατικά το αλάτι και τη θερμότητα	20
Σχήμα 2.1 Πειραματική διάταξη.....	22
Σχήμα 2.2 Πειραματική δεξαμενή	23
Σχήμα 2.3 Διάταξη δημιουργίας φύλλου Laser σε λειτουργία	24
Σχήμα 2.4 Σύστημα Laser – Κατόπτρου (πάνω εικόνα) / Τροφοδοσία Συστήματος (κάτω)...	25
Σχήμα 2.5 Παροχόμετρο τύπου πλωτήρα	26
Σχήμα 2.6 Ζυγαριά και ψηφιακό θερμομέτρο εργαστηρίου	27
Σχήμα 2.7 Ανάδευση με μαγνητικό αναδευτήρα.....	28
Σχήμα 2.8 Πυκνόμετρο / Αραιόμετρο	29
Σχήμα 2.9 Οπτικό διαθλασίμετρο (αριστερά) και πεδίου ανάγνωσης (δεξιά).....	29
Σχήμα 2.10 Ψηφιακό διαθλασίμετρο	30
Σχήμα 2.11 Επίτευξη τεχνητού σκότους με αποσπώμενο πανί	32
Σχήμα 2.12 Λήψη κλίμακας μήκους	33
Σχήμα 2.13 Πειραματική δεξαμενή	34
Σχήμα 2.14 Διάταξη πειραματικού χώρου	34
Σχήμα 3.1 Πειραματική διάταξη.....	37
Σχήμα 3.2 Εξέλιξη φαινομένου σε ένα τυπικό πείραμα με στιγμιότυπα ανά 30 min	42
Σχήμα 3.3 Τρόπος υπολογισμού πάχους διεπιφάνειας (h)	43
Σχήμα 3.4 Μεθοδολογία υπολογισμού μέσου πλάτους των Salt Fingers	44
Σχήμα 3.5 Τρόπος υπολογισμός συμμετρικής ή μη, εξέλιξης του φαινομένου	45
Σχήμα 3.6 Κλίμακα μήκους.....	46
Σχήμα 3.7 Εξέλιξη πάχους διεπιφάνειας (h) συναρτήσει του χρόνου (t).....	47
Σχήμα 3.8 Εξέλιξη μέσου πλάτους Salt Fingers (L) συναρτήσει του χρόνου (t).....	48
Σχήμα 3.9 Εξέλιξη ανοδικών και καθοδικών ροών (Συμμετρία φαινομένου για Up/Down = 1)	49
Σχήμα 3.10 Συσχέτιση πάχους διεπιφάνειας (h) με μέσο πλάτος Salt Fingers (L).....	50
Σχήμα 3.11 Εξέλιξη τυπικής αστάθειας	52
Σχήμα 4.1 Πειραματική διάταξη.....	58
Σχήμα 4.2 Τεχνική δημιουργίας γραμμικής πυκνομετρικής στρωμάτωσης.....	59

Σχήμα 4.3 Διάταξη στρωμάτωσης εργαστηρίου	61
Σχήμα 4.4 Γραμμικές πυκνομετρικές στρωματώσεις με αλατόνερο (άνω) και ζαχαρόνερο (κάτω).....	65
Σχήμα 4.5 Εξέλιξη τυπικού πειράματος (πρώτη φάση)	66
Σχήμα 4.6 Εξέλιξη τυπικού πειράματος (δεύτερη φάση)	67
Σχήμα 4.7 Υπολογισμός μέσου πλάτους (άνω εικόνα) και μέσου μήκους (κάτω εικόνα)	69
Σχήμα 4.8 Εξέλιξη μέσου πλάτους Salt Fingers (L) συναρτήσει του χρόνου (t).....	70
Σχήμα 4.9 Εξέλιξη μέσου μήκους Salt Fingers (λ) συναρτήσει του χρόνου	71
Σχήμα 4.10 Συσχέτιση μέσου μήκους (λ) με το μέσο πλάτος (L) των Salt Fingers.....	72
Σχήμα 4.11 Στρωμάτωση με αλατόνερο.....	74
Σχήμα 4.12 Στρωμάτωση με ζαχαρόνερο.....	75
Σχήμα 5.1 Πειραματική διάταξη.....	79
Σχήμα 5.2 Οπτικοποίηση με οριζόντιες στρώσεις ροδαμίνης και επακόλουθη διατάραξη τους	80
Σχήμα 5.3 Τεχνική γραμμικής στρωμάτωσης της δεξαμενής με μείγμα αλατόνερου και ζαχαρόνερου.	81
Σχήμα 5.4 Κατανομή πυκνότητας στη δεξαμενή (πάνω) και κατανομές συγκεντρώσεων αλατιού και ζάχαρης καθ' ύψος (κάτω).....	83
Σχήμα 5.5 Εξέλιξη τυπικού πειράματος	85
Σχήμα 5.6 Υπολογισμός μέσου πλάτους Salt Fingers (L).....	87
Σχήμα 5.7 Υπολογισμός πάχους στρώσης ροδαμίνης.....	88
Σχήμα 5.8 Εξέλιξη μέσου πλάτους των Salt Fingers (L) συναρτήσει του χρόνου (t) / Όλες οι στρώσεις.....	89
Σχήμα 5.9 Εξέλιξη πάχους στρώσης (Δh) συναρτήσει του χρόνου (t) / Όλες οι στρώσεις (Δh: προκύπτει με αφαίρεση του αρχικού πάχους).....	90
Σχήμα 5.10 Συσχέτιση πάχους στρώσης ροδαμίνης (Δh) με το μέσο πάχος των Salt Fingers (L) / Όλες οι στρώσεις	91
Σχήμα 5.11 Όρια δεξαμενής και εξέλιξη φαινομένου.....	93

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 1.1 Χρονική εξέλιξη πάχους διεπιφάνειας σε δίστρωτο σύστημα	10
Πίνακας 1.2 Πειράματα Shirtcliffe and Turner (1970)	10
Πίνακας 1.3 Ταχύτητα καθόδου Salt Fingers σε σύστημα αλατόνερου και θερμοκρασιακών μεταβολών	11
Πίνακας 1.4 Αρχικές συνθήκες πειραμάτων και δείκτης πυκνότητας.....	12
Πίνακας 3.1 Αρχικές συνθήκες των πειραμάτων πρώτου τύπου (Μέρος 1)	39
Πίνακας 3.1 Αρχικές συνθήκες των πειραμάτων πρώτου τύπου (Μέρος 2)	40
Πίνακας 4.1 Αρχικές συνθήκες των πειραμάτων δεύτερου τύπου (Μέρος 1)	62
Πίνακας 4.1 Αρχικές συνθήκες των πειραμάτων δεύτερου τύπου (Μέρος 2)	63
Πίνακας 4.2 Μεταβολή του N για θερμοκρασιακές μεταβολές στην πειραματική δεξαμενή	74
Πίνακας 4.3 Μεταβολή του N για θερμοκρασιακές μεταβολές στην πειραματική δεξαμενή	75
Πίνακας 5.1 Υπολογισμός πυκνομετρικής κατανομής των πειραμάτων	82
Πίνακας 5.2 Αρχικές συνθήκες των πειραμάτων τρίτου τύπου (Μέρος 1)	84
Πίνακας 5.2 Αρχικές συνθήκες των πειραμάτων τρίτου τύπου (Μέρος 2)	84

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

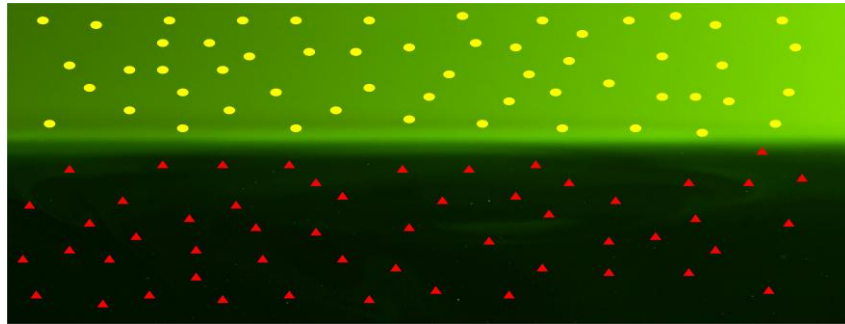
1.1 Βασικοί ορισμοί

Σε ένα ρευστό βαρυτικά ευσταθές, του οποίου η πυκνότητα καθορίζεται από δύο παράγοντες και οι παράγοντες αυτοί έχουν διαφορετική ταχύτητα μοριακής διάχυσης, δύναται να είναι ασταθές, δηλαδή να εμφανιστούν ροές εξαιτίας διαφορών πυκνότητας. Η θεμελίωση του παραπάνω φαινομένου έγινε από τον Melvin Stern το 1960. Έναυσμα και ερέθισμα αποτέλεσε η θαλάσσια μάζα στην οποία συνυπάρχουν κατανομές αλατότητας και θερμοκρασίας. Επιπλέον, η θερμοκρασία διαχέεται μοριακά περίπου 100 φορές πιο γρήγορα από το αλάτι. Βασιζόμενος ο Stern πάνω σε αυτές τις παρατηρήσεις έδωσε το ακόλουθο παράδειγμα καθώς και το πρώτο πείραμα επαλήθευσης της αρχικά θεωρητικής προσέγγισής του. Δύο ρευστά διαχωρίζονται φυσικά από μια διεπιφάνεια, με το άνω ρευστό ελαφρύτερο από το κάτω. Το δίστρωτο, λοιπόν, σύστημα αποτελείται από μια υπερκείμενη στρώση θερμότερου και μεγαλύτερης αλατότητας ρευστού σε σχέση με την κάτω στρώση. Αυτό παρατηρείται σε θάλασσες στις οποίες η έντονη ηλιοφάνεια εξατμίζει και θερμαίνει μεγάλες επιφανειακές μάζες. Αν φανταστούμε μια ποσότητα, οσοδήποτε μικρή, του άνω ρευστού να βρίσκεται στιγμιαία στο κάτω ρευστό, αυτή θα χάσει την θερμοκρασία της πολύ πιο γρήγορα από το πλεόνασμα αλατότητας, εξαιτίας της διαφοράς ταχυτήτων μοριακών διαχύσεων. Κατ' επέκταση, η παραπάνω ποσότητα όντας πλέον βαρύτερη από το περιβάλλον της (πιο ψυχρή και αλατισμένη) θα αρχίζει να βυθίζεται, συμπαρασύροντας επιπλέον ποσότητες. Αυτή η αστάθεια ονομάζεται Salt Finger, ακριβώς γιατί η δομή μοιάζει με δάκτυλο (βλ. Σχήμα 1.16 – Τέλος Κεφαλαίου).

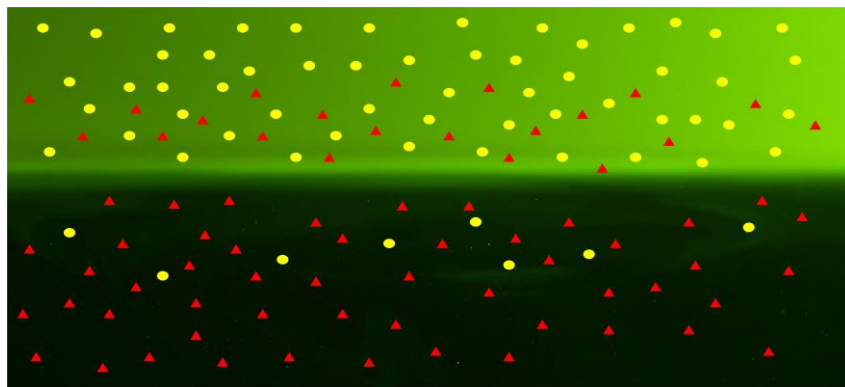
Εύκολα γίνεται αντιληπτό, ότι η ανάπτυξη τέτοιων δομών δεν περιορίζεται μόνο σε συστήματα με αλάτι και θερμοκρασιακές μεταβολές. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την πυκνότητα μπορεί να είναι οποιαδήποτε δυο συστατικά με απαραίτητα, όμως, διαφορετική ταχύτητα μοριακής διάχυσης. Παρακάτω, παρουσιάζεται το φαινόμενο αυτό σε χαρακτηριστικά συστήματα αποτελούμενα από διαλύματα αλατόνευρου και ζαχαρόνευρου, τα οποία μάλιστα μελετήθηκαν πειραματικά στην παρούσα πειραματική εργασία. *Το αλάτι διαχέεται περίπου 3 φορές πιο γρήγορα από τη ζάχαρη.*

(α) *Δίστρωτο σύστημα με ζαχαρόνευρο ("πράσινο" υγρό) και αλατόνευρο ("μαύρο" υγρό) σε ευσταθή ισορροπία ("The Two Layer System").* Τα μόρια της ζάχαρης αναπαρίστανται ως κίτρινα σφαιρίδια, ενώ τα μόρια αλατιού ως κόκκινα τρίγωνα (βλ. Σχήμα 1.1). Όταν τα δύο αυτά υγρά είναι σε επαφή, η ισορροπία του συστήματος είναι αμφίβολη. Επειδή, τα μόρια αλατιού κινούνται πιο γρήγορα από τα μόρια της ζάχαρης, σε κάποιο χρονικό διάστημα λίγο μετά από την επαφή των δυο υγρών, η εικόνα που θα ισχύει σε μοριακό επίπεδο θα είναι περίπου αυτή του Σχήματος 1.2. Αναλυτικότερα, περισσότερα μόρια αλατιού θα έχουν περάσει την διεπιφάνεια και θα βρίσκονται στη άνω στρώση του ζαχαρόνευρου σε σχέση με αυτά της ζάχαρης (Διάχυση). Αναμένεται η αναλογία των ποσοτήτων να είναι περίπου 3. Η

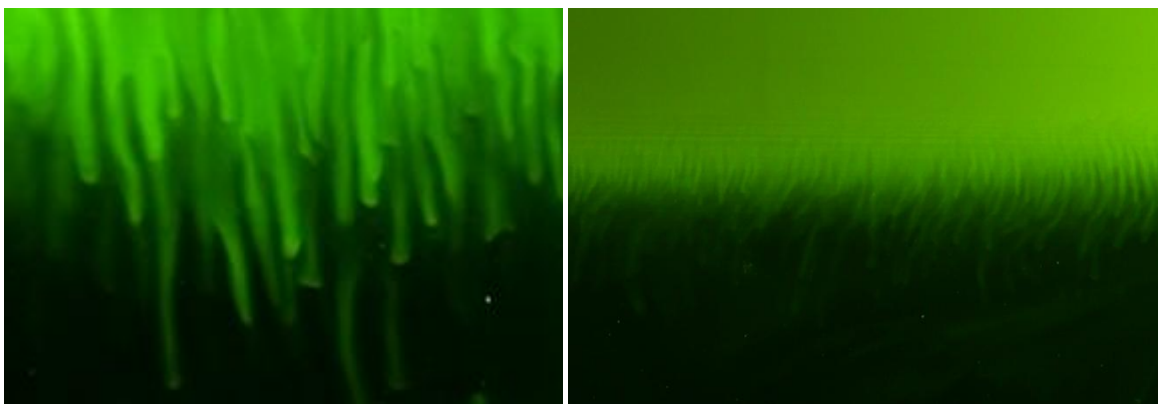
ανωμαλία όμως αυτή στο μοριακό επίπεδο επηρεάζει ταχύτατα και την μακροκλίμακα. Μέρος του στρώματος ζαχαρόνευρο έχει πλέον φορτιστεί με μόρια αλατιού και έχει μετατραπεί σε βαρύτερο από το περιβάλλον του, ενώ μέρος του στρώματος αλατόνευρο έχει μετατραπεί σε ελαφρύτερο από το περιβάλλον του, αφού έχει χάσει μόρια και έχει κερδίσει πολύ λιγότερα. Σε αυτήν την περιοχή επομένως δημιουργείται βαροκλιτική αστάθεια και επακόλουθη φυσική συναγωγή, δηλαδή το βαρύτερο ρευστό βυθίζεται ενώ το ελαφρύτερο ανέρχεται προς την επιφάνεια. Η τελική εικόνα του φαινομένου είναι αυτή στο Σχήμα 1.3.



Σχήμα 1.1 Δίστρωτο σύστημα αποτελούμενο από αλατόνευρο και ζαχαρόνευρο



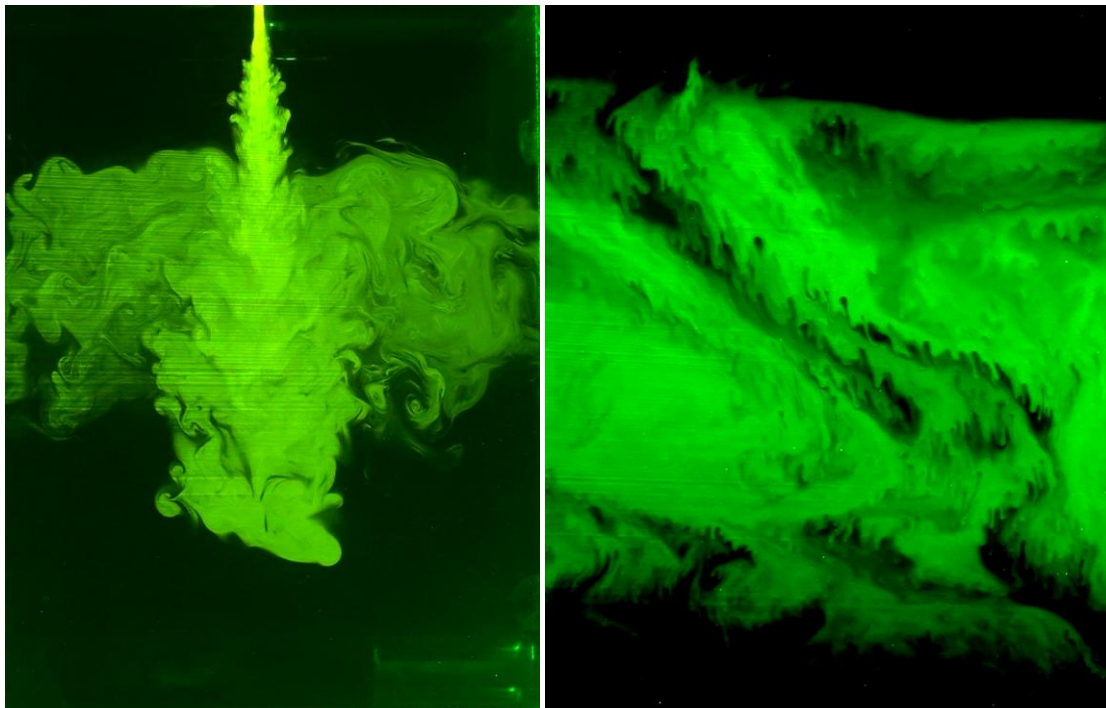
Σχήμα 1.2 Εικόνα σε μοριακό επίπεδο και επιτελούμενη μοριακή διάχυση



Σχήμα 1.3 Ανάπτυξη και εξέλιξη των τοπικών ασταθειών (*Salt Fingers*), κοντινό πλάνο (αριστερά), μακρινό πλάνο (δεξιά).

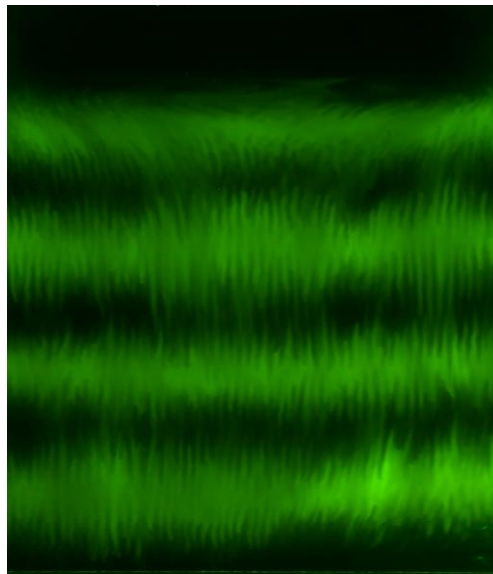
Το φαινόμενο εκδηλώνεται με τις παραπάνω τοπικές αστάθειες, οι οποίες έχουν νηματοειδή μορφή και ονομάζονται στη διεθνή βιβλιογραφία Salt Fingers ή Fingers. Επισημαίνεται ότι ακόμα και σε σύστημα χωρίς την ύπαρξη αλατιού, το φαινόμενο θα περιγραφόταν πάλι με τον γενικά χρησιμοποιούμενο όρο Salt Fingers.

(β) *Γραμμικά στρωματισμένος αποδέκτης με απόθεση ρευστού πεπερασμένης χρονικά διάρκειας.* Εν προκειμένω, ο αποδέκτης αποτελείται από διάλυμα αλατόνευρο με αυξανόμενη αλατότητα προς τον πυθμένα, δηλαδή η πυκνότητα αυξάνεται γραμμικά με το βάθος. Το εγχέομενο υγρό είναι διάλυμα ζαχαρόνευρο, το οποίο καθώς διατίθεται υπό μορφή φλέβας εγκλωβίζεται σε κάποιο βάθος του αποδέκτη. Επιπλέον, κατά την έγχυση, το διατιθέμενο ρευστό συμπαρασύρει ποσότητες υγρού του αποδέκτη στο εσωτερικό του (διαδικασία αραίωσης) και τελικά στο δημιουργούμενο ευσταθές πυκνομετρικά πεδίο συνυπάρχει αλατόνευρο και ζαχαρόνευρο. Στις περιοχές όπου τα δύο διαλύματα βρίσκονται σε επαφή ή συνυπάρχουν, υπάρχουν οι συνθήκες ανάπτυξης τοπικών βαροκλιτικών ασταθειών. Άρα στο εσωτερικό του πεδίου “αποβλήτων” αλλά και στις διεπιφάνειες πεδίου και αποδέκτη, σε μικρό χρονικό διάστημα θα εμφανιστούν οι μελετώμενοι νηματοειδείς σχηματισμοί. Τα μόρια αλατιού κινούνται εντόνως σε αντίθεση με τα μόρια ζάχαρης και επομένως μετατρέπουν περιοχές σε βαρύτερες ή ελαφρύτερες. Δηλαδή στις περιοχές στις οποίες συγκεντρώνονται, αυξάνουν τοπικά την πυκνότητά τους ενώ τις περιοχές που εγκαταλείπουν, μειώνουν τοπικά την πυκνότητά τους. Άρα, το αρχικά ευσταθές σύστημα μεταπίπτει σε ασταθές και εμφανίζονται κινήσεις του ρευστού υπό την μορφή των Salt Fingers. Στο Σχήμα 1.4 παρουσιάζεται η διαδικασία έγχυσης και η κατάσταση του συστήματος κατά την εμφάνιση των Salt Fingers.



Σχήμα 1.4 Στιγμιότυπο διάθεσης “αποβλήτων” (αριστερά) και επακόλουθος σχηματισμός Salt Fingers (δεξιά).

(γ) Περιβάλλον συνύπαρξης αλατότητας και συγκεντρώσεων ζάχαρης (“The Double Gradient System”). Το εξεταζόμενο σύστημα, του οποίου η πυκνότητα αυξάνεται γραμμικά από την επιφάνεια προς τον πυθμένα, συνίσταται από συνδυασμό αλατόνευρου και ζαχαρόνευρου. Η κατανομή της αλατότητας αυξάνεται γραμμικά από την επιφάνεια προς τον πυθμένα ενώ η συγκέντρωση ζάχαρης μειώνεται γραμμικά από την επιφάνεια προς τον πυθμένα. Η συνύπαρξη και μόνο των δύο αναμειγμένων υγρών μετατρέπει το βαρυντικά ευσταθές στρώμα σε ασταθές. Τα μόρια του αλατιού κινούνται πιο έντονα, με αποτέλεσμα να μετατρέπουν σε ελαφρύτερα τα στρώματα στα οποία βρίσκονταν, αφού τα αποφορτίζουν μεταπηδώντας στα γειτονικά τους, ενώ βαραίνουν τα γειτονικά τους. Αντιθέτως, τα μόρια ζάχαρης στο ίδιο χρονικό διάστημα παραμένουν κατά πολύ μεγάλο ποσοστό στις αρχικές τους θέσεις. Ουσιαστικά, εντός του στρώματος ενώ τα μόρια ζάχαρης χαρακτηρίζονται από σχετική στασιμότητα, τα μόρια αλατιού αναδιατάσσονται συνεχώς φορτίζοντας και αποφορτίζοντας περιοχές. Η επακόλουθη κατάσταση είναι η μακροσκοπική ανισορροπία, κατά την οποία στο αρχικά στατικό ρευστό παρατηρούνται εσωτερικές ροές υπό τη μορφή των Salt Fingers. Στο σχήμα 1.5 το “πράσινο” υγρό ήταν αρχικά τοποθετημένο σε οριζόντιες στρώσεις, τα αναπτυσσόμενα όμως Fingers προκάλεσαν την παρακάτω εικόνα.



Σχήμα 1.5 Προκαλούμενα Fingers σε περιβάλλον αντιτιθέμενων κατανομών αλατότητας και ζάχαρης

Στα παραπάνω παραδείγματα το αναπτυσσόμενο φαινόμενο είναι της ίδιας τάξης μεγέθους. Αντιπροσωπευτικά μεγέθη είναι το μήκος των Fingers το οποίο κυμαίνεται στο εύρος 0 – 30 mm, τα πάχη των Fingers κυμαίνονται στο διάστημα 1 - 2 mm και οι χρόνοι εξέλιξης του φαινομένου δεν ξεπερνούν τις 3 ώρες. Εδώ, γίνεται αντιληπτή η μεγάλη διαφορά του φαινομένου Double-Diffusive Convection από την απλή διάχυση (Diffusion). Η χρονική κλίμακα στην απλή διάχυση είναι της τάξης των ημερών. Το εξεταζόμενο φαινόμενο είναι ένας μηχανισμός ανάμιξης ρευστών, γρηγορότερος από την ανάμιξη την επιτελούμενη από την απλή διάχυση αλλά και πολύ βραδύτερος από την ανάμιξη που προκαλεί η τύρβη (χρονική κλίμακα δευτερολέπτων).

Επισημαίνεται ότι στα προαναφερόμενα συστήματα, η θερμοκρασία των ρευστών επιβάλλεται να είναι κοινή. Αν υπήρχαν θερμοκρασιακές μεταβολές, τότε η πυκνότητα θα επηρεαζόταν και από έναν ακόμα παράγοντα με διαφορετική ταχύτητα μοριακής διάχυσης. Τα φαινόμενα που θα αναπτύσσονταν, θα αποκαλούνταν Triple-Diffusive Convection. Επομένως, το φαινόμενο ονομάζεται ανάλογα με τον αριθμό των παραγόντων που επηρεάζουν την πυκνότητα και έχουν διαφορετικό συντελεστή μοριακής διάχυσης. Σε περιβάλλον πολλών παραγόντων έχουμε το αποκαλούμενο Multi-Component Diffusive Convection. Στην παρούσα διπλωματική εργασία όπως και στη συντριπτική πλειοψηφία των δημοσιευμένων εργασιών, βάρος δίνεται στην ανάλυση φαινομένων που περιλαμβάνουν δύο παράγοντες (Double-Diffusion).

Συνοψίζοντας, οι αναγκαίες συνθήκες εμφάνισης του φαινομένου των Salt Fingers είναι οι ακόλουθες:

- i. Βαρυτικά ευσταθές πεδίο, δηλαδή το ελαφρύτερο ρευστό βρίσκεται πάνω από το βαρύτερο.
- ii. Η πυκνότητα να επηρεάζεται από δύο παράγοντες (*Double-Diffusion*) με απαραίτητα διαφορετική ταχύτητα μοριακής διάχυσης. Οι ταχύτητες μπορεί να διαφέρουν πολύ ή λίγο χωρίς αυτό να επηρεάζει ποιοτικά και μορφολογικά το φαινόμενο.
- iii. Ύπαρξη διεπιφανειών με επικοινωνία ρευστών με τα χαρακτηριστικά της συνθήκης (ii) ή περιοχών συνύπαρξης των παραπάνω παραγόντων.
- iv. Ο ταχύτερα διαχεόμενος παράγοντας πρέπει να σταθεροποιεί την συνολική κατανομή πυκνότητας, ενώ ο αργότερα διαχεόμενος παράγοντας θα πρέπει να αποσταθεροποιεί την συνολική κατανομή πυκνότητας στο μελετώμενο σύστημα.
- v. Οι πυκνομετρικές διαφορές του συστήματος να μην είναι πολύ μεγάλες ($\Delta\rho \leq 0.01 \text{ gr/cm}^3$).

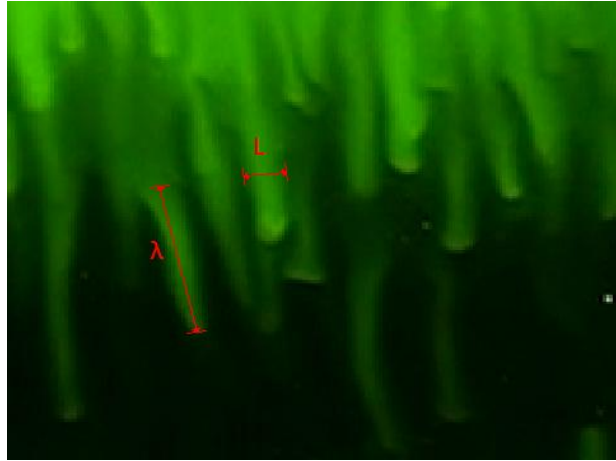
Το φαινόμενο, επομένως, των Salt Fingers εκκινείται σε μοριακό επίπεδο, αλλά εξελίσσεται στη μακροκλίμακα.

1.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των Salt Fingers

Η παρούσα πειραματική εργασία εστιάζει στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δομής των Fingers. Στη συνέχεια ορίζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και η μεθοδολογία μέτρησής τους:

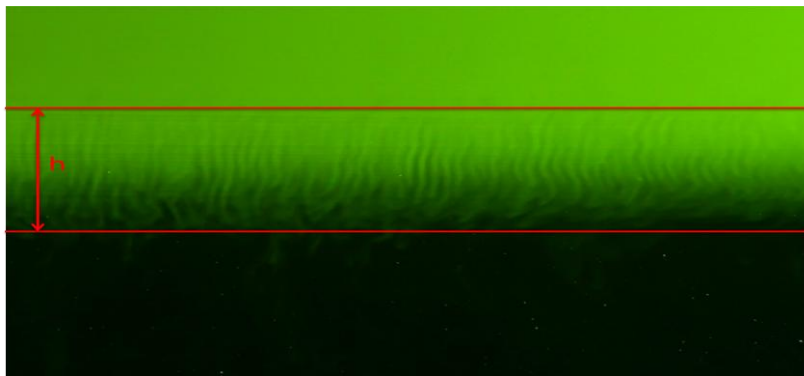
(α) Πάχος ή πλάτος Salt Finger (L): Ορίζεται ως το πάχος του Finger στο μέσο του μήκους του (βλ. Σχήμα 1.6).

(β) Μήκος Salt Finger (λ): Ορίζεται ως το ευθύγραμμο μήκος, το οποίο ενώνει τη βάση (ρίζα) με το ακραίο σημείο (βλ. Σχήμα 1.6).



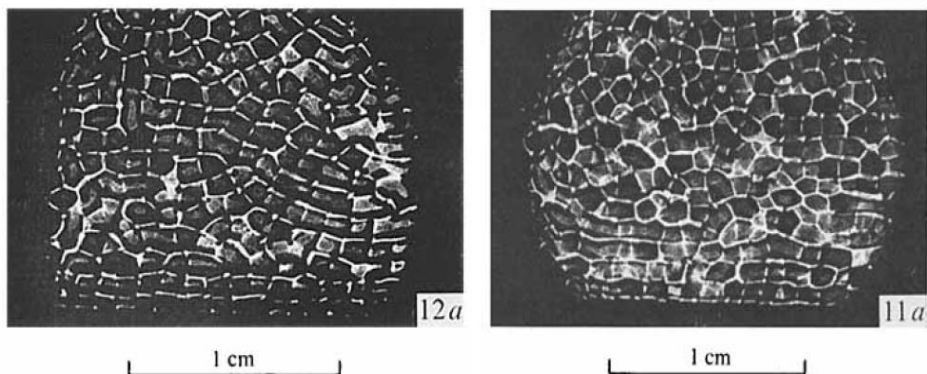
Σχήμα 1.6 Μήκος και πάχος Salt Finger

(γ) Πάχος διεπιφάνειας (h): Ορίζεται ως το κατακόρυφο μήκος της περιοχής, εντός της οποίας αναπτύσσονται τα Fingers (βλ. Σχήμα 1.7). Το πάχος της διεπιφάνειας εμπεριέχει Fingers των οποίων το μήκος κυμαίνεται από πολύ μικρό έως και ίσο με το h . Γι' αυτό τον λόγο διαχωρίζονται τα δύο χαρακτηριστικά (λ και h).



Σχήμα 1.7 Πάχος διεπιφάνειας

Για την πληρέστερη εικόνα της δομής των Fingers, παρουσιάζεται και η μορφή της διατομής τους. Τα στιγμιότυπα είναι από την εργασία των Shirtcliffe and Turner (1970). Η μορφή της διατομής τους είναι κατεξοχήν πολυγωνική (βλ. Σχήμα 1.8).



Σχήμα 1.8 Διατομή των Salt Fingers

1.3 Θεωρητική προσέγγιση φαινομένου

Παρουσιάζεται συνοπτικά η θεωρία του Melvin Stern (1960), ο οποίος έκανε την πρώτη θεωρητική προσέγγιση των Salt Fingers σε περιβάλλον συνύπαρξης αλατότητας και συγκεντρώσεων ζάχαρης ("The Double Gradient System"). Η ποιοτική προσέγγιση αυτού του συστήματος έγινε στην εισαγωγή της παρούσας εργασίας (Κεφάλαιο 1.1).

Το πρόβλημα προς διερεύνηση τοποθετείται ως ακολούθως: Μονωμένο σύστημα, που αποτελείται από οριζόντια στρώση πάχους H , διατηρεί στην κορυφή του μεγαλύτερη θερμοκρασία και αλατότητα σε σχέση με τον πυθμένα. Κατ' αυτόν τον τρόπο δημιουργείται μια κατάσταση ισορροπίας με γραμμικές μεταβολές της θερμοκρασίας και της αλατότητας αυξανόμενου του βάθους, με το βαρύτερο υγρό στον πυθμένα.

Το παραπάνω πρόβλημα επιλύεται από τον Stern (1960) και εξετάζεται η δυναμική του φύση στην περιοχή της στρωτής ροής (Laminar Regime). Τα εξαγόμενα συμπεράσματα συνοψίζονται στα παρακάτω:

- i. Το πάχος των Salt Fingers είναι συγκρίσιμο με το μήκος τους. Επισημαίνει όμως ότι σε καθεστώς μεγαλύτερων ταχυτήτων τα Fingers γίνονται μακρόστενα, όπως δηλαδή παρατηρούνται στα πειράματα.
- ii. Το πάχος τους υπολογίζεται από την σχέση (1.1)

$$L \sim \pi \left[\frac{g\beta_T\alpha}{\nu K_T} \right]^{-\frac{1}{4}} \quad (1.1)$$

Όπου β_T είναι η κλίση της θερμοκρασίας, α ο συντελεστής θερμικής διαστολής, g η επιτάχυνση της βαρύτητας, ν η κινηματική συνεκτικότητα και K_T ο συντελεστής θερμικής διάχυσης.

1.4 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Ο επιστημονικός αυτός κλάδος έχει τις βάσεις του στην ωκεανογραφία, στην οποία οι υπό μελέτη παράγοντες διάχυσης (δύο συστατικά) περιορίζονται σε αλατότητα (Salinity, - S) και θερμοκρασία (Temperature, - T), με την θερμοκρασία το ταχύτερα διαχεόμενο συστατικό. Όπως και ήταν λογικό οι πρώτες επιστημονικές εργασίες ασχολήθηκαν με τα δύο παραπάνω στοιχεία. Από εδώ και στο εξής, για την διατήρηση ενιαίων συμβολισμών το γρηγορότερα διαχεόμενο συστατικό (faster-diffusing component) θα συμβολίζεται ως T ("T-stuff"), ενώ το αργότερα διαχεόμενο συστατικό (slower-diffusing component) θα συμβολίζεται ως S ("S-stuff"). Δηλαδή, στα συστήματα που μελετήθηκαν στη συγκεκριμένη πειραματική εργασία, το αλάτι συμβολίζεται με T (σύμβολο επίσης και της συγκέντρωσής του gr/L) ενώ η ζάχαρης με S (σύμβολο επίσης και της συγκέντρωσής της gr/L).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εκτελέστηκαν τρεις τύποι πειραμάτων. Παρακάτω, σύντομα γίνεται μια περιγραφή του κάθε τύπου, για να μπορεί να δικαιολογηθεί και η παρουσίαση της αντίστοιχης βιβλιογραφίας:

(α) Πρώτος τύπος: Σύστημα δύο στρώσεων ('The Two Layer System')

Στην πειραματική δεξαμενή τοποθετήθηκαν δύο στρώσεις ρευστού. Η άνω ελαφρύτερη στρώση είναι διάλυμα ζαχαρόνευρου και η κάτω στρώση διάλυμα αλατόνευρου. Η πυκνότητα (συγκέντρωση αλατιού) της κάτω στρώσης διατηρείται σταθερά ενώ η συγκέντρωση του διαλύματος ζαχαρόνευρου μεταβάλλεται. Επισημαίνεται ότι η θερμοκρασία των δύο στρώσεων είναι ίδια.

(β) Δεύτερος τύπος: Διάχυση ενός συστατικού σε γραμμικά πυκνομετρική στρωμάτωση του δεύτερου

Στην πειραματική δεξαμενή δημιουργήθηκε γραμμική πυκνομετρική στρωμάτωση σε πρώτη φάση από αλατόνευρο και σε δεύτερη φάση από ζαχαρόνευρο. Εντός του αποδέκτη αποτέθηκε κατακόρυφα από επάνω υπό μορφή τυρβώδους ανωστικής φλέβας διάλυμα ζαχαρόνευρου και αλατόνευρου (σε πρώτη και δεύτερη φάση αντίστοιχα). Αποφασίσθηκε να διατηρείται η γραμμική πυκνομετρική στρωμάτωση σταθερή (κατά το δυνατό) ενώ μεταβλητή του πειράματος να είναι η πυκνότητα του εγχέομένου ρευστού. Οι θερμοκρασίες των ρευστών διατηρήθηκαν σε ίδια επίπεδα.

(γ) Τρίτος τύπος: Πυκνομετρική στρωμάτωση δύο συστατικών ("The Double Gradient System")

Στην πειραματική δεξαμενή δημιουργήθηκε γραμμική πυκνομετρική στρωμάτωση με ρευστό που προέκυψε από την ανάμειξη ζαχαρόνευρου και αλατόνευρου της ίδιας θερμοκρασίας. Η συγκέντρωση του ζαχαρόνευρου μειώνεται γραμμικά από την επιφάνεια προς τον πυθμένα, ενώ η συγκέντρωση του αλατόνευρου αυξάνεται γραμμικά από την επιφάνεια προς τον πυθμένα.

Ποιοτική προσέγγιση των παραπάνω συστημάτων έχει γίνει στο Κεφάλαιο 1.1. Σε όλα τα παραπάνω πειράματα η συνύπαρξη δυο ρευστών, επηρεαζόμενων από συστατικά - παράγοντες διαφορετικών ταχυτήτων μοριακής διάχυσης, οδήγησε στην εμφάνιση της αστάθειας των Salt Fingers. Επισημαίνεται ότι τα ρευστά είχαν κοινή θερμοκρασία προς αποφυγή φαινομένων τριπλής διάχυσης (Triple-Diffusive Convection).

Στη βιβλιογραφία ο πρώτος τύπος πειραμάτων έχει μελετηθεί διεξοδικά σε αντίθεση με τους άλλους δύο τύπους, οι οποίοι φαίνεται να βρίσκονται σε αρχικά στάδια έρευνας. Στη βιβλιογραφική ανασκόπηση που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι πειραματικές εργασίες που αφορούν τους παραπάνω τύπους πειραμάτων. Η παρουσίαση γίνεται ανά τύπο πειράματος με χρονολογική σειρά. Δεν παραλείπονται στην ανασκόπηση τα πειράματα σε συστήματα αλατόνευρου – θερμοκρασιακών μεταβολών λόγω της αντίστοιχης ποιοτικά συμπεριφοράς με τα συστήματα αλατόνευρου – ζαχαρόνευρου.

(α) Πειράματα 1^{ου} τύπου: Δύο στρώσεις υγρών με διαφορετική πυκνότητα.

- i. *Stern and Turner (1969)*: Ορίζουν μια βασική παράμετρο, με την οποία περιγράφουν την αρχική κατάσταση του συστήματος και την συσχετίζουν με την εξέλιξη του φαινομένου. Αυτή ονομάζεται λόγος πυκνότητας (*Density Ratio*) και ορίζεται ως ακολούθως – σχέση (1.2):

$$R_\rho = \frac{\beta_T T}{\beta_S S} \quad (1.2)$$

Όπου β_T είναι ο συντελεστής ογκομετρικής διαστολής εξαιτίας μεταβολής της αλατότητας, β_S είναι ο συντελεστής ογκομετρικής διαστολής εξαιτίας μεταβολής της συγκέντρωσης ζάχαρης, T είναι η αρχική συγκέντρωση σε αλάτι και S είναι η αρχική συγκέντρωση σε ζάχαρη.

Οι ερευνητές αναφέρουν κάποιες ποιοτικές και ποσοτικές παρατηρήσεις σε σύστημα με αλάτι και ζάχαρη, οι οποίες συνοψίζονται παρακάτω:

- Σε τυπικό πείραμα με αλατόνευρο χαρακτηριστικών $\rho_T=1.050 \text{ gr/cm}^3$ και $K_T=1.5 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ και ζαχαρόνευρο χαρακτηριστικών $\rho_S=1.045 \text{ gr/cm}^3$ και $K_S=0.5 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$, στα πρώτα λεπτά επαφής των δύο ρευστών η διεπιφάνεια είχε πάχος 1-2 mm.
- Αναφέρεται ότι τυπικό πλάτος των Salt Fingers είναι περί το 1 mm ή λιγότερο.
- Επισημαίνεται ότι η διεπιφάνεια στα πρώτα στάδια εξέλιξης του φαινομένου μειώνεται λόγω του ότι η δημιουργούμενη ροή καταστρέφει τις δομές των Salt Fingers, αλλά μετά από κάποιο χρόνο η ένταση της ροής μειώνεται και το πάχος της διεπιφάνειας αυξάνεται.
- Σε πείραμα με $\Delta\rho/\rho_0=0.21\%$, $R_\rho=1.047$ και πάχος κάθε στρώσης ίσο με 4.4 cm, έγινε καταγραφή του πάχους της διεπιφάνειας που δίνεται στον πίνακα 1.1:

Πίνακας 1.1 Χρονική εξέλιξη πάχους διεπιφάνειας σε δίστρωτο σύστημα

Time (min)	Interface thickness h (mm)
6	2
14	5
19	8
27	10

- ii. *Shirtcliffe and Turner (1970)*: Παρατήρησαν ότι όσο τα Fingers εξελίσσονται χρονικά και το πλάτος τους αλλά και το μήκος τους αυξάνονται, με το πρώτο (L) πιο αργά από το δεύτερο (λ). Τα πειράματα εκτελέστηκαν σε σύστημα διαλυμάτων αλατόνευρου – ζαχαρόνευρου με στρώσεις πάχους 6 cm έκαστη. Οι συγγραφείς επιπλέον θεώρησαν συμμετρία της ανοδικής και καθοδικής ροής. Τα πειράματα που εκτελέστηκαν συνοψίζονται στον πίνακα 1.2:

Πίνακας 1.2 Πειράματα Shirtcliffe and Turner (1970)

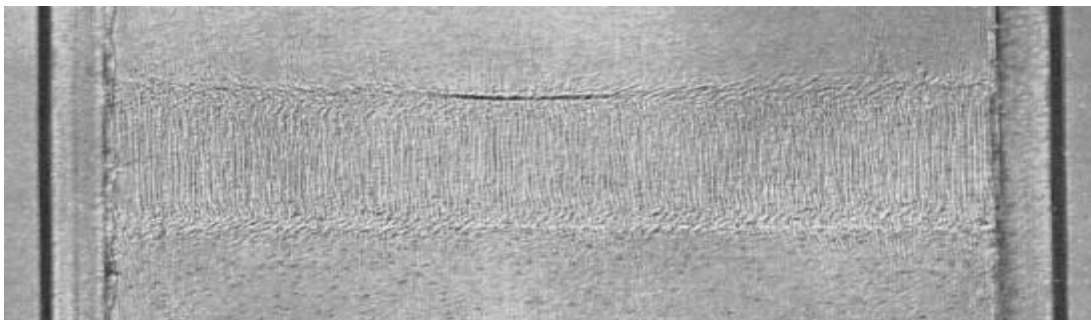
Run	Initial $\rho_{\text{sugar}}/\rho_{\text{salt}}$ (gr/cm ³)
1	1.09/1.10
2	1.09/1.10
3	1.10/1.11
4	1.05/1.06
5	1.045/1.05
6	1.11/1.12

Για το πείραμα Run 3 δίνεται η ταχύτητα ανάπτυξης του μήκους των Fingers και αυτή μεταβάλλεται από τα 30 min έως τα 180 min ως εξής: 0.0066 / 0.006 / 0.015 / 0.015 / 0.017 (cm/s).

Τα πλάτη των Salt Fingers κυμαίνονται από 0.5 mm έως 1 mm και τα μήκη των Salt Fingers από 2.5 mm έως 21 mm για χρόνους ανάπτυξης έως 180 min. Τέλος, γίνεται μια σύνδεση των δύο μεταβλητών και υποστηρίζεται μια σχέση της μορφής:

$$L \sim \lambda^{\frac{1}{4}} \quad (1.3)$$

Παρουσιάζεται, επίσης, ένα στιγμιότυπο πειράματός τους, στο οποίο με την τεχνική σκιαγραφήματος (shadowgraph) εμφανίζεται η περιοχή των Salt fingers (Σχήμα 1.9).



Σχήμα 1.9 Κατακόρυφη ανάπτυξη Salt Fingers και παρουσίαση από shadowgraph

- iii. *Green and Kirk (1971)*: Σε σύστημα με αλατόνερο και θερμοκρασιακές μεταβολές με πάχη στρώσεων 11 cm έκαστη, μετρήθηκε η ταχύτητα ανάπτυξης των Salt Fingers. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αυτούσια από την πειραματική τους εργασία στον πίνακα 1.3:

Πίνακας 1.3 Ταχύτητα καθόδου Salt Fingers σε σύστημα αλατόνερου και θερμοκρασιακών μεταβολών

Experimental Data					
Run	Upper layer Temperature (°C)	Salinity (%)	Lower layer Temperature (°C)	Salinity (%)	Salt finger descent rate (cm min ⁻¹)
1	40.0	0.699	18.6	0.699	0.06
2	42.75	0.174	11.6	0	0.25–0.28
3	35.3	0.116	9.5	0	0.32–0.71
4	36.9	0.232	7.0	0	0.79–1.11
5	37.0	1.16	11.7	0	3.18
6	42.6	1.16	9.5	0	2.54
7	43.75	0.174	19.4	0.174	0.32
8	Not used				
9	Not used				
10	46.5	1.676	9.2	0	10.9–12.7
11	41.1	0.873	10.5	0	3.81
12	39.2	0.582	13.3	0	1.91–3.05
13	41.6	0.291	17.6	0	1.27–1.60
14	49.0	5.588	24.85	4.191	5.10
15	45.1	3.358	19.05	1.676	5.84
16	43.8	1.746	11.7	0	4.24
17	45.0	0.499	11.9	0	1.91
18	Not used				
19	50.9	0.699	11.85	0	3.18
20	44.0	0.349	18.0	0	1.27
21	47.6	0.437	11.8	0	1.27–1.60
22	46.3	0.873	13.25	0	4.45–5.10
23	40.65	2.328	10.3	0	9.50
24	45.1	1.397	14.2	0	5.10–6.35
25	44.55	0.699	13.0	0	2.92–3.18
26	46.3	0.582	12.35	0	2.37–2.54
27	44.2	0.388	14.9	0	2.29–2.79
28	43.85	0.349	14.75	0	1.60–2.38

- iv. *Linden (1973)*: Αυτή η πειραματική εργασία ασχολείται με σύστημα ζαχαρόνερου και θερμοκρασιακών μεταβολών. Από διαστατική ανάλυση ο συγγραφέας προτείνει την ακόλουθη σχέση (1.4):

$$\frac{d\lambda}{dt} = \text{constant}, \quad \text{όπου } \lambda \text{ το μήκος των salt fingers} \quad (1.4)$$

Όσον αφορά τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται τα κύρια σημεία. Αναλυτικότερα, το πλάτος των Salt Fingers κυμαίνεται από 2 έως 3 mm και το μήκος αυτών από 15 έως 80 mm. Η ταχύτητα ανάπτυξης του μήκους των Fingers σε χρονικό διάστημα 80 min βρέθηκε να είναι σταθερή και ίση με $2.3 \cdot 10^{-3}$ cm/s.

- v. *Taylor and Veronis (1996)*: Τα πειράματα εκτελέστηκαν σε σύστημα αλατόνευρου - ζαχαρόνευρου και συσχετίστηκαν με τον λόγο πυκνότητας R_ρ . Αναφέρεται ότι για υψηλές τιμές του R_ρ (2.5 έως 3) το μήκος των Fingers αυξάνεται μονοτονικά και ανάλογα με τον όρο $t^{1/2}$. Για τιμές του R_ρ κοντά στη μονάδα, σε αρχικό στάδιο το μήκος μειώνεται (και μπορεί να γίνει μικρότερο και από το πλάτος τους) εξαιτίας των έντονων ροών και σε επόμενα στάδια όπου η ένταση των ροών ελαττώνεται το μήκος αυξάνεται γραμμικά με τον χρόνο. Σε όλα τα πειράματά τους παρατήρησαν μακριά και λεπτά Fingers, εξαιρουμένου του αρχικού σταδίου. Οι στρώσεις ζαχαρόνευρου και αλατόνευρου είχαν πάχος 35 cm η κάθε μια. Τα πειράματα που εκτελέστηκαν παρουσιάζονται συνοπτικά στον πίνακα 1.4:

Πίνακας 1.4 Αρχικές συνθήκες πειραμάτων και δείκτης πυκνότητας

No.	$\Delta\rho_T(t=0)$	$\Delta\rho_S(t=0)$	$R_\rho(t=0)$	R_ρ (end)
1	56.24	18.8	2.99	2.99
2	38.38	18.4	2.052	2.771
3	46.67	18.61	2.482	2.72
4	23.43	9.097	2.551	2.61
5	12.06	4.605	2.62	-
6	4.757	1.724	2.75	-
7	3.741	1.695	2.21	2.606
8	28.33	18.45	1.54	2.543
9	90.0	36.72	2.45	2.58
10	2.717	1.732	1.57	2.81
11	89.97	30.0	3.0	3.0

Reservoir density increments in kg m^{-3} and values of R_ρ for the 11 experiments.

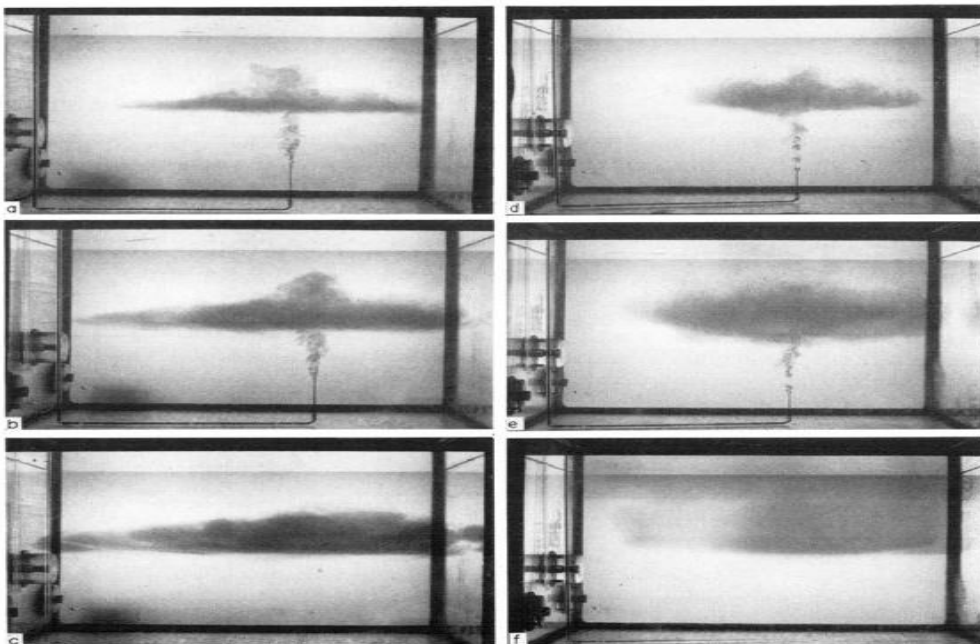
Οι τιμές του μήκους των Fingers, κατά περίπτωση του R_ρ , κυμαίνονται στον χρόνο 0 min από 5 mm έως 15 mm και στον χρόνο 180 min από 20 έως 40 mm.

- vi. *Sorkin, Sorkin and Leizerson (2002)*: Τα πειράματά τους αφορούν σύστημα αλατόνευρου-ζαχαρόνευρου. Στην πρώτη σειρά πειραμάτων η συγκέντρωση αλατιού διατηρήθηκε σταθερή (10 gr/L) ενώ η συγκέντρωση ζάχαρης μεταβαλλόταν από 6 έως 19 gr/L. Στη δεύτερη σειρά η συγκέντρωση ζάχαρης παρέμεινε σταθερή (12 g/L) ενώ η συγκέντρωση αλατιού μεταβαλλόταν από 7 σε 14 gr/L. Τα πειράματα μελετήθηκαν για χρόνους έως 100 min. Τα πειραματικά αποτελέσματα της εργασίας τους συνοψίζονται παρακάτω:
- Το μέσο πλάτος των Fingers αυξάνεται με την εξέλιξη του φαινομένου και κυμαίνεται από 0.6 έως 2.5 mm.
 - Σχετικά με την πρώτη σειρά πειραμάτων, παρατηρήθηκε ότι αυξανόμενης της συγκέντρωσης της ζάχαρης αυξάνεται και ο ρυθμός ανάπτυξης του πλάτους των Fingers.
 - Σχετικά με την δεύτερη σειρά πειραμάτων, παρατηρήθηκε ότι ο ρυθμός ανάπτυξης του πλάτους των Fingers αυξανόταν καθώς η συγκέντρωση σε αλάτι μειωνόταν.
 - Επαληθεύτηκε η σχέση $L \sim \lambda^{1/4}$.

- vii. *Pringle, Glass and Cooper (2002)*: Το πείραμα αφορά σύστημα αλατόνερου-ζαχαρόνερου με συντελεστή πυκνότητας $R_p=1.226$. Σε περίοδο παρακολούθησης 180 min το πάχος της διεπιφάνειας των δύο ρευστών μεταβάλλεται γραμμικά με μια αλλαγή κλίσης (όχι έντονη) στα 40 min και κυμαίνεται από 2.5 έως 32.5 mm. Αναφορικά με το πλάτος των Fingers αυτό κυμαίνεται από 0.5 έως 1.2 mm και η πορεία εξέλιξής του χαρακτηρίζεται από σταθερότητα έως τα 40 min ($L=0.5$ mm constant) και μετά μεταβάλλεται περίπου γραμμικά.

(β) Πειράματα 2^{ου} τύπου: Ανάμειξη δύο συστατικών σε γραμμική πυκνομετρική στρωμάτωση

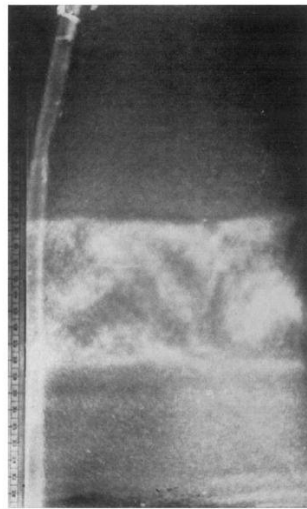
- i. *Fischer (1971)*: Στη συγκεκριμένη πειραματική εργασία έγινε μια ποιοτική διερεύνηση της ανάπτυξης των Salt Fingers σε πεδίο αποβλήτων που δημιουργείται από φλέβα που εγχέεται κατακόρυφα από τον πυθμένα σε γραμμικά στρωματισμένο αποδέκτη. Σκοπός του συγγραφέα ήταν η εύρεση και η επαλήθευση ενός πρόσθετου μηχανισμού αραίωσης του βυθισμένου πεδίου αποβλήτων. Αναλυτικότερα, έγινε έγχυση ψυχρότερου και φρέσκου νερού σε γραμμικά στρωματισμένο αποδέκτη. Η γραμμική στρωμάτωση σε πρώτη φάση επιτεύχθηκε με κατακόρυφα μεταβαλλόμενη θερμοκρασία και ομοιόμορφη κατανομή αλατότητας, ενώ σε δεύτερη φάση επιτεύχθηκε με κατακόρυφα μεταβαλλόμενη κατανομή αλατότητας και ομοιόμορφη θερμοκρασία. Η έγχυση παύει μετά κάποιο χρονικό διάστημα και παρατηρείται κατά πόσο αναπτύσσεται το φαινόμενο των Salt Fingers. Παρακάτω παρατίθενται στιγμιότυπα του πειράματος χωρίς όμως να είναι εμφανή τα Fingers. Παρόλα αυτά ο συγγραφέας αναφέρει την εμφανή ανάπτυξη του φαινομένου η οποία μάλιστα οδηγεί και σε εξάπλωση του πεδίου αποβλήτων, πράγμα που ενισχύει την περαιτέρω αραίωσή τους (Σχήμα 1.10).



Σχήμα 1.10 Διάθεση υπό μορφή φλέβας από πείραμα Fischer

(γ) Πειράματα 3^{ου} τύπου: Γραμμική στρωμάτωση πυκνότητας με δύο συστατικά

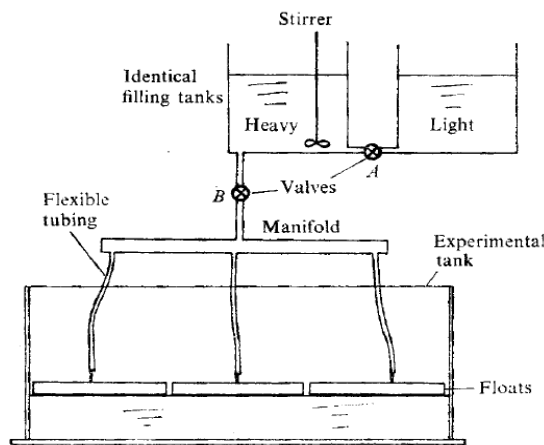
- i. *Stern and Turner (1969)*: Μέρος της συγκεκριμένης πειραματικής εργασίας αποτελούσε και ένα πείραμα συνύπαρξης αντίθετων κατανομών αλατόνευρου και ζαχαρόνευρου. Οι ερευνητές γέμισαν μια δεξαμενή βάθους 40 cm και επιφάνειας 15 x 22 cm σε 30 min χρησιμοποιώντας την τεχνική που περιγράφεται στο άρθρο των Oster and Yamamoto (1963). Αναφέρεται ποιοτικά και μόνο ότι σε όλο το ύψος της δεξαμενής μπορούσαν να διακρίνουν τα αναπτυσσόμενα Salt Fingers. Στην εργασία τους παραθέτουν και μια εικόνα (Σχήμα 1.11) η οποία αδυνατεί να παρουσιάσει το φαινόμενο (προφανώς η χρησιμοποιούμενη τεχνική και τεχνολογία ήταν ανεπαρκείς).



Σχήμα 1.11 The Double Gradient System από Turner and Stern (1969)

- ii. *Turner and Chen (1974)*: Το πείραμα εκτελέστηκε σε σύστημα αλατόνευρου - ζαχαρόνευρου. Μέρος της πειραματικής εργασίας αφιερώθηκε στην διερεύνηση του φαινομένου κατά το οποίο εντός της δεξαμενής με γραμμικό τρόπο η συγκέντρωση αλατόνευρου αυξάνεται από την επιφάνεια προς τον πυθμένα και η συγκέντρωση ζαχαρόνευρου μειώνεται από την επιφάνεια προς τον πυθμένα. Επισημαίνεται ότι η πυκνότητα του σύνθετου ρευστού αυξάνεται γραμμικά από την επιφάνεια προς τον πυθμένα. Η τεχνική που ακολουθήθηκε για την κατασκευή του πεδίου περιγράφεται από τους Oster and Yamamoto (1963) και παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.12 (από το άρθρο των Turner and Chen, 1974). Ο χρόνος που απαιτήθηκε για την πλήρωση της δεξαμενής και δημιουργία της πυκνομετρικής στρωμάτωσης κυμαινόταν από 20 έως 60 min. Στην εργασία αυτή δεν έγινε ποσοτική περιγραφή του αναπτυσσόμενου φαινομένου παρά μόνο ποιοτική περιγραφή χωρίς παράθεση φωτογραφιών, πιθανά από έλλειψη κατάλληλης τεχνικής οπτικοποίησης. Το συμπέρασμα των συγγραφέων, το οποίο ταυτίζεται με αυτό των Turner and Stern (1969), είναι ότι

κατακόρυφα Fingers παρατηρήθηκαν με σκιαγραφήματα (Shadowgraphs) σε όλο το ύψος της δεξαμενής.



Sketch of the filling process using the 'two bucket' method and three floats.

Σχήμα 1.12 Διαδικασία δημιουργίας του Double – Gradient System

1.5 Πρακτικές εφαρμογές του φαινομένου της διπλής διάχυσης

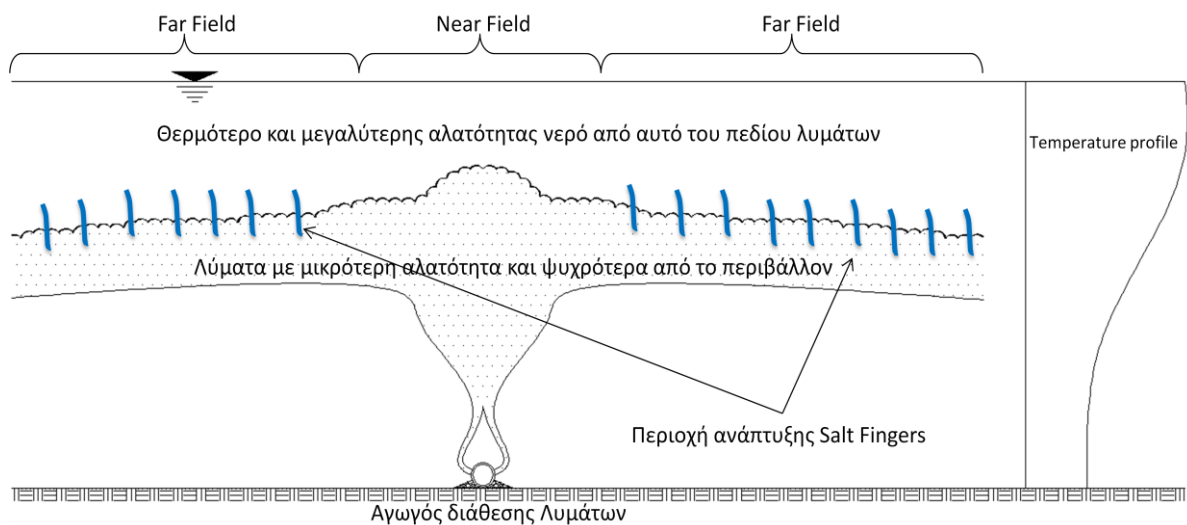
Σε συστήματα ρευστών όπου συνυπάρχουν παράγοντες με διαφορετική ταχύτητα μοριακής διάχυσης, το φαινόμενο των Salt Fingers φαίνεται να διαδραματίζει ιδιαίτερα ενεργό ρόλο στην ανάμειξη. Στα περιβαλλοντικά κυρίως συστήματα, όπου εμφανίζονται συγχρόνως αλατότητα και θερμοκρασία, θα πρέπει να δοθεί έμφαση στον πραγματικό ρόλο αυτού του νέου φαινομένου. Παρακάτω, γίνεται μια παρουσίαση θεμάτων που αφορούν τον Υδραυλικό Μηχανικό και στα οποία μπορεί να εμφανιστεί το υπό μελέτη φαινόμενο :

(α) Διάθεση λυμάτων σε θαλάσσιο αποδέκτη

Τα διατιθέμενα λύματα αν και επιβαρυσμένα με πλήθος βλαβερών στοιχείων, έχουν πυκνότητα περίπου ίση με αυτή του καθαρού νερού. Κατά τη διαδικασία έγχυσης, στο πεδίο λυμάτων συμπαρασύρεται θαλάσσια μάζα από τον πυθμένα, η οποία είναι ψυχρότερη από την επιφανειακή. Θεωρούμε, ότι η αλατότητα δεν μεταβάλλεται ιδιαίτερα καθ' ύψος. Άρα, το πεδίο λυμάτων είναι πλέον ψυχρότερο από το θαλασσινό νερό της επιφάνειας και λιγότερο αλατισμένο, δεχόμενοι αραίωση της τάξης του 70 - 100. Κατ'επέκταση στην άνω επιφάνεια του πεδίου λυμάτων υπάρχουν οι συνθήκες εμφάνισης των Salt Fingers (θερμότερης και με αυξημένη αλατότητα στρώσης που είναι υπερκείμενη ψυχρότερης και μειωμένης αλατότητας στρώσης). Αναλυτικότερα, η επιφανειακή θαλάσσια μάζα θερμαίνει τη διεπιφάνεια του πεδίου αποβλήτων με αποτέλεσμα αυτό να γίνεται ελαφρύτερο (θερμότερο και λιγότερο αλατισμένο) και να ανέρχεται προς την επιφάνεια υπό την μορφή των Salt Fingers. Από την άλλη, το πλεόνασμα αλατότητας της επιφανειακής μάζας παραμένει, εξαιτίας των διαφορών στην ταχύτητα μοριακής διάχυσης και τελικά ως

βαρύτερο υγρό διεισδύει στο πεδίο αποβλήτων. Επομένως, η προκαλούμενη φυσική συναγωγή οδηγεί σε περαιτέρω αραιώση του πεδίου αποβλήτων, λόγω της ανάμιξης που δημιουργείται από τη διπλή διάχυση.

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί η ευαισθησία των Salt Fingers στην διάτμηση ή ουσιαστικά στην υπάρχουσα ροή. Αυτές οι δομές δεν αναπτύσσονται σε περιβάλλον εμφάνισης διατμητικών τάσεων. Στο κοντινό πεδίο (Near Field) της διάθεσης των λυμάτων, οι συνθήκες αναστέλλουν την ανάπτυξη αυτών των νηματοειδών δομών, ακριβώς γιατί σε αυτή την περιοχή υπάρχει έντονη ροή και κατ' επέκταση πεδίο διατμητικών τάσεων. Όμως, στο μακρινό πεδίο (Far Field), η υπάρχουσα ηρεμία εξασφαλίζει την εμφάνιση των Fingers δεδομένων των συνθηκών που περιγράφηκαν στην πρώτη παράγραφο (βλ. Σχήμα 1.13).

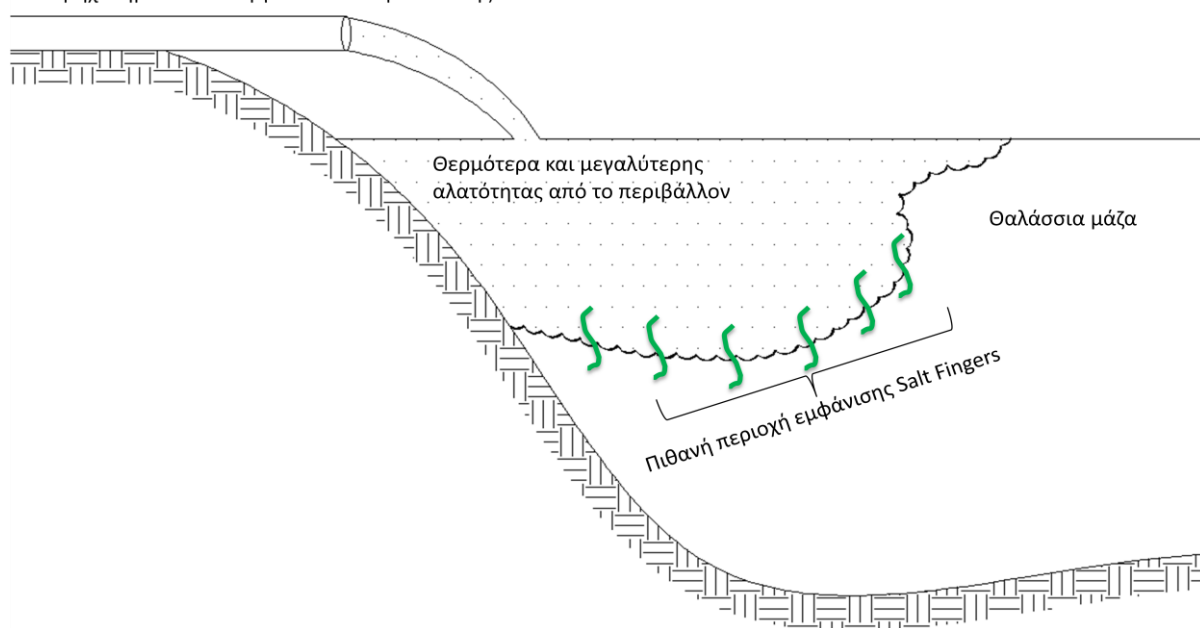


Σχήμα 1.13 Διάθεση λυμάτων και περιοχές ανάπτυξης Salt Fingers

(β) *Επιφανειακή διάθεση αλμόλοιπου αραιωμένου με θερμότερα λύματα*

Συνηθίζεται το παραπροϊόν της αφαλάτωσης, δηλαδή το αλμόλοιπο, να αναμιγνύεται πριν την διάθεσή του στη θάλασσα με το νερό που προκύπτει από την ψύξη των μηχανημάτων του ίδιου εργοστασίου. Επομένως, προκύπτει ένα διάλυμα θερμότερο και μεγαλύτερης αλατότητας από την θαλάσσια μάζα. Όταν αυτό διατεθεί επιφανειακά στην θάλασσα (βλ. Σχήμα 1.14), τότε στην διεπιφάνεια των δύο ρευστών δημιουργούνται συνθήκες ευνοϊκές για την ανάπτυξη των Salt Fingers. Τα λύματα διατηρούν το πλεόνασμα αλατότητας ενώ μετατρέπονται σε ψυχρότερα και επομένως γίνονται βαρύτερα από το περιβάλλον ρευστό. Αυτή η τοπική βαροκλιτική αστάθεια οδηγεί σε περαιτέρω ανάμιξη των δυο ρευστών (συναγωγή), πράγμα εξαιρετικά επιθυμητό λόγω της επακόλουθης αραιώσης του πεδίου λυμάτων. Βέβαια, η εμφάνιση του φαινομένου απαιτεί την απουσία ροών (ή διατμητικών τάσεων), η οποία εξασφαλίζεται με τη διακοπτόμενη διάθεση των λυμάτων στον αποδέκτη και στο μακρινό πεδίο (Far Field) των λυμάτων.

Αγωγός διάθεσης άλμης, αραιωμένης με θερμά λύματα από την ψύξη των μηχανημάτων του εργοστασίου αφαλάτωσης



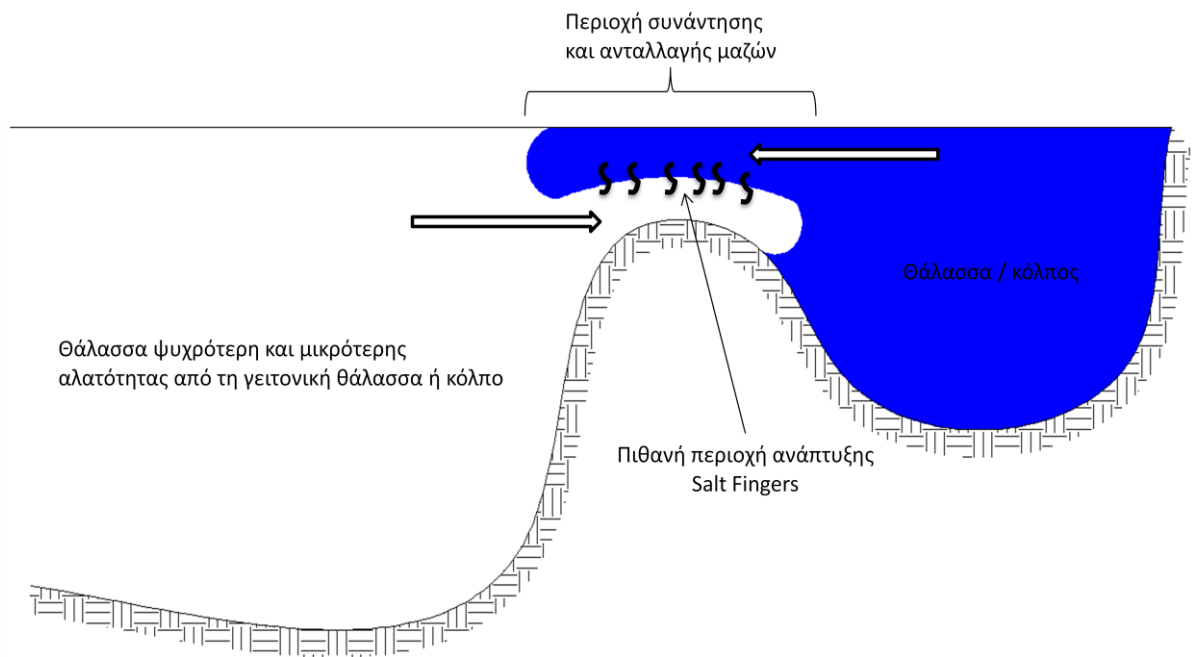
Σχήμα 1.14 Διάθεση παραπροϊόντος εργοστασίου αφαλάτωσης

Στα δύο παραπάνω παραδείγματα παρουσιάσθηκε ένας επικουρικός μηχανισμός αραιώσης, ο οποίος μέχρι τώρα δεν συνηθιζόταν. Τα Salt Fingers, οδηγούν σε αύξηση του όγκου του πεδίου λυμάτων και σε επακόλουθη αραιώσή του (μηχανισμός ανάμιξης). Το κατά πόσο αραιώνουν βέβαια τα λύματα δεν είναι ακόμα γνωστό. Ο τομέας αυτός χρήζει μεγαλύτερης επιστημονικής διερεύνησης.

(γ) *Σημείο συνάντησης θαλασσών ή θάλασσας με κόλπο*

Στην περίπτωση συνάντησης δύο θαλασσών (όπως π.χ. η Μεσόγειος με τον Ατλαντικό), τα νερά των δύο θαλασσών έχουν διαφορά τόσο στην θερμοκρασία όσο και στην αλατότητα. Στην διεπιφάνεια των δύο ρευστών εμφανίζεται ζεστό νερό και μεγαλύτερης αλατότητας (Μεσόγειος), πάνω από ψυχρότερο και λιγότερο αλατισμένο νερό. Αυτό οδηγεί στην εμφάνιση των Salt Fingers με επακόλουθη συναγωγή και μεταφορά συστατικών από το ένα σύστημα στο άλλο.

Στην περίπτωση συνάντησης θάλασσας με κόλπο (συνηθέστατη περίπτωση στον Ελλαδικό χώρο), έχουμε ακριβώς το ίδιο φαινόμενο. Δεν έχει γίνει κάποια μελέτη για το κατά πόσο επηρεάζουν τα Salt Fingers τα δύο συστήματα, αλλά σίγουρα το οικοσύστημα του κόλπου θα επωφελείται από τις ανταλλαγές μαζών και θρεπτικών με τη θάλασσα και αντίστροφα (βλ. Σχήμα 1.15).



Σχήμα 1.15 Σε τομή η περιοχή συνάντηση υγρών διαφορετικών χαρακτηριστικών

Από τα παραπάνω, προκύπτει η σημασία της μελέτης αυτού του σχετικά νέου φαινομένου (μόλις από το 1960). Όλα τα παραδείγματα που αναφέρθηκαν αφορούσαν σε συστήματα όπου εμπλέκονται η αλατότητα και η θερμοκρασία. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, μελετήθηκαν συστήματα διαλυμάτων ζαχαρόνευρου και αλατόνευρου. Ο λόγος για τον οποίο δεν καταφύγαμε απευθείας στην μελέτη των συστημάτων αλατότητας – θερμοκρασίας (πραγματικά συστήματα), είναι γιατί δεν μπορούσαμε να αντιμετωπίσουμε τις θερμικές απώλειες (σε επίπεδο διπλωματικής, περιορισμένου χρόνου και εργαστηριακών περιορισμών). Με άλλα λόγια, για την μελέτη συστημάτων όπου εμφανίζεται το συστατικό της θερμοκρασίας, απαιτούνται ιδιαίτερα λεπτές τεχνικές μόνωσης, οι οποίες σε συνδυασμό με την συνεχή βιντεοσκόπηση θα προκαλούσαν προβλήματα στην εκτέλεση και αναπαραγωγή του φαινομένου. Όμως, η απόλυτη ποιοτική αναλογία των συστημάτων αλατόνευρου – ζαχαρόνευρου και αλατόνευρου – θερμοκρασίας, μας ώθησε στο να παρακάμψουμε τα παραπάνω προβλήματα. Με άλλα λόγια, ένα πρόβλημα μελετημένο σε ένα από τα δύο προηγούμενα συστήματα θα δώσει ποιοτικά όμοια εικόνα.

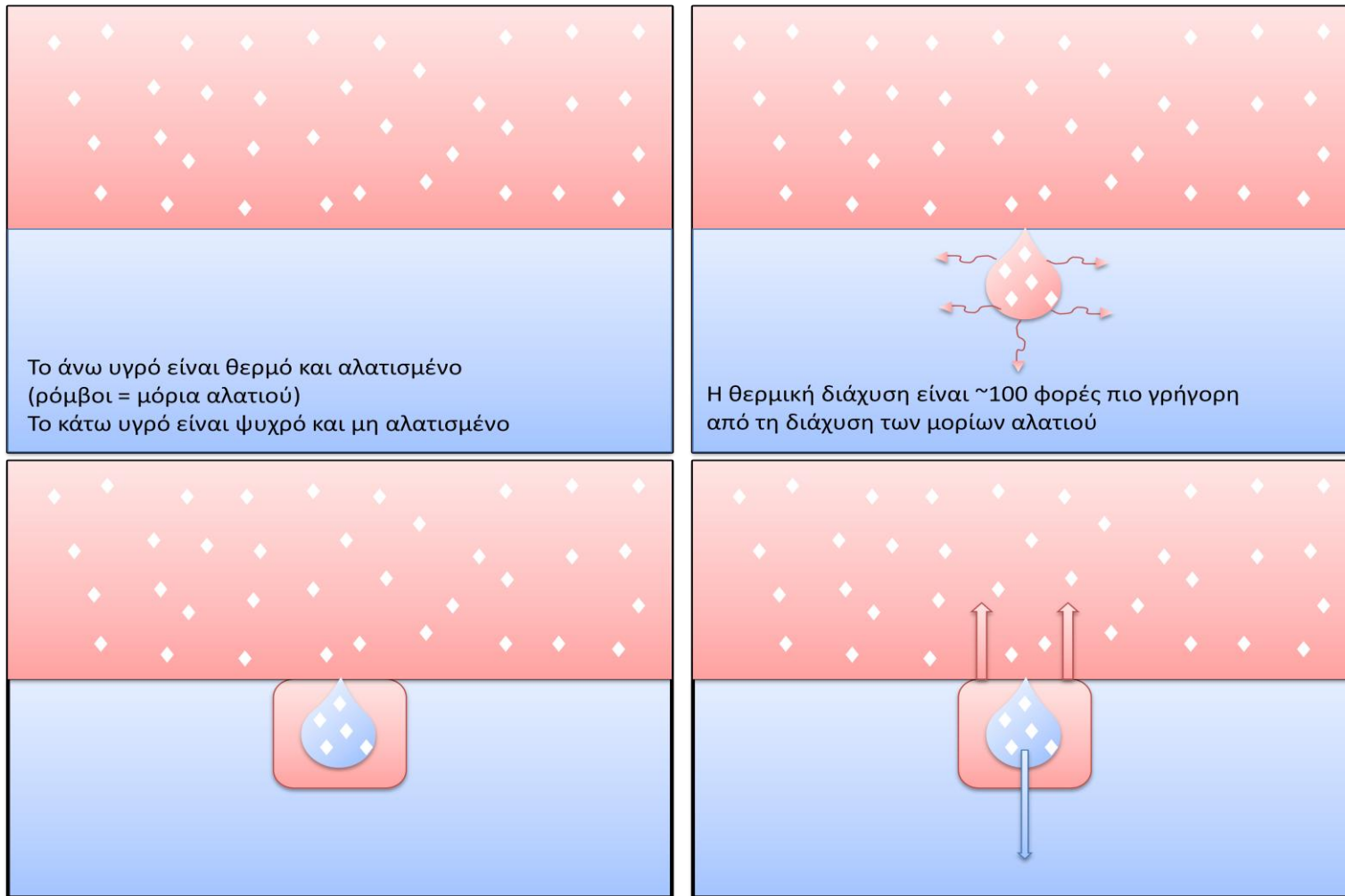
1.6 Σκοπός της παρούσας πειραματικής εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας πειραματικής εργασίας είναι η διερεύνηση των Salt Fingers συναρτήσει του χρόνου εξέλιξης του φαινομένου, μέσα από τρεις διαφορετικούς τύπους πειραμάτων. Ειδικότερα, ανά τύπο πειράματος θα μετρηθούν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- (α) Πρώτος τύπος
 - i. Μέσο Πλάτος Salt Fingers (L)
 - ii. Πάχος αναπτυσσόμενης διεπιφάνειας (h)
 - iii. Συμμετρική ανάπτυξη φαινομένου περί την αρχική διαχωριστική επιφάνεια των ρευστών
- (β) Δεύτερος τύπος
 - i. Μέσο Πλάτος Salt Fingers (L)
 - ii. Μέσο Μήκος Salt Fingers (λ)
- (γ) Τρίτος τύπος
 - i. Μέσο Πλάτος Salt Fingers (L)
 - ii. Πάχος αναπτυσσόμενων διεπιφανειών

Πρακτικά, γίνεται μια διεξοδική ανάλυση συστημάτων αποτελούμενων μόνο από αλατόνερο - ζαχαρόνερο και δίνονται ποσοτικές διερευνήσεις σε φαινόμενα όπου μέχρι τώρα είχαν δεχθεί μόνο ποιοτική ανάλυση (βλπ. πειράματα τύπου II και III). Επιπλέον, η χρησιμοποιούμενη τεχνική οπτικοποίησης (LIF) προσφέρει ποιοτική απεικόνιση του εξεταζόμενου φαινομένου σε σχέση με την τεχνική του σκιαγραφήματος (shadowgraph), βάσει της οποίας έχει γίνει η συντριπτική πλειοψηφία των προηγούμενων πειραματικών εργασιών και η οποία στερείται λεπτομέρειας και ποιότητας οπτικοποίησης αυτών των τόσο λεπτών δομών.

1.7 Παράρτημα Κεφαλαίου



Σχήμα 1.16 Salt Fingers σε σύστημα δύο στρώσεων με συστατικά το αλάτι και τη θερμότητα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια πλήρης περιγραφή του εργαστηριακού χώρου και το τι χρησιμοποιήθηκε για την κατάστρωση και την εκτέλεση των πειραμάτων.

2.1 Παράμετροι σχεδιασμού της πειραματικής διάταξης

Η επιλογή της πειραματικής διάταξης για την επίτευξη των σκοπών της παρούσας εργασίας έγινε σύμφωνα με παλαιότερες πειραματικές εργασίες έτσι ώστε:

- i. Να είναι δυνατή η ανάπτυξη και εξέλιξη του φαινομένου των Salt Fingers ανεμπόδιστα και χωρίς πρόσθετα παρασιτικά φαινόμενα. Ουσιαστικά, παρατηρήθηκε από την βιβλιογραφική ανασκόπηση ποιά είναι η τάξη μεγέθους των εξεταζόμενων χαρακτηριστικών και βάσει αυτών καθορίστηκαν οι διαστάσεις της πειραματικής διάταξης.
- ii. Να μπορούν να εκτελεσθούν και οι τρεις τύποι πειραμάτων, οι οποίοι αποφασίσθηκε να διερευνηθούν.

2.2 Γενική περιγραφή

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από τα ακόλουθα στοιχεία, τα οποία περιληπτικά παρουσιάζονται παρακάτω (βλ. Σχήμα 2.1):

- (1) Πειραματική δεξαμενή εσωτερικών διαστάσεων 20 x 20 x 30 cm (μήκος x πλάτος x ύψος). Είναι κατασκευασμένη από Plexiglas πάχους 1.5 cm. Σε αυτή έγινε παρακολούθηση των φαινομένων. Συμβολισμός Exp_Tank.
- (2) Δεξαμενή μέγιστης χωρητικότητας 7 L. Χρησιμοποιείται για την κατασκευή γραμμικής πυκνομετρικής στρωμάτωσης. Συμβολισμός Tank_3.
- (3) Δεξαμενή μέγιστης χωρητικότητας 7 L. Χρησιμοποιείται για την κατασκευή γραμμικής πυκνομετρικής στρωμάτωσης και την παροχέτευση ρευστού στην Exp_Tank. Συμβολισμός Tank_2.
- (4) Δεξαμενή μέγιστης χωρητικότητας 7 L. Χρησιμοποιείται για την παροχέτευση υπό μορφή κατακόρυφης από πάνω φλέβας εντός της Exp_Tank. Συμβολισμός Tank_1.
- (5) Μετρητής παροχής τύπου πλωτήρα. Μέτρηση παροχών από Tank_1.
- (6) Μαγνητικός Αναδευτήρας.
- (7) Σύριγγα παροχέτευσης ροδαμίνης σε συγκεκριμένα επίπεδα της Exp_Tank.
- (8) Δικλίδες
 - i. Ρύθμιση της ροής προς παροχέτευση φλέβας. Συμβολισμός Δικλίδα_3.
 - ii. Ρύθμιση της ροής προς κατασκευή γραμμικής πυκνομετρικής στρωμάτωσης. Συμβολισμός Δικλίδα_1.
 - iii. Ρύθμιση της ροής για παροχέτευση ρευστού στην Exp_Tank από τον πυθμένα της. Συμβολισμός Δικλίδα_2.

- (9) Αγωγοί παροχέτευσης εσωτερικής διαμέτρου 5.5 mm.
- Διάθεση φλέβας.
 - Παροχέτευση προς γέμισμα δεξαμενής από τον πυθμένα.
- (10) Ράβδοι πάνω στις οποίες τοποθετείται πανί για δημιουργία τεχνητού σκότους.
- (11) Σύστημα Laser, σε όλα τα πειράματα παραμένει σε αυτή τη θέση.
- (12) Θέση τοποθέτησης τρίποδα κάμερας για βιντεοσκόπηση πειραμάτων.



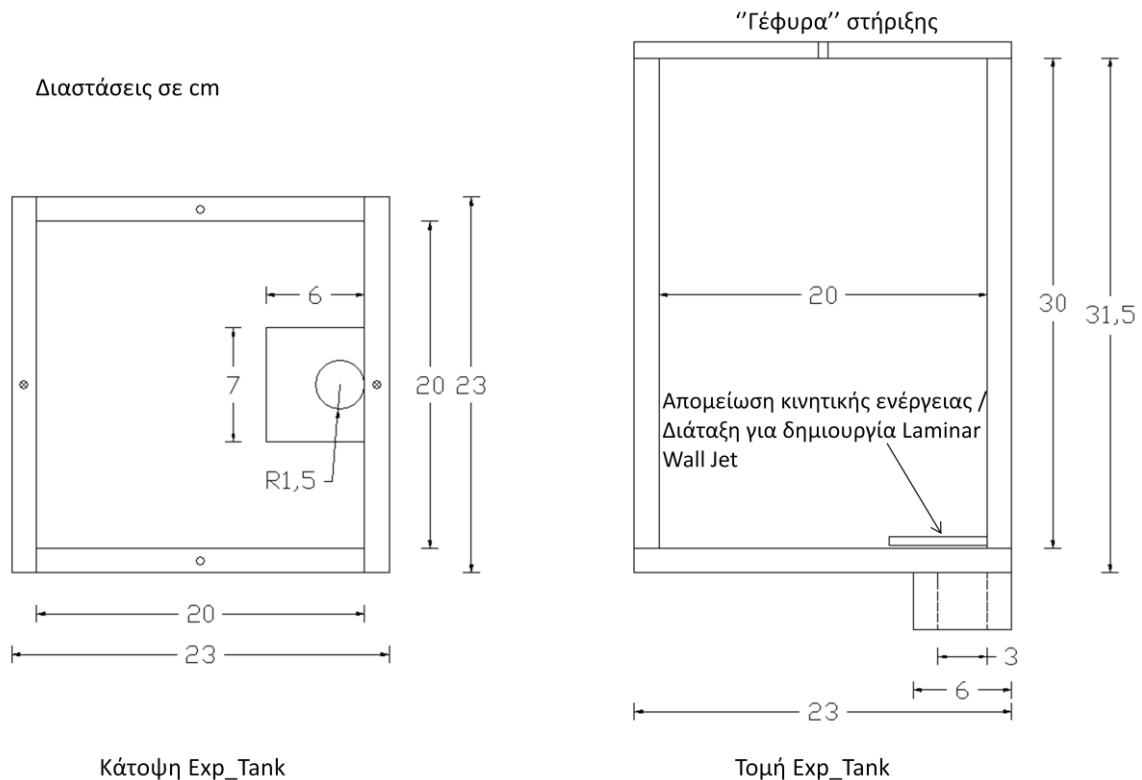
Σχήμα 2.1 Πειραματική διάταξη

2.3 Περιγραφή επιμέρους στοιχείων εργαστηριακού χώρου

2.3.1 Πειραματική Δεξαμενή

Μέσα στην πειραματική δεξαμενή (Exp_Tank) εκτελέσθηκαν και βιντεοσκοπήθηκαν όλα τα πειράματα. Οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες για την ορθή διεξαγωγή των πειραμάτων είναι οι ακόλουθες (βλ. Σχήμα 2.2):

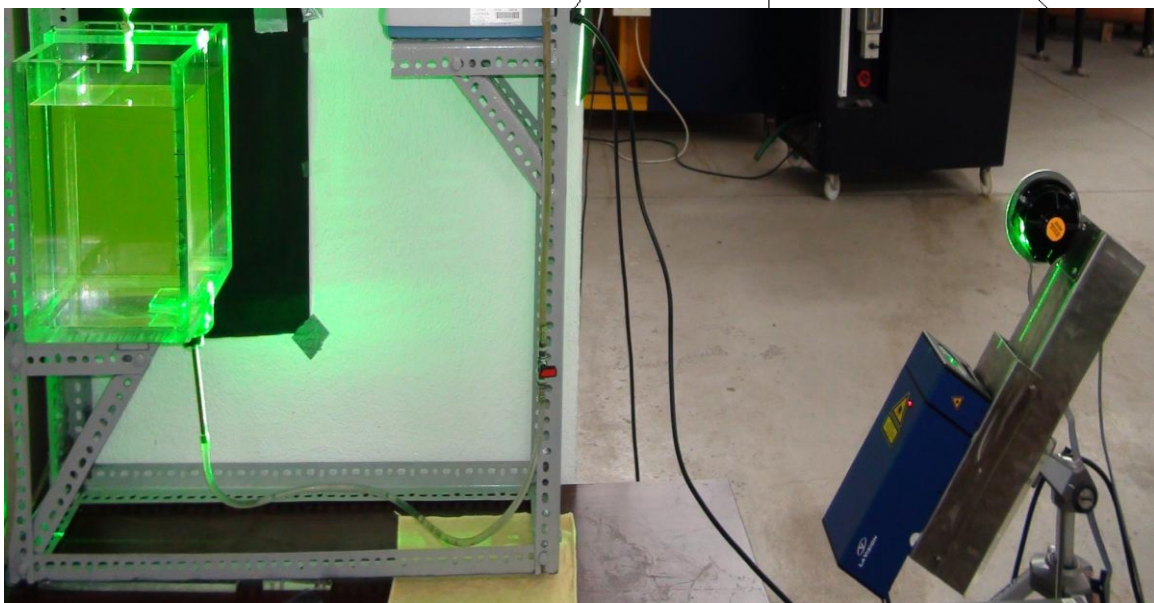
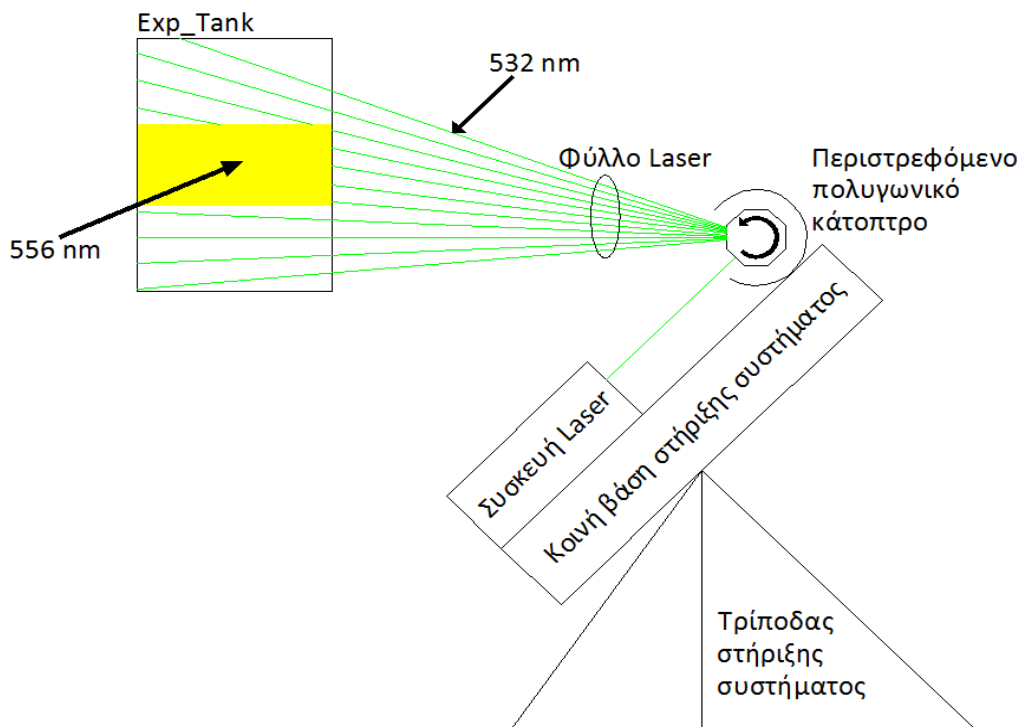
- Για την κατακόρυφη παροχέτευση ρευστού, από το επάνω μέρος, υπό μορφή φλέβας, χρησιμοποιήθηκε μικρή “γέφυρα” με οπή στη μέση της δεξαμενής. Με αυτόν τον τρόπο στηρίζεται και ρυθμίζεται το ύψος του σωλήνα (9_i).
- Στα πειράματα που εκτελέσθηκαν για σύστημα δύο στρώσεων διαφορετικής πυκνότητας ή για γραμμική πυκνομετρική στρωμάτωση του αποδέκτη, τα διαλύματα έπρεπε να παροχετευτούν με αργό ρυθμό εντός της πειραματικής δεξαμενής ώστε να αποφεύγεται η ανάμιξη των διαδοχικών στρώσεων. Για το λόγο αυτό σε απόσταση 2 mm από την έξοδο παροχέτευσης του σωλήνα (9_ii), τοποθετήθηκε Plexiglas διαστάσεων 7 x 6 x 0.5 cm σε απόσταση 2 mm από τον πυθμένα, με σκοπό την είσοδο του νερού σαν φλέβα στρωτής ροής παράλληλη στον πυθμένα (laminar wall jet). Ως αποτέλεσμα, το εισερχόμενο οριζόντια ρευστό δεν διαταράσσει την υπερκείμενη στρώση.



Σχήμα 2.2 Πειραματική δεξαμενή

2.3.2 Σύστημα Laser – Τεχνική οπτικοποίησης LIF

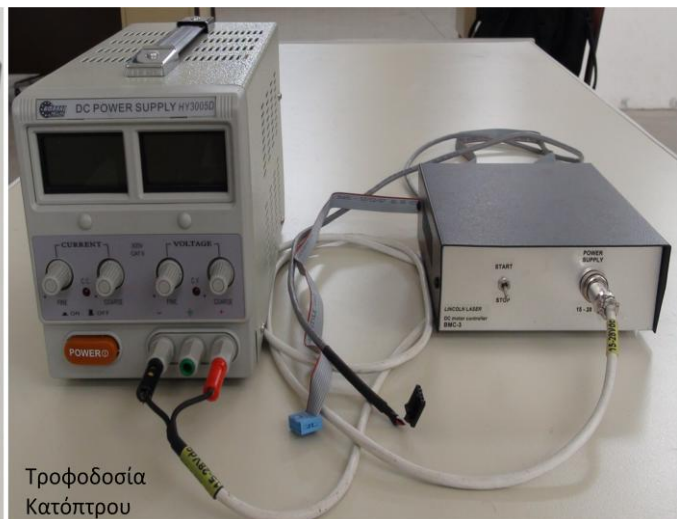
Με σκοπό την οπτικοποίηση των φαινομένων εφαρμόστηκε η τεχνική LIF (Laser-Induced Fluorescence). Αναλυτικότερα, στο ρευστό, το οποίο θέλουμε να παρατηρήσουμε, εγχέουμε μικροποσότητα διαλύματος ροδαμίνης 6G (R6G). Η ροδαμίνη 6G διεγερόμενη από μονοχρωματική ακτινοβολία μήκους κύματος 532 nm (πράσινο φως), εκπέμπει μονοχρωματική ακτινοβολία μήκους κύματος 556 nm (κίτρινο φως). Με στόχο την επίτευξη της οπτικοποίησης, ακτίνα Laser μετατρέπεται σε ένα φύλλο Laser με την βοήθεια περιστρεφόμενου πολυγωνικού κατόπτρου. Το φύλλο Laser διεγείρει τη διαλυμένη ροδαμίνη στο υγρό του δοχείου που φωτοβολεί (βλ. Σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.3 Διάταξη δημιουργίας φύλλου Laser σε λειτουργία

- **Συσκευή ακτίνας Laser – Περιστρεφόμενο πολυγωνικό κάτοπτρο**

Η συσκευή Laser τύπου DPSS (Diode Pumped Solid State) χρησιμοποιείται σε όλα τα πειράματα της παρούσας πειραματικής εργασίας. Εκπέμπει ακτίνα Laser ισχύος 1 W, μήκους κύματος 532 nm (πράσινο φώς) που μετατρέπεται σε ένα κατακόρυφο φύλλο Laser με την βοήθεια του πολυγωνικού κατόπτρου που περιστρέφεται με συχνότητα περίπου 20 kHz και διεγείρει τη ροδαμίνη 6G που εκπέμπει κίτρινη ακτινοβολία μήκους κύματος 556 nm. Για τη λειτουργία των παραπάνω συσκευών απαιτείται αυτόνομη εξωτερική τροφοδοσία (βλ. Σχήμα 2.4).



Σχήμα 2.4 Σύστημα Laser – Κατόπτρου (πάνω εικόνα) / Τροφοδοσία Συστήματος (κάτω)

Με την χρησιμοποίηση του παραπάνω ολοκληρωμένου συστήματος εκτελέστηκε επιτυχώς η οπτικοποίηση των *Salt fingers* σε όλα τα πειράματα της παρούσας εργασίας.

2.3.3 Μετρητής παροχής

Ο μετρητής παροχής αποτελείται από έναν πλαστικό διαφανή σωλήνα, εντός του οποίου κινείται ανάλογα με την εισερχόμενη ροή πλωτήρας (βλ. Σχήμα 2.5). Ο πλωτήρας κατά την διαδικασία παροχέτευσης ισορροπεί σε μια θέση, από την ένδειξη της οποίας προσδιορίζεται η παροχή. Για τον υπολογισμό όμως της παροχής (Q), από την ένδειξη του παροχομέτρου (F), απαιτείται βαθμονόμηση του συστήματος. Η βαθμονόμηση εκτελείται ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα:

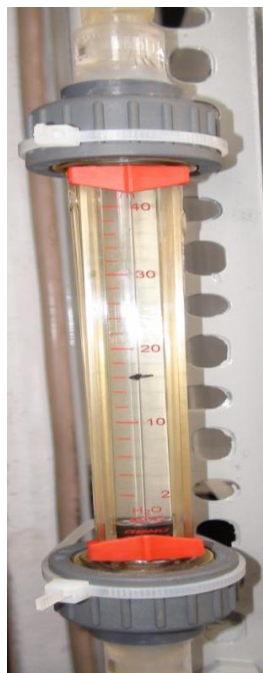
- i. Πλήρωση της βοηθητικής δεξαμενής Tank_2.
- ii. Με κατάλληλη ρύθμιση της Δικλίδας_3 ο πλωτήρας ισορροπεί στην επιθυμητή ένδειξη F .
- iii. Με τη βοήθεια ογκομετρικού σωλήνα μετράμε για 1 min τον προκύπτοντα όγκο. Εκτελείται αυτό το βήμα 2 φορές ανά ένδειξη. Ως αποτέλεσμα λαμβάνουμε για δεδομένη ένδειξη (F) από βήμα (ii) την αντίστοιχη παροχή Q .
- iv. Επαναλαμβάνονται τα βήματα (ii) και (iii) ώστε να καλυφθούν επαρκώς οι ενδείξεις (F) του παροχομέτρου.

Προσαρμόζεται ευθεία με χρήση της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων στα παραπάνω σημεία.

Στην παρούσα εργασία η παροχή Q (cc/s) σε συνάρτηση της ένδειξης του παροχομέτρου F προκύπτει από τη σχέση (2.1):

$$Q = 0.24423 \times F - 0.24216 \quad (2.1)$$

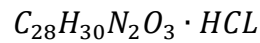
Στο παράρτημα δίνεται αναλυτικότερα ο πίνακας υπολογισμού και η παραπάνω ευθεία.



Σχήμα 2.5 Παροχόμετρο τύπου πλωτήρα

2.3.4 Ροδαμίνη 6G (R6G)

Στο εργαστήριο χρησιμοποιήθηκε διάλυμα ροδαμίνης με συγκέντρωση 1 gr ροδαμίνης 6G σε 1 L νερό, δηλαδή διάλυμα συγκέντρωσης 1 gr/L. Η ροδαμίνη 6G με χημικό τύπο:



είναι σκόνη χρώματος κόκκινου σκούρου. Οι ποσότητες του παραπάνω διαλύματος ροδαμίνης 6G που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα πειραματική εργασία για την οπτικοποίηση των Salt Fingers, κυμάνθηκαν από 0.05 έως 2.5 mL σε περίπου 5 L διαλύματος.

2.3.5 Θειώδες Νάτριο

Όλα τα διαλύματα αλατόνευρο - ζαχαρόνευρο που δημιουργήθηκαν στο εργαστήριο είχαν ως βάση το νερό του εργαστηρίου. Το νερό αυτό προέρχεται από γεώτρηση και η μόνη επεξεργασία που δέχεται είναι η χλωρίωση. Όμως το χλώριο αντιδρά με τη ροδαμίνη 6G και την εξουδετερώνει, που έχει ως αποτέλεσμα την μη ακτινοβολία της και την αποτυχία του πειράματος, αφού δεν γίνεται οπτικοποίηση του φαινομένου. Για τον παραπάνω λόγο, σε κάθε διάλυμα αλατόνευρο - ζαχαρόνευρο προστίθεται μια μικροποσότητα θειώδους νατρίου Na_2SO_3 που εξουδετερώνει το υπάρχον χλώριο. Κατ' αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται ανεμπόδιστα η ακτινοβολία των διαλυμάτων ροδαμίνης.

2.3.6 Ζυγαριά ακριβείας εργαστηρίου

Για την παρασκευή διαλυμάτων δεδομένων συγκεντρώσεων, ήταν απαραίτητη ζυγαριά ακριβείας, με σκοπό την μέτρηση των απαιτούμενων ποσοτήτων ζάχαρης και αλατιού. Στο εργαστήριο χρησιμοποιήθηκε ζυγαριά με όριο ζύγισης τα 250 gr και ανάγνωση 3 δεκαδικών ψηφίων (ακρίβεια ± 0.003 gr) που φαίνεται στο Σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6 Ζυγαριά και ψηφιακό θερμομέτρο εργαστηρίου

2.3.7 Ψηφιακό Θερμόμετρο εργαστηρίου

Για τον προσδιορισμό της πυκνότητας των χρησιμοποιούμενων διαλυμάτων δεν αρκεί μόνο η γνώση της συγκέντρωσης αλλά και της θερμοκρασίας. Γι' αυτόν τον λόγο χρησιμοποιήθηκε ψηφιακό θερμόμετρο με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά (βλ. Σχήμα 2.6):

- Εύρος μέτρησης: 0 έως 150 °C
- Ανάγνωση ενός δεκαδικού ψηφίου
- Ακρίβεια: ± 1 °C

2.3.8 Αναδευτήρας δεξαμενής 2 (Tank_2)

Για τη δημιουργία γραμμικής πυκνομετρικής στρωμάτωσης στην πειραματική δεξαμενή απαιτείται συνεχής ανάδευση της δεξαμενής 2 (σύμφωνα με την τεχνική των Oster & Yamamoto (1963) που θα παρουσιασθεί στο Κεφάλαιο 4). Για τον παραπάνω λόγο, χρησιμοποιήθηκε μαγνητικός αναδευτήρας (βλ. Σχήμα 2.7). Μεταλλικό κυλινδρικό στέλεχος τοποθετείται εντός της δεξαμενής και περιστρέφεται με τη βοήθεια περιστρεφόμενου μαγνήτη εκτός της δεξαμενής από μικρή απόσταση. Κατ' αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η ανάδευση της βοηθητικής δεξαμενής 2.



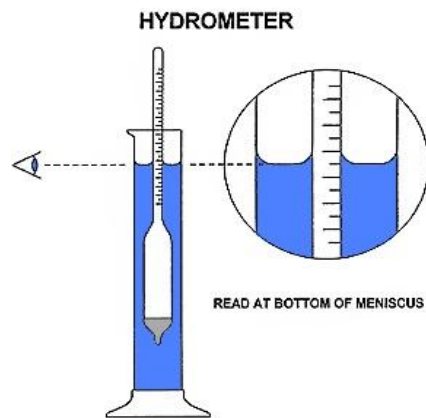
Σχήμα 2.7 Ανάδευση με μαγνητικό αναδευτήρα

2.4 Μέτρηση πυκνότητας διαλυμάτων

2.4.1 Πυκνόμετρο ή Αραιόμετρο (Hydrometer)

Αποτελέσει το πιο βασικό όργανο μέτρησης της πυκνότητας των διαλυμάτων αλατόνευρου και ζαχαρόνευρου (βλ. Σχήμα 2.8). Η αρχή λειτουργίας βασίζεται στην άνωση. Το όργανο βυθίζεται στο υγρό διάλυμα (χρήση ογκομετρικού σωλήνα) και ισορροπεί σε κάποια θέση. Στη θέση ισορροπίας διαβάζουμε την ένδειξη πυκνότητας. Το πυκνόμετρο μετράει πυκνότητες στο εύρος 1.000 έως 1.050 gr/cm^3 ανά 0.001 gr/cm^3 για θερμοκρασία ρευστού στους 20 °C. Για θερμοκρασίες διαφορετικές από 20 °C, η ένδειξη παύει να είναι ακριβής. Στα περισσότερα πειράματα που εκτελέστηκαν στην παρούσα εργασία, η θερμοκρασία δεν

ήταν ποτέ 20 °C, αλλά ήταν στο διάστημα από 16 έως 24 °C. Δεδομένου του περιορισμού του οργάνου, χρησιμοποιήθηκε μόνο για την εύρεση των διαφορών πυκνότητας ($\Delta\rho$) των διαλυμάτων, μιας που κατ' αυτόν τον τρόπο απαλείφεται ο θερμοκρασιακός παράγοντας.



Σχήμα 2.8 Πυκνόμετρο / Αραιόμετρο

2.4.2 Οπτικό Διαθλασίμετρο

Με το συγκεκριμένο όργανο έγινε μέτρηση της πυκνότητας διαλυμάτων αλατόνευρου. Η αρχή λειτουργίας βασίζεται στο γεγονός ότι διαλύματα διαφορετικής αλατότητας παρουσιάζουν διαφορές στον δείκτη διάθλασης. Κατ' επέκταση, στον οπτικό αισθητήρα του οργάνου τοποθετείται μικροποσότητα διαλύματος με τη χρήση πιπέτας και στη συνέχεια γίνεται ανάγνωση της πυκνότητας. Το όργανο δίνει απευθείας την πυκνότητα του διαλύματος με αναγωγή στους 20 °C, δηλαδή την ρ^{20} . Τα χαρακτηριστικά του οργάνου δίνονται παρακάτω (βλ. Σχήμα 2.9):

- Εύρος μέτρησης πυκνότητας 1.000 έως 1.070 gr/cm^3
- Ανάγνωση ανά 0.001 gr/cm^3
- Αυτόματη αντιστάθμιση θερμοκρασίας από +10 έως +40 °C, δηλαδή μετατρέπει αυτόματα τη μέτρηση σε πυκνότητα στους 20 °C για το δεδομένο διάλυμα (ρ^{20}).



Σχήμα 2.9 Οπτικό διαθλασίμετρο (αριστερά) και πεδίου ανάγνωσης (δεξιά)

2.4.3 Ψηφιακό Διαθλασίμετρο

Με το συγκεκριμένο όργανο έγινε μέτρηση της πυκνότητας διαλυμάτων του ζαχαρόνερου. Λόγω όμως του ότι είναι ψηφιακό και δεν έχει υποκειμενικότητα στην ανάγνωση, χρησιμοποιήθηκε και για ορισμένα διαλύματα αλατόνερου, κυρίως για την επαλήθευση της γραμμικότητας των πυκνομετρικών στρωματώσεων. Η αρχή λειτουργίας του είναι όμοια με αυτή του οπτικού διαθλασίμετρου. Για τη μέτρηση της πυκνότητας τοποθετείται μια μικροποσότητα διαλύματος στον οπτικό αισθητήρα και με το πάτημα κουμπιού προκύπτει στην οθόνη η τιμή της συγκέντρωσης της ζάχαρης στο διάλυμα σε μονάδες Brix. Η μονάδα μέτρησης Brix ισοδυναμεί με την περιεκτικότητα επί τοις εκατό κατά βάρος, δηλαδή με % $\frac{w}{w}$. Στη συνέχεια η επί τοις % περιεκτικότητα μετατρέπεται σε συγκέντρωση ζάχαρης (gr/L) με τη σχέση (2.2):

$$S \left(\frac{gr}{L} \right) = 10 \times \text{Περιεκτικότητα} \left(\% \frac{w}{w} \right) \quad (2.2)$$

Σε αυτό το σημείο επισημαίνεται ότι το βάρος 1 L διαλύματος ζαχαρόνερου ή αλατόνερου είναι με ικανοποιητική ακρίβεια ίσο με το βάρος 1 L φρέσκου νερού. Άλλωστε στα πειράματα αυτής της εργασίας δεν ξεπεράστηκαν συγκεντρώσεις πάνω από 30 gr/L. Άρα, 1 L διαλύματος ζυγίζει περίπου 1Kg. Με αυτή την απλοποίηση, από την ζυγιζόμενη ποσότητα ζάχαρης ή αλατιού γνωρίζουμε απευθείας τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις στα παρασκευασμένα διαλύματα δεδομένου όγκου. Για παράδειγμα, βοηθητική δεξαμενή γεμίζεται με 4 L νερό. Σε αυτή την δεξαμενή, θα αναμιχθούν 40 gr ζάχαρης. Το προκύπτον διάλυμα θα έχει συγκέντρωση 10 gr ζάχαρης ανά λίτρο διαλύματος ή 1% κατά βάρος.

Τα χαρακτηριστικά του ψηφιακού διαθλασίμετρου δίνονται παρακάτω:

- Εύρος συγκεντρώσεων ζάχαρης από 0 έως 35 Brix
- Ανάγνωση ενός δεκαδικού ψηφίου
- Ακρίβεια ± 0.2
- Αυτόματη αναπροσαρμογή στους 20 °C, δηλαδή προκύπτει άμεσα η ρ^{20} .
- Απαιτείται βαθμονόμηση με απιονισμένο νερό



Σχήμα 2.10 Ψηφιακό διαθλασίμετρο

2.5 Υπολογισμός Πυκνότητας διαλυμάτων

Τα όργανα που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους εμφανίζουν ευαισθησία στις μεταβολές της θερμοκρασίας των διαλυμάτων. Το πρόβλημα έγκειται στο γεγονός ότι το πυκνόμετρο δίνει τιμές πυκνότητας χωρίς προσαρμογές, ενώ το οπτικό και το ψηφιακό διαθλασίμετρο, δίνουν τιμές πυκνότητας προσαρμοσμένες στους 20 °C (ρ^{20}). Αμέσως γίνεται αντιληπτό ότι με τα παραπάνω όργανα απουσιάζει η κοινή βάση αναφοράς, δεδομένου ότι οι αναπροσαρμογές εισάγουν διαφορές και αβεβαιότητες στις προκύπτουσες τιμές.

Για τον παραπάνω λόγο, τα όργανα χρησιμοποιήθηκαν επικουρικά με τις σχέσεις υπολογισμού πυκνοτήτων από την εργασία των Ruddick and Shirtcliffe (1979). Αναλυτικότερα, στην προαναφερόμενη εργασία δίνονται πολυώνυμα υπολογισμού πυκνότητας διαλυμάτων αλατόνευρου και ζαχαρόνευρου συναρτήσεως της συγκέντρωσης (T ή S σε gr/L) και της θερμοκρασίας (θ σε °C). Μάλιστα, οι συγγραφείς αναφέρουν στην εισαγωγή τους ότι οι σχέσεις είναι χρήσιμες για πειράματα μελέτης φαινομένων Double-Diffusive Convection. Οι σχέσεις είναι οι ακόλουθες (2.3) και (2.4):

$$\begin{aligned} \rho_T = & 0.99708 - \{2.539 * 10^{-4} * (\theta - 25)\} - \{4.968 * 10^{-6} * (\theta - 25)^2\} + \{2.7 * 10^{-8} * \\ & (\theta - 25)^3\} + \left(0.6997 * \frac{T}{1000}\right) + \left\{0.1402 * \left(\frac{T}{1000}\right)^2\right\} + \left\{0.337 * \left(\frac{T}{1000}\right)^3\right\} - \{1.6803 * \\ & 10^{-3} * (\theta - 25)\} - \{3.551 * 10^{-5} * (\theta - 25)^2\} + \{3.52 * 10^{-7} * (\theta - 25)^3\} * \left(\frac{T}{1000}\right) + \\ & \{2.714 * 10^{-3} * (\theta - 25)\} - \{3.551 * 10^{-5} * (\theta - 25)^2\} + \{3.52 * 10^{-7} * (\theta - 25)^3\} * \\ & \left(\frac{T}{1000}\right)^2 \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} \rho_S = & 0.99708 - \{2.539 * 10^{-4} * (\theta - 25)\} - \{4.968 * 10^{-6} * (\theta - 25)^2\} + \{2.7 * 10^{-8} * \\ & (\theta - 25)^3\} + \left(0.38512 * \frac{S}{1000}\right) + \left\{0.12405 * \left(\frac{S}{1000}\right)^2\right\} + \left\{0.055 * \left(\frac{S}{1000}\right)^3\right\} - \{3.353 * \\ & 10^{-4} * (\theta - 25)\} - \{0.76735 * 10^{-5} * (\theta - 25)^2\} * \left(\frac{S}{1000}\right) - \{2.16623 * 10^{-4} * \\ & (\theta - 25)\} + \{0.538995 * 10^{-5} * (\theta - 25)^2\} * \left(\frac{T}{1000}\right)^2 \end{aligned} \quad (2.4)$$

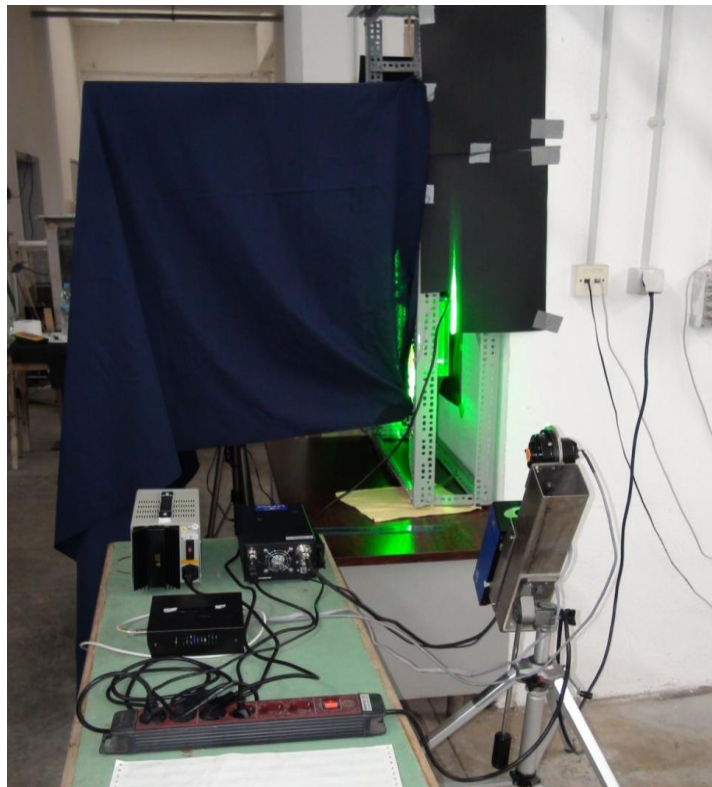
όπου, ρ_T η πυκνότητα διαλύματος αλατόνευρου (gr/cm^3), ρ_S η πυκνότητα διαλύματος ζαχαρόνευρου (gr/cm^3), T η συγκέντρωση αλατιού (gr/L), S η συγκέντρωση ζάχαρης (gr/L) και θ η θερμοκρασία (°C).

Στην παρούσα πειραματική εργασία επαληθεύτηκαν οι σχέσεις (2.3) και (2.4) με την χρήση των οργάνων μέτρησης της πυκνότητας, αλλά για τους υπολογισμούς με απόλυτα μεγέθη χρησιμοποιήθηκαν οι τύποι ακριβώς γιατί ξεκινούν από κοινό σημείο αναφοράς.

2.6 Βιντεοσκόπηση

Η παρακολούθηση του φαινομένου των Salt Fingers σε όλα τα πειράματα επιτεύχθηκε βιντεοσκοπώντας την πειραματική δεξαμενή. Παρακάτω παρατίθενται οι βασικές αρχές βιντεοσκόπησης που τηρήθηκαν αυστηρά σε κάθε πείραμα:

- i. Ο φακός της κάμερας εστιάζει κάθετα στο επίπεδο παρακολούθησης του φαινομένου. Το επίπεδο παρακολούθησης είναι το φύλλο Laser πάνω στο οποίο ακτινοβολεί η ροδαμίνη 6G. Η θέση της κάμερας αποφασίστηκε να είναι σε μικρή απόσταση από την πειραματική δεξαμενή, όχι όμως τόσο κοντά ώστε να επηρεάζεται από προοπτικές στρεβλώσεις.
- ii. Το επίπεδο παρακολούθησης πρέπει να είναι κατακόρυφο και να διέρχεται από το μέσο της δεξαμενής (έλεγχος με νήμα της στάθμης) καθώς επίσης και το τρίποδο της κάμερας να είναι ρυθμισμένο για κατακόρυφη και οριζόντια σκόπευση (έλεγχος με ενσωματωμένο αλφάδι).
- iii. Με σκοπό τη σύνδεση του βιντεοσκοπημένου υλικού με τα πραγματικά μεγέθη των αναπτυσσόμενων φαινομένων, τοποθετείται χάρακας πάνω στο επίπεδο παρακολούθησης (με γεμάτη την δεξαμενή). Επισημαίνεται ότι η κλίμακα μήκους είναι η ίδια είτε ο χάρακας τοποθετηθεί οριζόντια είτε κατακόρυφα.
- iv. Δημιουργία τεχνητού σκότους για την ποιοτική απεικόνιση των μικροσκοπικών δομών των Salt Fingers (βλ. Σχήμα 2.11).
- v. Για την καλύτερη βιντεοσκόπηση τοποθετήθηκε μαύρο χαρτόνι πίσω από την Exp_Tank (γι' αυτό τον λόγο το ρευστό που δεν περιέχει ροδαμίνη φαίνεται μαύρο).



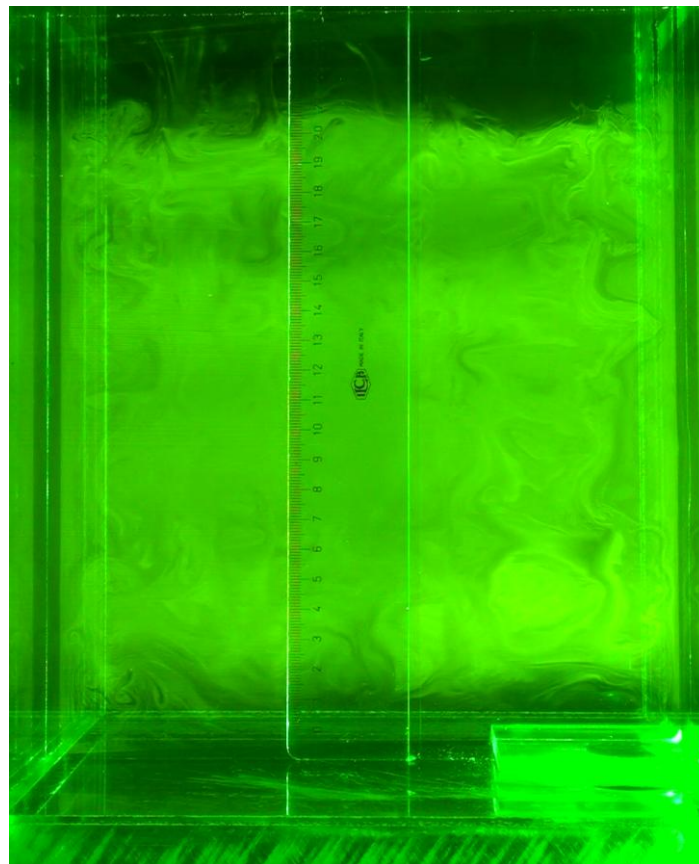
Σχήμα 2.11 Επίτευξη τεχνητού σκότους με αποσπώμενο πανί

2.6.1 Κάμερα εργαστηρίου

Στο εργαστήριο χρησιμοποιήθηκε η κάμερα Sony HDR-XR550. Όλα τα πειράματα βιντεοσκοπήθηκαν σε κατάσταση λειτουργίας HD HQ, δηλαδή High Definition – High Quality στα 9Mbps και ανάλυση στα 1440 x 1080. Η μόνη ρύθμιση της κάμερας που μεταβαλλόταν σε όλα τα πειράματα και κατά την διάρκεια εξέλιξής τους ήταν η φωτεινότητα (Brightness), ρύθμιση απαραίτητη για την καταγραφή των Fingers.

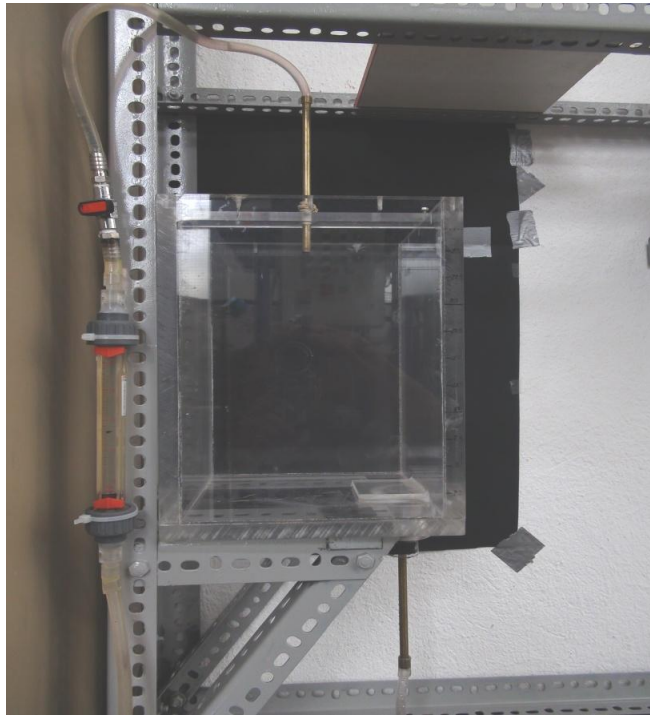
2.6.2 Λήψη Κλίμακας Μήκους

Όπως προαναφέρθηκε είναι απαραίτητη η σύνδεση του βιντεοσκοπούμενου υλικού με τα πραγματικά μεγέθη. Η κάμερα πριν την έναρξη του κάθε πειράματος τοποθετείται σε συγκριμένη θέση και εστιάζει στο επίπεδο παρακολούθησης. Οι ρυθμίσεις αυτές διατηρούνται αναλλοίωτες κατά την διάρκεια εξέλιξης του φαινομένου. Στο τέλος του κάθε πειράματος αναδεύεται η δεξαμενή για να εξαπλωθεί η ροδαμίνη σε κάθε σημείο του επιπέδου παρακολούθησης για την καλύτερη φωτογράφιση του κανόνα. Ο κανόνας (Σχήμα 2.12) τοποθετείται στο κέντρο του παραθύρου λήψης και επί του επιπέδου παρακολούθησης, αφού πάνω σε αυτό μετρώνται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των Salt Fingers. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να γίνει η σύνδεση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των Fingers οποιασδήποτε εικόνας με το πραγματικό τους μέγεθος. Μεταφέρεται στο AutoCAD η διάσταση του 1 cm του κανόνα με βάση την οποία μετρώνται τα γραμμικά μεγέθη των εικόνων.



Σχήμα 2.12 Λήψη κλίμακας μήκους

2.7 Παράρτημα εικόνων



Σχήμα 2.13 Πειραματική δεξαμενή



Σχήμα 2.14 Διάταξη πειραματικού χώρου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

3. ΠΡΩΤΟΣ ΤΥΠΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

3.1 Γενική περιγραφή

Σε αυτόν τον τύπο πειραμάτων μελετήθηκε το φαινόμενο των Salt Fingers σε ρευστό δύο στρώσεων (two layer system) με υγρά διαφορετικής πυκνότητας και με διαφορετικό συντελεστή μοριακής διάχυσης. Η ανώτερη ελαφρύτερη στρώση είναι διάλυμα ζαχαρόνευρου, η κατώτερη βαρύτερη είναι διάλυμα αλατόνευρου. Αποφασίσθηκε, μεταβλητή αυτής της σειράς πειραμάτων να είναι η συγκέντρωση ζάχαρης της ανώτερης στρώσης (κυμάνθηκε από 4 έως 18 gr/L), διατηρώντας σταθερή τη συγκέντρωση αλατιού της κατώτερης (10 gr/L). Μικρή ποσότητα διαλύματος ροδαμίνης 6G τοποθετήθηκε στο διάλυμα ζαχαρόνευρου, το οποίο εγχύθηκε πρώτο στη δεξαμενή. Από τον πυθμένα της πειραματικής δεξαμενής παροχετεύθηκε αργά από τη σχισμή εισόδου μήκους 70 mm και ύψους 2 mm η στρώση του αλατόνευρου σαν wall jet, μέχρι να αποκτήσει πάχος 10 cm, όσο δηλαδή και το πάχος του ζαχαρόνευρου. Η επαφή των δύο ρευστών, με δεδομένη την διαφορά στην ταχύτητα μοριακής διάχυσης, οδηγεί σε ταχύτατη εμφάνιση και εξέλιξη του φαινομένου των Salt Fingers (αναλυτική εξήγηση δίνεται στο Κεφάλαιο 1.1). Όλα τα πειράματα βιντεοσκοπήθηκαν για 180 min και από την επεξεργασία προέκυψαν το πάχος της διεπιφάνειας (h), το μέσο πλάτος των Salt Fingers (L) και έγινε έλεγχος της συμμετρίας της ανοδικής και καθοδικής ροής, σαν συναρτήσεις του χρόνου.

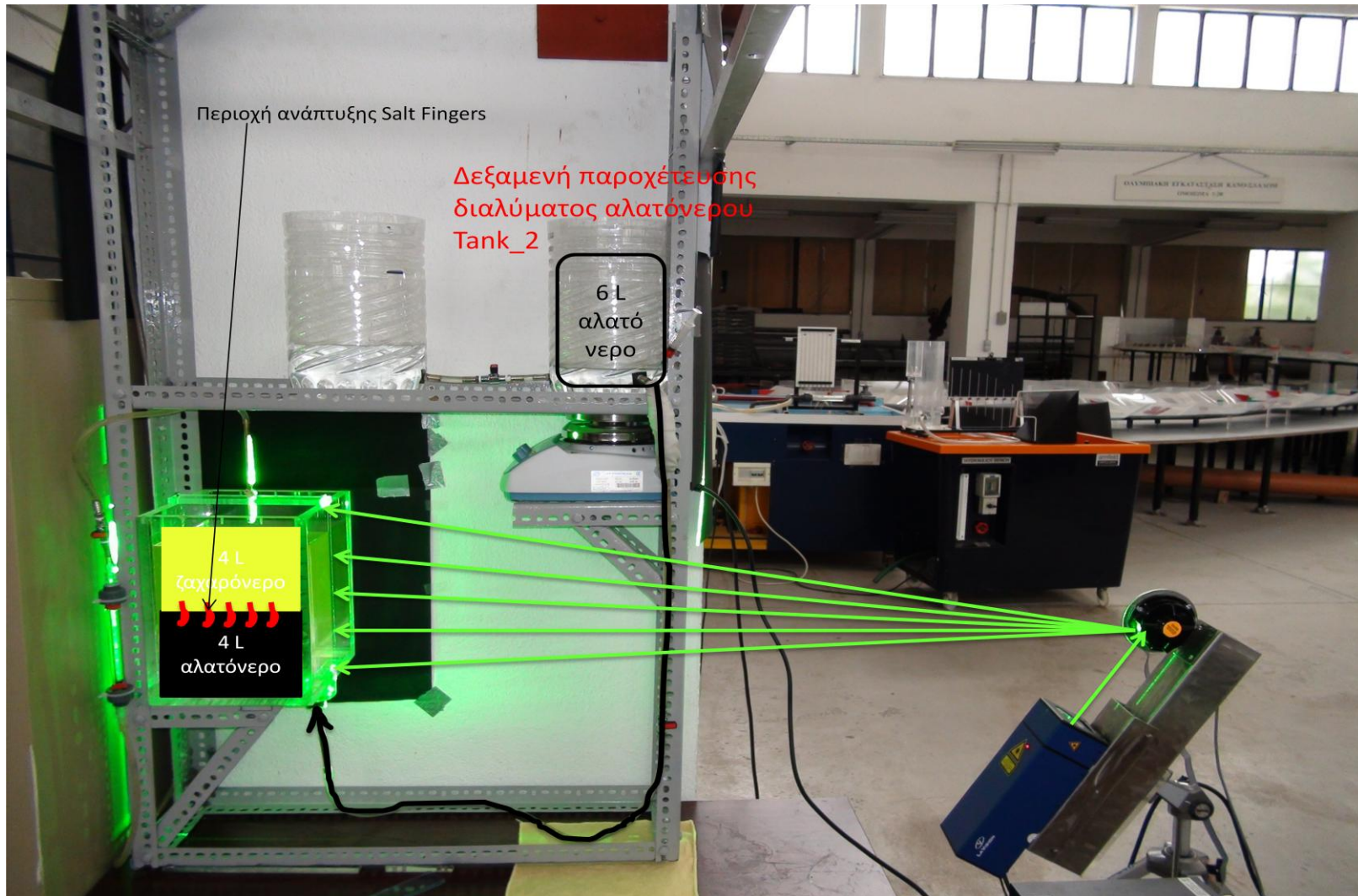
3.2 Περιγραφή τυπικού πειράματος

Παρακάτω, παρουσιάζονται αναλυτικά τα βήματα που ακολουθήθηκαν αυστηρά σε κάθε πείραμα αυτού του τύπου (βλ. Σχήμα 1.1).

- (1) Παρασκευή διαλυμάτων αλατόνευρου και ζαχαρόνευρου της ίδιας θερμοκρασίας:
 - i. Διάλυμα αλατόνευρου: Σε βοηθητική δεξαμενή μέγιστης χωρητικότητας 7 L, τοποθετούνται 6 L νερού βρύσης, 60 gr αλάτι και αναδεύονται για περίπου 2 min ώστε το αλάτι να διαλυθεί και να προκύψει ομογενές διάλυμα. Στη συνέχεια, μετριέται η πυκνότητά του διαλύματος με το πυκνόμετρο και η θερμοκρασία του. Ακολούθως, το έτοιμο διάλυμα τοποθετείται στη δεξαμενή 2 (Tank_2), έτσι ώστε να ξεκινήσει λίγο αργότερα η παροχέτευσή του.
 - ii. Διάλυμα ζαχαρόνευρου: Σε βοηθητική δεξαμενή μέγιστης χωρητικότητας 7 L, τοποθετούνται 4 L νερού βρύσης, 5 gr ζάχαρη και αναδεύονται για περίπου 2 min. Κατά το τέλος της σύνθεσης του διαλύματος, μετριέται η πυκνότητα με το πυκνόμετρο και το ψηφιακό διαθλασίμετρο. Τέλος, στο διάλυμα προστίθεται περίπου 1 mL διαλύματος ροδαμίνης 6G. Το επόμενο βήμα είναι η έγχυση του διαλύματος εντός της δεξαμενής (4 L ισοδυναμούν με 10 cm ύψους πειραματικής δεξαμενής). Και στα δύο διαλύματα τοποθετείται μικροποσότητα θειώδους νατρίου (Na_2SO_3).

- (2) Ορθό στήσιμο συστήματος Laser. Σε όλα τα πειράματα (κάθε τύπου) η συσκευή Laser τοποθετείται στα δεξιά (όπως παρατηρούμε τη διάταξη) της πειραματικής δεξαμενής σε μικρή απόσταση από αυτή. Είναι απαραίτητο το δημιουργούμενο φύλλο Laser να είναι κατακόρυφο. Η μη κατακορυφότητα μπορεί να οδηγήσει σε λάθος ερμηνεία των εικόνων. Ο λόγος είναι ότι τα Fingers αναπτύσσονται κατά την κατακόρυφη διεύθυνση (βαρυτικό πεδίο) και επομένως το φύλλο Laser που διεγείρει την ροδαμίνη θα πρέπει να είναι παράλληλο με την πορεία ανάπτυξης αυτών των δομών. Τέλος, το φύλλο Laser ρυθμίζεται να διέρχεται από το μέσο της δεξαμενής.
- (3) Στήσιμο κάμερας σε μικρή απόσταση από την πειραματική δεξαμενή. Ο φακός στοχεύει κάθετα το επίπεδο παρακολούθησης. Υπενθυμίζεται ότι μόνο στο επίπεδο που υπάρχει η ακτινοβολία του Laser, δύναται να εμφανιστεί το φαινόμενο των Fingers, αφού πάνω σε αυτό διεγείρεται και ακτινοβολεί η ροδαμίνη 6G. Επιπλέον, φροντίζουμε το ύψος του άξονα του φακού να είναι στο επίπεδο της διαχωριστικής επιφάνειας.
- (4) Τοποθέτηση πανιού με σκοπό την δημιουργία σκότους και ως αποτέλεσμα την καλύτερη παρακολούθηση του φαινομένου.
- (5) Πλέον, εντός της δεξαμενής υπάρχει το διάλυμα ζαχαρόνευρο. Για να αρχίσει το φαινόμενο των Salt Fingers απαιτείται τα δύο διαλύματα να έρθουν σε επαφή. Εκκινείται, λοιπόν, η διαδικασία παροχέτευσης διαλύματος αλατόνευρο από τη σχισμή πλήρωσης στον πυθμένα της δεξαμενής. Η Δικλίδα_2 είναι ανοικτή κατά το $\frac{1}{3}$ με σκοπό αφενός να μην καθυστερήσει πολύ η παροχέτευση και αφετέρου να μην διαταράσσεται το ήδη υπάρχον ρευστό εντός της δεξαμενής. Ένα πρόβλημα που εμφανίζεται σε αυτό το στήσιμο πειράματος είναι ότι με το που έρχονται τα δύο διαλύματα σε επαφή εκκινεί το φαινόμενο των Fingers. Όμως, το γέμισμα διαρκεί κατά μέσο όρο 23 min και σε αυτό το διάστημα δεν γίνεται βιντεοσκόπηση αφού η κάμερα στοχεύει ένα παράθυρο μέσα στο οποίο δεν έχει φτάσει η (ασταθής) διεπιφάνεια των δύο ρευστών. Πρέπει δηλαδή να προοδεύσει η διαδικασία παροχέτευσης ώστε να αποκτήσει κάποιο πάχος η κατώτερη στρώση αλατόνευρο. Η παροχέτευση σταματάει όταν το πάχος της κατώτερης στρώσης γίνει 10 cm.
- (6) Παρόλα τα παραπάνω προβλήματα της διαδικασίας παροχέτευσης (Βήμα 5), αυτή σταματάει μετά περίπου 23 min. Με το που κλείνει η Δικλίδα_2, αυτή ορίζεται ως χρονική στιγμή $t=0$ και εκκινεί η βιντεοσκόπηση. Η βιντεοσκόπηση διαρκεί 180 min.
- (7) Μετά το πέρας των 180 min, τοποθετείται στο επίπεδο παρακολούθησης κανόνας για τον μετέπειτα προσδιορισμό της κλίμακας μήκους.

Στα πειράματα αυτού του τύπου δεν υπήρξε καμία παρέκκλιση από τα παραπάνω επτά βήματα.



Σχήμα 3.1 Πειραματική διάταξη

3.3 Επισημάνσεις επί της πειραματικής διαδικασίας

Παρακάτω θα παρουσιασθούν ζητήματα επί της πειραματικής διάταξης και διαδικασίας:

- i. Χωρίς την ύπαρξη ροδαμίνης στο άνω στρώμα, το φαινόμενο είναι αδύνατον να παρακολουθηθεί από το ανθρώπινο μάτι. Η ροδαμίνη 6G σε διάλυμα νερού κάτω από την επίδραση μονοχρωματικής ακτινοβολίας Laser μήκους κύματος 532 nm, εκπέμπει κίτρινο φώς μήκους κύματος περί τα 560 nm οπτικοποιώντας την περιοχή ανάμειξης. Το ρευστό το οποίο δεν έχει ροδαμίνη είναι απλά διαφανές και με το μαύρο χαρτόνι στην πίσω πλευρά της πειραματικής δεξαμενής φαίνεται μαύρο. Έτσι εξασφαλίζεται η αντίθεση των δύο διαλυμάτων και η άριστη οπτικοποίηση (κιτρινοπράσινο φώς σε αντίθεση με το κάτω μαύρο φόντο). Πρακτικά η ροδαμίνη ακολουθεί τις κινήσεις του ρευστού εντός του οποίου βρίσκεται και φωτοβολώντας, γίνεται εφικτή η παρακολούθηση των φαινομένων.
- ii. Το φαινόμενο των Salt Fingers εκκινεί εξαιρετικά γρήγορα στις μικρές διαφορές πυκνότητας. Το πρόβλημα ξεκινά από το γεγονός ότι η παροχέτευση αλατόνευρου από κάτω διαρκεί περίπου 23 min. Στο διάστημα αυτό σε κάποια πειράματα το φαινόμενο έχει ήδη αρχίσει να αναπτύσσεται, με αποτέλεσμα τη στιγμή της έναρξης της βιντεοσκόπησης τα Fingers να είναι ήδη ανεπτυγμένα. Επομένως, με την δεδομένη πειραματική διαδικασία στα μισά περίπου πειράματα χάνεται το αρχικό στάδιο εξέλιξης των Salt Fingers. Συμβατικά πάντως ορίζουμε την έναρξη της βιντεοσκόπησης ως χρόνο μηδέν του φαινομένου, με δεδομένο όμως ότι το φαινόμενο έχει τις προϋποθέσεις εκκίνησης από τη στιγμή της επαφής των διαλυμάτων. Το καλό με το ορισμένο συμβατικό μηδέν, είναι ότι κατά το τέλος της παροχέτευσης η διεπιφάνεια δεν επηρεάζεται από καμία παρασιτική κίνηση, η οποία εισάγεται κατά τη διαδικασία παροχέτευσης.
- iii. Στις μικρές διαφορές πυκνότητας το σύστημα είναι μεν βαρυντικά ευσταθές, αλλά αρκετά ευαίσθητο στις οποιοσδήποτε εσωτερικές διαταραχές που υπάρχουν στη δεξαμενή. Τέτοιου είδους διαταραχές εισάγει η διαδικασία παροχέτευσης αλατόνευρου και προκαλεί μια περιοχή μίξης των δύο διαλυμάτων, αλλοιώνοντας τις αρχικές συνθήκες του πειράματος. Δεδομένης όμως της πειραματικής διαδικασίας, δόθηκε προσοχή, σε αργή και επιμελημένη παροχέτευση αλατόνευρου προς διατήρηση καθαρών αρχικών συνθηκών.

3.4 Συγκεντρωτικά στοιχεία των πειραμάτων

Στον πίνακα 3.1 παρουσιάζονται τα 12 πειράματα που υλοποιήθηκαν, με όλες τις απαραίτητες πληροφορίες της *αρχικής κατάστασης* του συστήματος. Τα πειράματα της παρούσας διπλωματικής παρουσιάζονται και κωδικοποιούνται με τον ακόλουθο τρόπο:

EXP_τύπος πειράματος_αριθμός πειράματος / όπου τύπος πειράματος = i

Πίνακας 3.1 Αρχικές συνθήκες των πειραμάτων πρώτου τύπου (Μέρος 1)

Hatched Area					Hydrometer Indication		Ruddick & Shirtcliffe (1979)		
Date	Experiment	T (gr/L)	S (gr/L)	θ (°C)	ρ _T (gr/cm ³)	ρ _S (gr/cm ³)	ρ _T (gr/cm ³)	ρ _S (gr/cm ³)	Δρ (gr/cm ³)
5/4/2012	EXP_i_1	10	10	18.2	1.00725	1.0040	1.0057	1.0025	0.00325
5/4/2012	EXP_i_2	10	12	18.5	1.00725	1.0050	1.0056	1.0032	0.00246
6/4/2012	EXP_i_3	10	14	18.0	1.00725	1.0055	1.0057	1.0041	0.00169
6/4/2012	EXP_i_4	10	16	18.4	1.00725	1.0065	1.0057	1.0048	0.00090
11/4/2012	EXP_i_5	10	18	15.9	1.00725	1.00725	1.0062	1.0060	0.00015
11/4/2012	EXP_i_6	10	8	16.6	1.00725	1.0035	1.0060	1.0020	0.00406
12/4/2012	EXP_i_7	10	16	16.7	1.00725	1.0065	1.0060	1.0051	0.00093
16/4/2012	EXP_i_8	10	6	18.4	1.00725	1.0025	1.0057	1.0009	0.00481
16/4/2012	EXP_i_9	10	4	19.0	1.00725	1.0015	1.0055	0.99997	0.00557
11/5/2012	EXP_i_10	10	7	24.2	1.00625	1.0020	1.0043	0.99998	0.00432
11/5/2012	EXP_i_11	10	9	23.8	1.00625	1.0030	1.0044	1.0009	0.00355
12/5/2012	EXP_i_12	10	10	24.0	1.00625	1.0025	1.0044	1.0012	0.00316

Όπου T είναι η συγκέντρωση αλατιού, S η συγκέντρωση ζάχαρης, θ η θερμοκρασία των στρωμάτων, ρ_T η πυκνότητα του αλατόνερου (κατώτερη στρώση), ρ_S η πυκνότητα του ζαχαρόνερου (ανώτερη στρώση) και Δρ η διαφορά των πυκνοτήτων των δυο στρώσεων.

Πίνακας 3.1 Αρχικές συνθήκες των πειραμάτων πρώτου τύπου (Μέρος 2)

Experiment	K_T^{25} (cm ² /s)	K_S^{25} (cm ² /s)	β_T	β_S	R_p	ν_T^{20} (cm ² /s)	ν_S^{20} (cm ² /s)	τ	R6G Quantity in 4 L of Sugar Solution (mL)	Duration of Salt Drainage (min)
EXP_i_1	1.48E-05	5.03E-06	0.711	0.389	1.83	1.01E-02	1.02E-02	0.34	0.5	20
EXP_i_2	1.48E-05	4.99E-06	0.711	0.389	1.52	1.01E-02	1.03E-02	0.34	0.2	20
EXP_i_3	1.48E-05	4.95E-06	0.712	0.390	1.30	1.01E-02	1.03E-02	0.33	0.2	25
EXP_i_4	1.48E-05	4.91E-06	0.711	0.390	1.14	1.01E-02	1.04E-02	0.33	0.2	25
EXP_i_5	1.48E-05	4.87E-06	0.716	0.391	1.02	1.01E-02	1.04E-02	0.33	0.2	35
EXP_i_6	1.48E-05	5.07E-06	0.715	0.390	2.29	1.01E-02	1.02E-02	0.34	1.0	25
EXP_i_7	1.48E-05	4.91E-06	0.714	0.391	1.14	1.01E-02	1.04E-02	0.33	2.0	30
EXP_i_8	1.48E-05	5.11E-06	0.711	0.389	3.05	1.01E-02	1.01E-02	0.34	1.5	20
EXP_i_9	1.48E-05	5.15E-06	0.710	0.388	4.57	1.01E-02	1.01E-02	0.35	1.5	20
EXP_i_10	1.48E-05	5.09E-06	0.701	0.387	2.59	1.01E-02	1.02E-02	0.34	2.0	20
EXP_i_11	1.48E-05	5.05E-06	0.702	0.387	2.01	1.01E-02	1.02E-02	0.34	2.0	20
EXP_i_12	1.48E-05	5.03E-06	0.701	0.388	1.81	1.01E-02	1.02E-02	0.34	2.0	20

Όπου K_T^{25} ο συντελεστής μοριακής διάχυσης του αλατιού στους 25 °C, K_S^{25} ο συντελεστής μοριακής διάχυσης της ζάχαρης στους 25 °C, β_T ο συντελεστής ογκομετρικής διαστολής εξαιτίας της μεταβολής της αλατότητας, β_S ο συντελεστής ογκομετρικής διαστολής εξαιτίας της μεταβολής της συγκέντρωσης ζάχαρης, R_p ο δείκτης πυκνότητας, ν_T^{20} η κινηματική συνεκτικότητα του διαλύματος αλατόνευρου στους 20 °C, ν_S^{20} η κινηματική συνεκτικότητα του διαλύματος ζαχαρόνευρου στους 20 °C, τ ο λόγος των συντελεστών μοριακής διάχυσης και R6G η ροδαμίνη που χρησιμοποιήθηκε.

Στους παραπάνω πίνακες, ορισμένα από τα αρχικά δεδομένα αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες. Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση δεν ήταν δυνατή η εύρεση των αντίστοιχων χαρακτηριστικών για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων της παρούσας εργασίας. Αποφασίσθηκε όμως, να χρησιμοποιηθούν αυτά των δεδομένων θερμοκρασιών ως η καλύτερη δυνατή λύση. Αναλυτικότερα:

- i. Ο συντελεστής μοριακής διάχυσης του αλατιού στους 25 °C (K_T^{25}), υπολογίστηκε με προσαρμογή καμπύλης ελαχίστων τετραγώνων στα αποτελέσματα της πειραματικής εργασίας του Stokes (1950).
- ii. Ο συντελεστής μοριακής διάχυσης της ζάχαρης στους 25 °C (K_S^{25}), υπολογίστηκε με προσαρμογή καμπύλης ελαχίστων τετραγώνων στα αποτελέσματα της πειραματικής εργασίας των Irani and Adamson (1958).
- iii. Οι κινηματικές συνεκτικότητες των διαλυμάτων αλατόνευρου και ζαχαρόνευρου στους 20 °C (ν_T^{20} & ν_S^{20} αντίστοιχα), υπολογίστηκαν με προσαρμογή καμπύλης ελαχίστων τετραγώνων στα δεδομένα από το CRC Handbook of Chemistry and Physics (87th Edition).

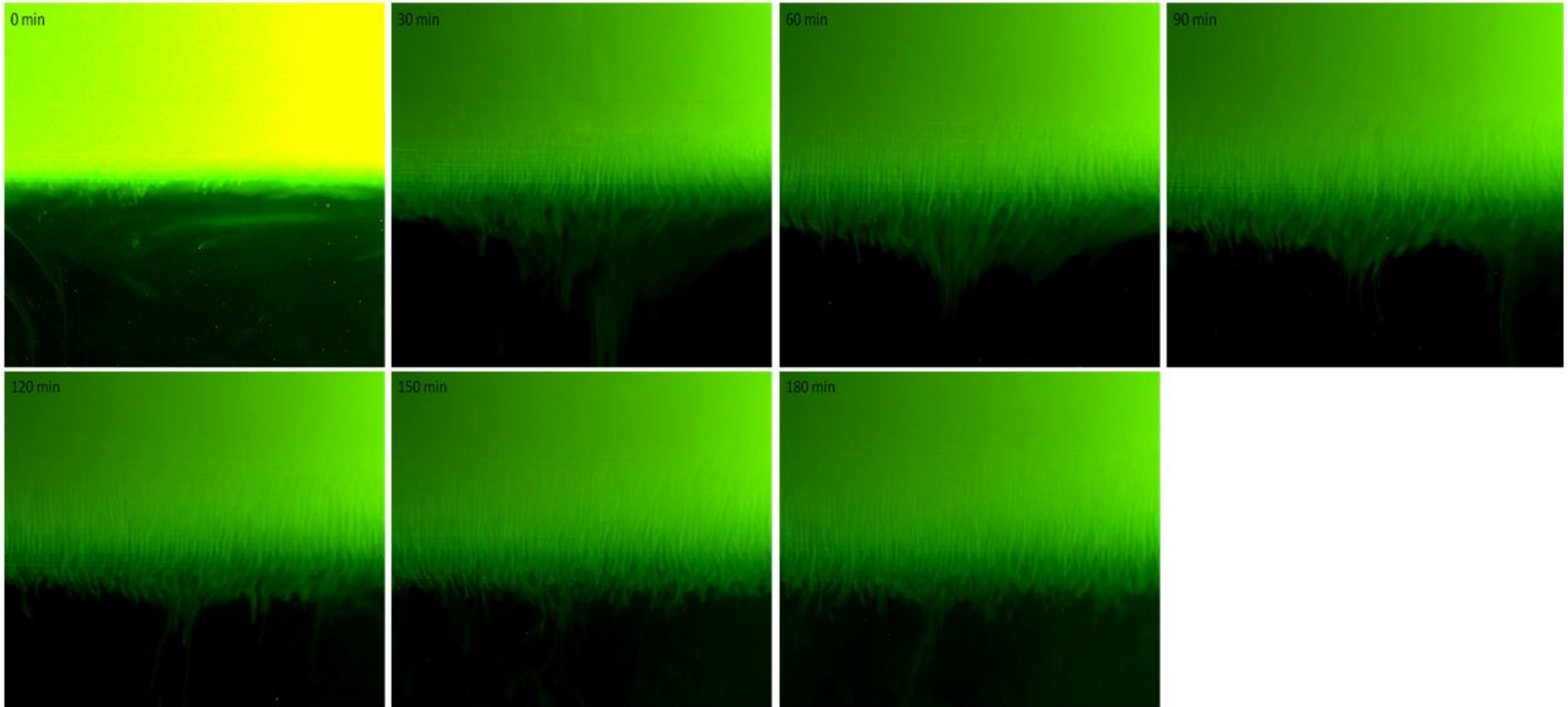
Στο παράρτημα δίνονται οι πίνακες και οι καμπύλες από τις εργασίες και τα βιβλία που αναφέρθηκαν για τα παραπάνω χαρακτηριστικά.

Σχετικά με τα β_T και β_S , ο υπολογισμός τους έγινε ως ακολούθως:

- i. $\beta_T = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial T}$, συντελεστής ογκομετρικής διαστολής εξαιτίας μεταβολής της αλατότητας. Από την σχέση (2.3) των Ruddick & Shirlcliffe (1979) προέκυψε η μερική παράγωγος, κρατώντας σταθερή τη θερμοκρασία (θ) και θεωρώντας μόνη μεταβλητή τη συγκέντρωση αλατιού (T). Ακολούθως, αντικαθιστώντας ανάλογα με το πείραμα τα T και θ , προκύπτει μια πραγματική τιμή της μερικής παραγωγού. Με διαίρεση αυτής της τιμής με την αρχική πυκνότητα του διαλύματος αλατόνευρου (ρ_0), προκύπτει ο συντελεστής β_T για κάθε πείραμα.
- ii. $\beta_S = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial S}$, συντελεστής ογκομετρικής διαστολής εξαιτίας μεταβολής της συγκέντρωσης ζάχαρης. Από την σχέση (2.4) των Ruddick & Shirlcliffe (1979) προέκυψε η μερική παράγωγος, κρατώντας σταθερή τη θερμοκρασία (θ) και θεωρώντας μόνη μεταβλητή τη συγκέντρωση ζάχαρης (S). Ακολούθως, αντικαθιστώντας ανάλογα με το πείραμα τα S και θ , προκύπτει μια πραγματική τιμή της μερικής παραγωγού. Με διαίρεση αυτής της τιμής με την αρχική πυκνότητα του διαλύματος ζαχαρόνευρου (ρ_0), προκύπτει ο συντελεστής β_S για κάθε πείραμα.

3.5 Εξέλιξη φαινομένου σε ένα τυπικό πείραμα

Σε όλη τη σειρά πειραμάτων το φαινόμενο των Salt Fingers, όπως και ήταν αναμενόμενο, είχε μια ποιοτικά όμοια πορεία. Παρακάτω, παρουσιάζονται στιγμιότυπα ενός τυπικού πειράματος ανά 30 min. Οι όποιες διαφορές των πειραμάτων είναι εμφανής στα συγκεντρωτικά γραφήματα, κατόπιν επεξεργασίας των φαινομένων (βλ. Σχήμα 3.2).

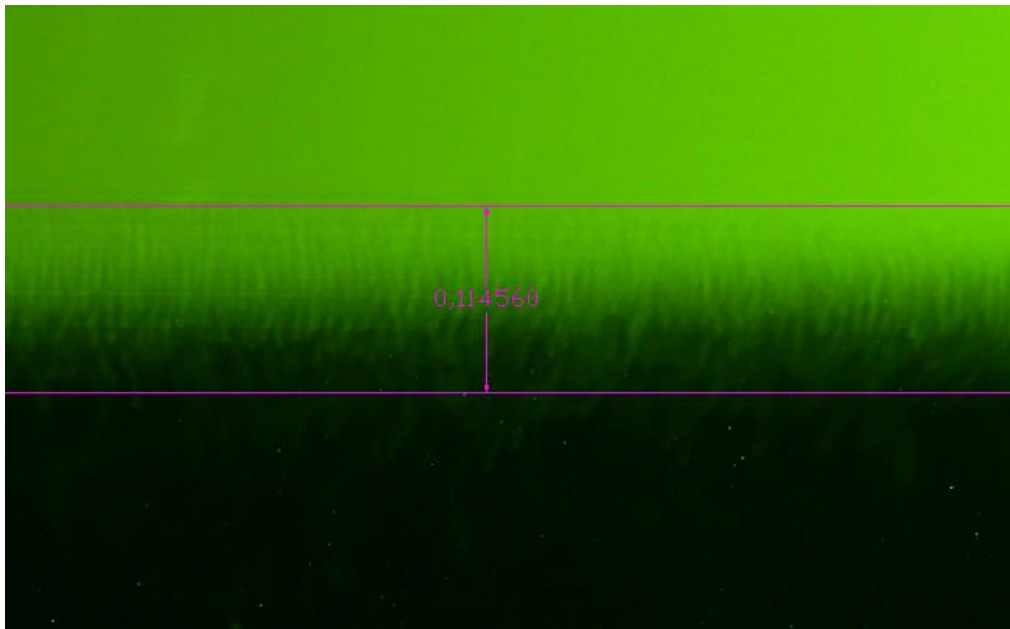


Σχήμα 3.2 Εξέλιξη φαινομένου σε ένα τυπικό πείραμα με στιγμιότυπα ανά 30 min

3.6 Επεξεργασία βιντεοσκοπημένου υλικού

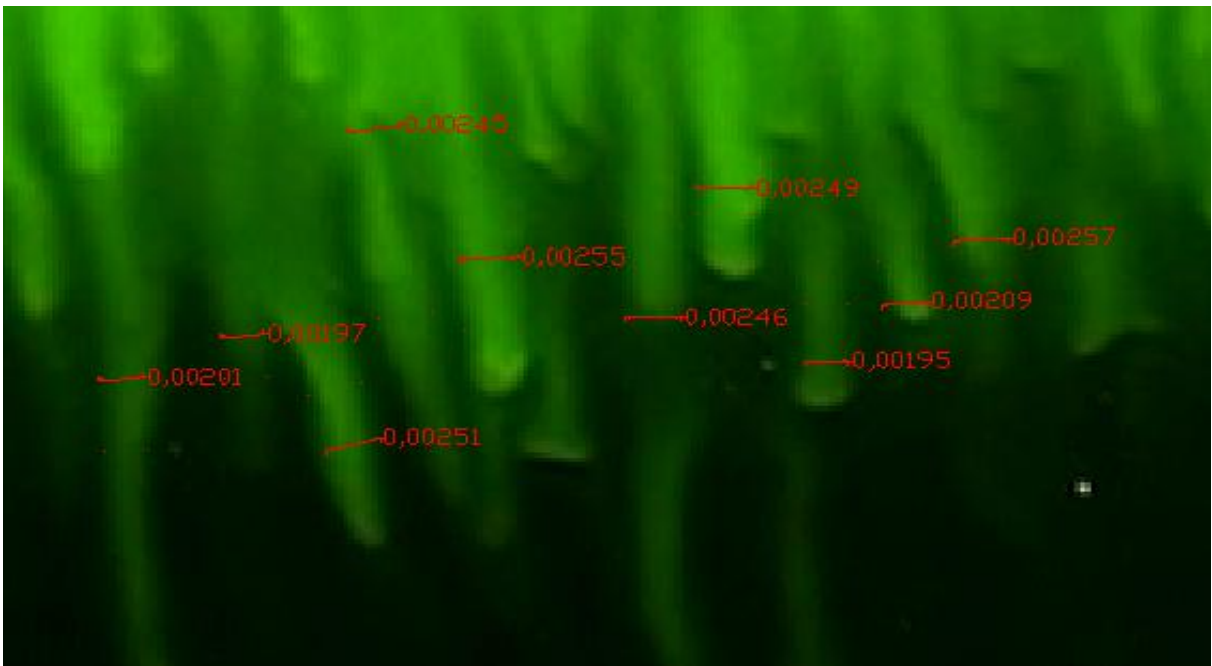
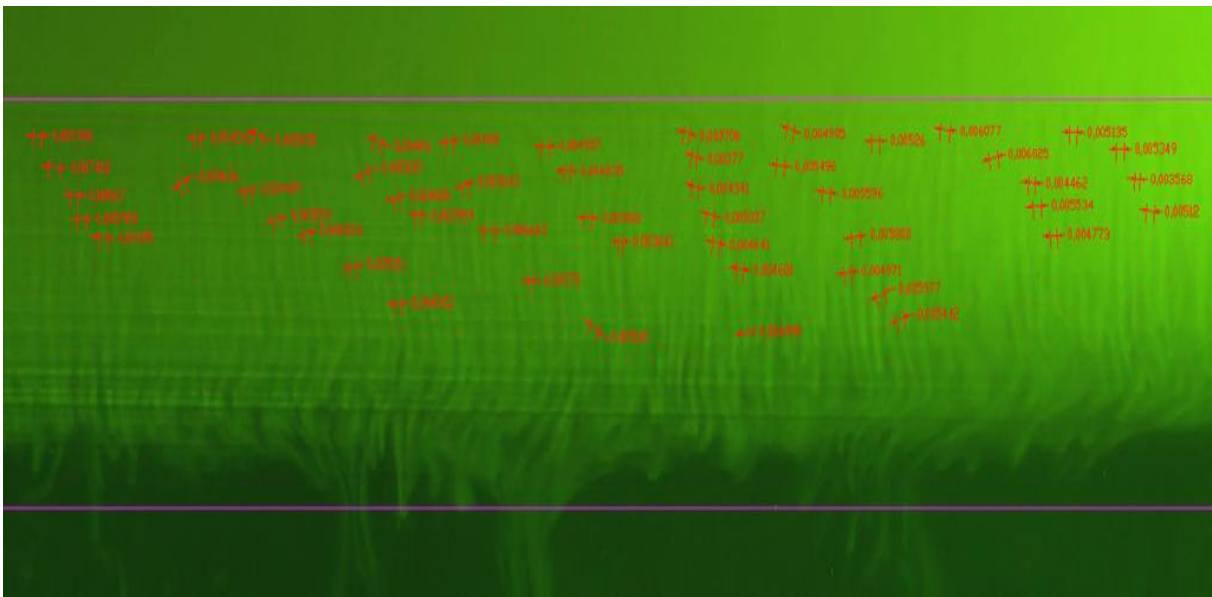
Ακολουθώντας τα επτά βήματα του Κεφαλαίου 3.2 και επαναλαμβάνοντας τα με μόνη μεταβλητή τη συγκέντρωση ζάχαρης στο διάλυμα ζαχαρόνευρο, προέκυψαν τα πειράματα που παρουσιάσθηκαν στους συγκεντρωτικούς πίνακες και ένας όγκος βιντεοσκοπημένου υλικού (3 ώρες βίντεο ανά πείραμα). Τα βήματα που ακολουθήθηκαν κατά το πέρας των πειραμάτων για την επεξεργασία των βίντεο έχουν ως εξής:

- (1) Σε πρώτη φάση ορίσθηκε το συμβατικό μηδέν, δηλαδή προσδιορίσθηκε το κοινό σημείο αναφοράς και έναρξης των πειραμάτων. Αυτό αποτελεί για κάθε πείραμα, ο χρόνος λήξης παροχέτευσης αλατόνευρο στη δεξαμενή. Άλλωστε αυτό το χρονικό σημείο συμπίπτει και με την έναρξη βιντεοσκόπησης. Με δεδομένο ότι ο χρόνος παροχέτευσης είναι περίπου ίδιος για όλα τα πειράματα, το συμβατικό μηδέν είναι κοινό σημείο αναφοράς για όλα τα πειράματα αυτού του τύπου.
- (2) Τα βίντεο χωρίσθηκαν σε στιγμιότυπα ανά 5 min. Κάθε 5 min λαμβανόταν και μια φωτογραφία του φαινομένου. Αυτό έγινε με κοινό πρόγραμμα αναπαραγωγής βίντεο με την εντολή Take Snapshot.
- (3) Τα στιγμιότυπα τοποθετήθηκαν στο σχεδιαστικό πρόγραμμα AutoCAD και ανά στιγμιότυπο μετρήθηκαν τα μεγέθη πάχους διεπιφάνειας (h), μέσο πλάτος Salt Finger (L) και συμμετρική εξέλιξη των ανοδικών και καθοδικών ροών.
 - i. Πάχος διεπιφάνειας (h): Ορίζεται η περιοχή μέσα στην οποία αναπτύσσονται τα Salt Fingers (βλ. Σχήμα 3.3). Με αυτόν τον τρόπο προέκυψαν τα διαγράμματα εξέλιξης του (h) συναρτήσει του χρόνου (t) ανά στιγμιότυπο και ανά πείραμα.



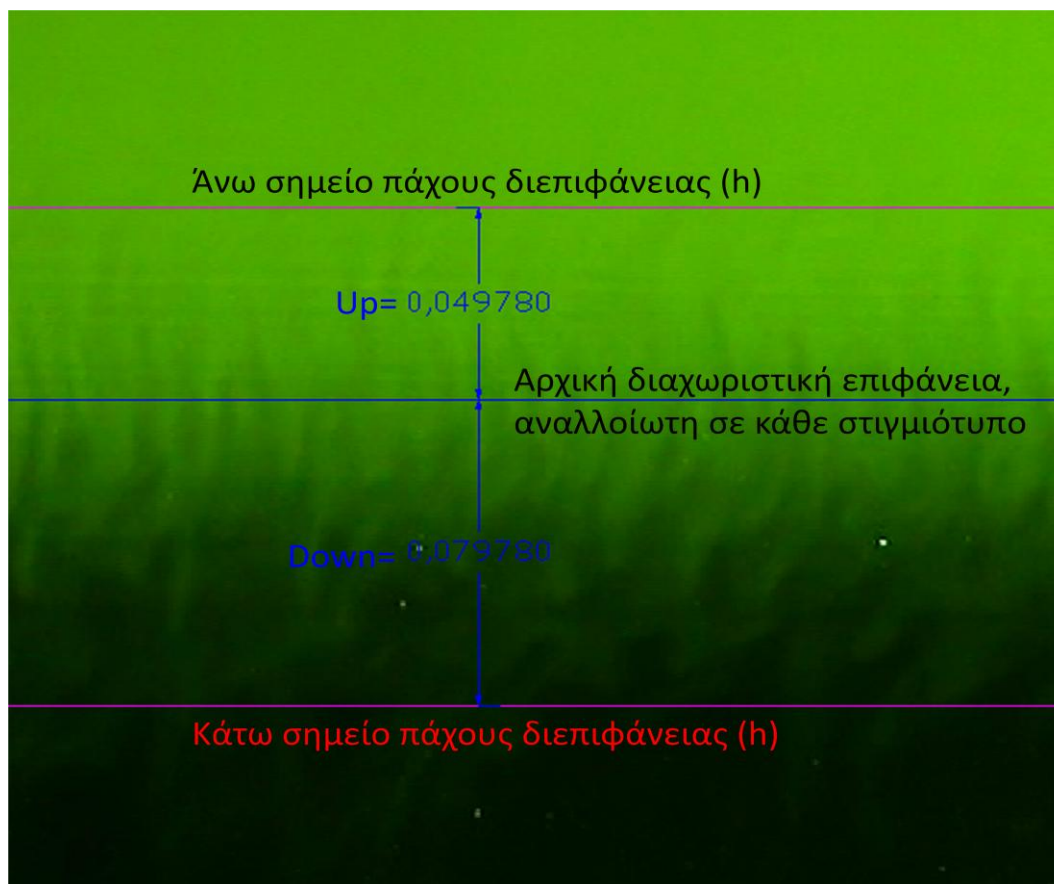
Σχήμα 3.3 Τρόπος υπολογισμού πάχους διεπιφάνειας (h)

- ii. Μέσο πλάτος Salt Fingers ανά στιγμιότυπο (L): Ουσιαστικά στο παράθυρο λήψης της βιντεοκάμερας, υπάρχουν εκατοντάδες Salt Fingers (εμφανή σε κάθε εικόνα). Το μέσο πλάτος προκύπτει μετρώντας πολλά πλάτη ανά στιγμιότυπο και υπολογίζοντας τη μέση τιμή. Η αντιπροσωπευτικότητα της εξαγόμενης τιμής εξαρτάται κυρίως από το πλήθος, το οποίο φροντίσαμε να είναι αρκετά μεγάλο και αντιπροσωπευτικό, δηλαδή οι μετρήσεις κάλυπταν όλα το εύρος της εικόνας με ικανοποιητική πυκνότητα (βλ. Σχήμα 3.4). Αυτή η διαδικασία ακολουθήθηκε ανά στιγμιότυπο και ανά πείραμα και τελικά προέκυψαν διαγράμματα εξέλιξης του (L) συναρτήσει του χρόνου (t).



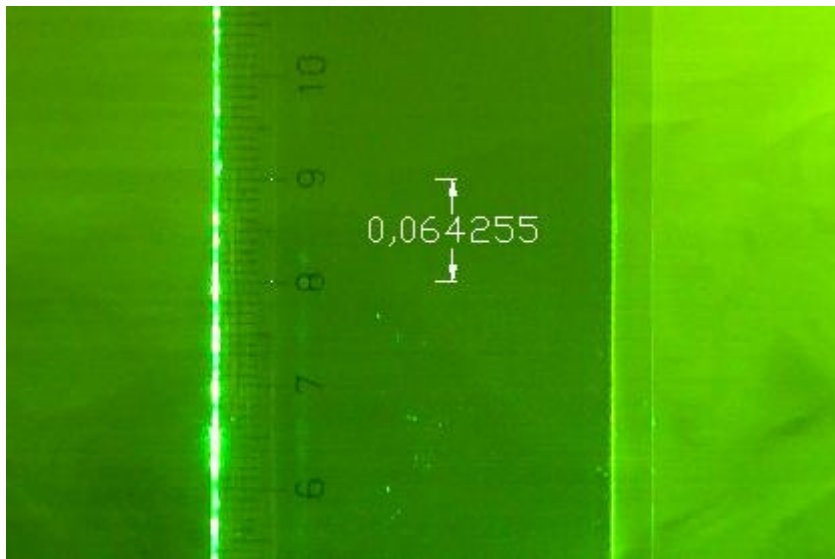
Σχήμα 3.4 Μεθοδολογία υπολογισμού μέσου πλάτους των Salt Fingers

- iii. Συμμετρική εξέλιξη ανοδικών και καθοδικών ροών: Τη χρονική στιγμή $t=0$ min ορίσθηκε η διαχωριστική επιφάνεια των δύο διαλυμάτων. Η επιφάνεια αυτή ορίζεται ως το επίπεδο του μέσου ύψους του υφιστάμενου πάχους της διεπιφάνειας (h). Αυτή η επιφάνεια διατηρείται σταθερά σε όλα τα επόμενα στιγμιότυπα. Ανά στιγμιότυπο μετρήθηκε η απόσταση από την επιφάνεια αυτή ως το άνω σημείο εξέλιξης των Fingers, δηλαδή ως το άνω σημείο του ήδη καθορισμένου h . Αυτή η απόσταση ορίσθηκε ως U_p και αποτελεί ουσιαστικά το μήκος εξέλιξης των Fingers πάνω από την αρχική διαχωριστική επιφάνεια. Τέλος, μετριέται και η απόσταση από την αρχική διεπιφάνεια ως το κάτω σημείο του h . Αυτή η απόσταση ορίσθηκε ως $Down$ και αποτελεί ουσιαστικά το μήκος εξέλιξης των Fingers που διεισδύουν στο στρώμα αλατόνευρου (βλ. Σχήμα 3.5). Αν τα μήκη U_p και $Down$ είναι ίσα, δηλαδή $U_p/Down = 1$ τότε το φαινόμενο εξελίσσεται συμμετρικά περί την αρχική διαχωριστική επιφάνεια. Για $U_p/Down \neq 1$ τότε οι ανοδικές και οι καθοδικές ροές εξελίσσονται ασύμμετρα. Κατ' αυτόν τον τρόπο προέκυψαν διαγράμματα εξέλιξης της συμμετρικής ή μη φύσης του φαινομένου των Salt Fingers ανά στιγμιότυπο και ανά πείραμα συναρτήσεως του χρόνου (t).



Σχήμα 3.5 Τρόπος υπολογισμός συμμετρικής ή μη, εξέλιξης του φαινομένου

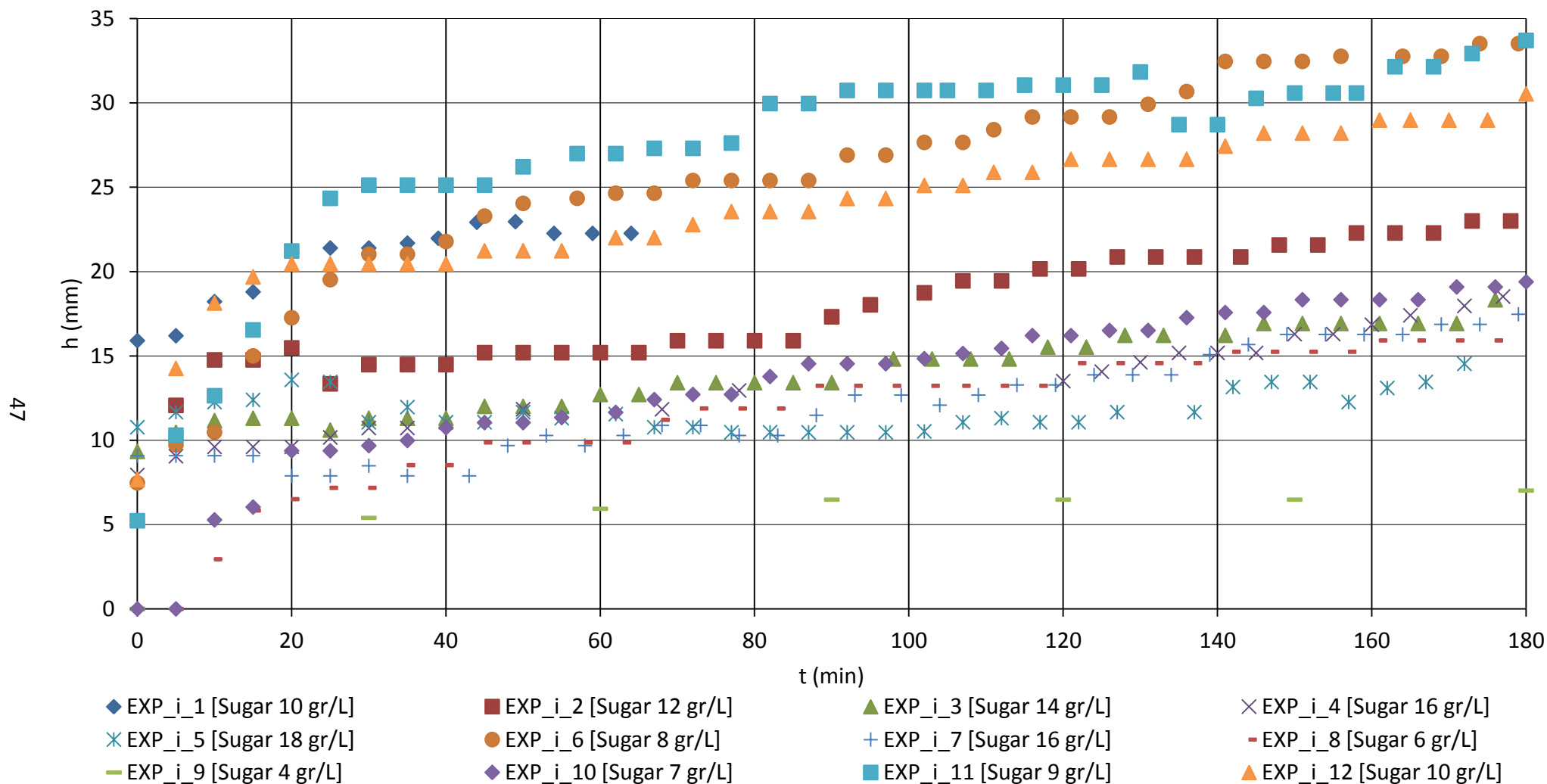
- iv. Σύνδεση μεγεθών AutoCAD με πραγματικά μεγέθη. Εισάγοντας τα στιγμιότυπα στο AutoCAD στην ίδια κλίμακα (Scale = 1), το πρόγραμμα δεν μπορεί να δώσει απευθείας σύνδεση των μετρήσεων που παρουσιάστηκαν παραπάνω με τις πραγματικές τους μονάδες. Για το λόγο αυτό, με την εισαγωγή ενός κανόνα στο παράθυρο λήψης της κάμερας πάνω στο επίπεδο παρακολούθησης (φύλλο laser), γίνεται η σύνδεση του 1 cm με την κλίμακα του AutoCAD (βλ. Σχήμα 3.6). Για παράδειγμα, στο Σχήμα 3.6 το 1 cm αντιστοιχεί σε 0.064255 μονάδες AutoCAD. Με απλή μέθοδο των τριών μπορεί να προσδιοριστεί οποιοδήποτε άλλο μέγεθος.



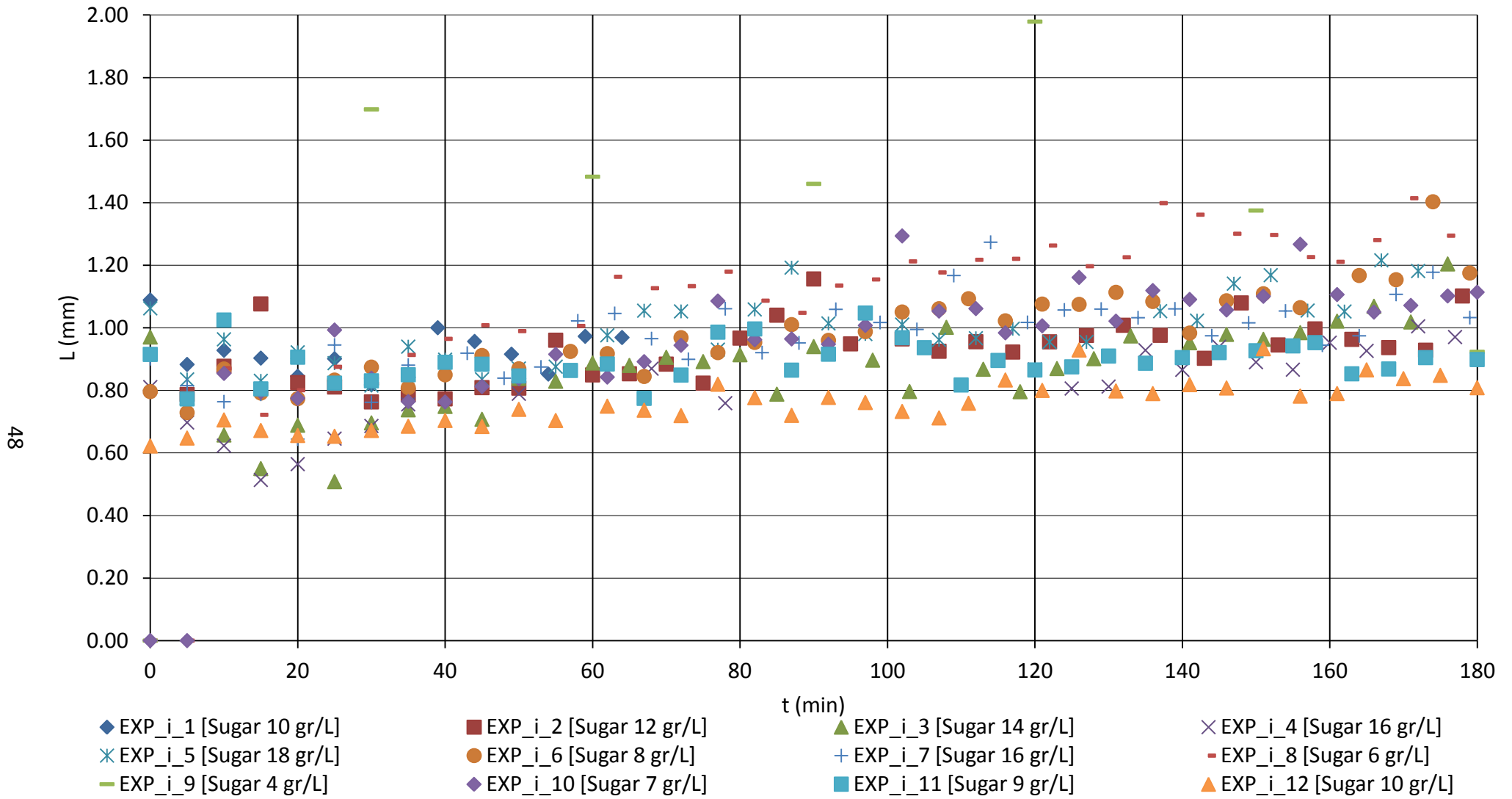
Σχήμα 3.6 Κλίμακα μήκους

Ακολουθώντας τα παραπάνω βήματα για κάθε πείραμα αυτού του τύπου, χωρίς καμία παρέκκλιση, προκύπτουν τα συγκεντρωτικά διαγράμματα του Κεφαλαίου 3.7, τα οποία παρουσιάζουν το πώς εξελίσσονται τα βασικά γεωμετρικά μεγέθη του φαινομένου συναρτήσει του χρόνου καθώς και τις μεταξύ τους συσχετίσεις.

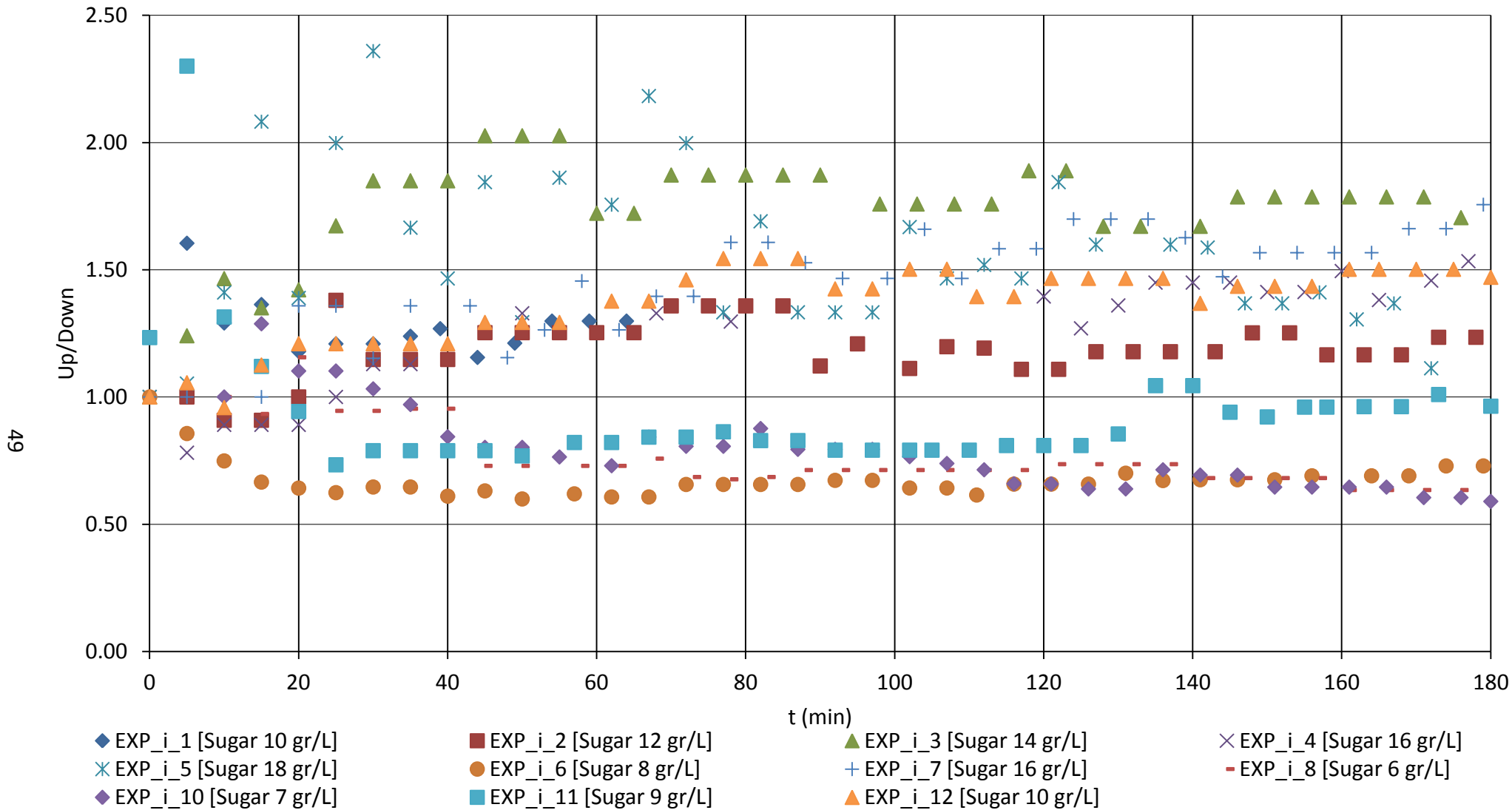
3.7 Συγκεντρωτικά διαγράμματα από την επεξεργασία του βιντεοσκοπημένου υλικού



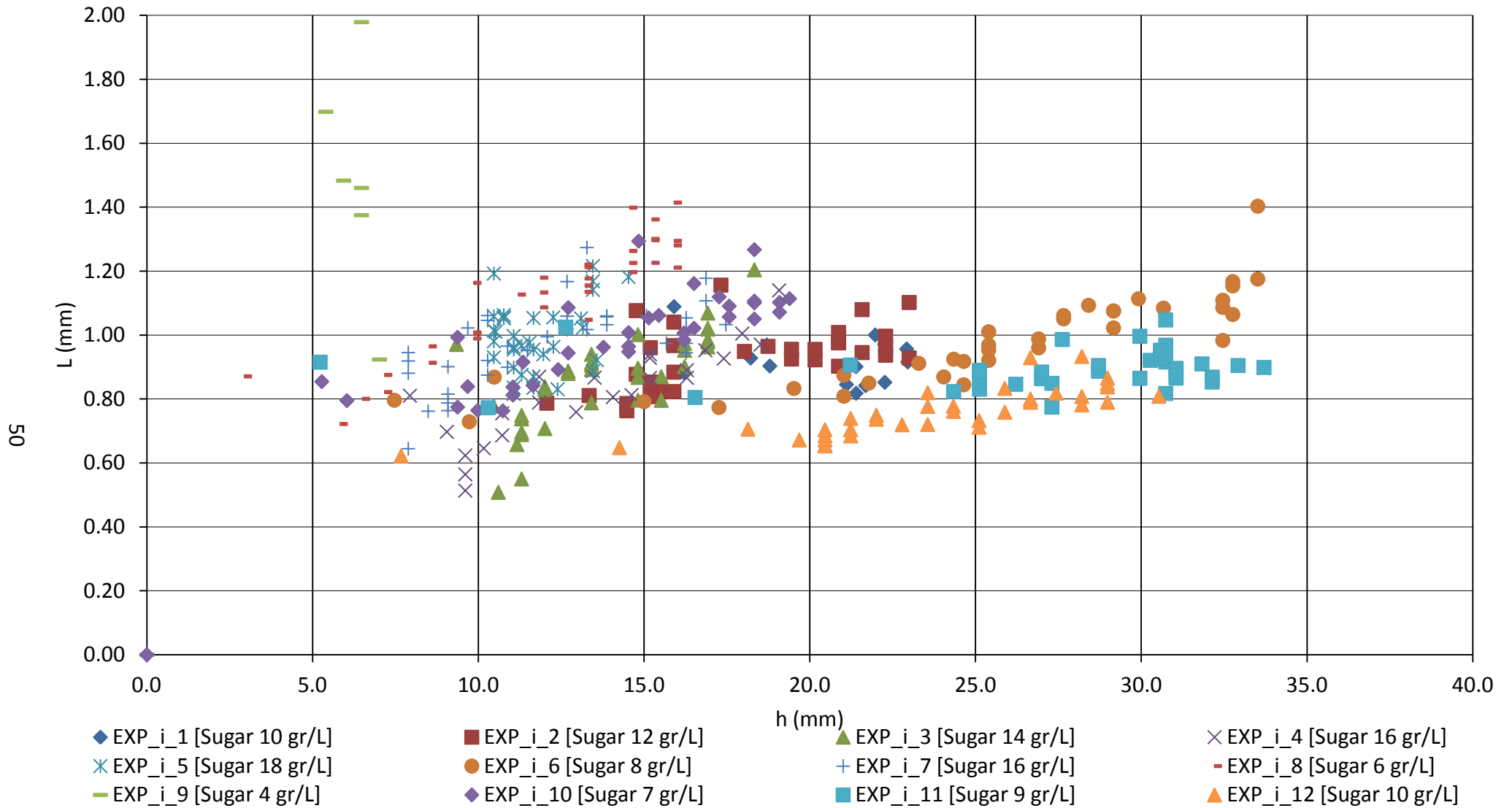
Σχήμα 3.7 Εξέλιξη πάχους διεπιφάνειας (h) συναρτήσει του χρόνου (t)



Σχήμα 3.8 Εξέλιξη μέσου πλάτους Salt Fingers (L) συναρτήσει του χρόνου (t)



Σχήμα 3.9 Εξέλιξη ανοδικών και καθοδικών ροών (Συμμετρία φαινομένου για Up/Down = 1)



Σχήμα 3.10 Συσχέτιση πάχους διεπιφάνειας (h) με μέσο πλάτος Salt Fingers (L)

3.8 Συμπεράσματα

Ακολουθούν τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρατήρηση του πειράματος και των διαγραμμάτων που παρουσιάστηκαν.

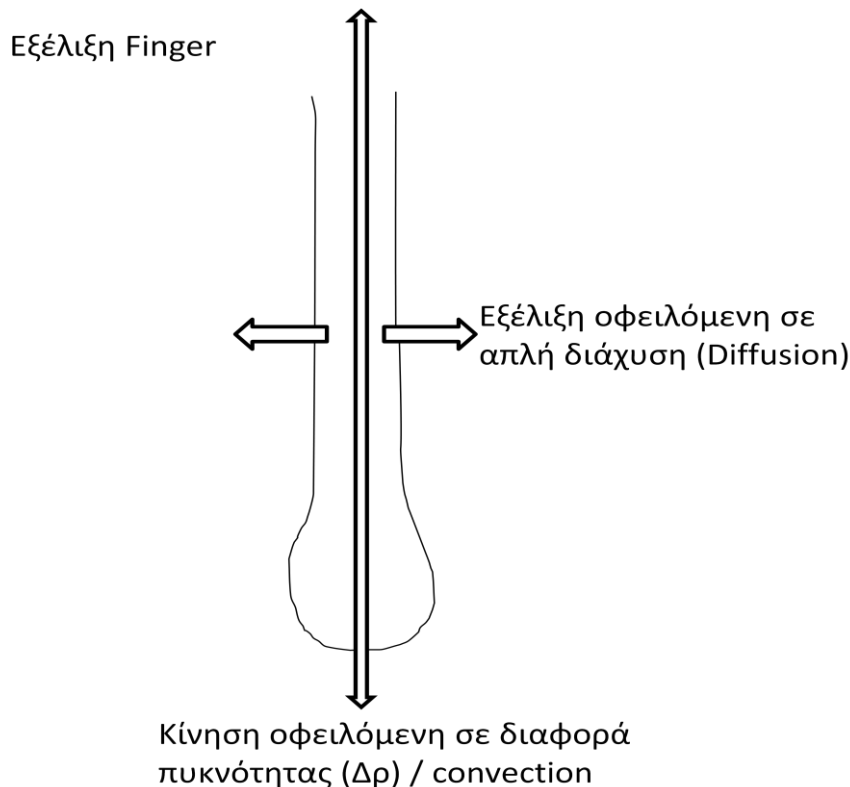
- i. *Σχήμα 3.7 / Διάγραμμα $h(t)$* : Σε όλα τα πειράματα η ποιοτική ομοιότητα είναι εμφανής. Στα γραφήματα παρατηρείται μια αρχική περιοχή έντονης ανάπτυξης του πάχους της διεπιφάνειας (μεγάλη κλίση), ενώ με την πάροδο του χρόνου η κλίση μειώνεται αλλά η αυξητική πορεία είναι δεδομένη. Στην αρχή του φαινομένου, οι τοπικές βαροκλινικές αστάθειες είναι έντονες με άμεσο αποτέλεσμα την έντονη ανάπτυξη και εξέλιξη των Fingers. Με την πάροδο του χρόνου, οι ροές και οι μεταφορές μάζας εξελίσσονται, οι βαροκλινικές αστάθειες εξουδετερώνονται και το σύστημα μεταπίπτει σε μία πιο ευσταθή κατάσταση. Ουσιαστικά, η κάτω στρώση γίνεται όλο και βαρύτερη, η άνω όλο και ελαφρύτερη με αποτέλεσμα την αύξηση της $\Delta\rho$ και αναστολή του φαινομένου των Salt Fingers.

Για την ερμηνεία των διαγραμμάτων υπάρχει ένας σαφής διαχωρισμός. Τα πειράματα με τις αρχικά μεγάλες διαφορές πυκνότητας και τα πειράματα με τις μικρές αρχικές $\Delta\rho$. Στα πειράματα με τις μεγάλες $\Delta\rho$, παρατηρείται όλο και μικρότερη κλίση της καμπύλης (του "ευθύγραμμου" τμήματος των καμπυλών) $h(t)$ αυξανόμενης της $\Delta\rho$. Το συμπέρασμα αυτό είναι λογικό, μιας που όσο μεγαλύτερη είναι η αρχική διαφορά πυκνότητας τόσο περισσότερος χρόνος απαιτείται για να δράσουν οι κινήσεις σε μοριακό επίπεδο, ώστε να προκαλέσουν τις τοπικές αστάθειες. Αυτή η λογική εξήγηση παρατηρείται στο Σχήμα 3.7 για τα πειράματα με συγκεντρώσεις ζάχαρης κάτω από 10 gr/L (μεγάλες $\Delta\rho$). Θα ήταν επομένως αναμενόμενο ότι όσο αυξάνεται η συκέντρωση ζάχαρης να αυξάνεται η κλίση της καμπύλης. Κάτι τέτοιο όμως δεν είναι εμφανές, αλλά φαίνεται ότι όσο μειώνεται η $\Delta\rho$, τόσο μειώνεται η κλίση (βλ. Πειράματα EXP_i_2/3/4/5/7). Μια πιθανή εξήγηση της αστοχίας αυτών των πειραμάτων να ακολουθήσουν την παραπάνω λογική είναι η αδυναμία της πειραματικής διάταξης όπως αυτή παρουσιάσθηκε στο Κεφάλαιο 3.3 (ii και iii).

Στα διαγράμματα επίσης παρατηρούνται ορισμένες κλιμακωτές δομές. Δηλαδή, ενώ αυξάνεται το h , παραμένει για κάποιο χρονικό διάστημα σταθερό και έπειτα συνεχίζει την αυξητική πορεία (σκαλοπάτια). Αυτό το φαινόμενο εξηγείται από το γεγονός ότι όσο προοδεύει η συναγωγή, οι δημιουργούμενες ροές καταστρέφουν τις δομές των Salt Fingers. Ουσιαστικά, η διάτμηση που επιβάλλουν οι ροές διαλύει τα Fingers τα οποία είναι ευαίσθητα σε οποιαδήποτε κίνηση εντός της δεξαμενής. Η καταστροφή των δομών αναστέλλει επομένως την εξέλιξη και αύξηση του πάχους της διεπιφάνειας. Όμως τα Fingers εύκολα ανακάμπουν (εμφανίζονται ταχύτατα) και το h συνεχίζει την πορεία του.

Οι τιμές που προέκυψαν από την ανάλυση του βιντεοσκοπημένου υλικού, συμπίπτουν με τις βιβλιογραφικά αναφερόμενες τιμές.

- ii. **Σχήμα 3.8 / Διάγραμμα $L(t)$:** Ποιοτικά και ποσοτικά σε όλα τα πειράματα, παρατηρείται κοινή πορεία. Το πάχος των Salt Fingers αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου, αλλά η κλίση είναι πολύ μικρή και σε ορισμένα πειράματα η κλίση τείνει να είναι μηδενική. Το εύρος μέσα στο οποίο κυμαίνονται οι τιμές του πάχους συμφωνεί απόλυτα με τη βιβλιογραφία, εκτός από την πειραματική εργασία των Sorkin, Sorkin and Leizeron (2002), με την οποία μάλιστα διαφωνούν ποσοτικά και οι υπόλοιποι ερευνητές. Η μελετώμενη τοπική βαροκλιτική αστάθεια (Salt Fingers), αναπτύσσεται σε δύο άξονες. Τον κατακόρυφο άξονα (βαρυτικό πεδίο) και τον οριζόντιο. Η κατακόρυφη κίνηση των Fingers οφείλεται εξολοκλήρου σε πυκνομετρική αστάθεια. Όσον αφορά την οριζόντια εξέλιξή τους, τα πλάτη των Fingers αυξάνονται εξαιτίας της διάχυσης (Diffusion). Γίνεται δηλαδή αντιληπτό ότι η οριζόντια εξέλιξή τους εξαρτάται μόνο από τους εμπλεκόμενους συντελεστές μοριακής διάχυσης (βλ. Σχήμα 3.11). Από το γεγονός ότι, σε όλα τα πειράματα αυτού του τύπου τα δύο διαλύματα είναι συγκεκριμένα, αναμενόμενο θα ήταν το γράφημα $L(t)$ να παραμένει αναλλοίωτο σε όλα τα πειράματα, όπως και επαληθεύτηκε.



Σχήμα 3.11 Εξέλιξη τυπικής αστάθειας

- iii. **Σχήμα 3.9 / Διάγραμμα Συμμετρικής εξέλιξης ανοδικών και καθοδικών ροών:** Από το διάγραμμα είναι φανερό ότι το φαινόμενο δεν εξελίσσεται συμμετρικά περί την αρχική διαχωριστική επιφάνεια. Στην εργασία των Shirtcliffe and Turner (1970), αναφέρεται μόνο ως εικασία/παραδοχή η συμμετρία του φαινομένου. Από την βιβλιογραφική ανασκόπηση δεν έχει γίνει κάποια επαλήθευση του ισχυρισμού τους σε άλλες εργασίες. Από την παρούσα πειραματική εργασία διαφαίνεται ότι ένας τέτοιος ισχυρισμός είναι αβάσιμος.

- iv. Σχήμα 3.10 / Διάγραμμα συσχέτισης L(h): Στις πειραματικές εργασίες τους, οι Shirtcliffe and Turner (1970) και Sorkin, Sorkin and Leizerson (2002), υποστηρίζουν ότι τα L και h συνδέονται μεταξύ τους με τη σχέση (1.3). Στην παρούσα πειραματική εργασία δεν παρατηρήθηκε να υφίσταται τέτοια συσχέτιση αυτών των δύο μεγεθών. Ουσιαστικά, από τα εξαγόμενα διαγράμματα δεν μπορεί να προσαρμοστεί εκθετική καμπύλη, της μορφής δηλαδή $Y = a \cdot X^{0.25}$ μεταξύ των δύο μεταβλητών. Έγιναν δοκιμές προσαρμογής εκθετικών καμπυλών με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, αλλά σε καμία περίπτωση δεν προσεγγίστηκε η προαναφερόμενη βιβλιογραφική σχέση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

4. ΔΕΥΤΕΡΟΣ ΤΥΠΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

4.1 Γενική περιγραφή

Σε αυτόν τον τύπο πειραμάτων μελετήθηκε το φαινόμενο των Salt Fingers σε γραμμικά στρωματισμένο αποδέκτη (βάθους 25 cm), στην περιοχή ανάμειξης (waste field) που προκύπτει από την έγχυση υγρού υπό μορφή κατακόρυφης ανωστικής φλέβας. Στην πρώτη φάση πειραμάτων (EXP_ii_1 έως EXP_ii_7), ο ευσταθής και γραμμικά στρωματισμένος αποδέκτης αποτελείται από αλατόνερο με γραμμική μεταβολή της αλατότητας καθ' ύψος. Στη δεξαμενή εγχέεται για δεδομένο χρονικό διάστημα, κατακόρυφα πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια διάλυμα ζαχαρόνερου που περιέχει μικρή ποσότητα ροδαμίνης 6G υπό μορφή φλέβας. Τα χαρακτηριστικά του αποδέκτη διατηρούνται σταθερά σε αυτή τη σειρά πειραμάτων με μεταβλητή τη συγκέντρωση ζάχαρης του διαλύματος που εγχέεται. Οι συγκεντρώσεις ζάχαρης κυμάνθηκαν από 4 έως 16 gr/L και το μέσο προφίλ γραμμικής πυκνότητας κυμάνθηκε από 1.000 gr/cm³ στην επιφάνεια έως 1.009 gr/cm³ στον πυθμένα. Στην δεύτερη φάση πειραμάτων (EXP_ii_8 έως EXP_ii_13), ο ευσταθής και γραμμικά στρωματισμένος αποδέκτης αποτελείται από ζαχαρόνερο με γραμμική μεταβολή της συγκέντρωσης ζάχαρης καθ' ύψος. Στη δεξαμενή, εγχέεται για δεδομένο χρονικό διάστημα, κατακόρυφα από επάνω και υπό μορφή φλέβας διάλυμα αλατόνερου. Τα χαρακτηριστικά του αποδέκτη διατηρούνται σταθερά (ίδια με αυτά της πρώτης φάσης – από τη άποψη της πυκνότητας) και σε αυτή τη σειρά πειραμάτων, ενώ η συγκέντρωση αλατιού του αποτιθέμενου διαλύματος μεταβάλλεται. Οι συγκεντρώσεις αλατιού κυμάνθηκαν από 4 έως 14 gr/L και το μέσο προφίλ γραμμικής πυκνότητας κυμάνθηκε από 1.000 gr/cm³ στην επιφάνεια έως 1.009 gr/cm³ στον πυθμένα. Και στις δύο φάσεις πειραμάτων, η επαφή των δύο ρευστών προκαλεί τοπικές βαροκλινικές αστάθειες με επακόλουθη την εμφάνιση Salt fingers (εξήγηση στο Κεφάλαιο 1.1). Όλα τα πειράματα βιντεοσκοπήθηκαν για 180 min και από την επεξεργασία προέκυψαν το μέσο μήκος (λ) των Salt Fingers και το μέσο πλάτος τους (L) συναρτήσει του χρόνου.

Στη δεύτερη σειρά πειραμάτων, το φαινόμενο των Salt Fingers που εμφανίζεται στην φαινομενικά σταθερή περιοχή ανάμειξης έχει την ακόλουθη εξέλιξη. Τη χρονική στιγμή που παύει η έγχυση, τα μόρια του αλατιού ως ταχύτερα κινούμενα θα αποφορτίσουν το πεδίο του αλατόνερου (αυτό το οποίο έχει αποτεθεί στον αποδέκτη), με συνέπεια στις περιοχές συνύπαρξης αλατιού και ζάχαρης, το αλατόνερο να μετατρέπεται σε ελαφρύτερο και το ζαχαρόνερο σε βαρύτερο. Αντίθετα, τα μόρια ζάχαρης στο ίδιο χρονικό διάστημα έχουν μετακινηθεί από τη θέση τους λιγότερο από τα μόρια του αλατιού και το αποτέλεσμα είναι η εμφάνιση τοπικών βαροκλινικών ασταθειών. Σε αντίθεση με τα πειράματα της πρώτης φάσης, τα Salt Fingers ροδαμίνης θα ανεβαίνουν προς την επιφάνεια.

4.2 Περιγραφή ενός τυπικού πειράματος

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα βήματα, τα οποία ακολουθηθήκαν αυστηρά σε κάθε πείραμα αυτού του τύπου (βλ. Σχήμα 4.1).

(1) Παρασκευή διαλυμάτων αλατόνερου – ζαχαρόνερου αυστηρά ίδιας θερμοκρασίας:

- Πειράματα EXP_ii_1 έως EXP_ii_7 (Πρώτη φάση)
 - i. Διάλυμα αλατόνερου: Σε βοηθητική δεξαμενή μέγιστης χωρητικότητας 7 L τοποθετούνται 7 L νερού βρύσης, 15 gr/L αλάτι και αναδεύονται για 2 min. Μετά το τέλος της ανάμειξης, μετριέται η πυκνότητα του ομογενούς διαλύματος αλατόνερου με το πυκνόμετρο καθώς επίσης και η θερμοκρασία του. Ακολούθως, το έτοιμο διάλυμα τοποθετείται στη δεξαμενή 3 (Tank_3), έτσι ώστε να ξεκινήσει λίγο αργότερα η δημιουργία της γραμμικής πυκνομετρικής στρωμάτωσης στην πειραματική δεξαμενή διάχυσης.
 - ii. Διάλυμα ζαχαρόνερου: Σε βοηθητική δεξαμενή μέγιστης χωρητικότητας 7 L τοποθετούνται 4 L νερού βρύσης, 5 gr/L ζάχαρη και αναδεύονται για 2 min. Μετά το τέλος της ανάμειξης, μετριέται η πυκνότητα του ομογενούς διαλύματος ζαχαρόνερου με το πυκνόμετρο καθώς επίσης και η θερμοκρασία του. Στο διάλυμα, τέλος, τοποθετείται μικροποσότητα ροδαμίνης. Το διάλυμα τοποθετείται στη δεξαμενή 1 (Tank_1), έτσι ώστε να είναι έτοιμο για την παροχέτευσή του στην πειραματική δεξαμενή υπό μορφή φλέβας.
 - iii. Στη δεξαμενή 2 (Tank_2) τοποθετούνται 7 L νερού βρύσης, βήμα απαραίτητο για τη δημιουργία της γραμμικής πυκνομετρικής στρωμάτωσης (εφαρμόζεται και στη δεύτερη φάση πειραμάτων).
- Πειράματα EXP_ii_8 έως EXP_ii_13 (Δεύτερη φάση)
 - i. Διάλυμα ζαχαρόνερου: Σε βοηθητική δεξαμενή μέγιστης χωρητικότητας 7 L τοποθετούνται 7 L νερού βρύσης, 28 gr/L ζάχαρη και αναδεύονται για 2 min. Μετά το τέλος της ανάμειξης, μετριέται η πυκνότητα του ομογενούς διαλύματος ζαχαρόνερου με το πυκνόμετρο καθώς επίσης και η θερμοκρασία του. Ακολούθως, το έτοιμο διάλυμα τοποθετείται στη δεξαμενή 3 (Tank_3), έτσι ώστε να ξεκινήσει λίγο αργότερα η δημιουργία της γραμμικής πυκνομετρικής στρωμάτωσης στην πειραματική δεξαμενή διάχυσης.
 - ii. Διάλυμα αλατόνερου: Σε βοηθητική δεξαμενή μέγιστης χωρητικότητας 7 L τοποθετούνται 4 L νερού βρύσης, 7 gr/L αλάτι και αναδεύονται για 2 min. Μετά το τέλος της ανάμειξης, μετριέται η πυκνότητα του ομογενούς διαλύματος αλατόνερου με το πυκνόμετρο καθώς επίσης και η θερμοκρασία του. Στο διάλυμα, τέλος, τοποθετείται μικροποσότητα ροδαμίνης. Το διάλυμα τοποθετείται

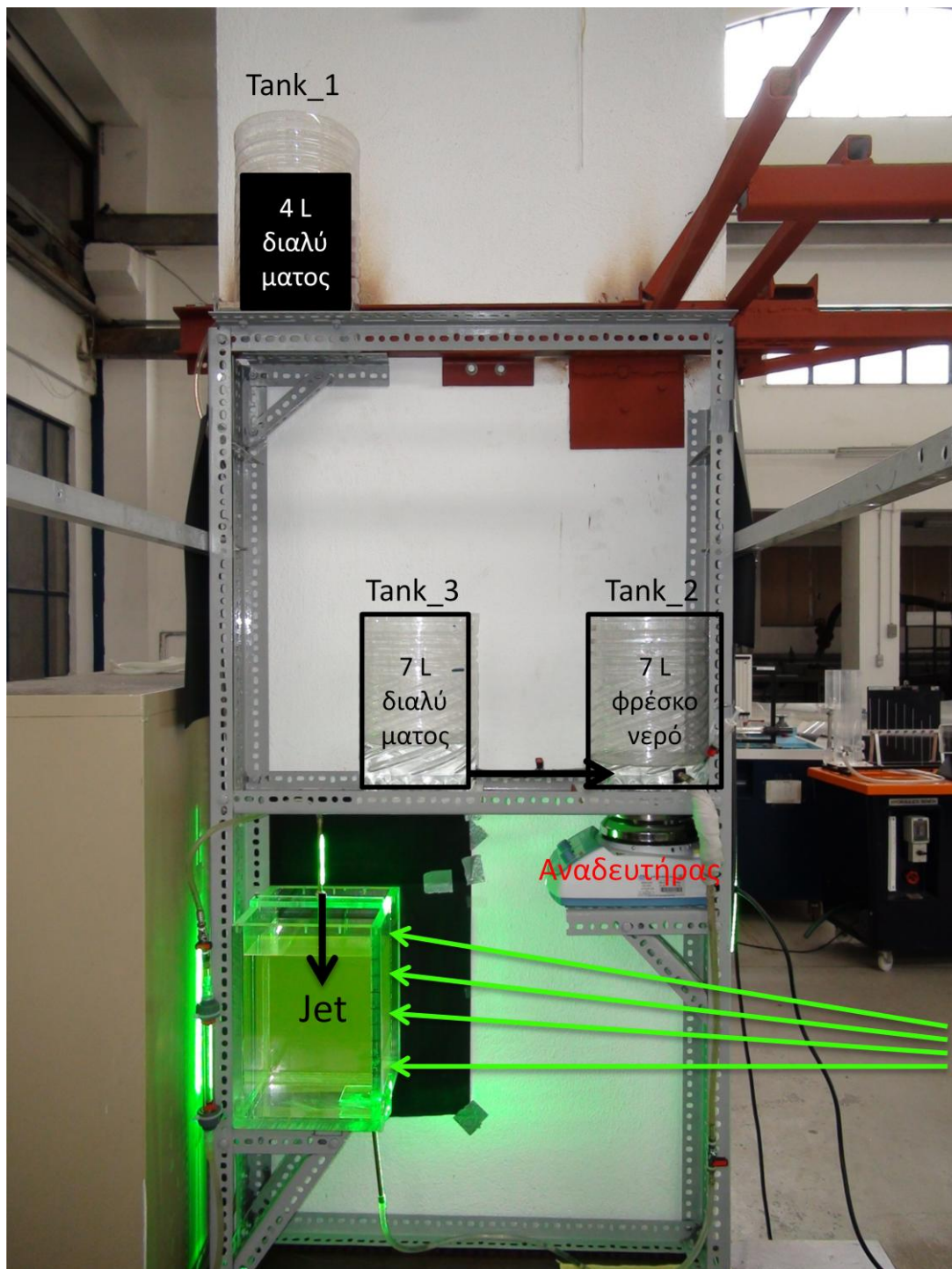
στη δεξαμενή 1 (Tank_1), έτσι ώστε να είναι έτοιμο για την παροχέτευσή του, υπό μορφή φλέβας στην πειραματική δεξαμενή διάχυσης.

Σε όλα τα υγρά προστίθεται μικροποσότητα θειώδους νατρίου (Na_2SO_3).

- (2) Κατασκευή γραμμικής πυκνομετρικής στρωμάτωσης στην πειραματική δεξαμενή. Με δεδομένο ότι οι δεξαμενές 2 και 3 είναι πληρωμένες με τα κατάλληλα ρευστά, τότε δύναται να εκκινήσει η διαδικασία στρωμάτωσης. Η Δικλίδα_1 είναι πλήρως ανοικτή και η Δικλίδα_2 είναι ανοικτή κατά το $\frac{1}{3}$. Απαραίτητα, η δεξαμενή 2 αναδεύεται καθ' όλη τη διαδικασία στρωμάτωσης, από μαγνητικό αναδευτήρα. Η παροχέτευση γίνεται από κάτω και η στρωμάτωση διαρκεί περίπου 25 min. Κατά τη διάρκεια στρωμάτωσης αφήνεται το σύστημα να λειτουργεί ανεμπόδιστα και τελικά όταν το υγρό εντός της πειραματικής δεξαμενής φτάσει να έχει βάθος 25 cm, τότε κλείνει η Δικλίδα_2 και η στρωμάτωση έχει επιτευχθεί. Το επόμενο σημαντικό βήμα είναι η λήψη δειγμάτων από την δεξαμενή ανά 2.5 cm, έτσι ώστε να επαληθευτεί η γραμμικότητα της στρωμάτωσης. Όταν έχουμε στρωμάτωση από αλατόνερο χρησιμοποιούμε το οπτικό διαθλασίμετρο, ενώ για γραμμική στρωμάτωση με ζαχαρόνερο χρησιμοποιούμε το ψηφιακό διαθλασίμετρο για προσδιορισμό της ρ^{20} .

Η τεχνική της στρωμάτωσης θα περιγραφεί αναλυτικότερα στο κεφάλαιο 4.4.

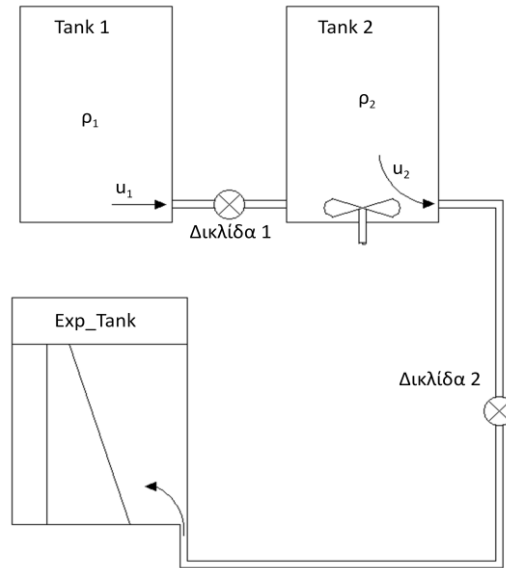
- (3) Ορθό στήσιμο συστήματος Laser (βλ. Κεφάλαιο 3.2 – Όμοια διαδικασία).
- (4) Στήσιμο κάμερας (βλ. Κεφάλαιο 3.2 – Όμοια διαδικασία).
- (5) Τοποθέτηση πανιού με σκοπό την δημιουργία σκότους (βλ. Κεφάλαιο 3.2 – Όμοια διαδικασία).
- (6) Παροχέτευση του υγρού υπό μορφή φλέβας για 45 sec με ένδειξη παροχομέτρου 16. Επισημαίνεται ότι η έξοδος του κατακόρυφου σωλήνα που μεταφέρει το εγχεόμενο ρευστό τοποθετείται σε απόσταση 2 cm πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια. Αυτό γίνεται με σκοπό την τεχνητή αύξηση του αριθμού Reynolds και την επακόλουθη αύξηση της αραιώσης του ρευστού της φλέβας.
- (7) Η βιντεοσκόπηση ξεκινάει από την στιγμή έναρξης της διάθεσης του υγρού υπό μορφή φλέβας. Η χρονική στιγμή παύσης της έγχυσης ορίζεται ως η στιγμή 0 min του παρατηρούμενου φαινομένου. Η βιντεοσκόπηση διαρκεί 180 min.
- (8) Στο τέλος της βιντεοσκόπησης, τοποθετείται κανόνας στο επίπεδο παρακολούθησης και λαμβάνεται κλίμακα μήκους.



Σχήμα 4.1 Πειραματική διάταξη

4.3 Τεχνική δημιουργίας γραμμικής πυκνομετρικής στρωμάτωσης από την εργασία των Gerald Oster and Masahide Yamamoto (1963)

Η θεωρία της δημιουργίας γραμμικής πυκνομετρικής στρωμάτωσης θα παρουσιασθεί όπως ακριβώς αναφέρεται στην εργασία των Oster and Yamamoto (1963) και κατ' αυτόν τον τρόπο θα εφαρμοσθεί η ακόλουθη τεχνική στην παρούσα πειραματική εργασία.



Σχήμα 4.2 Τεχνική δημιουργίας γραμμικής πυκνομετρικής στρωμάτωσης

Στο σχήμα 4.2, το ρευστό της δεξαμενής 1, πυκνότητας ρ_1 , ρέει με σταθερή παροχή u_1 στη δεξαμενή 2. Η δεξαμενή 2 έχει αρχική πυκνότητα ρ_2^0 και ρέει στη δεξαμενή διάχυσης (Exp_Tank) με σταθερή παροχή u_2 . Η πυκνότητα ρ_2 μεταβάλλεται με τον χρόνο σύμφωνα με τη σχέση (4.1):

$$\frac{d\rho_2}{dt} = \frac{\rho_1 u_1 - \rho_2 u_2}{V_2} = \frac{\rho_2(u_2 - u_1)}{V_2} = \frac{(\rho_1 - \rho_2)u_2}{V_2} \quad (4.1)$$

Όπου V_2 είναι ο όγκος της Tank_2 οποιαδήποτε στιγμή t . Ο πρώτος όρος στα δεξιά της εξίσωσης (4.1) περιγράφει τη συσσώρευση μάζας στην Tank_2 και ο δεύτερος όρος περιγράφει τη συμβολή εξαιτίας της αλλαγής του όγκου. Η μεταβολή του όγκου της Tank_2 δίνεται από τη σχέση (4.2):

$$\frac{dV_2}{dt} = u_1 - u_2 \quad (4.2)$$

Ορίζεται ως V ο όγκος της Exp_Tank. Άρα από τη σχέση (4.2) προκύπτει η σχέση (4.3):

$$V_2(t) = (u_1 - u_2)t + V_2^0 \quad (4.3)$$

Όπου V_2^0 είναι ο αρχικός όγκος της Tank_2. Στις παραπάνω σχέσεις οι όροι ρ_1 , u_1 , u_2 είναι σταθεροί και ανεξάρτητοι του χρόνου, ενώ οι όροι ρ_2 , V_2 και V μεταβάλλονται με το χρόνο t . Τοποθετώντας τη σχέση (4.3), στη σχέση (4.1) και ολοκληρώνοντας προκύπτει η σχέση (4.4):

$$\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2^0 - \rho_1} = \left[\frac{(u_1 - u_2) + V_2^0}{V_2^0} \right]^{u_1/u_2 - u_1} \quad (4.4)$$

Η σχέση (4.4) είναι έγκυρη μόνο για $u_2 \neq u_1$, ενώ για $u_2 = u_1$, από ολοκλήρωση της (4.1) προκύπτει η σχέση (4.5):

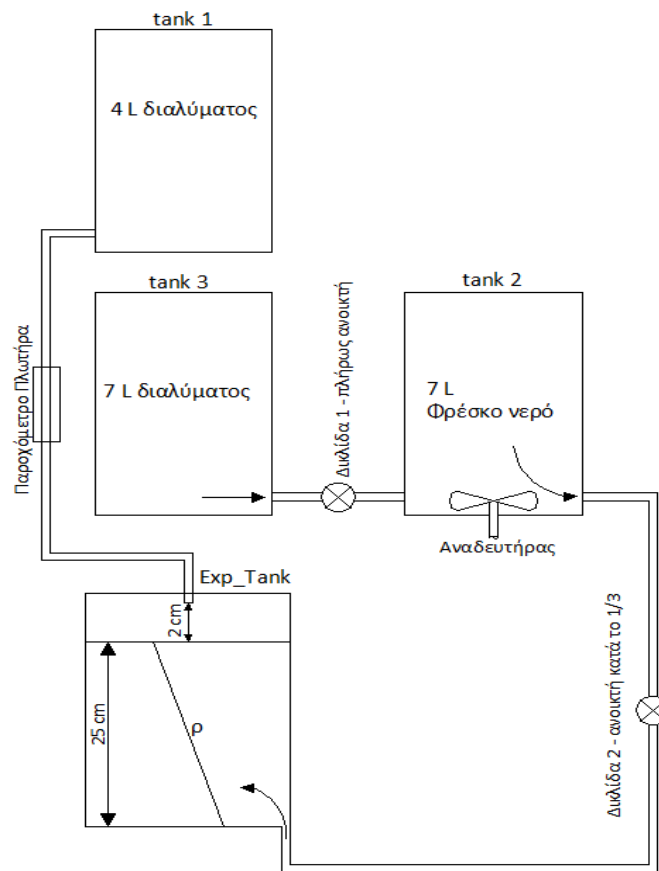
$$\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2^0 - \rho_1} = \exp \left[-\frac{V}{V_2^0} \right] \quad (4.5)$$

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση κατά την οποία $u_2 = 2u_1$. Η περίπτωση αυτή είναι η περίπτωση της τεχνικής της παρούσας πειραματικής εργασίας, επειδή οι δεξαμενές Tank_2 και Tank_3 κατά την έναρξη της στρωμάτωσης έχουν ίδιο όγκο ρευστού 7 L και ίδια διατομή. Από τη άλλη, η δεξαμενή διάχυσης (Exp_Tank) στο τέλος της στρωμάτωσης έχει βάθος 25 cm, δηλαδή περιέχει 10 L νερού. Οι δεξαμενές 2 και 3 σε όλη τη διαδικασία στρωμάτωσης έχουν ίδια στάθμη και επομένως στο τέλος η κάθε μία θα έχει όγκο μειωμένο κατά 5 L. Άρα, υποθέτοντας *προσεγγιστικά σταθερές παροχές*, η Tank_3 θα έχει $u_1 = 5/\tau$ L/min και η Tank_2 θα έχει $u_2 = 10/\tau$ L/min, όπου τ ο χρόνος στρωμάτωσης. Κατά τη συγκεκριμένη, λοιπόν, περίπτωση η σχέση (4.4) μετασχηματίζεται στη σχέση (4.6):

$$\rho_2 = \rho_2^0 - \frac{\rho_2^0 - \rho_1}{2V_2^0} u_2 t \quad (4.6)$$

Η σχέση (4.6) υποδηλώνει γραμμική κατανομή πυκνότητας με τον όρο $u_2 t$ να είναι ο όγκος V . Όταν το ρευστό της δεξαμενής 1 είναι πιο πυκνό από το αρχικό ρευστό της δεξαμενής 2, τότε το μίγμα εισάγεται στην πειραματική δεξαμενή διάχυσης από κάτω, ώστε όσο αυτή γεμίζει με το μίγμα, πυκνότερο διάλυμα να εισάγεται στον πυθμένα (περίπτωση παρούσας εργασίας). Στην αντίθετη περίπτωση, το γέμισμα γίνεται στην επιφάνεια (περίπτωση Turner & Chen, 1974) με κυκλικούς διαχυτήρες που επιπλέουν.

Στην παρούσα διπλωματική, η διαδικασία που ακολουθήθηκε παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4.2 – Βήμα (2). Παρακάτω δίνονται σκαριφήματα και φωτογραφίες της διάταξης (βλ. Σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.3 Διάταξη στρωμάτωσης εργαστηρίου

4.4 Συγκεντρωτικά στοιχεία εκτελεσθέντων πειραμάτων

Παρακάτω παρουσιάζονται υπό μορφή πινάκων (πίνακας 4.1) οι αρχικές συνθήκες του συστήματος (αποδέκτης και υγρό φλέβας) από τα 13 πειράματα που υλοποιήθηκαν. Η κωδικοποίηση των πειραμάτων γίνεται με: EXP_τύπος πειράματος_αριθμός πειράματος / όπου τύπος πειράματος = ii.

Πίνακας 4.1 Αρχικές συνθήκες των πειραμάτων δεύτερου τύπου (Μέρος 1)

		Exp_Tank - Ambient Characteristics			Jet Characteristics							
Date	Experiment	θ_a (°C)	N^{20} (s ⁻¹)	K^{25} for the average depth (cm ² /s)	θ_j (°C)	S (gr/L)	ρ^{20} (gr/cm ³)	ρ (gr/cm ³) Ruddick & Shirtcliffe	ν^{20} (cm ² /s)	Reynolds number Re^{20}	K^{25} (cm ² /s)	R6G quantity in 4 L Solution (mL)
20/4/2012	EXP_ii_1	18.1	0.624	1.48E-05	18.1	4	1.00000	1.00014	1.01E-02	1684	5.15E-06	1.5
28/4/2012	EXP_ii_2	20.2	0.624	1.48E-05	20.2	6	1.00051	1.00051	1.01E-02	1623	5.11E-06	2
28/4/2012	EXP_ii_3	21.2	0.550	1.48E-05	21.2	8	1.00129	1.00107	1.02E-02	1771	5.07E-06	2
29/4/2012	EXP_ii_4	20.5	0.624	1.48E-05	20.5	10	1.00207	1.00200	1.02E-02	1602	5.03E-06	2
29/4/2012	EXP_ii_5	20.9	0.624	1.48E-05	20.9	12	1.00285	1.00269	1.03E-02	1682	4.99E-06	2
30/4/2012	EXP_ii_6	21.4	0.624	1.48E-05	21.4	14	1.00363	1.00336	1.03E-02	1598	4.95E-06	2
30/4/2012	EXP_ii_7	21.7	0.588	1.48E-05	21.7	16	1.00441	1.00408	1.04E-02	1578	4.91E-06	2
						T (gr/L)						
14/5/2012	EXP_ii_8	24.7	0.546	4.99E-06	24.7	4	1.00106	1.00004	1.01E-02	1664	1.50E-05	2
14/5/2012	EXP_ii_9	24.2	0.521	4.99E-06	24.2	6	1.00249	1.00157	1.01E-02	1478	1.49E-05	2
15/5/2012	EXP_ii_10	23.9	0.521	4.99E-06	23.9	8	1.00392	1.00305	1.01E-02	1524	1.49E-05	2
15/5/2012	EXP_ii_11	23.7	0.508	4.99E-06	23.7	10	1.00534	1.00450	1.01E-02	1487	1.48E-05	2.5
16/5/2012	EXP_ii_12	23.9	0.528	4.99E-06	23.9	12	1.00677	1.00585	1.02E-02	1554	1.48E-05	2.5
16/5/2012	EXP_ii_13	22.8	0.546	4.99E-06	22.8	14	1.00820	1.00754	1.02E-02	1548	1.48E-05	2

Όπου θ_a η θερμοκρασία του αποδέκτη, N^{20} συχνότητα Brunt – Vaisala με αναγωγή στους 20 °C, K^{25} ο συντελεστής μοριακής διάχυσης στους 25 °C, θ_j η θερμοκρασία του υγρού της φλέβας, S η συγκέντρωση ζάχαρης, T η συγκέντρωση αλατιού, ρ^{20} η πυκνότητα στους 20 °C, ρ η πυκνότητα από Ruddick & Shirtcliffe (1979) στην κανονική θερμοκρασία του εγχέομένου υγρού, ν^{20} η κινηματική συνεκτικότητα στους 20 °C, Re^{20} ο αριθμός Reynolds της φλέβας υπολογισμένος στους 20 °C και R6G η χρησιμοποιούμενη ροδαμίνη.

Πίνακας 4.1 Αρχικές συνθήκες των πειραμάτων δεύτερου τύπου (Μέρος 2)

Experiment	Injection Characteristics			Duration of disposal (s)	Stratification	Υπαρξη Δενδροειδών Δομών	Duration of Stratification process (min)
	Flowmeter Indication (F)	Q (cm ³ /s)	Diameter (mm)				
EXP_ii_1	16	3.67	2.75	45	Salt	Όχι	55
EXP_ii_2	16	3.67	2.84	45	Salt	Όχι	35
EXP_ii_3	16	3.67	2.59	45	Salt	Όχι	30
EXP_ii_4	16	3.67	2.85	45	Salt	Όχι	35
EXP_ii_5	16	3.67	2.70	45	Salt	Όχι	35
EXP_ii_6	16	3.67	2.83	45	Salt	Όχι	25
EXP_ii_7	16	3.67	2.85	45	Salt	Όχι	25
EXP_ii_8	16	3.67	2.78	45	Sugar	Ναι (εμφανείς)	20
EXP_ii_9	16	3.67	3.12	45	Sugar	Όχι	20
EXP_ii_10	16	3.67	3.02	45	Sugar	Ναι (εμφανείς)	25
EXP_ii_11	16	3.67	3.10	45	Sugar	Όχι	20
EXP_ii_12	16	3.67	2.96	45	Sugar	Ναι (εμφανείς)	15
EXP_ii_13	16	3.67	2.96	45	Sugar	Όχι	20

Όπου Q η παροχή με την οποία διατέθηκε η φλέβα και D η διάμετρος της φλέβας κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια.

Οι συντελεστές μοριακής διάχυσης της ζάχαρης και του αλατιού λήφθηκαν από τις εργασίες των Irani and Adamson (1958) και Stokes (1950) αντίστοιχα. Η κινηματική συνεκτικότητα του αλατόνευρου και του ζαχαρόνευρου στους 20 °C από το CRC handbook of Chemistry and Physics (87th Edition).

Επισημάνσεις σε στοιχεία των παραπάνω πινάκων:

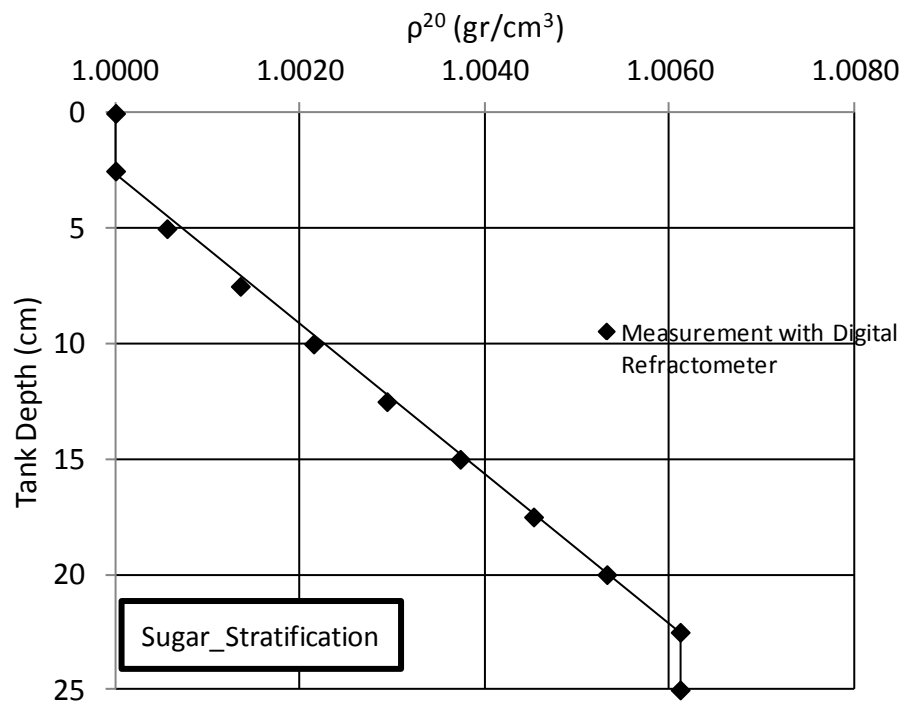
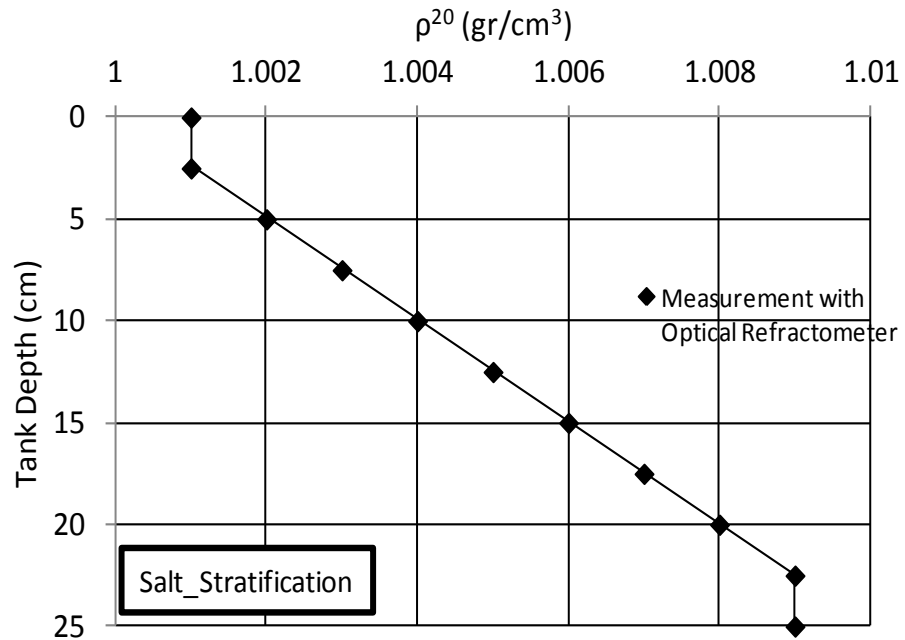
- i. Ο αριθμός Reynolds της φλέβας υπολογίστηκε για τους 20 °C και αυτό γιατί δεν βρέθηκαν στοιχεία της κινηματικής συνεκτικότητας για θερμοκρασίες άλλες από τους 20 °C.
- ii. Για τον προσδιορισμό της κλίσης της γραμμικής πυκνομετρικής στρωμάτωσης, ελήφθησαν δείγματα διαλύματος σε διαφορετικές στάθμες της δεξαμενής ανά 2.5 cm με πιπέτα και μετρήθηκαν οι πυκνότητές τους με το οπτικό και το ψηφιακό διαθλασίμετρο για το αλατόνερο και το ζαχαρόνερο αντίστοιχα. Όμως, τα διαθλασίμετρα δίνουν την αναπροσαρμοσμένη τιμή της πυκνότητας, δηλαδή δίνουν την πυκνότητα του διαλύματος με αναγωγή στους 20 °C. Με δεδομένο ότι τα όργανα δίνουν τιμές με βάση αναφοράς τους 20 °C, θεωρήθηκε σκόπιμο η πυκνότητα της φλέβας να υπολογιστεί με την ίδια βάση αναφοράς. Επομένως, για το υγρό της φλέβας (ζαχαρόνερο ή αλατόνερο κατά περίπτωση και φάση πειραμάτων) δόθηκαν στους πίνακες οι πυκνότητες ρ^{20} . Αυτές υπολογίστηκαν με προσαρμογή καμπύλης ελαχίστων τετραγώνων στα δεδομένα από το CRC Handbook of Chemistry and Physics (87th Edition). Για την πληρότητα της εργασίας, δόθηκαν και οι τιμές της πυκνότητας στην κανονική θερμοκρασία από τους τύπους των Ruddick & Shirlcliffe (1979).
- iii. Ο αριθμός Brunt – Vaisala υπολογίζεται από τη σχέση (4.7):

$$N = \sqrt{-\frac{g}{\rho_{bottom}} \frac{d\rho}{dz}} \quad (4.7)$$

Ο αριθμός N^{20} αναφέρεται στους 20 °C (N^{20}) και αυτό γιατί τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για μετρήσεις πυκνομετρικού προφίλ έδιναν προσαρμοσμένες τιμές της πυκνότητας στους 20 °C.

- iv. *Δενδροειδείς δομές*: Από τη στιγμή που παύει η έγχυση υγρού στη δεξαμενή, το φαινόμενο των Salt Fingers εξελίσσεται ταχύτατα και μετά από 70 min κατά μέσο όρο (για το σύνολο των πειραμάτων), το φαινόμενο εξαφανίζεται, με την έννοια ότι τα Fingers εξαλείφουν τις βαροκλινικές αστάθειες και μόνο η απλή διάχυση (Diffusion) δρα πλέον στο ακίνητο σύστημα. Όμως στη δεύτερη φάση πειραμάτων, μετά τα 70 min στο πεδίο του εγχεόμενου ρευστού παρατηρούνταν κάποιες ογκώδεις και στάσιμες δομές, οι οποίες ομοιάζαν με δένδρα. Αυτές οι δομές προκύπτουν από τα Salt Fingers, είναι δηλαδή το τελικό στάδιο εξέλιξης και παραμένουν στάσιμες σε αντίθεση με τα Fingers που είναι έντονα κινητικά και μεταβλητά. Αυτές οι δομές απλά υπάρχουν στο πεδίο και εξαλείφονται με το χρόνο λόγω απλής διάχυσης. Επισημαίνεται ότι η εξέλιξη αυτού του είδους δεν παρατηρήθηκε σε όλα τα πειράματα, παρά μόνο στα πειράματα της δεύτερης φάσης. Δεν πρέπει να αποτελεί κάποιο ιδιαίτερο φαινόμενο αλλά έχει αξία ως παρατήρηση. Σε όλα πάντως τα πειράματα η πορεία εξέλιξης των Salt Fingers ήταν ίδια και χρονικά και μορφολογικά.

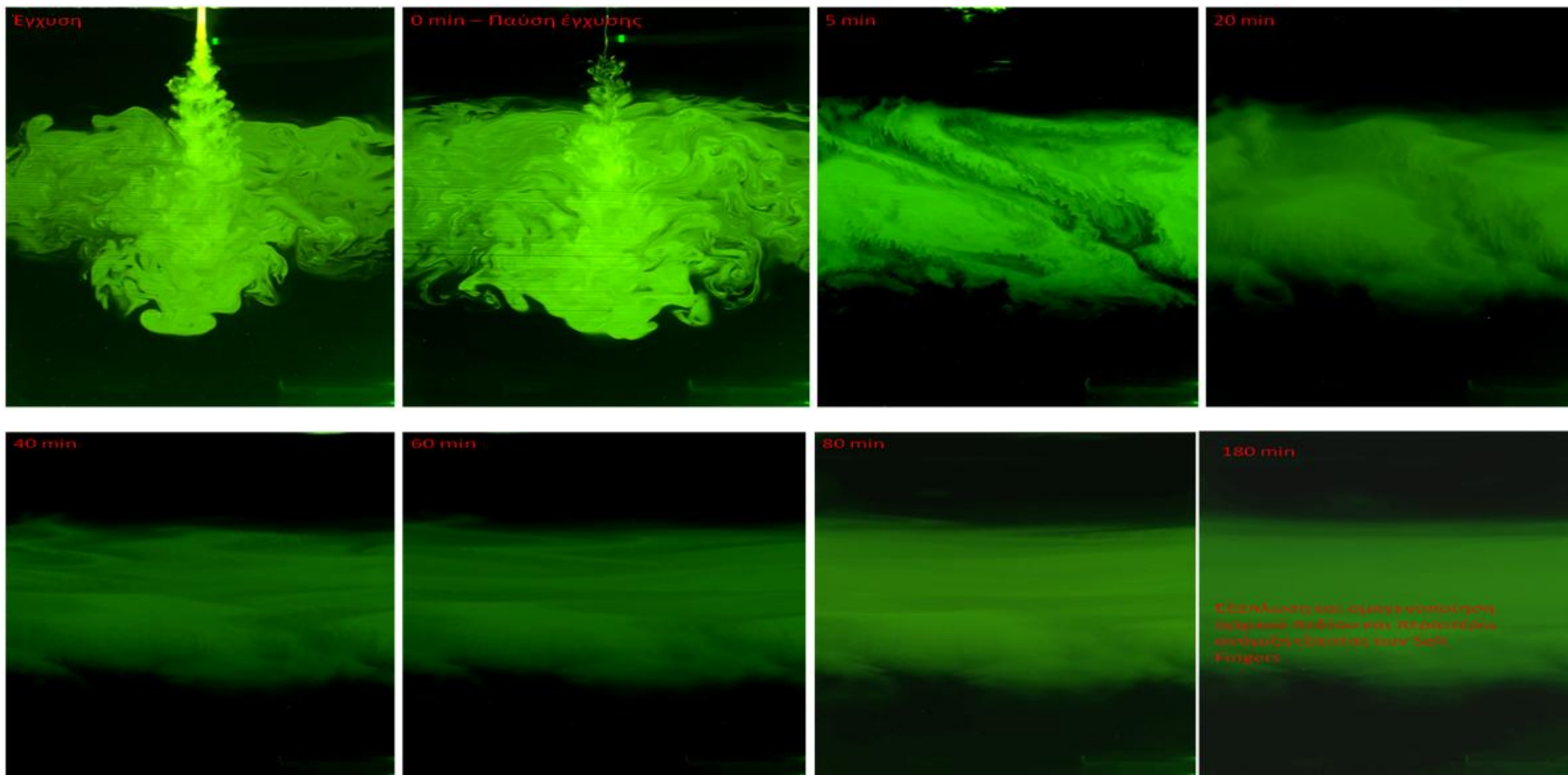
Στο Σχήμα 4.4 δίνονται δύο τυπικές γραμμικές πυκνομετρικές στρωματώσεις όπως αυτές προέκυψαν από την τεχνική των Oster and Yamamoto (1963) και όπως επαληθεύτηκαν από μετρήσεις. Στις δύο φάσεις πειραμάτων το προφίλ παρέμεινε κατά το δυνατόν σταθερό.



Σχήμα 4.4 Γραμμικές πυκνομετρικές στρωματώσεις με αλατόνερο (άνω) και ζαχαρόνερο (κάτω).

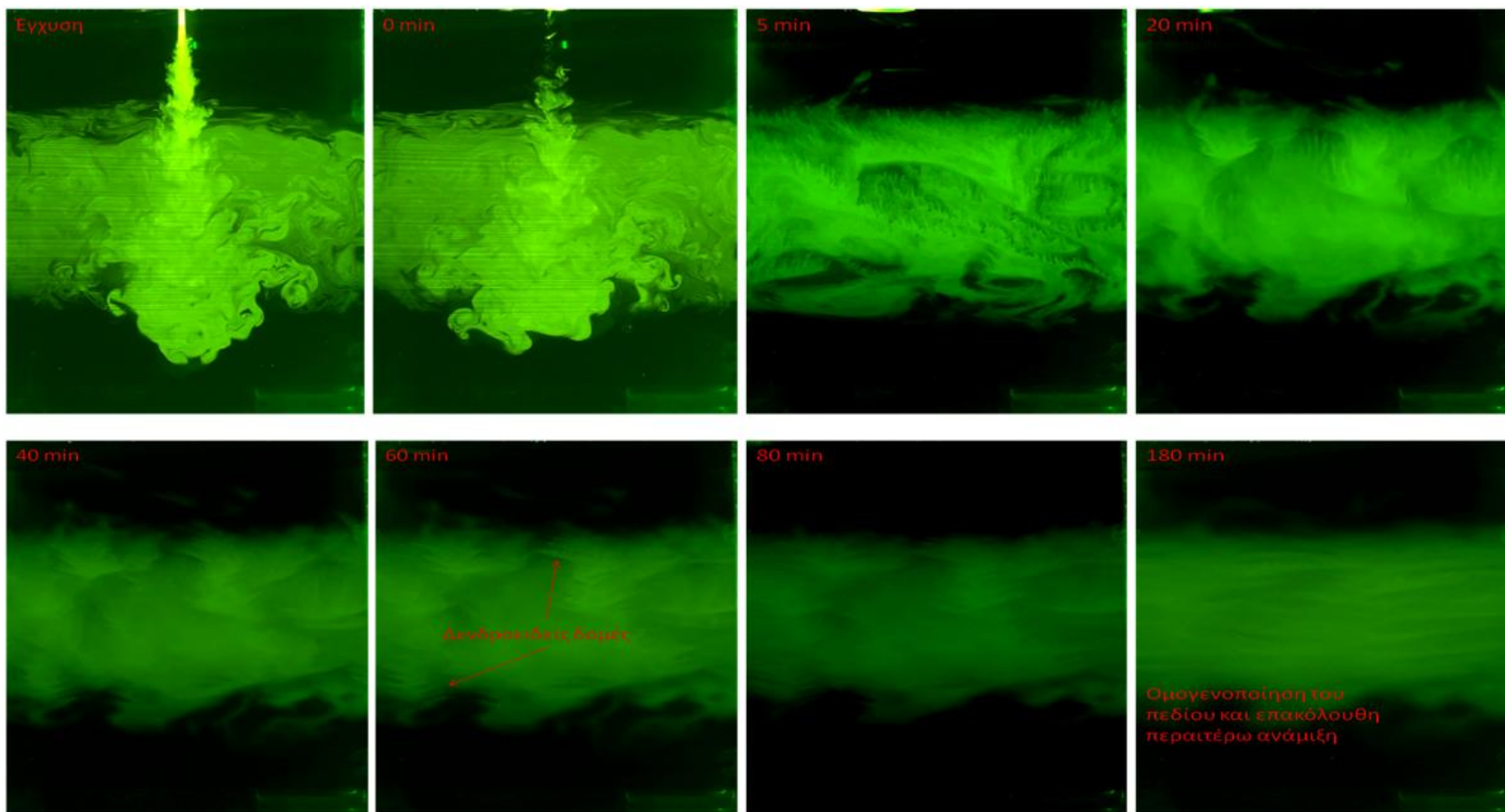
4.5 Εξέλιξη φαινομένου σε ένα τυπικό πείραμα

4.5.1 Εξέλιξη φαινομένου σε στρωμάτωση με αλατόνερο και έγχυση ζαχαρόνερου



Σχήμα 4.5 Εξέλιξη τυπικού πειράματος (πρώτη φάση)

4.5.2 Εξέλιξη φαινομένου σε στρωμάτωση με ζαχαρόνερο και έγχυση αλατόνερου



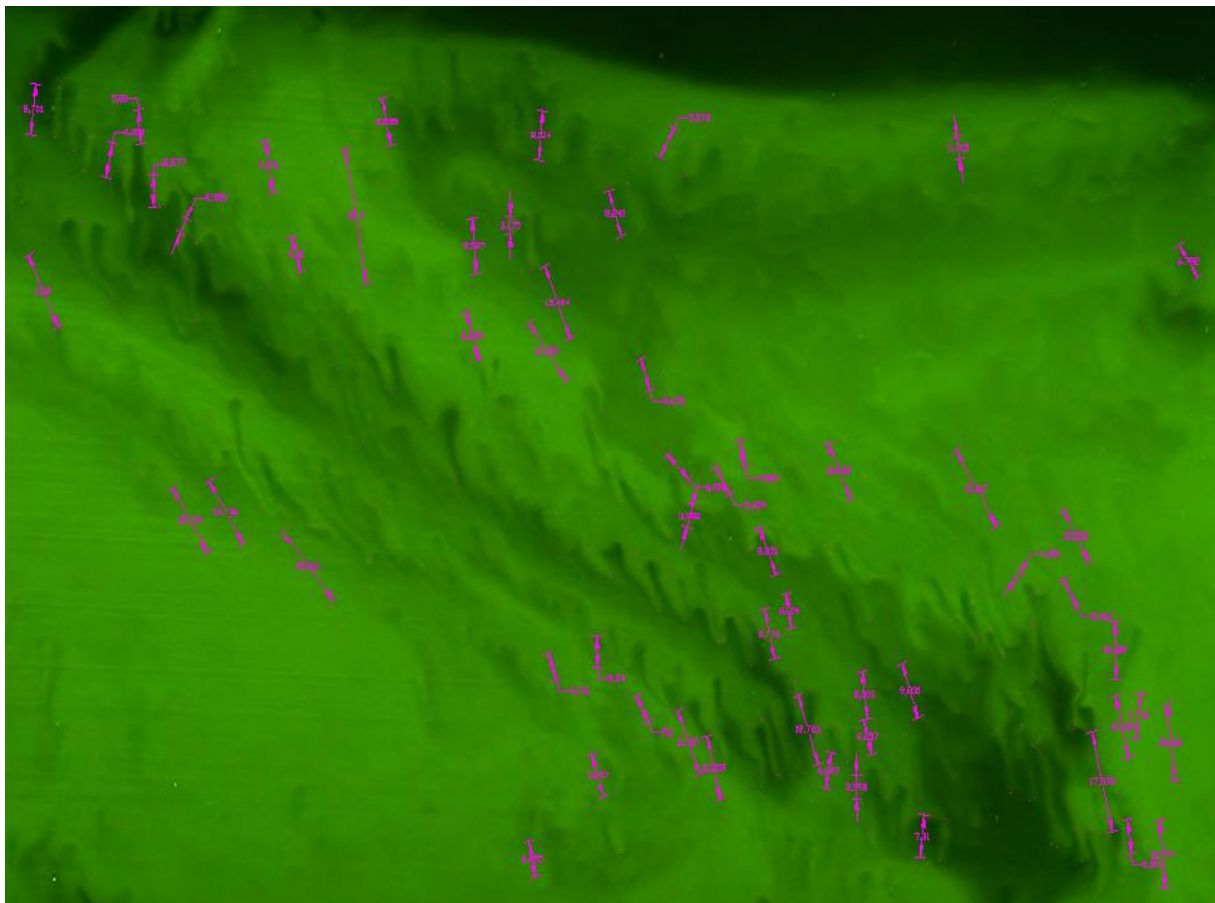
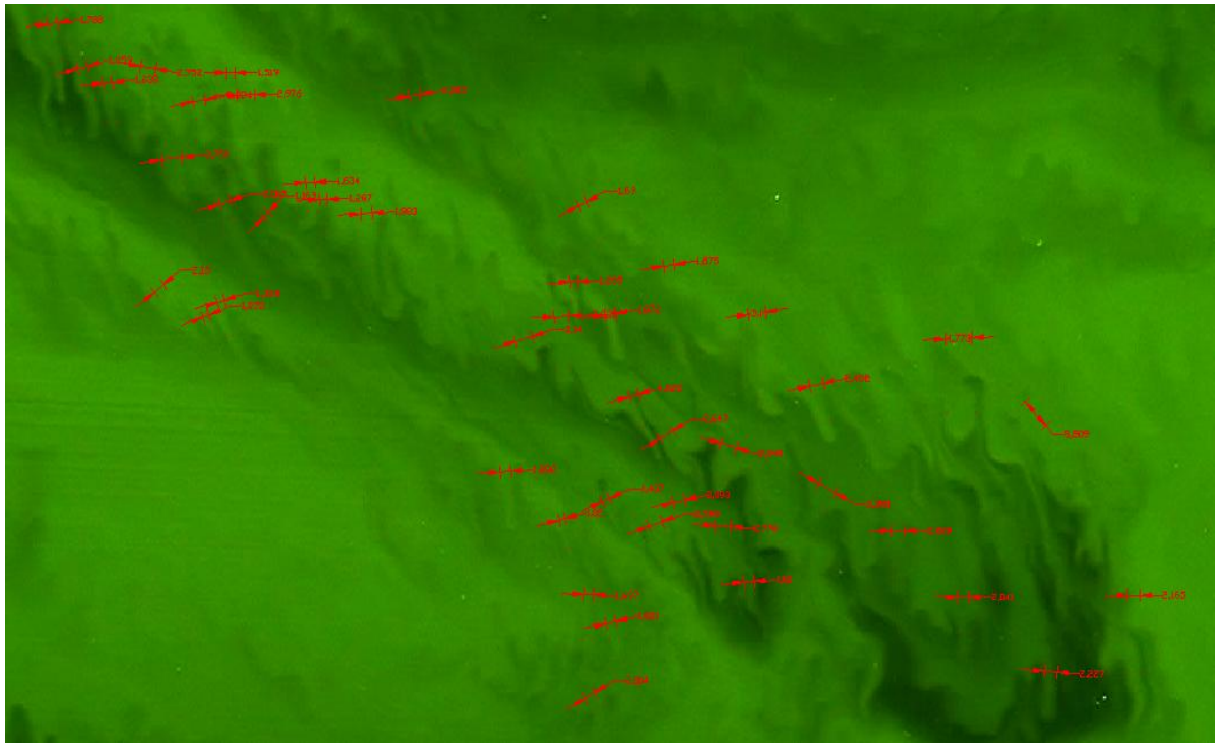
Σχήμα 4.6 Εξέλιξη τυπικού πειράματος (δεύτερη φάση)

4.6 Επεξεργασία βιντεοσκοπημένου υλικού

Ακολουθώντας τα 8 βήματα του Κεφαλαίου 4.2 και επαναλαμβάνοντάς τα, αλλάζοντας μόνο τα επιλεγμένα στοιχεία, προέκυψαν τα πειράματα που παρουσιάστηκαν στους συγκεντρωτικούς πίνακες και ένας όγκος βιντεοσκοπημένου υλικού (3 ώρες βίντεο ανά πείραμα). Τα βήματα που ακολουθήθηκαν κατά το πέρας των πειραμάτων για την επεξεργασία των βίντεο έχουν ως εξής:

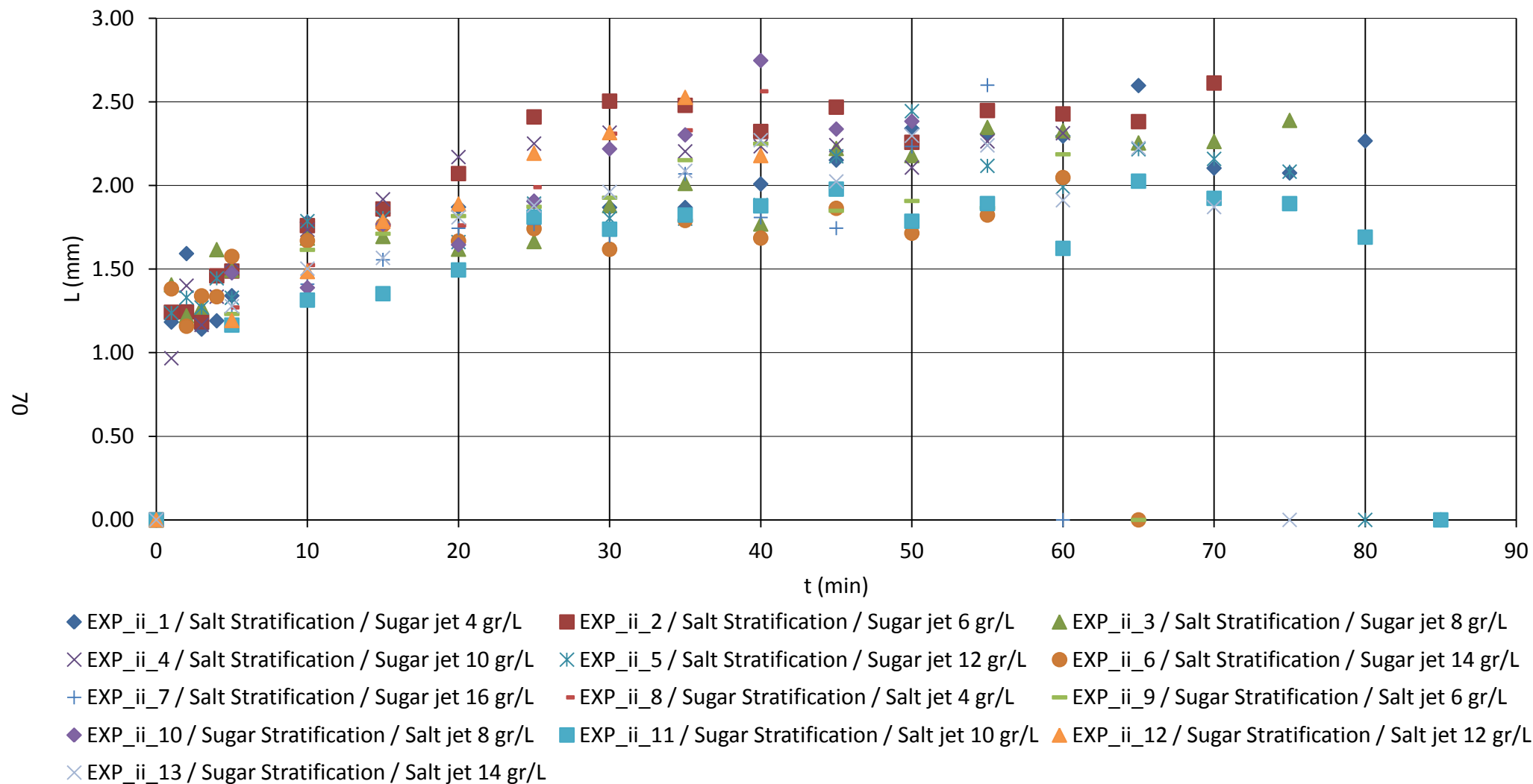
- (1) Σε πρώτη φάση ορίζεται το συμβατικό μηδέν. Αυτό αποτελεί το χρονικό σημείο παύσης της παροχέτευσης υγρού υπό μορφή φλέβας εντός του αποδέκτη. Από το 0 min, εκκινεί το φαινόμενο των Salt Fingers.
- (2) Στη συνέχεια χωρίστηκαν τα βίντεο σε στιγμιότυπα ανά 5 min και κάθε 5 min αποσπάστηκαν από τα βίντεο στιγμιότυπα της εξέλιξης του φαινομένου.
- (3) Τα στιγμιότυπα τοποθετήθηκαν στο σχεδιαστικό πρόγραμμα AutoCAD και μετρήθηκαν το μέσο πάχος (L) και το μέσο μήκος των Salt Fingers. Επισημαίνεται ότι το φαινόμενο σταματάει στο στιγμιότυπο όπου πλέον δεν υπάρχουν Fingers (περίπτωση απουσίας δενδροειδών δομών), ενώ στην περίπτωση ύπαρξης δενδροειδών δομών το φαινόμενο σταματάει στο στιγμιότυπο μετά το οποίο δεν παρουσιάζονται αλλαγές στο διαμορφούμενο πεδίο (“πράσινη” περιοχή των εικόνων).
 - i. Μέσο πλάτος Salt Fingers ανά στιγμιότυπο (L): Στο παρατηρούμενο παράθυρο λήψης του φαινομένου, υπάρχουν εκατοντάδες Fingers. Το μέσο πλάτος προκύπτει μετρώντας πολλά πλάτη ανά στιγμιότυπο και εξάγοντας απλά τη μέση τιμή. Για να είναι αντιπροσωπευτική η μέση τιμή, φροντίσαμε οι μετρήσεις να έχουν μεγάλη πυκνότητα και να καλύπτουν όλα το εύρος της εικόνας (Σχήμα 4.7). Αυτή η διαδικασία ακολουθήθηκε ανά στιγμιότυπο και ανά πείραμα και τελικά προέκυψαν τα διαγράμματα εξέλιξης του (L) συναρτήσεως του χρόνου (t).
 - ii. Μέσο μήκος Salt Fingers (λ). Ο τρόπος υπολογισμού, δεν διαφέρει καθόλου από αυτό του μέσου πλάτους. Πάλι εξάγεται η μέση τιμή από πολλά μετρημένα αντίστοιχα μεγέθη (Σχήμα 4.7). Αυτή η διαδικασία ακολουθήθηκε ανά στιγμιότυπο και ανά πείραμα και τελικά προέκυψαν διαγράμματα εξέλιξης του (λ) συναρτήσεως του χρόνου (t).
 - iii. Σύνδεση μετρημένων μεγεθών AutoCAD με τα πραγματικά μεγέθη. Με τη εισαγωγή κανόνα στο παράθυρο λήψης της κάμερας και πιο συγκεκριμένα στο επίπεδο παρακολούθησης, γίνεται σύνδεση του 1 cm με τις μονάδες που δίνει το AutoCAD (διαδικασία γνωστή από Κεφάλαιο 3).

Ακολουθώντας όλα τα παραπάνω βήματα προέκυψαν τα συγκεντρωτικά διαγράμματα του Κεφαλαίου 4.8, τα οποία παρουσιάζουν το πώς εξελίσσονται τα δύο παραπάνω βασικά μεγέθη των Fingers συναρτήσεως του χρόνου καθώς και οι μεταξύ τους συσχετίσεις.

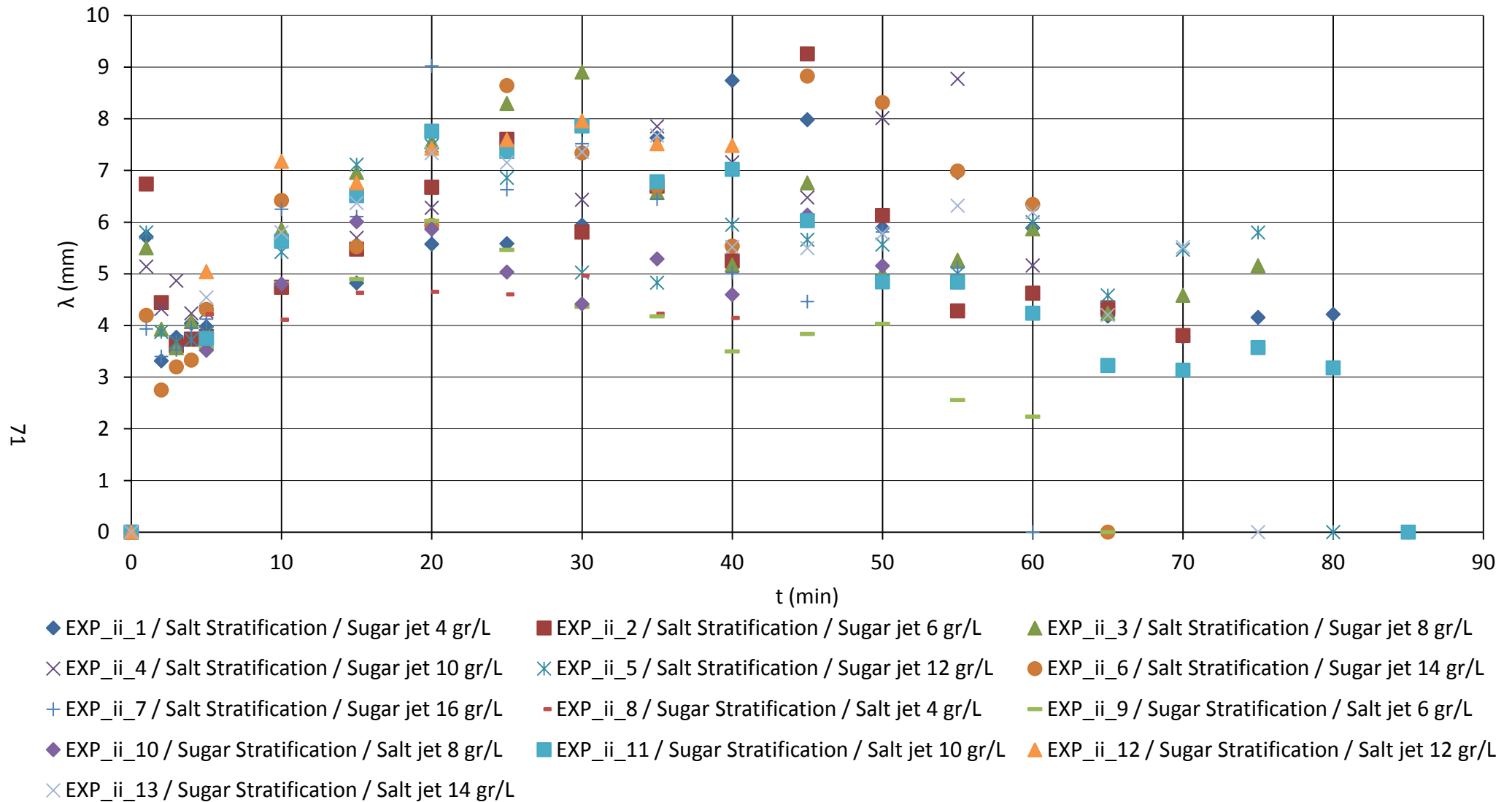


Σχήμα 4.7 Υπολογισμός μέσου πλάτους (άνω εικόνα) και μέσου μήκους (κάτω εικόνα)

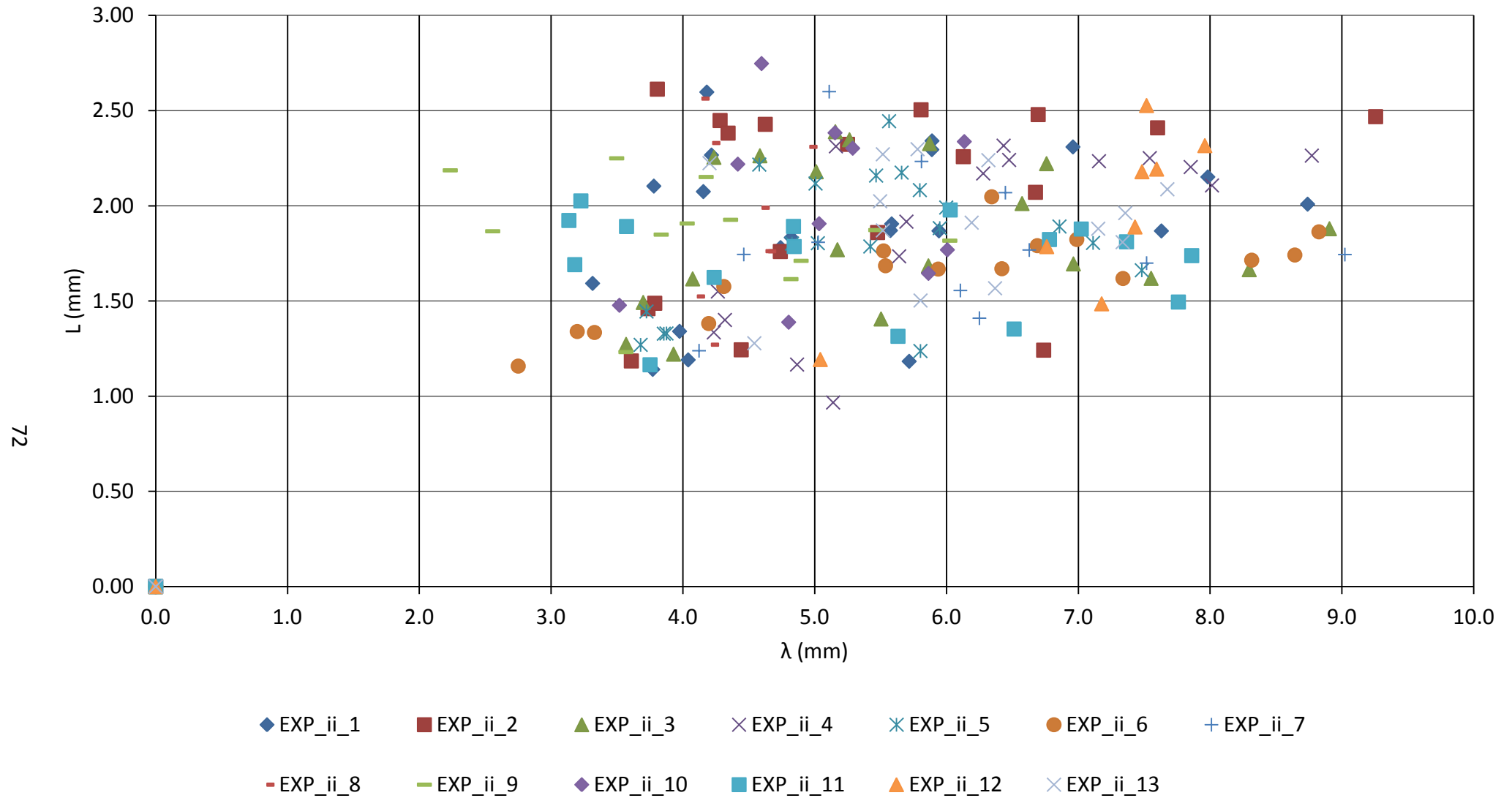
4.7 Συγκεντρωτικά διαγράμματα από την επεξεργασία του βιντεοσκοπημένου υλικού



Σχήμα 4.8 Εξέλιξη μέσου πλάτους Salt Fingers (L) συναρτήσει του χρόνου (t)



Σχήμα 4.9 Εξέλιξη μέσου μήκους Salt Fingers (λ) συναρτήσει του χρόνου



Σχήμα 4.10 Συσχέτιση μέσου μήκους (λ) με το μέσο πλάτος (L) των Salt Fingers

4.8 Συμπεράσματα

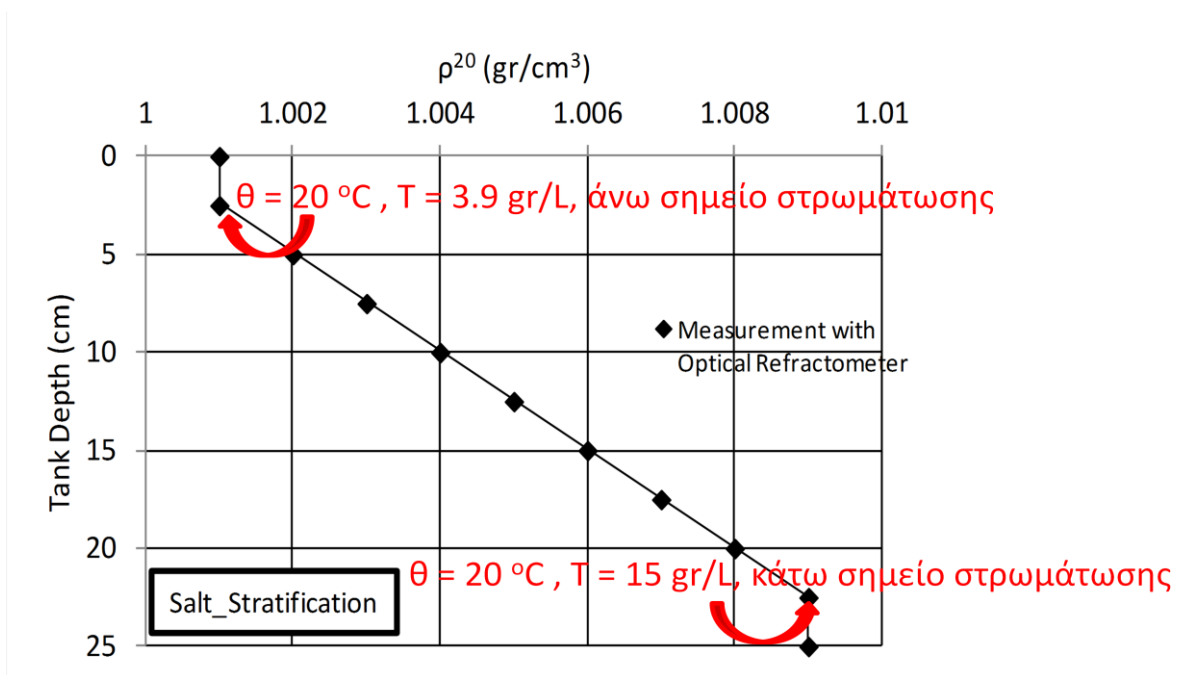
Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρατήρηση του πειράματος και των διαγραμμάτων των προηγούμενων παραγράφων συνοψίζονται στα εξής:

- i. Όταν το υγρό εγχέεται εντός του αποδέκτη, δημιουργείται ένα πεδίο ανάμειξης που είναι ομογενές ως προς την πυκνότητα αλλά μη ομογενές ως προς την διαλυμένη ουσία (αλάτι ή ζάχαρη). Με άλλα λόγια έχει υπάρξει μια πρώτη ανάμειξη και αραίωση του ρευστού της φλέβας λόγω συμπαράσυρσης του στρωματισμένου ρευστού του αποδέκτη, αλλά το πεδίο συγκεντρώσεων ροδαμίνης (και ως εκ τούτου της ουσίας της φλέβας) δεν είναι ομοιόμορφα χωρικά κατανεμημένο, δηλαδή δεν υπάρχει η ίδια ποσότητα ροδαμίνης σε κάθε σημείο του. Όμως με την εξέλιξη του φαινομένου της διπλής διάχυσης λόγω των Salt Fingers παρατηρούμε ότι μέσα σε μικρό χρονικό διάστημα (100 min) η ροδαμίνη βρίσκεται ομοιόμορφα κατανεμημένη. Αυτό σημαίνει ότι ο όγκος του αρχικού πεδίου ανάμειξης έχει μεγαλώσει με αποτέλεσμα την περαιτέρω αραίωση του ρευστού της φλέβας. Άρα, ο μηχανισμός των Fingers φαίνεται να είναι ένας αποτελεσματικός, επικουρικός μηχανισμός περαιτέρω αραίωσης. Όλα αυτά όμως έχουν εφαρμογή σε ακίνητο αποδέκτη, επειδή τα Fingers είναι ευαίσθητα σε διάτμηση (ροή).
- ii. Σε όλα τα πειράματα, η λήξη του φαινομένου των Salt Fingers συνέβαινε περί το ίδιο χρονικό σημείο (70 min από την έγχυση της φλέβας) με μικρή απόκλιση.
- iii. Σχήμα 4.8 / $L(t)$: Όλα τα εκτελεσθέντα πειράματα (και των δυο φάσεων) ποιοτικά και ποσοτικά ακολουθούν κοινή πορεία. Το πλάτος των Salt Fingers αυξάνεται συνεχώς με το χρόνο. Αρχικά, η αύξηση γίνεται με μεγαλύτερο ρυθμό και ακολούθως μειώνεται λίγο η κλίση της καμπύλης. Η οριζόντια ανάπτυξη των Fingers καθορίζεται εξολοκλήρου από την απλή διάχυση. Από τη στιγμή όπου σε κάθε πείραμα τα εμπλεκόμενα ρευστά είναι τα ίδια, τότε οι συντελεστές μοριακής διάχυσης δεν αλλάζουν και κατ' επέκταση η συμπεριφορά του L είναι κοινή.
- iv. Σχήμα 4.9 / $\lambda(t)$: Ποιοτικά οι καμπύλες ακολουθούν την ίδια πορεία. Αναλυτικότερα, το μήκος εκκινεί από το μηδέν και με μεγάλη κλίση προσεγγίζει τη μέγιστη τιμή, έπειτα ακολουθεί μια πτωτική πορεία μέχρις ότου λήξει το φαινόμενο. Στην ουσία, το φαινόμενο των Salt Fingers όσο εξελίσσεται και μεταφέρονται μάζες, δημιουργεί ένα βαρυσταθές σύστημα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, την μείωση των δομών τόσο σε πλήθος όσο και σε μέγεθος (εξαιρουμένου του πλάτους για το οποίο υπεύθυνη είναι η απλή διάχυση και όχι οι διαφορές πυκνότητας).
- v. Σχήμα 4.10 / $L(\lambda)$: Δεν παρατηρείται καμία συσχέτιση των δύο μεγεθών.
- vi. Σε όλα τα παραπάνω πειράματα τα πυκνομετρικά χαρακτηριστικά του αποδέκτη διατηρήθηκαν κατά το δυνατόν σταθερά, με μόνη μεταβλητή την πυκνότητα του εγχέομένου διαλύματος. Από τα διαγράμματα, γίνεται αντιληπτό ότι μεταβάλλοντας αυτό το χαρακτηριστικό, το φαινόμενο θα εξελιχθεί κατά δεδομένο ποιοτικά και ποσοτικά τρόπο. Δηλαδή, σε όλα τα πειράματα οι καμπύλες $L(t)$ και $\lambda(t)$ είναι προσεγγιστικά κοινές.

4.9 Ευαισθησία της συχνότητας πυκνομετρικής στρωμάτωσης N (Brunt – Vaisala) σε μεταβολές θερμοκρασίας

Σε αυτήν την ενότητα, εξετάζεται η ευαισθησία της συχνότητας Brunt – Vaisala σε διαφορετικές θερμοκρασίες της πειραματικής δεξαμενής. Σε όλα τα πειράματα που εκτελέστηκαν το εύρος θερμοκρασιών όλων των υγρών κυμάνθηκε από 16 έως 24 °C. Η ανάλυση που ακολουθεί στηρίζεται στο ακόλουθο σκεπτικό: Για τις δύο τυπικές στρωματώσεις (αλατόνερο και ζαχαρόνερο), με πάχος στρώσης 20 cm εντός της οποίας η πυκνότητα μεταβάλλεται γραμμικά, θα μεταβάλλουμε τη θερμοκρασία στις τιμές 16 / 20 / 24 °C. Ουσιαστικά, στο άνω και στο κάτω σημείο της στρώσης θα διατηρηθούν σταθερές οι συγκεντρώσεις αλατιού και ζάχαρης ενώ θα μεταβάλλεται η τιμή της θερμοκρασίας. Για κάθε στρωμάτωση, θα προκύψουν 3 τιμές της συχνότητας N. Κατ' αυτόν τον τρόπο, θα φανεί η ευαισθησία του αριθμού N στις μεταβολές θερμοκρασίας.

Στρωμάτωση με αλατόνερο (Salt Stratification) (βλ. Σχήμα 4.11)



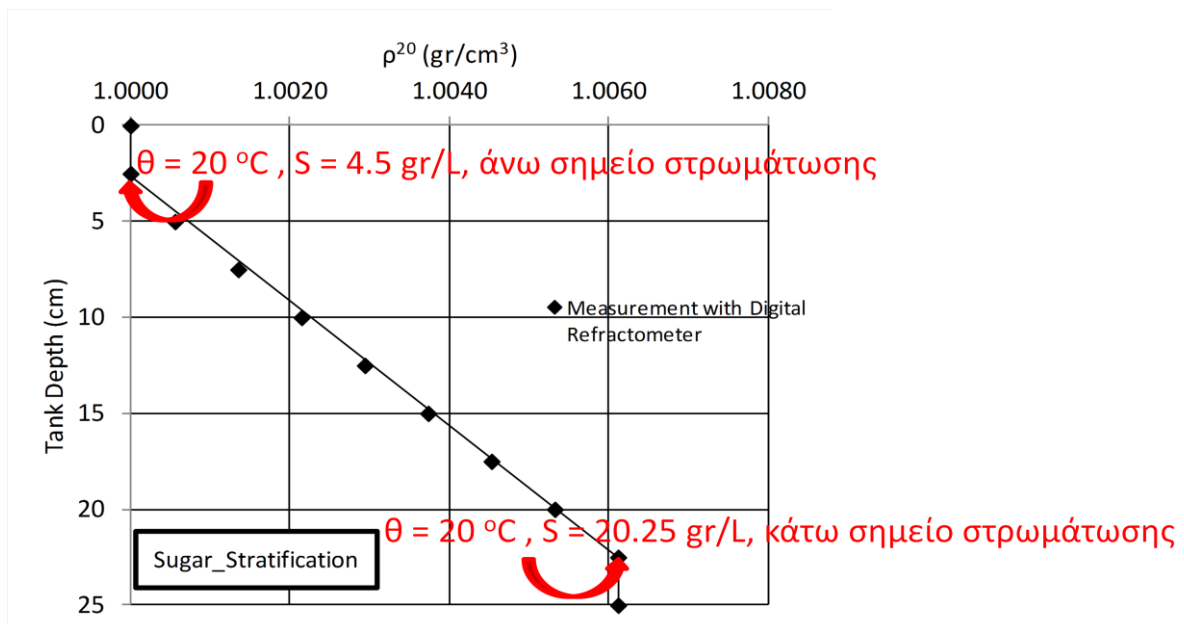
Σχήμα 4.11 Στρωμάτωση με αλατόνερο

Πίνακας 4.2 Μεταβολή του N για θερμοκρασιακές μεταβολές στην πειραματική δεξαμενή

Ruddick & Shirtcliffe			
θ (°C)	$\rho_{\text{άνω}}$ (gr/cm ³)	$\rho_{\text{κάτω}}$ (gr/cm ³)	N (s ⁻¹)
16	1.0017	1.0097	0.623
20	1.0010	1.0089	0.620
24	1.0001	1.0079	0.616

Άρα για μεταβολή της θερμοκρασίας κατά 8 °C, ο αριθμός N μεταβάλλεται μόλις κατά ~1% σε σχέση με την τιμή του στους 16 °C.

Στρωμάτωση με ζαχαρόνερο (Sugar Stratification) (βλ. Σχήμα 4.12)



Σχήμα 4.12 Στρωμάτωση με ζαχαρόνερο

Πίνακας 4.3 Μεταβολή του N για θερμοκρασιακές μεταβολές στην πειραματική δεξαμενή

	Ruddick & Shirtcliffe		
θ (°C)	$\rho_{\text{άνω}}$ (gr/cm ³)	$\rho_{\text{κάτω}}$ (gr/cm ³)	N (s ⁻¹)
16	1.0007	1.0069	0.550
20	1.0000	1.0061	0.545
24	0.9991	1.0052	0.546

Άρα για μεταβολή της θερμοκρασίας κατά 8 °C, ο αριθμός N μεταβάλλεται μόλις κατά ~0.7% σε σχέση με την τιμή του στους 16 °C.

Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι ο αριθμός Brunt – Vaisala δεν είναι ευαίσθητος στις θερμοκρασιακές μεταβολές, για το εύρος πάντα των μεταβολών που παρουσιάζονται στην παρούσα πειραματική εργασία. Άρα, για τα εκτελεσθέντα πειράματα μπορούμε να υποστηρίξουμε χωρίς ιδιαίτερο σφάλμα ότι: $N^{16} = N^{20} = N^{24}$, δηλαδή η ανωστική συχνότητα N που δίνεται στον πίνακα 4.1 παραμένει σταθερά στο εύρος θερμοκρασιών από 16 έως 24 °C.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

5. ΤΡΙΤΟΣ ΤΥΠΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

5.1 Γενική περιγραφή

Σε αυτόν τον τύπο πειραμάτων μελετήθηκε το φαινόμενο των Salt Fingers σε γραμμικά στρωματισμένο ρευστό (βάθους 25 cm) και πιο συγκεκριμένα σε περιβάλλον συνύπαρξης συγκεντρώσεων αλατιού και ζάχαρης. Η πυκνότητα του ρευστού μεταβάλλεται γραμμικά από την επιφάνεια προς τον πυθμένα με ευσταθή τρόπο (το βαρύτερο ρευστό κάτω από το ελαφρύτερο), με το ρευστό της πειραματικής δεξαμενής να είναι μια μίξη διαλυμάτων αλατόνευρου – ζαχαρόνευρου. Η συγκέντρωση αλατιού αυξάνεται γραμμικά από την επιφάνεια προς τον πυθμένα, ενώ η συγκέντρωση ζάχαρης μειώνεται γραμμικά από την επιφάνεια προς τον πυθμένα. Η κατασκευή του σύνθετου αυτού πεδίου (“The Double Gradient System”) έγινε εφαρμόζοντας την τεχνική των Oster and Yamamoto (1963). Η μεταβλητή του πειράματος είναι ο ίδιος ο αποδέκτης. Η συνύπαρξη των δύο διαλυμάτων στο ίδιο περιβάλλον είναι ικανή να μετατρέψει το στρώμα από ευσταθές σε ασταθές σύστημα (εξήγηση Κεφάλαιο 1.1). Η οπτικοποίηση του φαινομένου επιτεύχθηκε με την τοποθέτηση στρώσεων ροδαμίνης ανά 5 cm κατά την διάρκεια δημιουργίας της στρωμάτωσης. Το φαινόμενο βιντεοσκοπήθηκε μέχρις ότου τα Fingers να καταλάβουν όλο το βάθος της δεξαμενής. Μετρήθηκαν ανά στρώση ροδαμίνης, το μέσο πλάτος των Salt Fingers (L) και η εξέλιξη (από την άποψη του πάχους) των στρώσεων ροδαμίνης (h).

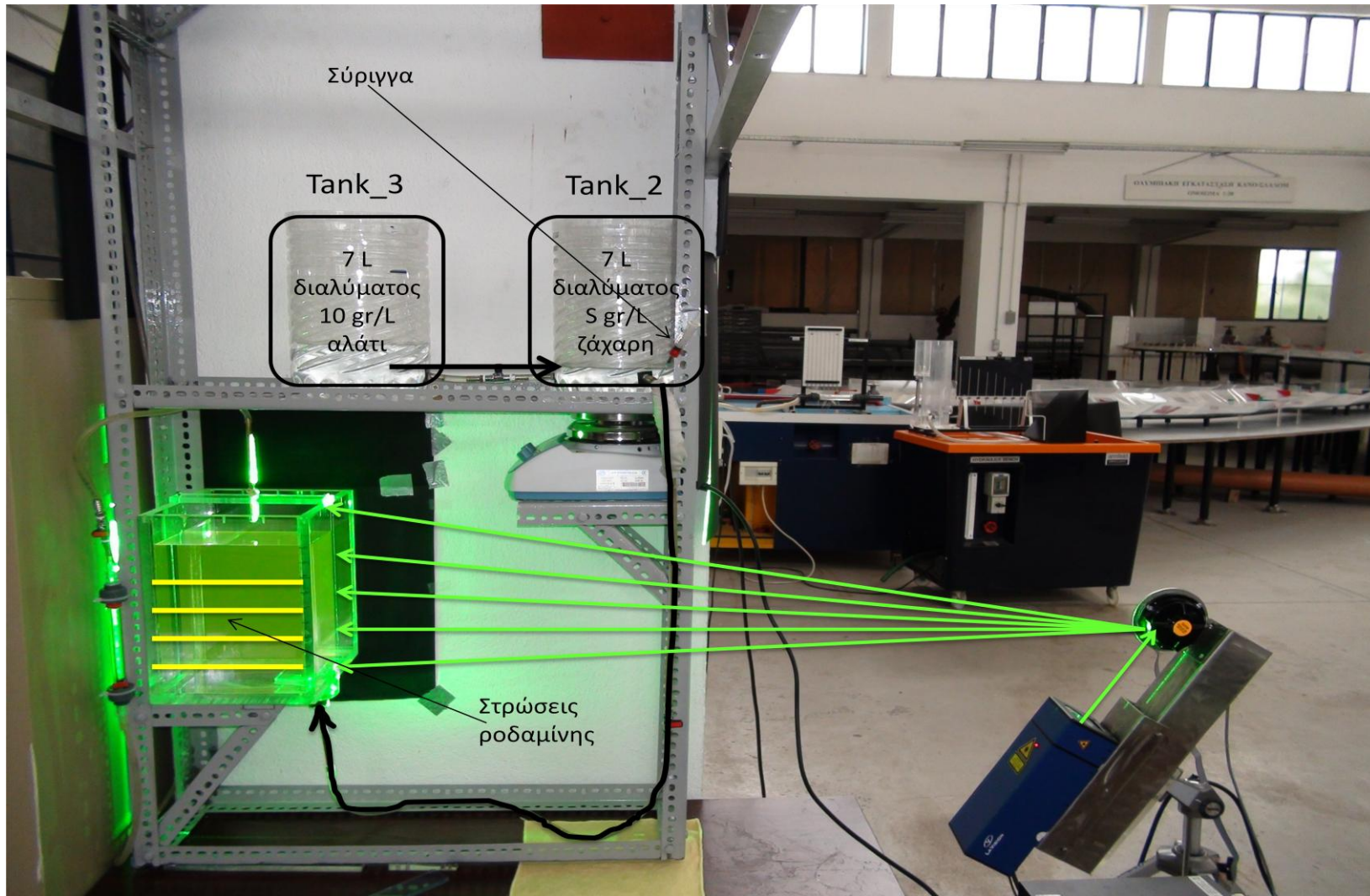
5.2 Περιγραφή τυπικού πειράματος

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα βήματα τα οποία αυστηρά ακολουθήθηκαν σε κάθε πείραμα αυτού του τύπου (βλ. Σχήμα 5.1).

(1) Παρασκευή διαλυμάτων αλατόνευρου – ζαχαρόνευρου, ίδιας θερμοκρασίας.

- i. Διάλυμα αλατόνευρου: Σε βοηθητική δεξαμενή μέγιστης χωρητικότητας 7 L τοποθετούνται 7 L νερού βρύσης, 10 gr/L αλάτι και αναδεύονται με μικροποσότητα θειώδους νατρίου για 2 min. Μετά το τέλος της ανάμειξης μετριέται η πυκνότητα και η θερμοκρασία του ομογενούς διαλύματος με το πυκνόμετρο και το θερμόμετρο. Ακολούθως, το έτοιμο διάλυμα τοποθετείται στη δεξαμενή 3 (Tank_3).
- ii. Διάλυμα ζαχαρόνευρου: Σε βοηθητική δεξαμενή μέγιστης χωρητικότητας 7 L τοποθετούνται 7 L νερού βρύσης, 5 gr/L ζάχαρη και αναδεύονται με μικροποσότητα θειώδους νατρίου για 2 min. Μετά το τέλος της ανάμειξης μετριέται η πυκνότητα και η θερμοκρασία του ομογενούς διαλύματος με το πυκνόμετρο και το θερμόμετρο. Ακολούθως, το έτοιμο διάλυμα τοποθετείται στη δεξαμενή 2 (Tank_2).

- (2) Ορθό στήσιμο συστήματος Laser (βλ. Κεφάλαιο 3.2 – Όμοια διαδικασία).
- (3) Στήσιμο κάμερας (βλ. Κεφάλαιο 3.2 – Όμοια διαδικασία).
- (4) Τοποθέτηση πανιού με σκοπό την δημιουργία σκότους (βλ. Κεφάλαιο 3.2 – Όμοια διαδικασία).
- (5) Δημιουργία σύνθετου πεδίου, δηλαδή δημιουργία γραμμικής πυκνομετρικής στρωμάτωσης στην πειραματική δεξαμενή. Με δεδομένο ότι οι δεξαμενές 2 και 3 είναι πληρωμένες με τα κατάλληλα ρευστά, τότε δύναται να εκκινήσει η διαδικασία στρωμάτωσης. Η Δικλίδα_1 είναι πλήρως ανοικτή και η Δικλίδα_2 είναι ανοικτή κατά το $\frac{1}{3}$. Η δεξαμενή 2 αναδευέται καθ' όλη τη διαδικασία στρωμάτωσης, από μαγνητικό αναδευτήρα. Η παροχέτευση του μίγματος γίνεται αργά από τον πυθμένα και η στρωμάτωση διαρκεί περίπου 75 min. Κατά τη διάρκεια στρωμάτωσης ανά 15 με 20 min ρυθμιζόταν η Δικλίδα_2 ώστε η παροχέτευση να διατηρεί σταθερό ρυθμό. Ουσιαστικά, όσο αδειάζουν οι δεξαμενές, το ενεργειακό φορτίο μειώνεται και η Δικλίδα_2 θα πρέπει να ρυθμίζεται έτσι ώστε η παροχή του μείγματος να παραμένει σταθερή. *Για την οπτικοποίηση του φαινομένου θα πρέπει να υπάρχει ροδαμίνη μέσα στο σύστημα. Γι' αυτόν τον λόγο, καθώς προοδεύει η διαδικασία στρωμάτωσης, ανά 5 cm βάθους δεξαμενής εγχέεται μικροποσότητα ροδαμίνης 0,05 mL, με σύριγγα από σημείο κοντά στη δεξαμενή 2 στο σωλήνα που διοχετεύει το μείγμα στη δεξαμενή. Έτσι δημιουργείται μια λεπτή στρώση ρευστού με συγκεκριμένη πυκνότητα που περιέχει ροδαμίνη. Η παροχέτευση του μείγματος παύει όταν το βάθος του ρευστού της πειραματικής δεξαμενής φτάσει τα 25 cm.*
- (6) Η βιντεοσκόπηση ξεκινάει μαζί με την διαδικασία στρωμάτωσης και σταματάει εκεί όπου τα Fingers έχουν καταλάβει όλη την δεξαμενή σε ύψος.
- (7) Στο τέλος της βιντεοσκόπησης, τοποθετείται κανόνας στο επίπεδο παρακολούθησης και λαμβάνεται κλίμακα μήκους.

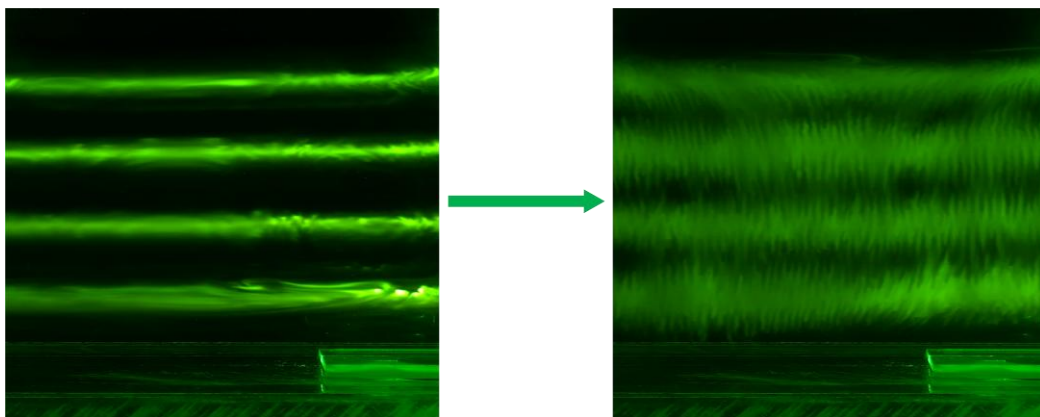


Σχήμα 5.1 Πειραματική διάταξη

5.3 Επισημάνσεις επί της πειραματικής διαδικασίας

Παρακάτω παρουσιάζονται ζητήματα λεπτά της πειραματικής διάταξης.

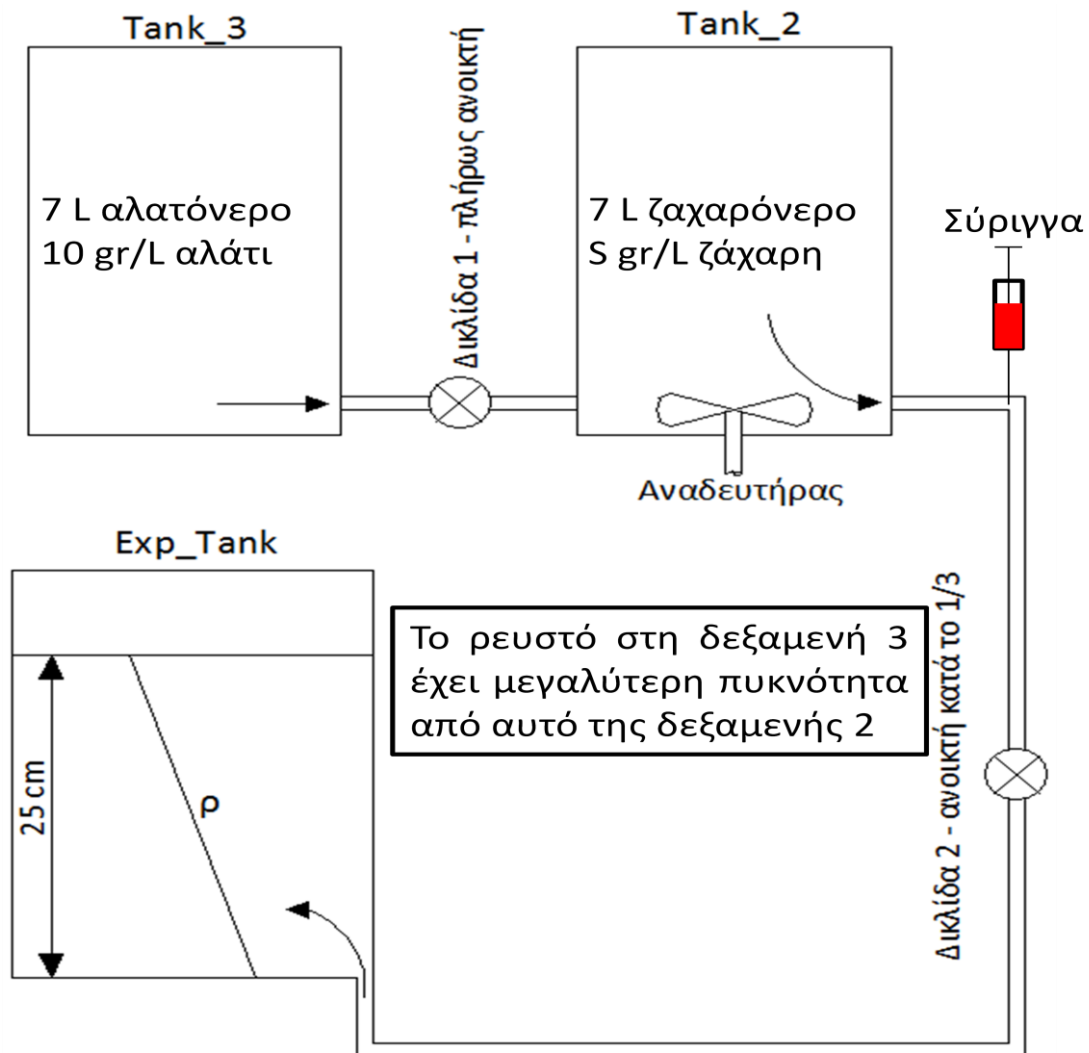
- i. Σε κάθε σημείο της δεξαμενής δημιουργούνται βαροκλινικές αστάθειες, αφού σε κάθε σημείο συνυπάρχουν δύο παράγοντες με διαφορετική ταχύτητα μοριακής διάχυσης (αλάτι – ζάχαρη). Οι παραπάνω αστάθειες που εμφανίζονται με τη μορφή των Salt Fingers αναπτύσσονται μόνο κατά τη διεύθυνση του βάθους. Με σκοπό την οπτικοποίηση αυτού του φαινομένου, *τοποθετήθηκαν οριζόντιες στρώσεις μείγματος που περιείχαν ροδαμίνη*. Λόγω των κατακόρυφων κινήσεων, οι στρώσεις αυτές διαταράσσονται με αποτέλεσμα την οπτικοποίηση του φαινομένου. Καθώς η ροδαμίνη συμπαρασύρεται από τις αναπτυσσόμενες κινήσεις μπορούμε να παρατηρήσουμε τι συμβαίνει μέσα στο σύνθετο αυτό στρώμα (βλ. Σχήμα 5.2).
- ii. Για μικρές διαφορές πυκνότητας των διαλυμάτων των δύο δεξαμενών, δηλαδή για προφίλ γραμμικής πυκνομετρικής στρωμάτωσης με μικρή κλίση, το φαινόμενο εξελίσσεται με γρήγορο ρυθμό. Ακόμα και κατά τη διάρκεια της στρωμάτωσης, τα οριζόντια στρώματα ροδαμίνης παρουσιάζουν Salt Fingers.
- iii. Η στρωμάτωση διαρκούσε 75 min κατά μέσο όρο, σε αντίθεση με τα πειράματα του τύπου 2 όπου η στρωμάτωση διαρκούσε 25 min. Σε δοκιμαστικά πειράματα, μετρήθηκαν τα προφίλ πυκνότητας (προερχόμενα από διαδικασία στρωμάτωσης μεγάλης διάρκειας) και τελικά προέκυψε ότι η γραμμικότητα του προφίλ είναι δεδομένη ανεξάρτητα με το ρυθμό προσθήκης υγρού στη δεξαμενή στρωμάτωσης, όταν εφαρμόζεται η τεχνική των Oster & Yamamoto (1963).
- iv. Επειδή το φαινόμενο αναπτύσσεται με το που τα δύο διαλύματα έρχονται σε επαφή, δεν ήταν δυνατόν να μετρήσουμε το προφίλ πυκνότητας. Η χρήση πιπέτας για λήψη δείγματος από τη δεξαμενή θα διατάρασσε τις δομές των Fingers με αποτέλεσμα την μερική αποτυχία του πειράματος. Βέβαια, η γραμμικότητα είναι δεδομένη (από την επισήμανση ii), αλλά καλό θα ήταν να αποτυπώναμε την κατανομή πυκνότητας με μέτρησή της.



Σχήμα 5.2 Οπτικοποίηση με οριζόντιες στρώσεις ροδαμίνης και επακόλουθη διατάραξη τους

5.4 Πυκνομετρική στρωμάτωση και κατανομές συγκεντρώσεων εντός της πειραματικής δεξαμενής των πειραμάτων τρίτου τύπου

Η διάταξη για τη δημιουργία της γραμμικής πυκνομετρικής στρωμάτωσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.3. Η τεχνική και η φιλοσοφία της στρωμάτωσης είναι ακριβώς ίδια με αυτή που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4.3, δηλαδή η τεχνική των Oster & Yamamoto (1963).



Σχήμα 5.3 Τεχνική γραμμικής στρωμάτωσης της δεξαμενής με μείγμα αλατόνευρο και ζαχαρόνευρο.

Η διαδικασία- στρωμάτωσης παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 5.2 – Βήμα (5). Το ρευστό της δεξαμενής 2 θα εισέλθει πρώτα στην δεξαμενή πειραμάτων Exp_Tank, ενώ στη δεξαμενή 2 εισρέει συνεχώς βαρύτερο ρευστό. Κατ' αυτόν τον τρόπο το βαρύτερο συνεχώς υγρό που προστίθεται στη δεξαμενή παραμένει στο επίπεδο του πυθμένα ενώ το υπερκείμενο ελαφρύτερο μετακινείται κατακόρυφα σαν ακίνητη στήλη προς τα πάνω χωρίς να αναμειγνύεται.

Απλοποιήσεις και παρατηρήσεις για το τελικό προφίλ πυκνότητας και για τις κατανομές συγκεντρώσεων των δύο παραγόντων διαφορετικών ταχυτήτων μοριακής διάχυσης (αλάτι – ζάχαρη):

- i. Απλοποίηση και παραδοχή της κατανομής συγκεντρώσεων. Θεωρούμε ότι η συγκέντρωση αλατότητας αυξάνεται από το μηδέν στην επιφάνεια έως τα 10 gr/L στον πυθμένα και η συγκέντρωση ζάχαρης μειώνεται από τα 5 gr/L (αναλόγως του πειράματος) στην επιφάνεια έως το μηδέν στον πυθμένα. Αυτό ισχύει ικανοποιητικά, δεδομένου ότι στην επιφάνεια υπάρχει ρευστό από την δεξαμενή 2 (πριν αυτό αναδευτεί με ποσότητες της δεξαμενής 3) και στον πυθμένα υπάρχει κυρίως ρευστό από την δεξαμενή 3. Ο τελευταίος ισχυρισμός αποτελεί μια αρκετά αδρή προσέγγιση, αφού στον πυθμένα γνωρίζουμε ότι συνυπάρχουν τα δύο διαλύματα (άλλωστε το φαινόμενο αναπτύσσεται στον πυθμένα, έστω και νωθρά).
- ii. Στα όρια της δεξαμενής (επιφάνεια και πυθμένας), το προφίλ πυκνότητας είναι κατακόρυφο γιατί σε αντίθετη περίπτωση η κλίση της κατανομής πυκνότητας θα οδηγούσε σε ανύπαρκτη ροή. Από τα πειράματα του 2^{ου} τύπου, παρατηρήσαμε από τις μετρήσεις με τα όργανα ότι αυτή η φυσική συνθήκη επαληθεύεται. Μάλιστα, από την παρατήρηση αυτών των πυκνομετρικών προφίλ, είναι φανερό ότι η περιοχή ομοιόμορφης πυκνότητας (κατακόρυφο τμήμα) είναι στα 2.5 cm από τα όρια.

Η γραμμικότητα των κατανομών είναι βέβαιη, δεδομένης της πιστής εφαρμογής της τεχνικής στρωμάτωσης. Βέβαια, στην παρούσα εργασία αντί των παραπάνω παραδοχών/απλοποιήσεων θα ήταν προτιμότερη η μέτρηση συγκέντρωσης του αλατιού καθ' ύψος της δεξαμενής με αγωγιμόμετρο για την επαλήθευση των κατανομών.

Βασιζόμενοι στην παρατήρηση (ii) και εφαρμόζοντας τη σχέση (4.6) των Oster & Yamamoto προκύπτει ο πίνακας 5.1.

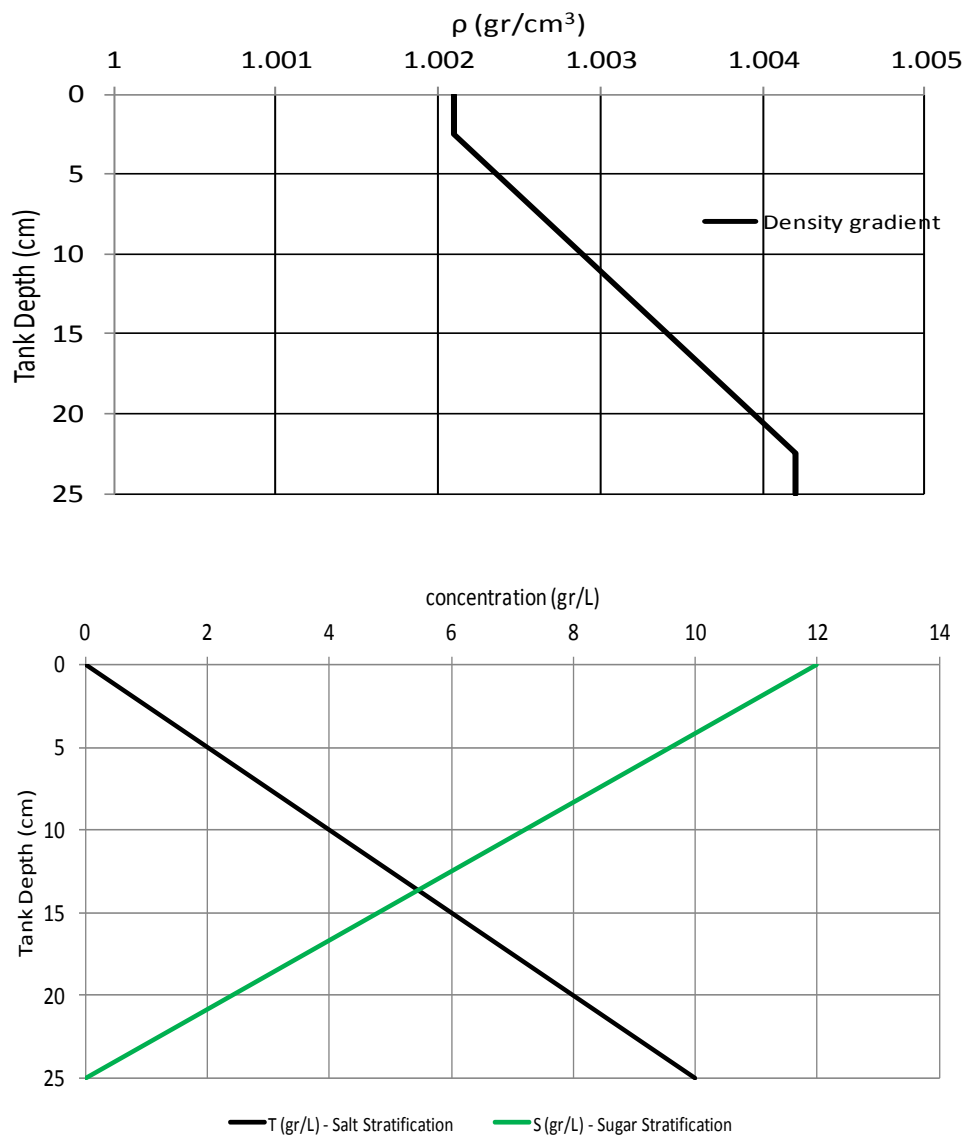
Πίνακας 5.1 Υπολογισμός πυκνομετρικής κατανομής των πειραμάτων

ρ (gr/cm ³)				
	EXP_iii_1	EXP_iii_2	EXP_iii_3	EXP_iii_4
ρ^0	1.0020	1.0033	1.0010	1.0026
$\rho^{2.5}$	1.0023	1.0035	1.0013	1.0028
$\rho^{22.5}$	1.0041	1.0044	1.0036	1.0041
ρ^{25}	1.0043	1.0045	1.0039	1.0043
ρ_{surface}	1.0021	1.0034	1.0012	1.0027
ρ_{Bottom}	1.0042	1.0045	1.0037	1.0042
N (s ⁻¹)	0.318	0.227	0.353	0.276

Όπου ρ^0 η πυκνότητα στην επιφάνεια της δεξαμενής διάχυσης, $\rho^{2.5}$ η πυκνότητα σε βάθος 2.5 cm στη δεξαμενή διάχυσης, $\rho^{22.5}$ η πυκνότητα σε βάθος 22.5 cm και ρ^{25} η πυκνότητα

στον πυθμένα της δεξαμενής. Οι παραπάνω πυκνότητες προκύπτουν με απλή εφαρμογή της σχέσης (4.6) και των αντίστοιχων θεωρήσεων του Κεφαλαίου 4.3. Με δεδομένη την παρατήρηση (ii), η πυκνότητα του άνω επιφανειακού στρώματος 2.5 cm προκύπτει ως μέσος όρος των ρ^0 και $\rho^{2.5}$ και η πυκνότητα του κάτω πυθμενικού στρώματος 2.5 cm προκύπτει ως μέσος όρος των $\rho^{22.5}$ και ρ^{25} . Μεταξύ των δύο οριακών στρώσεων ομοιόμορφης πυκνότητας, το πυκνομετρικό προφίλ κατανέμεται γραμμικά.

Παρακάτω, δίνονται ένα τυπικό προφίλ πυκνότητας και ένα διάγραμμα κατανομής συγκεντρώσεων εντός της πειραματικής δεξαμενής/ δεξαμενή διάχυσης (βλ. Σχήμα 5.4).



Σχήμα 5.4 Κατανομή πυκνότητας στη δεξαμενή (πάνω) και κατανομές συγκεντρώσεων αλατιού και ζάχαρης καθ' ύψος (κάτω).

5.5 Συγκεντρωτικά στοιχεία εκτελεσθέντων πειραμάτων

Παρακάτω παρουσιάζονται υπό μορφή πινάκων (πίνακας 5.2) τα 5 πειράματα που εκτελέστηκαν και οι αρχικές συνθήκες του συστήματος. Η κωδικοποίηση των πειραμάτων γίνεται με: EXP_τύπος πειράματος_αριθμός εκτελεσθέντος πειράματος / όπου τύπος πειράματος = iii.

Πίνακας 5.2 Αρχικές συνθήκες των πειραμάτων τρίτου τύπου (Μέρος 1)

Date	Experiment	Tank_3				Tank_2			
		T (gr/L)	θ ($^{\circ}$ C)	Hydrometer Indication (gr/cm ³)	ρ_T (gr/cm ³) Ruddick&Shirtcliffe	S (gr/L)	θ ($^{\circ}$ C)	Hydrometer Indication (gr/cm ³)	ρ_S (gr/cm ³) Ruddick&Shirtcliffe
19/5/2012	EXP_iii_1	10	20.4	1.0065	1.0052	10	20.4	1.0035	1.0020
20/5/2012	EXP_iii_2	10	21.5	1.0065	1.0050	14	21.5	1.0055	1.0033
21/5/2012	EXP_iii_3	10	21.4	1.007	1.0050	8	21.4	1.003	1.0010
22/5/2012	EXP_iii_4	10	21.4	1.0065	1.0050	12	21.4	1.004	1.0026
27/5/2012	EXP_iii_5	10	21.5	1.0065	1.0050	6	21.5	1.002	1.0002

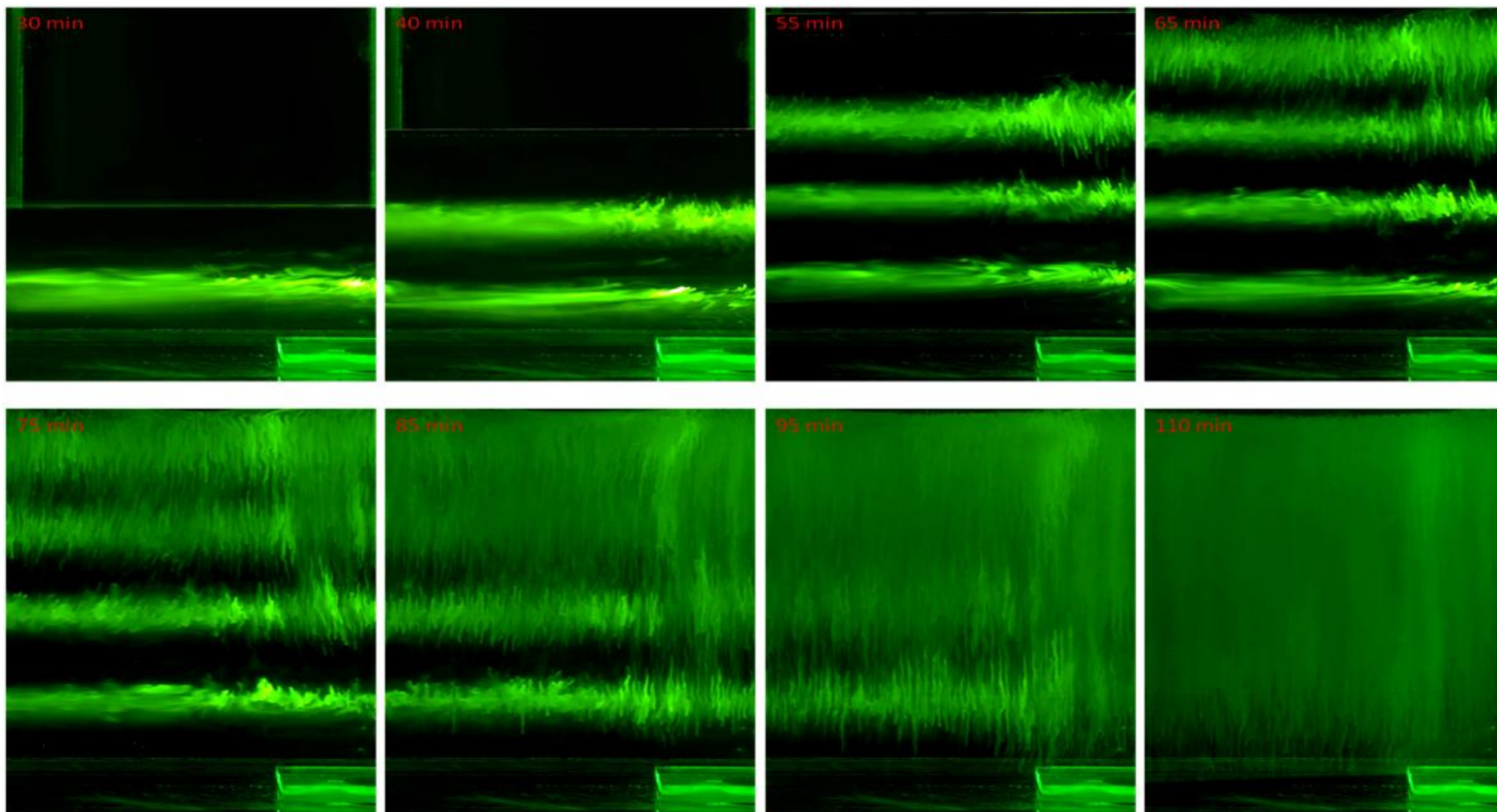
84

Πίνακας 5.2 Αρχικές συνθήκες των πειραμάτων τρίτου τύπου (Μέρος 2)

Exp_tank			
Experiment	Duration of Stratification process (min)	Duration until total mixing of Exp_Tank (min)	N (s ⁻¹)
EXP_iii_1	85	160	0.318
EXP_iii_2	80	100	0.227
EXP_iii_3	75	320	0.353
EXP_iii_4	60	100	0.276
EXP_iii_5	60	STABLE STRATIFICATION - NO FINGERS	-

T είναι η συγκέντρωση αλατιού, S η συγκέντρωση ζάχαρης, θ η θερμοκρασία του ρευστού, ρ_T η πυκνότητα του διαλύματος αλατόνευρου, ρ_S η πυκνότητα διαλύματος ζαχαρόνευρου, N η συχνότητα Brunt – Vaisala.

5.6 Εξέλιξη φαινομένου σε ένα τυπικό πείραμα



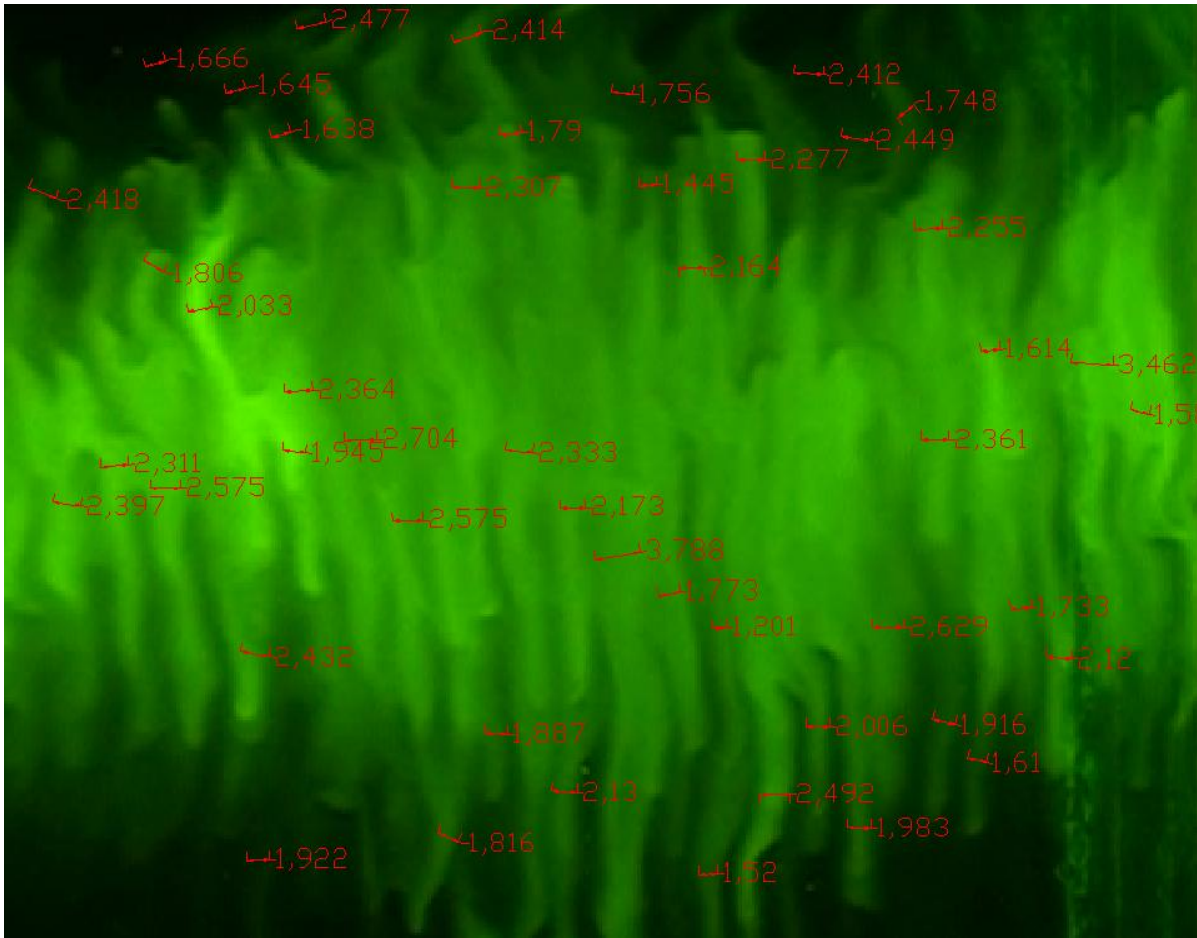
85

Σχήμα 5.5 Εξέλιξη τυπικού πειράματος

5.7 Επεξεργασία βιντεοσκοπημένου υλικού

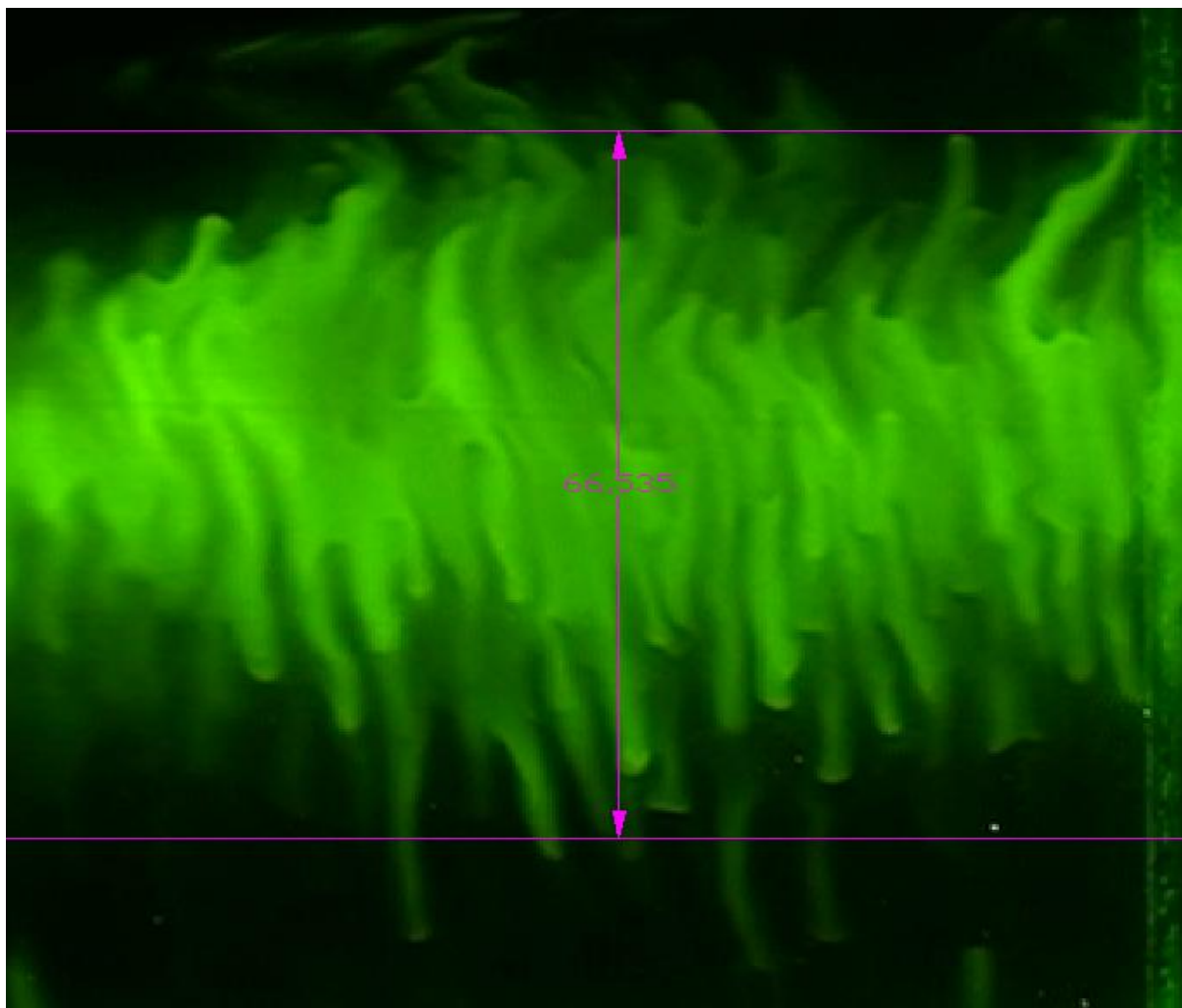
Ακολουθώντας τα επτά βήματα του Κεφαλαίου 5.2 και επαναλαμβάνοντάς τα, αλλάζοντας μόνο τα επιλεγμένα στοιχεία, προέκυψαν τα πειράματα που παρουσιάστηκαν στους συγκεντρωτικούς πίνακες και ένας όγκος βιντεοσκοπημένου υλικού. Τα βήματα που ακολουθήθηκαν κατά το πέρας των πειραμάτων με σκοπό την επεξεργασία των βίντεο, έχουν ως εξής:

- (1) Η κάθε στρώση ροδαμίνης σε κάθε πείραμα, παρακολουθείται ξεχωριστά. Δηλαδή, η κάθε στρώση αποκόπτεται από τα βίντεο και αναλύεται αγνοώντας τις υπόλοιπες. Βέβαια, η ανάλυση της κάθε στρώσης σταματάει εκεί όπου οι διαταραχές της ενώνονται με τις διαταραχές των γειτονικών στρώσεων.
- (2) Ορίζεται το συμβατικό μηδέν της κάθε στρώσης. Δεν πρέπει να αμελούμε το γεγονός ότι οι στρώσεις του μείγματος με ροδαμίνη εισέρχονται ασύγχρονα στη δεξαμενή και ότι το φαινόμενο εκκινεί από την στιγμή όπου τα δύο διαλύματα έρθουν σε επαφή. Άρα, το συμβατικό μηδέν ορίζεται για κάθε στρώση ως 10 min αφότου η στρώση έχει εισέλθει στη δεξαμενή. Αφήνουμε να περάσουν 10 min, με σκοπό η στρώση ροδαμίνης να φτάσει σε κάποιο ύψος και να μην επηρεάζεται από το εισερχόμενο ρευστό (παρασιτικά φαινόμενα). Με αυτόν τον τρόπο, η ανάλυση κάθε στρώσης ανάγεται σε μία κοινή βάση αναφοράς και επομένως στοιχεία που προκύπτουν θα μπορούν να τοποθετηθούν σε κοινό διάγραμμα με κοινό μηδέν.
- (3) Έπειτα από το συμβατικό μηδέν του βίντεο, για κάθε στρώση χωριστά, λαμβάνονται στιγμιότυπα ανά 5 min.
- (4) Τα στιγμιότυπα (frames) για κάθε στρώση τοποθετούνται στο AutoCAD. Για να μην επηρεάζεται το φαινόμενο από τις κινήσεις που δημιουργούνται κατά το γέμισμα της δεξαμενής, αποφασίσθηκε να αναλυθεί η περιοχή από το δεξιό τοίχωμα της δεξαμενής μέχρι και 6 cm προς το εσωτερικό. Παρατηρήσαμε ουσιαστικά ότι σε αυτή την περιοχή τα Fingers εκκινούσαν πιο γρήγορα, επειδή δεν επηρεαζόταν από το γέμισμα της δεξαμενής. Στην περιοχή αυτή μετρήθηκαν ανά στιγμιότυπο το μέσο πλάτος των Salt Fingers (L) και το πάχος της στρώσης ροδαμίνης (h).
 - i. Μέσο πλάτος των Salt Fingers (L): Ουσιαστικά στο παρατηρούμενο παράθυρο λήψης του φαινομένου, υπάρχουν εκατοντάδες Fingers. Το μέσο πλάτος προκύπτει μετρώντας πολλά πλάτη ανά στιγμιότυπο και στρώση και εξαγοντας απλά τη μέση τιμή. Η αντιπροσωπευτικότητα της τιμής εξασφαλίζεται από την πυκνότητα των μετρούμενων μεγεθών (βλ. Σχήμα 5.6). Αυτή η διαδικασία ακολουθήθηκε ανά στιγμιότυπο, ανά στρώση και ανά πείραμα και τελικά προέκυψαν διαγράμματα εξέλιξης του (L) συναρτήσει του χρόνου (t).



Σχήμα 5.6 Υπολογισμός μέσου πλάτους Salt Fingers (L)

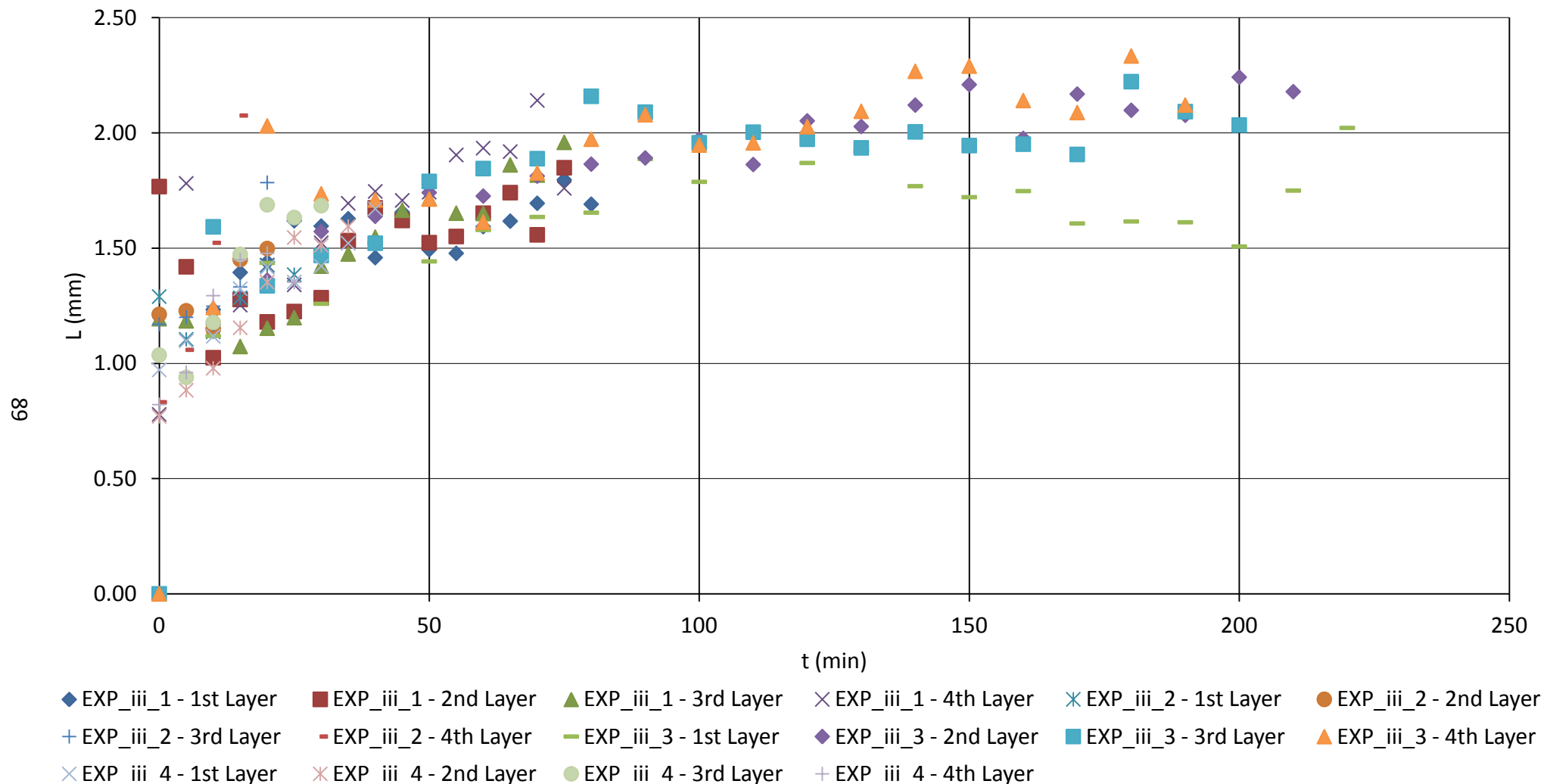
- ii. Πάχος στρώσης ροδαμίνης (h): Ορίζεται ως το κατακόρυφο μήκος εντός του οποίου αναπτύσσονται τα Salt Fingers της στρώσης (βλ. Σχήμα 5.7). Αυτή η διαδικασία ακολουθήθηκε ανά στιγμιότυπο, ανά στρώση και ανά πείραμα και προέκυψαν τελικά διαγράμματα εξέλιξης του *τροποποιημένου πάχους* (Δh) συναρτήσεως του χρόνου (t). Από τις παραπάνω τιμές για την εξαγωγή των διαγραμμάτων αφαιρέθηκε από όλες τις τιμές το αρχικό πάχος της στρώσης. Κατ' αυτόν τον τρόπο προκύπτει το *τροποποιημένο πάχος*. Θεωρήθηκε δηλαδή ότι η στρώση τη χρονική στιγμή 0 min έχει μηδενικό πάχος. Αυτό έγινε αφενός γιατί το αρχικό πάχος δεν ρυθμίζεται ως παράμετρος και αφετέρου γιατί μας ενδιαφέρει το h να έχει μια κοινή βάση αναφοράς για όλες τις στρώσεις και όλα τα πειράματα. Δηλαδή με αυτήν τη ρύθμιση / τροποποίηση όλες οι στρώσεις τη χρονική στιγμή μηδέν έχουν ίδιο πάχος και από εκεί και πέρα παρατηρούμε πώς αυτό εξελίσσεται.
- iii. Σύνδεση μετρημένων μεγεθών AutoCAD με τα πραγματικά μεγέθη. Με τη εισαγωγή χάρακα στο παράθυρο λήψης της κάμερας και πιο συγκεκριμένα στο επίπεδο παρακολούθησης, γίνεται σύνδεση του 1 cm με τις μονάδες που δίνει το AutoCAD (διαδικασία γνωστή από Κεφάλαιο 3).



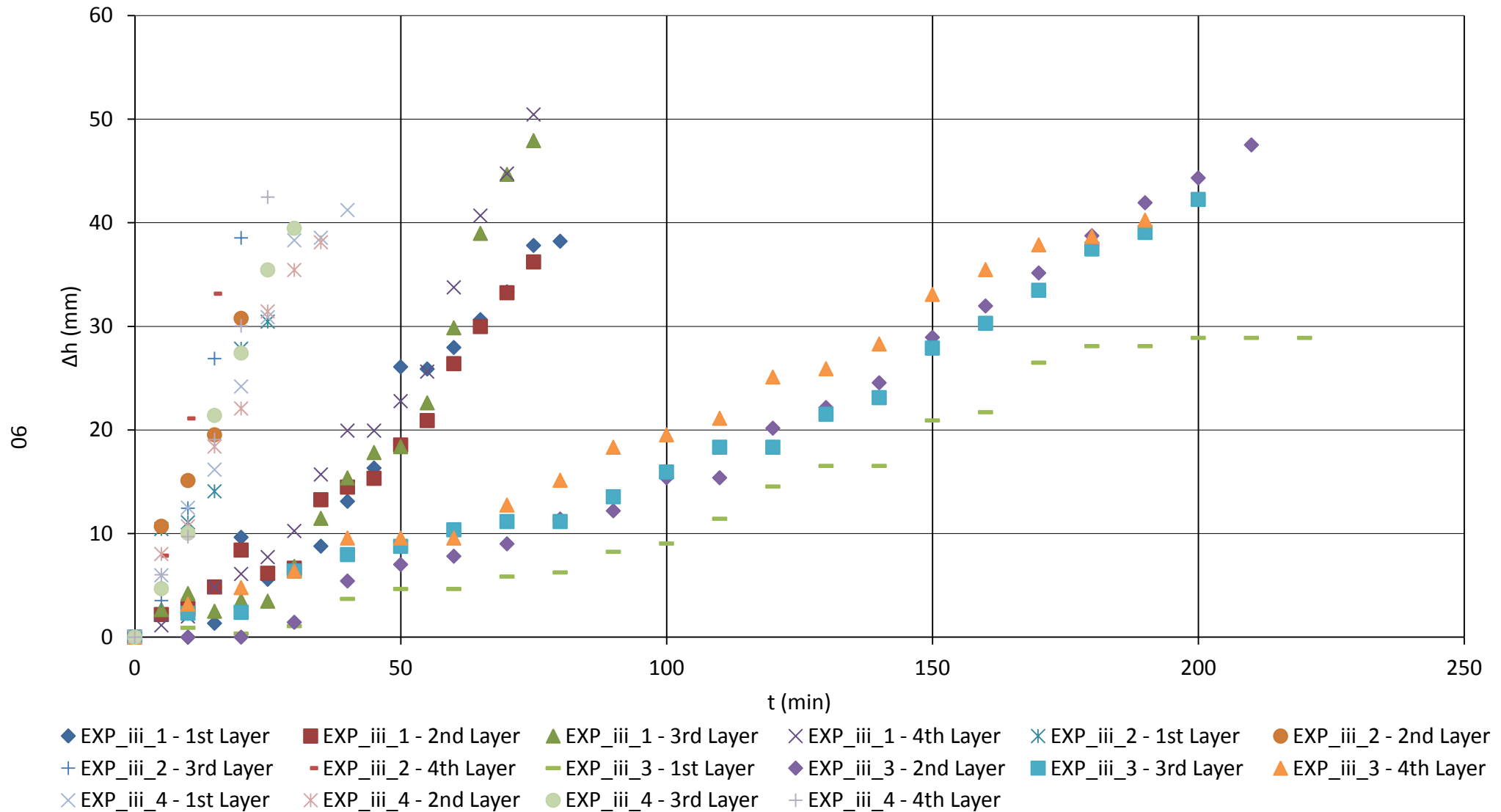
Σχήμα 5.7 Υπολογισμός πάχους στρώσης ροδαμίνης

Από την ανάλυση των εικόνων προέκυψαν τα συγκεντρωτικά διαγράμματα του Κεφαλαίου 5.8, τα οποία περιγράφουν την εξέλιξη των γραμμικών χαρακτηριστικών των Fingers συναρτήσει του χρόνου και τις μεταξύ τους συσχετίσεις.

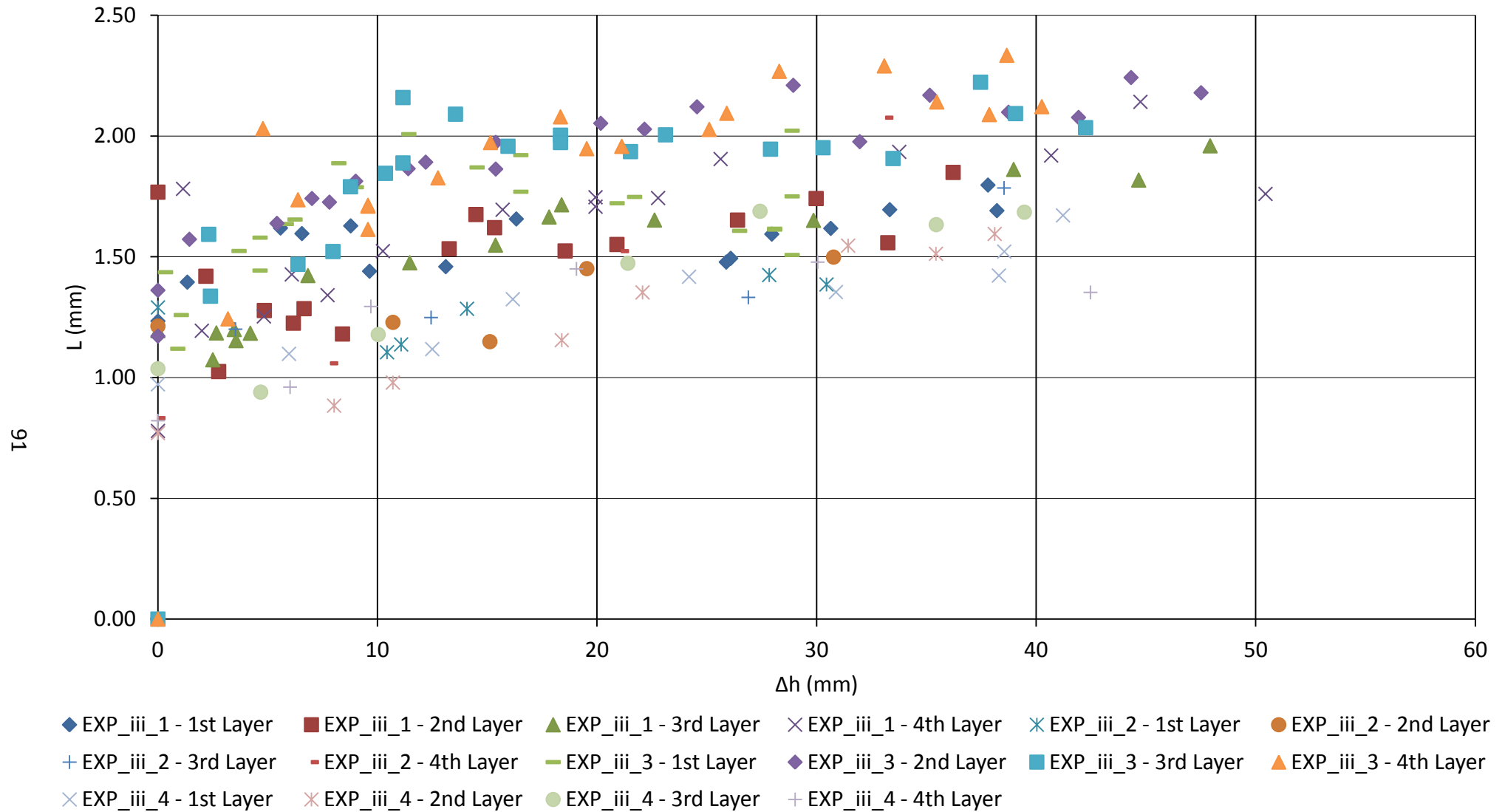
5.8 Συγκεντρωτικά γραφήματα από την επεξεργασία του βιντεοσκοπημένου υλικού



Σχήμα 5.8 Εξέλιξη μέσου πλάτους των Salt Fingers (L) συναρτήσει του χρόνου (t) / Όλες οι στρώσεις



Σχήμα 5.9 Εξέλιξη πάχους στρώσης (Δh) συναρτήσει του χρόνου (t) / Όλες οι στρώσεις (Δh : προκύπτει με αφαίρεση του αρχικού πάχους)

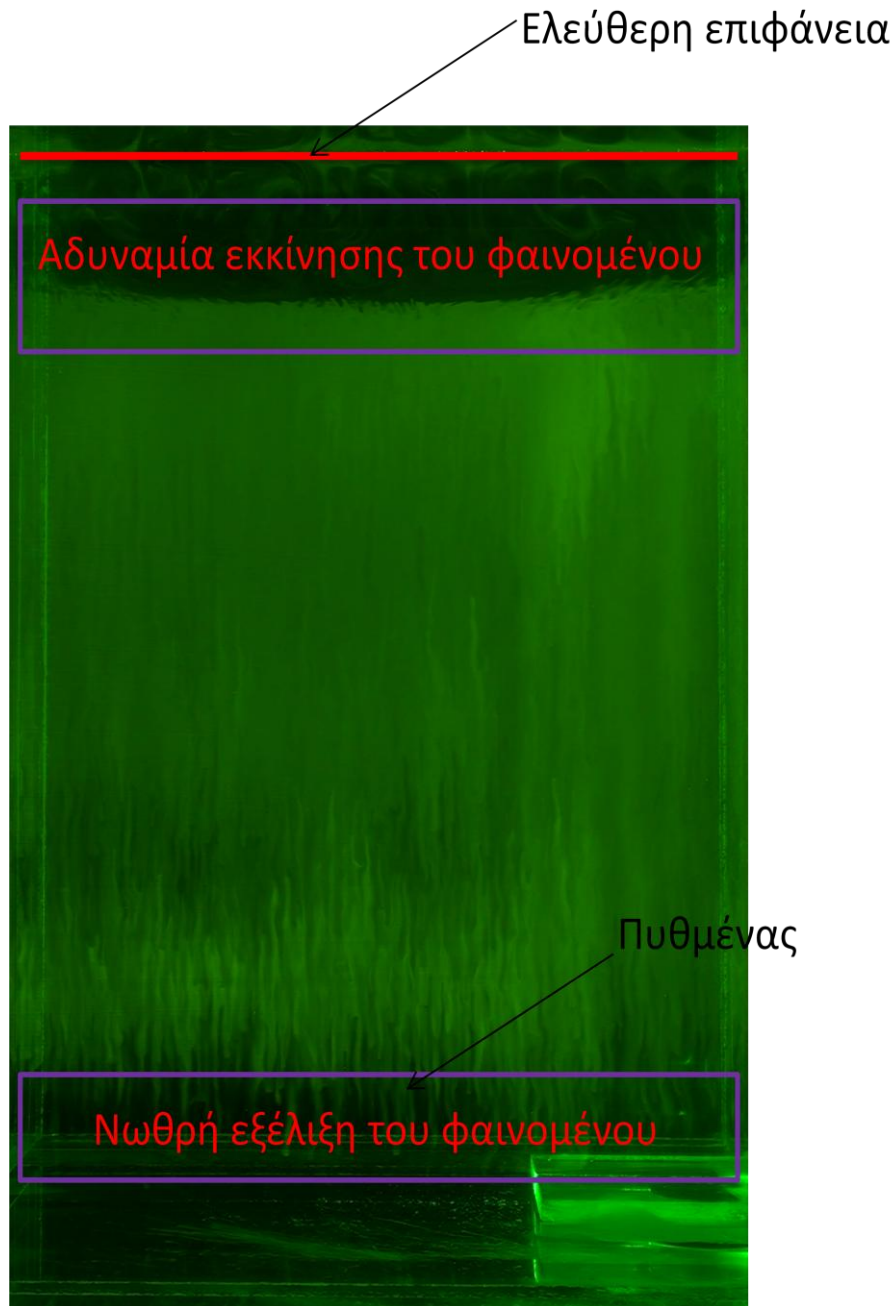


Σχήμα 5.10 Συσχέτιση πάχους στρώσης ροδαμίνης (Δh) με το μέσο πάχος των Salt Fingers (L) / Όλες οι στρώσεις

5.9 Συμπεράσματα

Από την παρατήρηση των πειραμάτων και των παραπάνω διαγραμμάτων προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- i. Σχήμα 5.8 / $L(t)$: Η ποιοτική και ποσοτική εξέλιξη του πάχους των Fingers είναι κοινή σε όλα τα πειράματα αλλά και σε όλες τις στρώσεις. Ειδικότερα, το πάχος αυξάνεται συνεχώς με την πάροδο του χρόνου με όλο και μειούμενο ρυθμό.
- ii. Σχήμα 5.9 / $\Delta h(t)$: Όσο πιο μεγάλη είναι η κλίση της γραμμικής πυκνομετρικής στρωμάτωσης τόσο πιο ευσταθής είναι ο αποδέκτης. Σε αυτή την περίπτωση, το φαινόμενο των Salt Fingers αργεί να εκκινήσει. Αυτό είναι λογικό δεδομένου ότι οι κινήσεις σε μοριακό επίπεδο θα απαιτήσουν μεγαλύτερο χρόνο, ώστε να μεταφερθούν ποσότητες μορίων ικανές να προκαλέσουν την αποσταθεροποίηση του συστήματος. Άλλωστε οι ποσότητες μορίων αλατιού και ζάχαρης που πρέπει να αναδιαταχθούν είναι μεγαλύτερες σε σχέση με έναν αποδέκτη ο οποίος έχει μικρή κλίση γραμμικής πυκνομετρικής στρωμάτωσης. Σε αυτή την περίπτωση το σύστημα μεταπίπτει σε ασταθή κατάσταση πολύ πιο γρήγορα, μιας που και οι μικρές μοριακές αναδιατάξεις είναι ικανές να προκαλέσουν βαροκλινικές αστάθειες. Η παραπάνω λογική είναι με μεγάλη σαφήνεια διατυπωμένη στο διάγραμμα $\Delta h(t)$, στο οποίο οι ευσταθείς αποδέκτες παρουσιάζουν μικρότερη κλίση εξέλιξης του φαινομένου από ότι οι λιγότερο ευσταθείς.
- iii. Σχήμα 5.10 / $L(\Delta h)$: Δεδομένης της μονοτονικής αύξησης των δύο μεγεθών με τον χρόνο, είναι λογική η ύπαρξη σχέσης μεταξύ τους. Από τα διαγράμματα, διαφαίνεται μια εκθετική σχέση ($Y = a X^b$) να συνδέει το πάχος της στρώσης ροδαμίνης με το πλάτος των Salt Fingers.
- iv. Παρατηρώντας την πειραματική δεξαμενή, στις περιοχές του πυθμένα αλλά πολύ πιο έντονα στην περιοχή της ελεύθερης επιφάνειας, το φαινόμενο των Salt Fingers δεν εξελίσσεται. Μια τέτοια συμπεριφορά είναι απολύτως φυσιολογική μιας που στα όρια της δεξαμενής δεν συνυπάρχουν τα δύο διαλύματα (εξαιτίας της μεθόδου στρωμάτωσης). Επομένως εκεί όπου υπάρχει μόνο το ένα διάλυμα το φαινόμενο είναι φυσικά αδύνατο να εξελιχθεί. Στον πυθμένα υπάρχει έστω και μια μικρή ποσότητα διαλύματος ζαχαρόνευ, γι' αυτό και εκκινούν τα Fingers, αλλά στην περιοχή της επιφάνειας είναι δεδομένη η απουσία αλατόνευ, με επακόλουθη την μη εκκίνηση του φαινομένου (βλ. Σχήμα 5.11).



Σχήμα 5.11 Όρια δεξαμενής και εξέλιξη φαινομένου

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

6.1 Συμπεράσματα και προβληματισμοί

Μέσα από τους τρεις διαφορετικούς τύπους πειραμάτων κατανοήθηκε σε μεγάλο βαθμό η εξέλιξη του φαινομένου της διπλής διάχυσης. Στον πρώτο τύπο πειραμάτων το φαινόμενο εξελίσσεται σε σύστημα δύο στρώσεων όπου η ανώτερη (ελαφρύτερη) στρώση είναι διάλυμα ζαχαρόνευ και η κατώτερη (βαρύτερη) στρώση διάλυμα αλατόνευ. Στο δεύτερο τύπο πειραμάτων το φαινόμενο εξελίσσεται με την διάχυση διαλύματος μιας ουσίας σε περιβάλλον γραμμικής πυκνομετρικής στρωμάτωσης από διάλυμα άλλης ουσίας με διαφορετικό συντελεστή μοριακής διάχυσης. Στον τρίτο τύπο πειραμάτων μελετήθηκε το φαινόμενο της διπλής διάχυσης σε υγρό με γραμμική πυκνομετρική στρωμάτωση, που προέκυψε από την ανάμειξη διαλυμάτων με διαφορετικούς συντελεστές μοριακής διάχυσης (ζαχαρόνευ και αλατόνευ).

Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται συγκεντρωτικά συμπεράσματα, επισημάνσεις για περαιτέρω έρευνα και προβληματισμοί ανά τύπο πειράματος.

(α) Πειράματα 1^{ου} τύπου: Δύο στρώσεις υγρών με διαφορετική πυκνότητα

- i. Όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνομετρική διαφορά των δύο στρώσεων τόσο πιο αργά εξελίσσεται το φαινόμενο. Αντίθετα, όσο οι πυκνότητες των δύο στρώσεων πλησιάζουν, το φαινόμενο εκκινεί ταχύτερα (εντός ολίγων δευτερολέπτων). Από τη σειρά πειραμάτων προέκυψαν τα όρια εμφάνισης του φαινομένου. Το άνω όριο είναι το σημείο στο οποίο οι πυκνότητες των στρώσεων είναι περίπου ίδιες και το σύστημα είναι οριακά ευσταθές και το κάτω όριο είναι για πυκνομετρική διαφορά των δύο στρώσεων περίπου 5 gr/L στην οποία τα Salt Fingers αδυνατούν να εκκινήσουν (για παρατήρηση 180 min).
- ii. Με την πρόοδο των κατακόρυφων ροών στα αρχικά στάδια εξέλιξης του φαινομένου δημιουργείται έντονο διατμητικό πεδίο τάσεων, το οποίο αναχαιτίζει την εξέλιξη των Fingers και αλλοιώνει τις δομές τους. Όσο όμως οι βαροκλινικές αστάθειες εξουδετερώνονται (λόγω του ότι οι ροές έχουν μεταφέρει ποσότητες διαλυμάτων από τη μία στρώση στην άλλη), τα Fingers ανακάμπτουν και εξελίσσονται χωρίς εμπόδια.
- iii. Μια μέση τιμή του πάχους των Fingers, η οποία διατηρείται περίπου σταθερή κατά την διάρκεια εξέλιξης του φαινομένου είναι το 1 mm ή και ελάχιστα λιγότερο. Ενώ η περιοχή εντός της οποίας εξελίσσονται (κατακόρυφα) οι δομές είναι περί τα 2 cm.
- iv. Εκτός από την περιοχή ανάπτυξης των Salt Fingers, η οποία είναι γύρω από την αρχική διαχωριστική επιφάνεια, εμφανίζονται αρκετά Salt Fingers να φεύγουν έκτος ορίων του h και να φτάνουν με μεγάλη ταχύτητα στα όρια της δεξαμενής (επιφάνεια και πυθμένα). Με άλλα λόγια, υπάρχουν έντονες ροές και εκτός της καθορισμένης περιοχής του h , αλλά δεν μπορούν να καθοριστούν με την εφαρμοζόμενη μέθοδο

της παρούσας διπλωματικής, γιατί είναι λίγες σε σχέση με τις εμφανιζόμενες ροές περί την διαχωριστική επιφάνεια των δύο ρευστών (εκτός μέσου όρου). Επίσης δεν είναι μόνιμο φαινόμενο, δηλαδή σε αρχικά στάδια εξέλιξης έχουν επαναληψιμότητα αλλά όπως είναι λογικό σε μετέπειτα στάδια σχεδόν εξαλείφονται. Ουσιαστικά, αυτές είναι υπεύθυνες για τις ογκώδεις μεταφορές υγρών ποσοτήτων και για την μετατροπή του συστήματος σε περισσότερο ευσταθές. Με την παρούσα όμως μέθοδο παρατήρησης του φαινομένου εξετάζουμε τι συμβαίνει περί την διαχωριστική επιφάνεια, αδυνατώντας να μελετήσουμε διεξοδικά τις προαναφερόμενες ροές. Η λύση για την βέλτιστη παρακολούθηση του φαινομένου παρουσιάζεται στο υποκεφάλαιο των προτάσεων. Στη σειρά αυτή των πειραμάτων αν και μελετήθηκαν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δακτύλων, μένει να μελετηθεί διεξοδικά η μεταβολή του πεδίου συγκεντρώσεων και η χρονική εξέλιξη των πυκνοτήτων των δύο στρώσεων.

(β) Πειράματα 2^{ου} τύπου: Διάχυση διαλύματος ουσίας σε γραμμικά πυκνομετρική στρωμάτωση ουσίας με διαφορετικό συντελεστή μοριακής διάχυσης

- i. Μία μέση τιμή του πάχους των Fingers είναι περί τα 2 mm με μικρή μεταβλητότητα καθ' όλη την διάρκεια εξέλιξης του φαινομένου. Αξίζει να παρατηρηθεί η διαφορά με το σύστημα των δύο στρώσεων. Από την άλλη, το μήκος των Fingers μεταβάλλεται έντονα από μηδέν στην αρχή σε μηδέν (εξαφάνιση) στο τέλος του φαινομένου και με μέγιστη μέση τιμή τα 6.5 mm.
- ii. Το φαινόμενο της διπλής διάχυσης είναι ίδιο ποιοτικά και ποσοτικά για όλα τα πειράματα αυτού του τύπου. Αναλυτικότερα, η πιο διεξοδική μελέτη μιας μόνο περίπτωσης (από τις 13 που εξετάστηκαν), καλύπτει όλα τα υπόλοιπα πειράματα.
- iii. Είναι πολύ σημαντικό να προσδιορισθεί το πόσο συνεισφέρει ο συγκεκριμένος μηχανισμός στην ανάμιξη του πεδίου αποβλήτων. Ουσιαστικά, μετά την ανάμειξη/απόθεση υπό μορφή τυρβώδους φλέβας, τα Salt Fingers αποτελούν τον δεύτερο κατά σειρά μηχανισμό αραίωσης. Κρίνεται λοιπόν επιτακτικός ο προσδιορισμός της σημασίας του φαινομένου σε σχέση με τον πρώτο μηχανισμό αραίωσης.

(γ) Πειράματα 3^{ου} τύπου: Πυκνομετρική στρωμάτωση με δύο διαλύματα με διαφορετική πυκνότητα και συντελεστή μοριακής διάχυσης

- i. Από τα πέντε πειράματα που εκτελέστηκαν παρατηρήσαμε ότι το φαινόμενο έχει σαφή όρια εξέλιξης. Το πρώτο όριο είναι αυτό στο οποίο η στρωμάτωση έχει οριακή (μικρή) κλίση, δηλαδή η πυκνότητα του πυθμένα είναι περίπου ίδια με αυτή της επιφάνειας. Σε αυτή την περίπτωση το σύστημα είναι εξαρχής οριακά ευσταθές και επομένως τα Salt Fingers εκκινούν σε λίγα δευτερόλεπτα από την στιγμή της επαφής των δύο διαλυμάτων. Το δεύτερο όριο είναι για πυκνομετρική διαφορά των υπό ανάμειξη διαλυμάτων (διαφορά πυκνοτήτων δεξαμενών 2 και 3) 5 gr/L. Το δημιουργούμενο πεδίο είναι αρκετά ευσταθές και δύσκολα οι μοριακές

αναδιατάξεις το επηρεάζουν. Ενδιαφέρον έχει η σύγκριση αυτής της τιμής με το όριο του πειράματος πρώτου τύπου.

- ii. Μία μέση τιμή του πάχους των Fingers είναι τα 1.7 mm.
- iii. Στο τέλος του φαινομένου, παρατηρούμε ένα πεδίο συγκεντρώσεων ροδαμίνης πλήρως ομογενοποιημένο, όπου η συγκέντρωση φαίνεται να είναι παντού ίδια σε ολόκληρο το πεδίο. Δεν γνωρίζουμε όμως, κατά πόσο έχει ομογενοποιηθεί σε πρώτη φάση το προφίλ της πυκνότητας και σε δεύτερη φάση οι συγκεντρώσεις αλατόνευρου και ζαχαρόνευρου. Άρα, μπορεί η γεωμετρική παρακολούθηση και ανάλυση να δίνει μια πρώτη εντύπωση για το τι μπορεί να συμβεί στη συνύπαρξη τέτοιων διαλυμάτων, αλλά δεν λύνει όλους τους προβληματισμούς και τις βαθύτερες απορίες για την πραγματική σημασία του φαινομένου. Δεν παύει όμως να αποτελεί το πρώτο και απαραίτητο βήμα για την γνωριμία με το φαινόμενο.

6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Οι προβληματισμοί και τα κενά στην πιστή περιγραφή του φαινομένου με τη μέθοδο που εφαρμόσαμε στην παρούσα εργασία μπορούν να απαντηθούν με περαιτέρω έρευνα σε αυτόν τον νέο σχετικά για τους μηχανικούς επιστημονικό τομέα.

1. Μετρήσεις με αγωγιμόμετρο. Η χρήση αγωγιμόμετρου σε διαφορετικές θέσεις της δεξαμενής, μπορεί να αποκαλύψει τι συμβαίνει σε όλο το βάθος της δεξαμενής διάχυσης σχετικά με την κατανομή της αλατότητας. Οι ενδείξεις αγωγιμόμετρου δεν επηρεάζονται από την ύπαρξη ζαχαρόνευρου, μιας που η ζάχαρη δεν μεταβάλλει την αγωγιμότητα του ρευστού. Επίσης, η διατάραξη που προκαλεί το αγωγιμόμετρο στο υγρό της δεξαμενής είναι μικρή και αυτό βοηθάει στην παρατήρηση του πεδίου ακόμα και όταν το φαινόμενο βρίσκεται σε εξέλιξη.
2. Παρακολούθηση χρονικής εξέλιξης φαινομένου με εφαρμογή μεθόδου LIF (Laser-Induced Fluorescence) και σύνδεση της έντασης της ακτινοβολίας ροδαμίνης με τη συγκέντρωση του ενός συστατικού (αλάτι ή ζάχαρη).

Ο συνδυασμός της γεωμετρικής διερεύνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας με μετρήσεις συγκεντρώσεων, θα μπορεί να δώσει απάντηση σε αρκετά ερωτήματα που προέκυψαν από τη μέχρι σήμερα διερεύνηση του φαινομένου .

7. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

7.1 Βιβλία

- Κωτσοβίνος, Ν.Ε., Αγγελίδης, Π.Β., 2008, *Υδραυλική Περιβάλλοντος*, Τόμος 1, Εκδόσεις ΣΠΑΝΙΔΗ, Ξάνθη.
- Brandt, A., Fernando, H.J.S., 1994, *Double-Diffusive Convection*, AGU Geophysical Monograph 94, U.S.A..
- David R. Lide, ed., CRC Handbook of Chemistry and Physics, Internet Version 2007, (87th Edition), <<http://www.hbcnpnetbase.com>>, Taylor and Francis, Boca Raton, FL, 2007.
- Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J., Brooks, N.H., 1979, *Mixing in Inland and Coastal Waters*, Academic Press, United Kingdom Edition.

7.2 Άρθρα

- Chen, B., Luo, L., and Li, J., 2010, Salt-Fingering of pollutant vertical mixing in static thermal-stratified water, *Journal of Hydrodynamics*, 22(3), 430-437.
- Fischer, H.B., 1971, The Dilution of an undersea sewage cloud by Salt Fingers, *Water Research, Pergamon Press*, vol. 5, 909-915.
- Green, T. III, and Kirk, R.G., 1971, Descent Rates of Salt Fingers, *Nature Physical Science*, 232(9), 123-124.
- Heavers, R.M., and Colucci, L.A., 2009, Sugar Fingers and Double-Diffusive Convection, *Journal of Chemical Education*, 86(11), 1326-1329.
- Huppert, H.E., and Turner, J.S., 1981, Double-diffusive convection, *J. Fluid Mech.*, vol. 106, 299-329.
- Irani, R.R., Adamson, A.W., 1958, Transport processes in binary liquid systems. I. Diffusion in the sucrose-water system at 25 °C, *The Journal of Physical Chemistry*, 62(12), 1517-1521.
- Linden, P.F., 1973, On the structure of salt fingers, *Deep-Sea Research*, vol. 20, 325-340.
- Oster, G., Yamamoto, M., 1963, Density Gradient Techniques, *Chemical Reviews*, 63(3), 257-268.
- Pringle, E.S., Glass, R.J., Cooper, C.A., 2002, Double-Diffusive Finger Convection in a Hele-Shaw Cell: An Experiment Exploring the Evolution of Concentrations Fields, Length Scales and Mass Transfer, *Transport in Porous Media*, vol. 47, 195-214.

- Pringle, E.S., Glass, R.J., 2002, Double-diffusive finger convection: influence of concentration at fixed buoyancy ratio, *J. Fluid Mech.*, vol. 462, 161-183.
- Ruddick, B.R., Shirtcliffe, T.G.L., 1979, Data for double-diffusers: Physical Properties of aqueous salt-sugar solutions, *Deep-Sea Research*, vol. 26A, 775-787.
- Shirtcliffe, T.G.L., Turner, J.S., Observations of the cell structure of salt fingers, *J. Fluid Mech.*, 41(4), 707-719.
- Sorkin, A., Sorkin, V., Leizeron, I., 2002, Salt fingers in double-diffusive systems, *Physica, A* 303, 13-26.
- Stern, M.E., 1960, The "Salt-Fountain" and Thermohaline Convection, *Tellus*, 12(2), 172-175.
- Stern, M.E., Turner, J.S., 1969, Salt Fingers and convecting layers, *Deep-Sea Research*, vol. 16, 497-511.
- Stokes, R.H., 1950, The Diffusion Coefficients of Eight Uni-univalent Electrolytes in Aqueous Solution at 25 °C, *Journal of The American Chemical Society*, 72(5), 2243-2247.
- Taylor, J.R., Veronis, G., Experiments on double-diffusive sugar-salt fingers at high stability ratio, 1996, *J. Fluid Mech.*, vol. 321, 315-333.
- Turner, J.S., Chen, C.F., 1974, Two-dimensional effects in double-diffusive convection, *J. Fluid Mech.*, 63(3), 577-592.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α - APPENDIX A / ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ – EXPERIMENTS

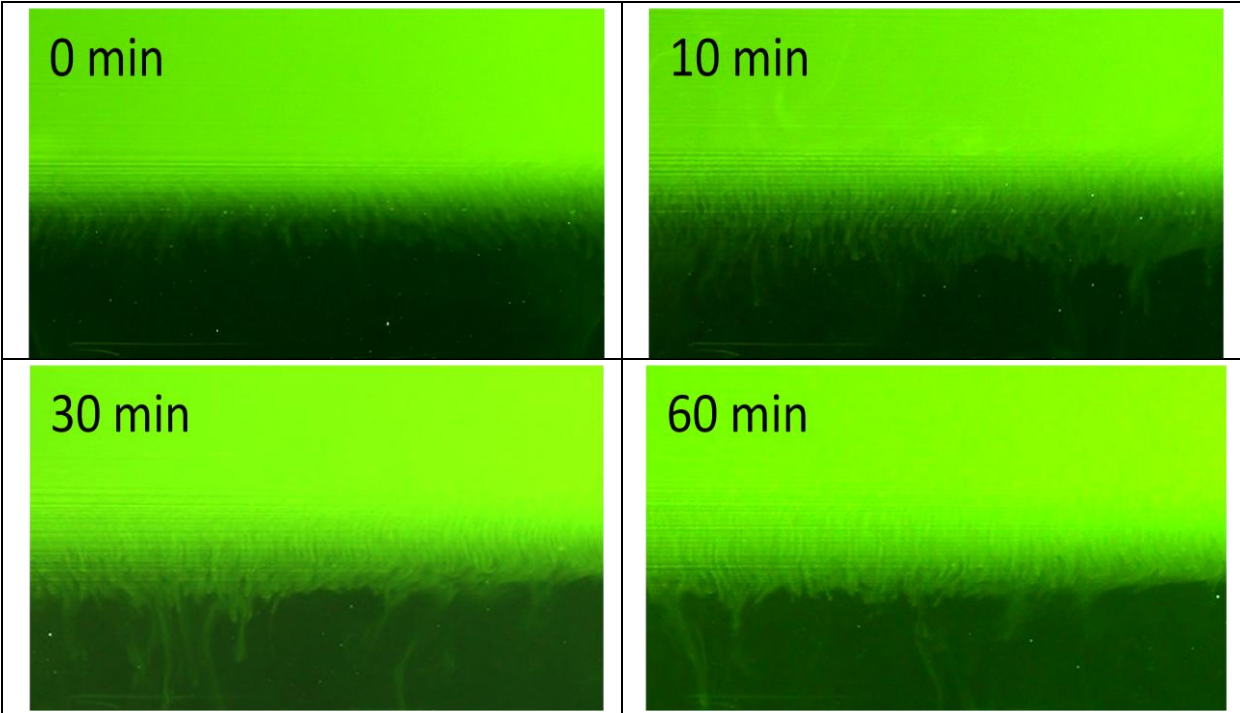
Σε αυτήν την ενότητα γίνεται συνοπτική παρουσίαση όλων των πειραμάτων που υλοποιήθηκαν. Παρουσιάζονται οι αρχικές συνθήκες του κάθε συστήματος, στιγμιότυπα εξέλιξης και σημαντικά διαγράμματα ανά πείραμα. Περιλαμβάνονται και οι 3 τύποι πειραμάτων.

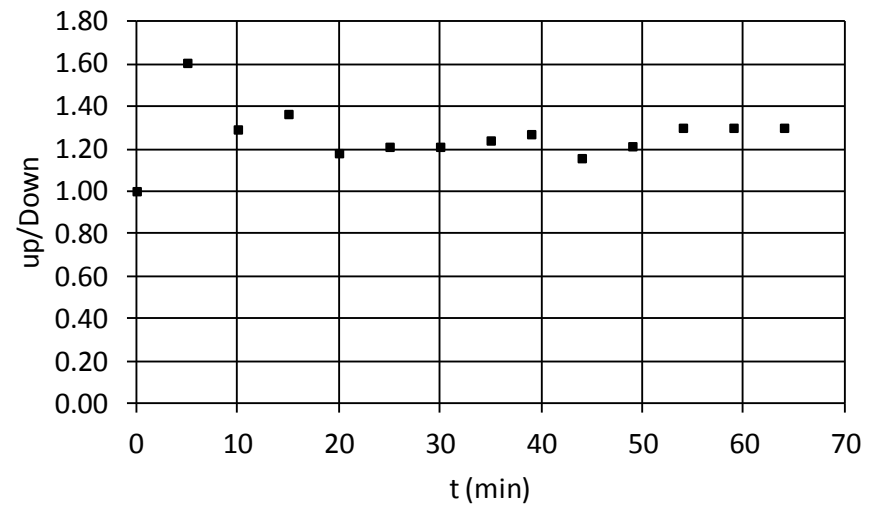
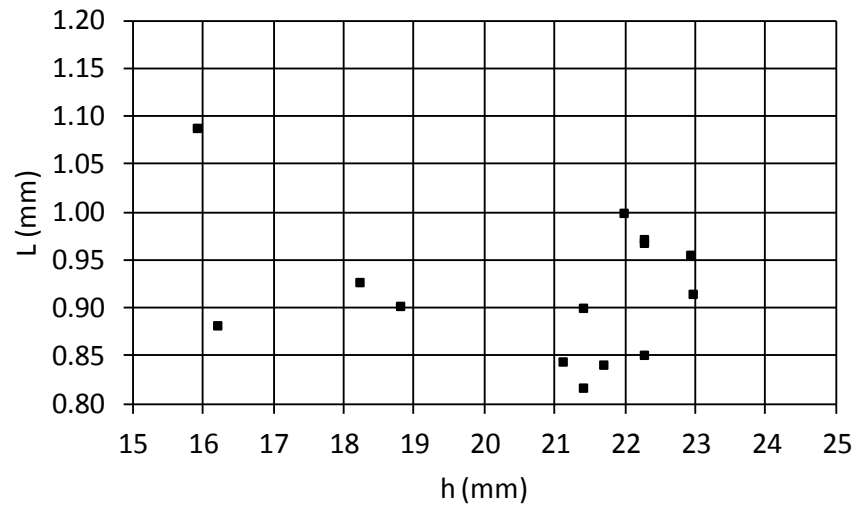
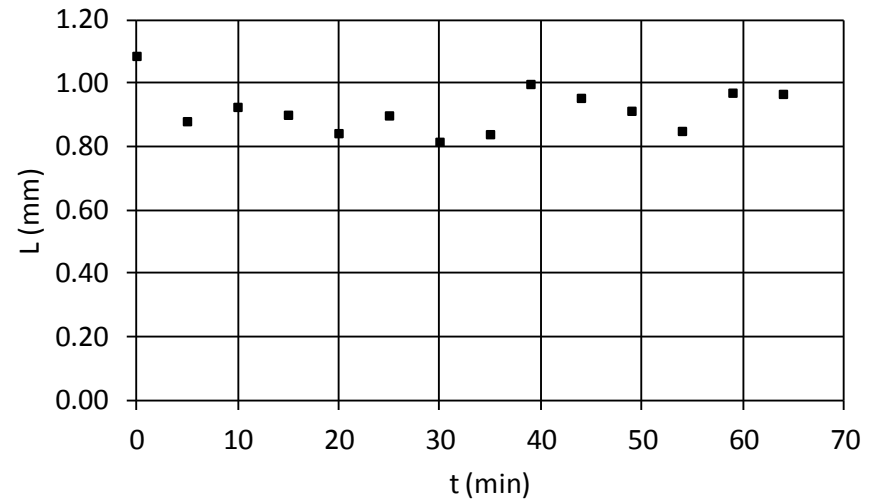
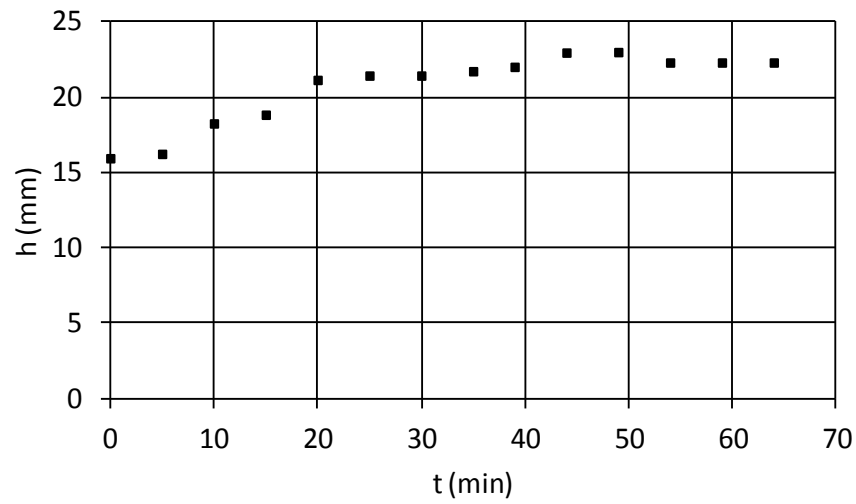
In this section, a presentation of all the accomplished experiments is done. We present the initial state of each system, snapshots of the developed phenomenon and important graphs for each experiment. In Appendix A, there are all types of the experiments that have been described in the abstract.

Experiment: **EXP_i_1** | Date: 5/4/2012

All Data are for the Initial State			Hydrometer Indication		Ruddick & Shirtcliffe (1979)		
T (gr/L)	S (gr/L)	θ ($^{\circ}\text{C}$)	ρ_T (gr/cm^3)	ρ_S (gr/cm^3)	ρ_T (gr/cm^3)	ρ_S (gr/cm^3)	$\Delta\rho$ (gr/cm^3)
10	10	18.2	1.00725	1.0040	1.0057	1.0025	0.00325

K_T^{25} (cm^2/s)	K_S^{25} (cm^2/s)	v_T^{20} (cm^2/s)	v_S^{20} (cm^2/s)	β_T	β_S	R_p	R6G Quantity in 4 L Sugar Solution (mL)
1.48E-05	5.03E-06	1.01E-02	1.02E-02	0.711	0.389	1.83	0.5

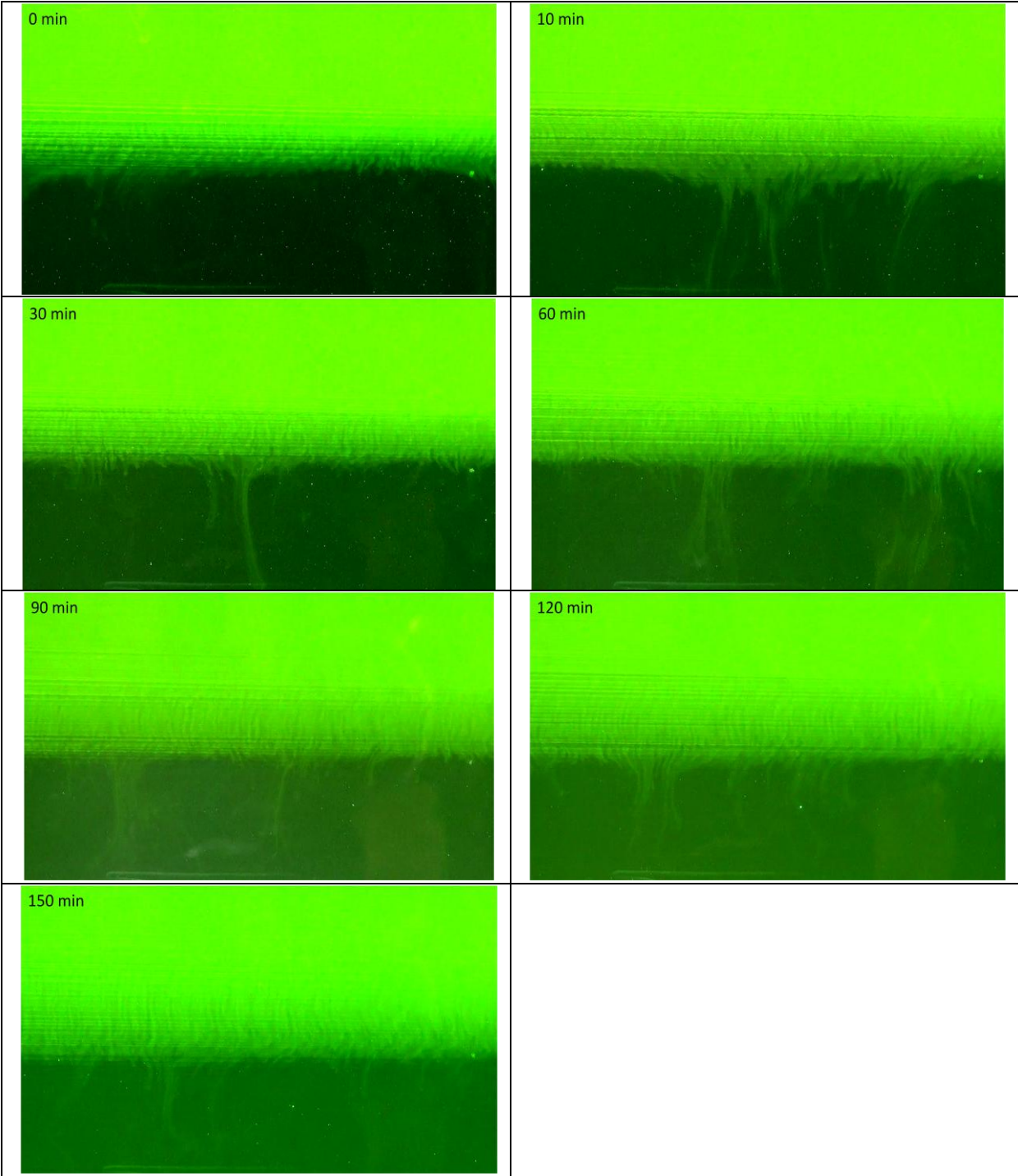


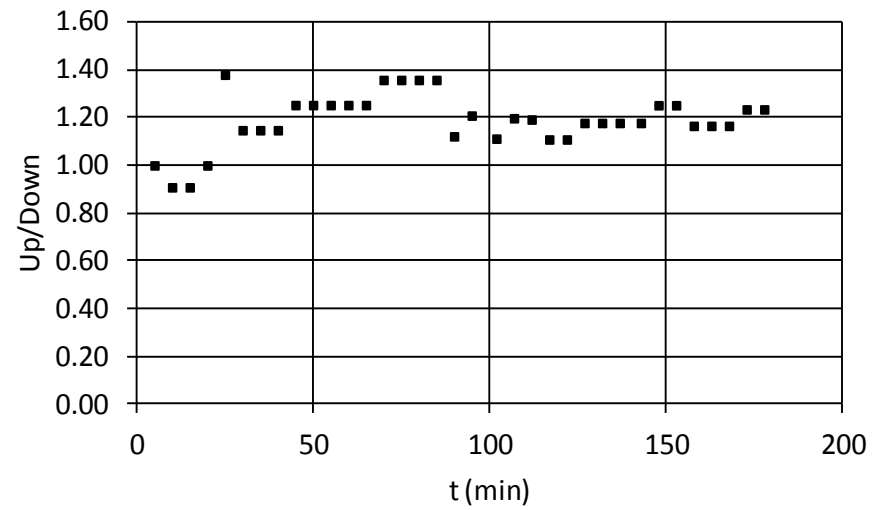
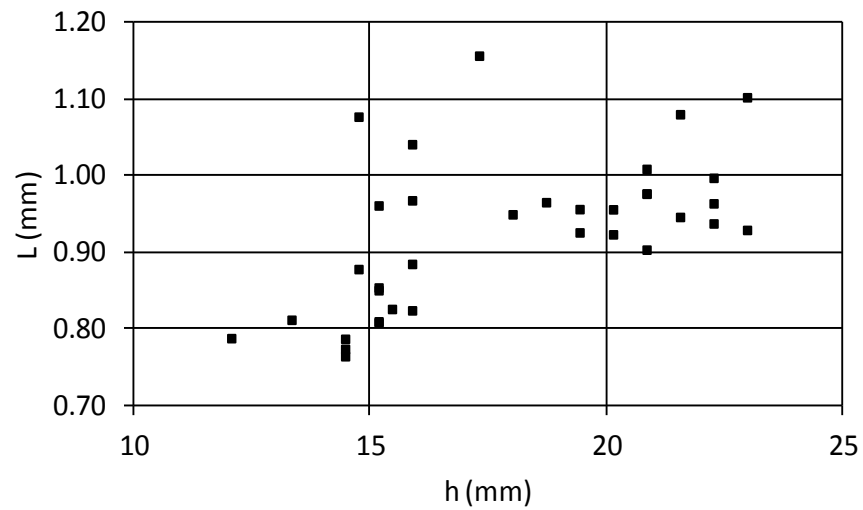
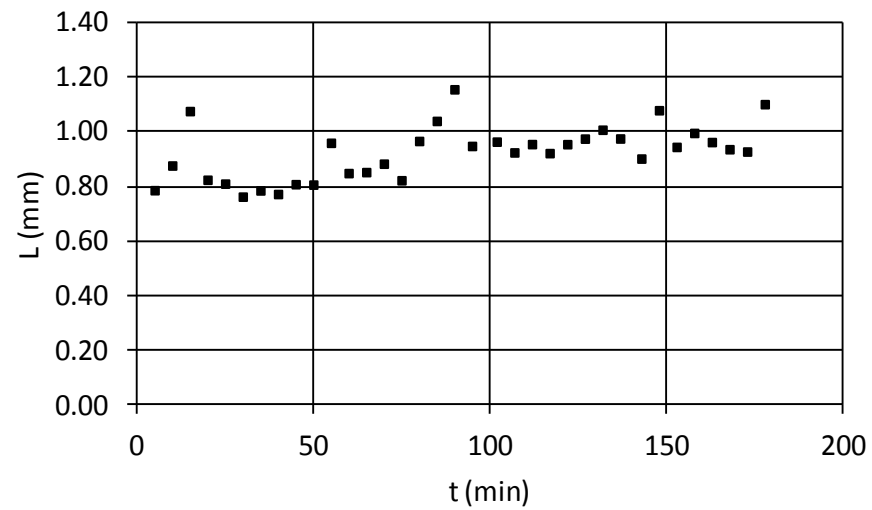
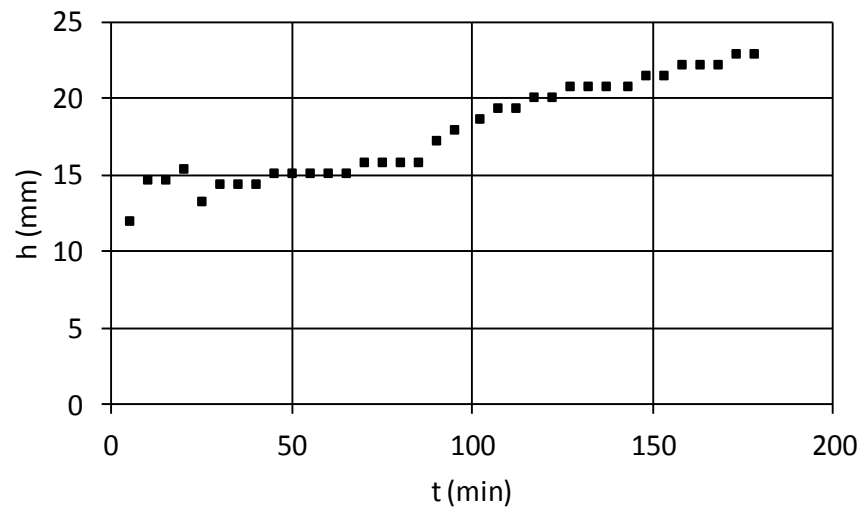


Experiment: **EXP_i_2** | Date: 5/4/2012

All Data are for the Initial State			Hydrometer Indication		Ruddick & Shirlcliffe (1979)		
T (gr/L)	S (gr/L)	θ ($^{\circ}$ C)	ρ_T (gr/cm ³)	ρ_S (gr/cm ³)	ρ_T (gr/cm ³)	ρ_S (gr/cm ³)	$\Delta\rho$ (gr/cm ³)
10	12	18.5	1.00725	1.0050	1.0056	1.0032	0.00246

K_T^{25} (cm ² /s)	K_S^{25} (cm ² /s)	v_T^{20} (cm ² /s)	v_S^{20} (cm ² /s)	β_T	β_S	R_p	R6G Quantity in 4 L Sugar Solution (mL)
1.48E-05	4.99E-06	1.01E-02	1.03E-02	0.711	0.389	1.52	0.2

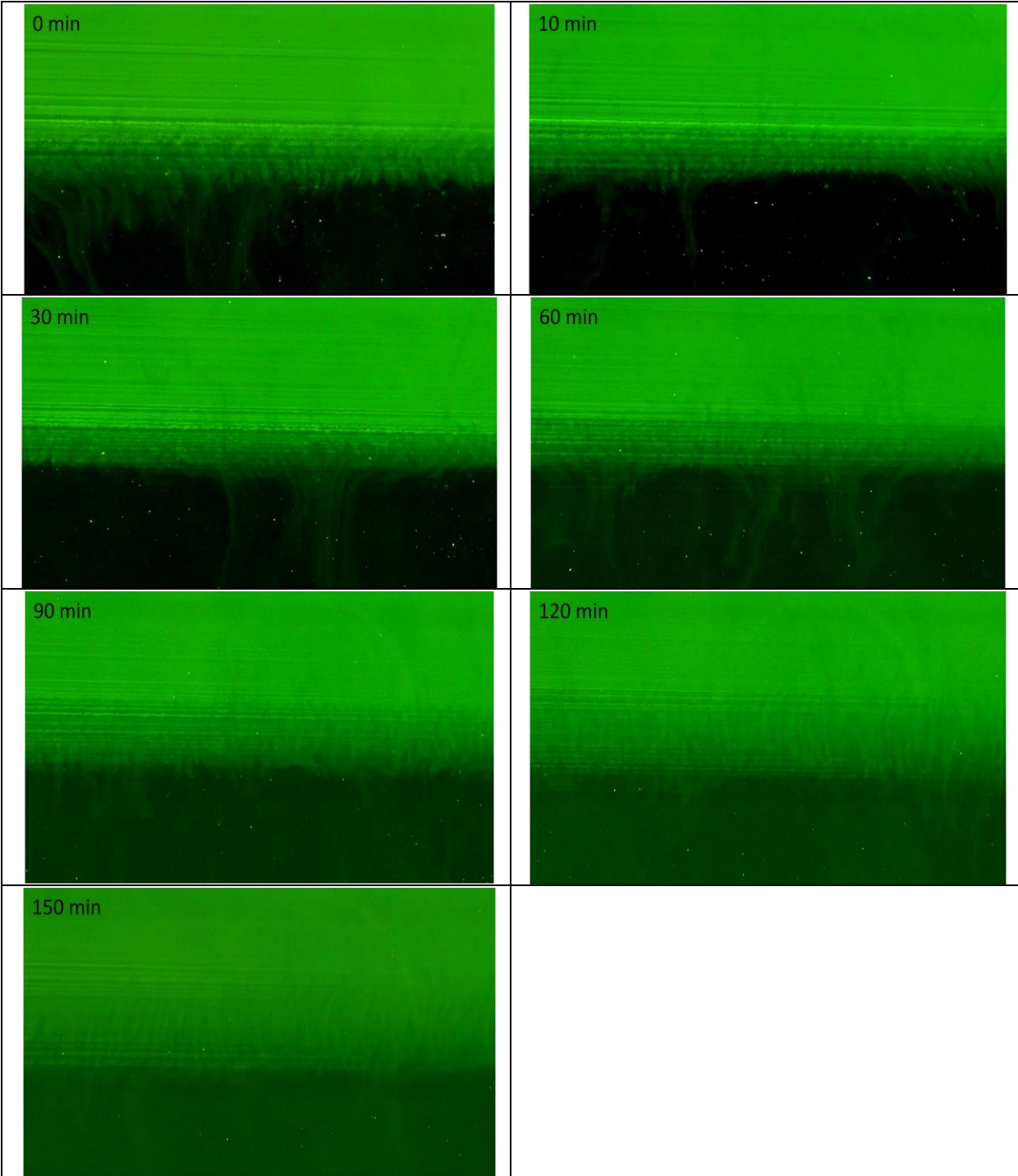


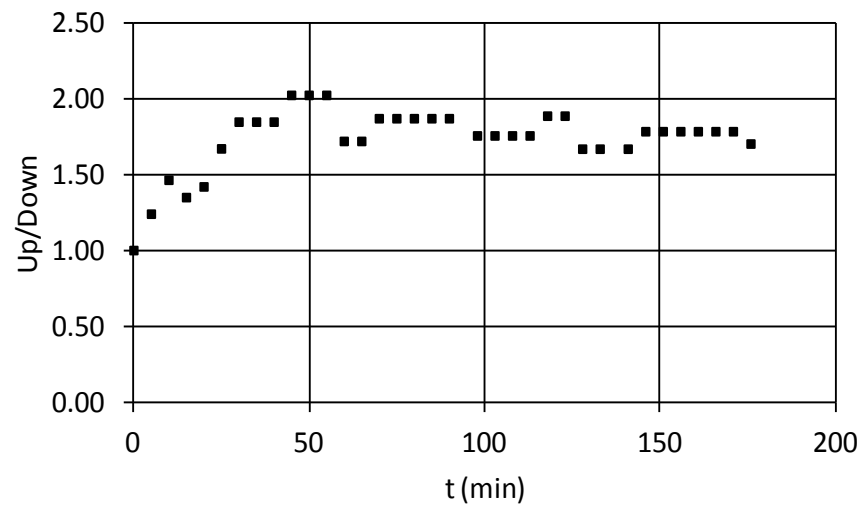
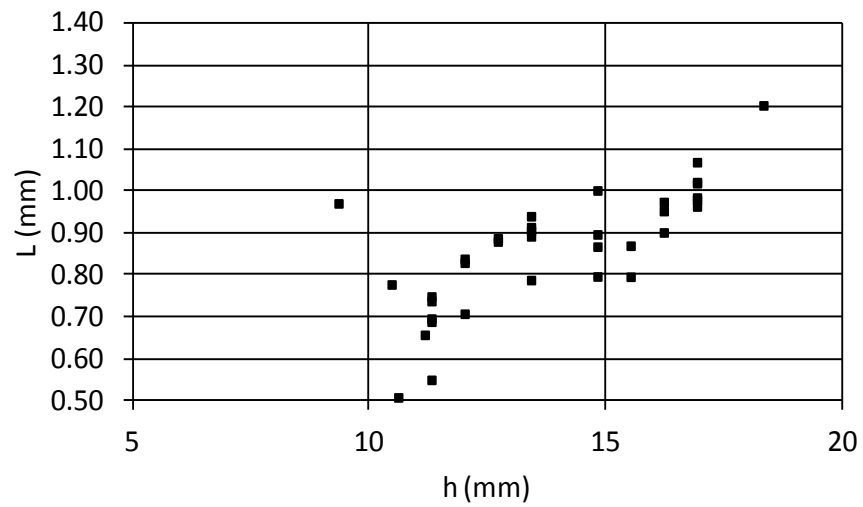
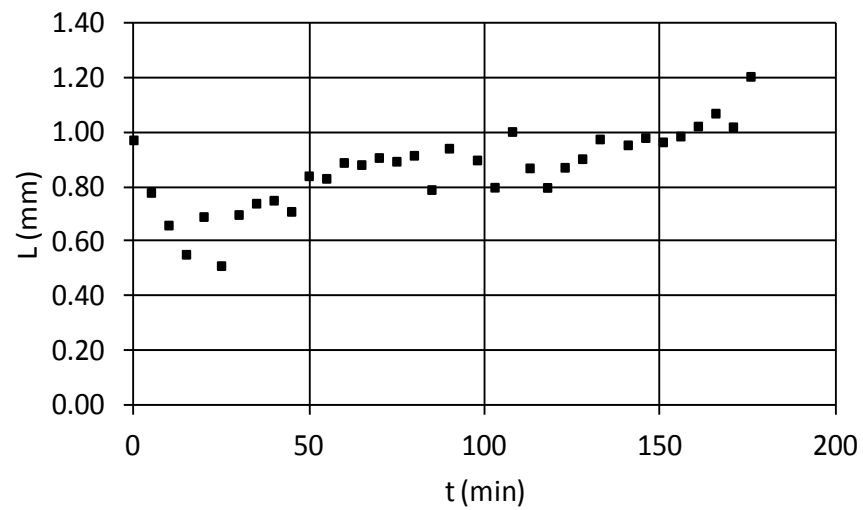
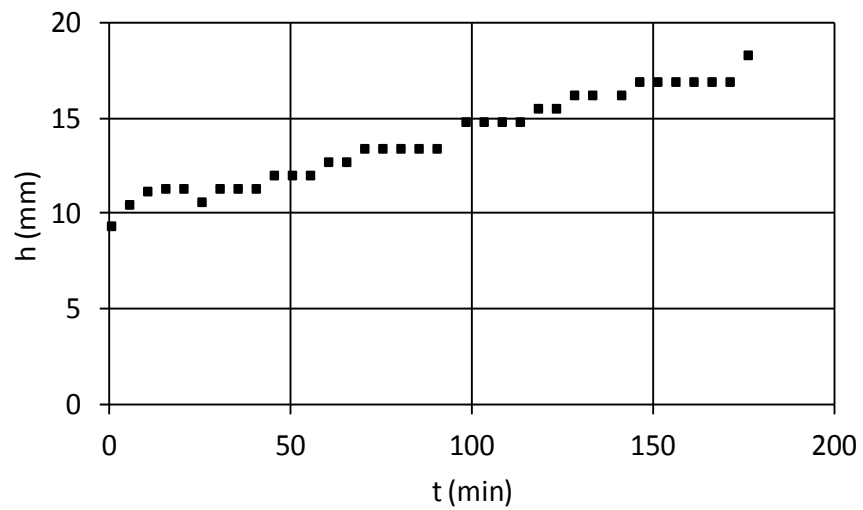


Experiment: **EXP_i_3** | Date: 6/4/2012

All Data are for the Initial State			Hydrometer Indication		Ruddick & Shirtcliffe (1979)		
T (gr/L)	S (gr/L)	θ (°C)	ρ_T (gr/cm ³)	ρ_S (gr/cm ³)	ρ_T (gr/cm ³)	ρ_S (gr/cm ³)	$\Delta\rho$ (gr/cm ³)
10	14	18.0	1.00725	1.0055	1.0057	1.0041	0.00169

K_T^{25} (cm ² /s)	K_S^{25} (cm ² /s)	v_T^{20} (cm ² /s)	v_S^{20} (cm ² /s)	β_T	β_S	R_p	R6G Quantity in 4 L Sugar Solution (mL)
1.48E-05	4.95E-06	1.01E-02	1.03E-02	0.712	0.390	1.3	0.2

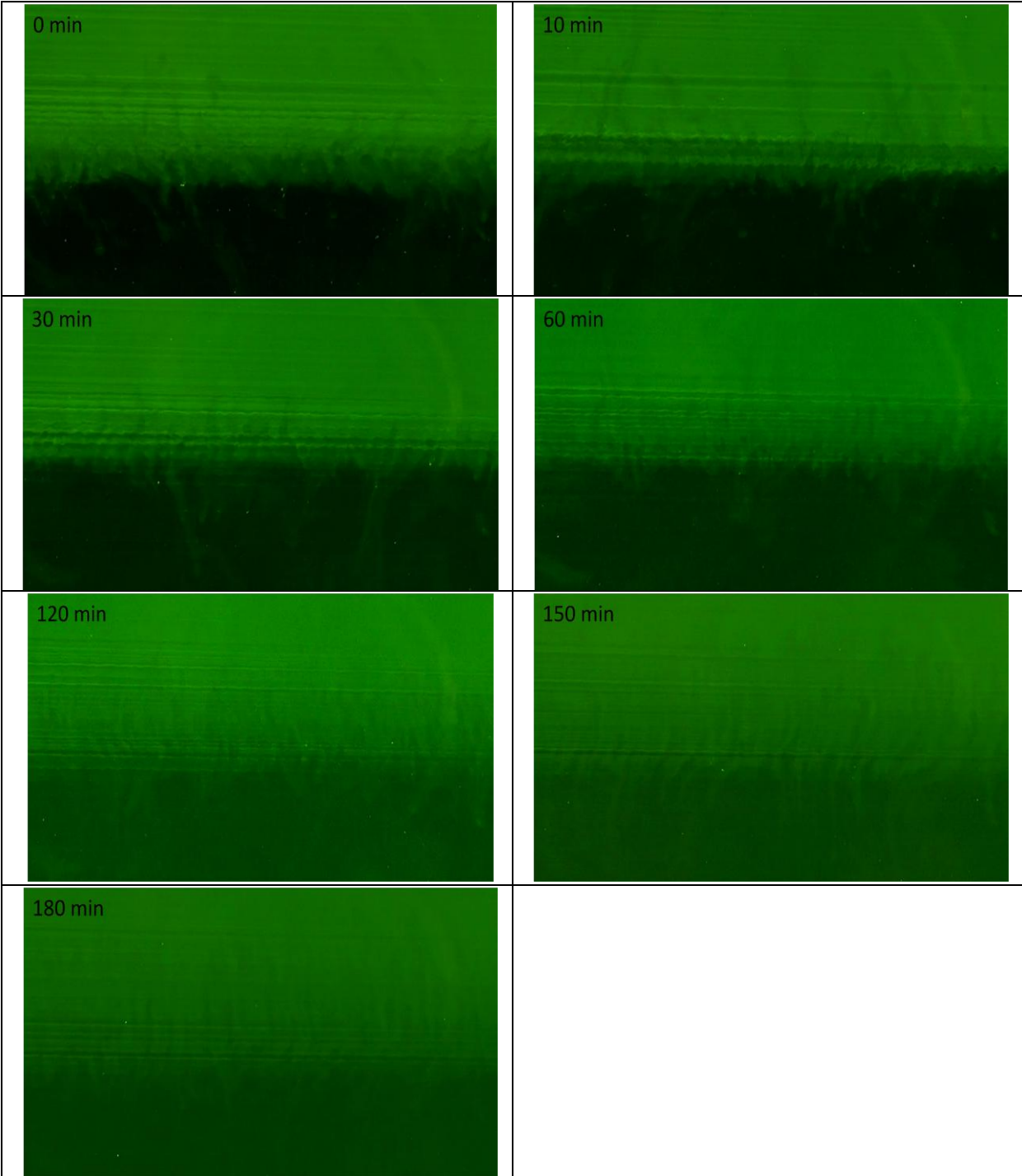


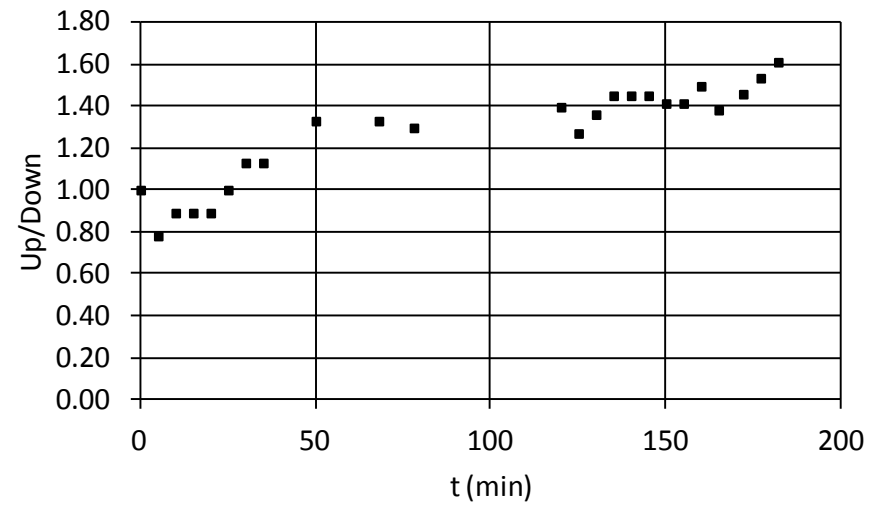
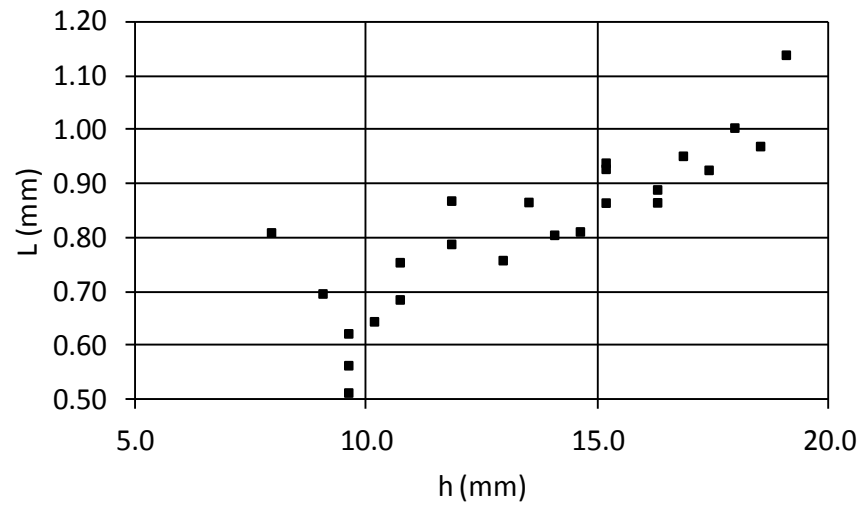
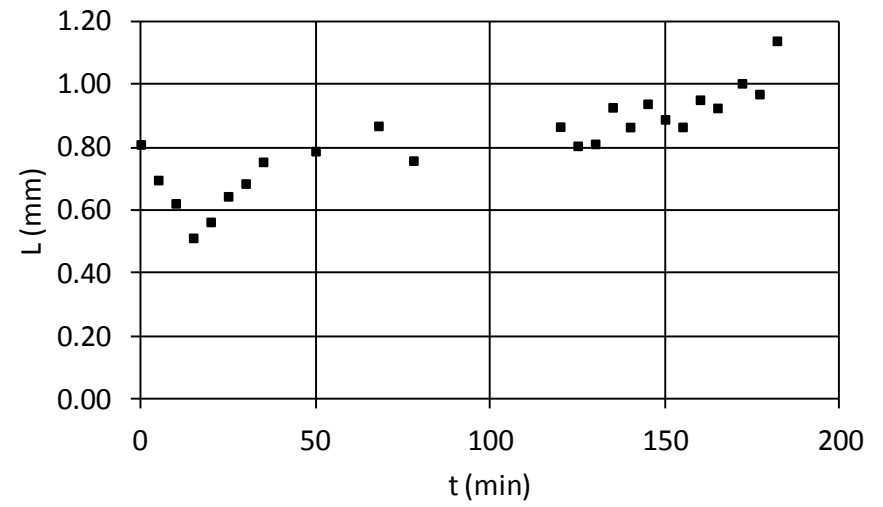
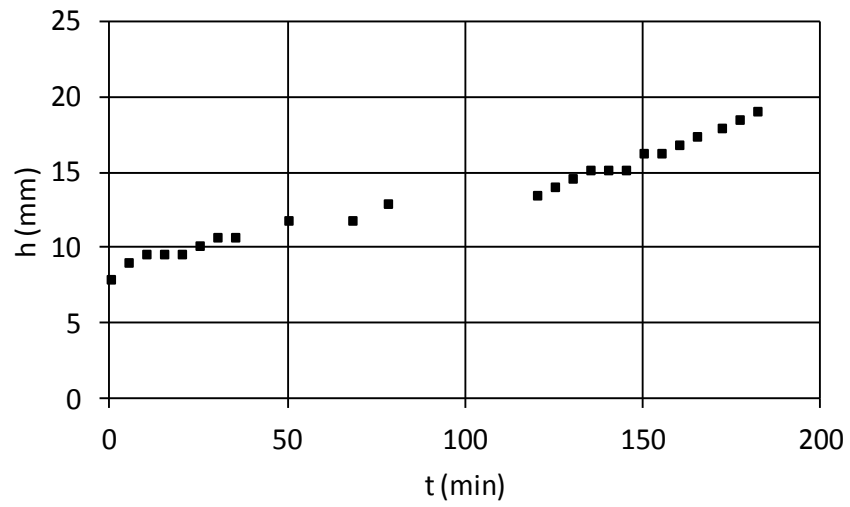


Experiment: **EXP_i_4** | Date: 6/4/2012

All Data are for the Initial State			Hydrometer Indication		Ruddick & Shirtcliffe (1979)		
T (gr/L)	S (gr/L)	θ ($^{\circ}$ C)	ρ_T (gr/cm ³)	ρ_S (gr/cm ³)	ρ_T (gr/cm ³)	ρ_S (gr/cm ³)	$\Delta\rho$ (gr/cm ³)
10	16	18.4	1.00725	1.0065	1.0057	1.0048	0.00090

K_T^{25} (cm ² /s)	K_S^{25} (cm ² /s)	v_T^{20} (cm ² /s)	v_S^{20} (cm ² /s)	β_T	β_S	R_p	R6G Quantity in 4 L Sugar Solution (mL)
1.48E-05	4.91E-06	1.01E-02	1.04E-02	0.711	0.39	1.14	0.2

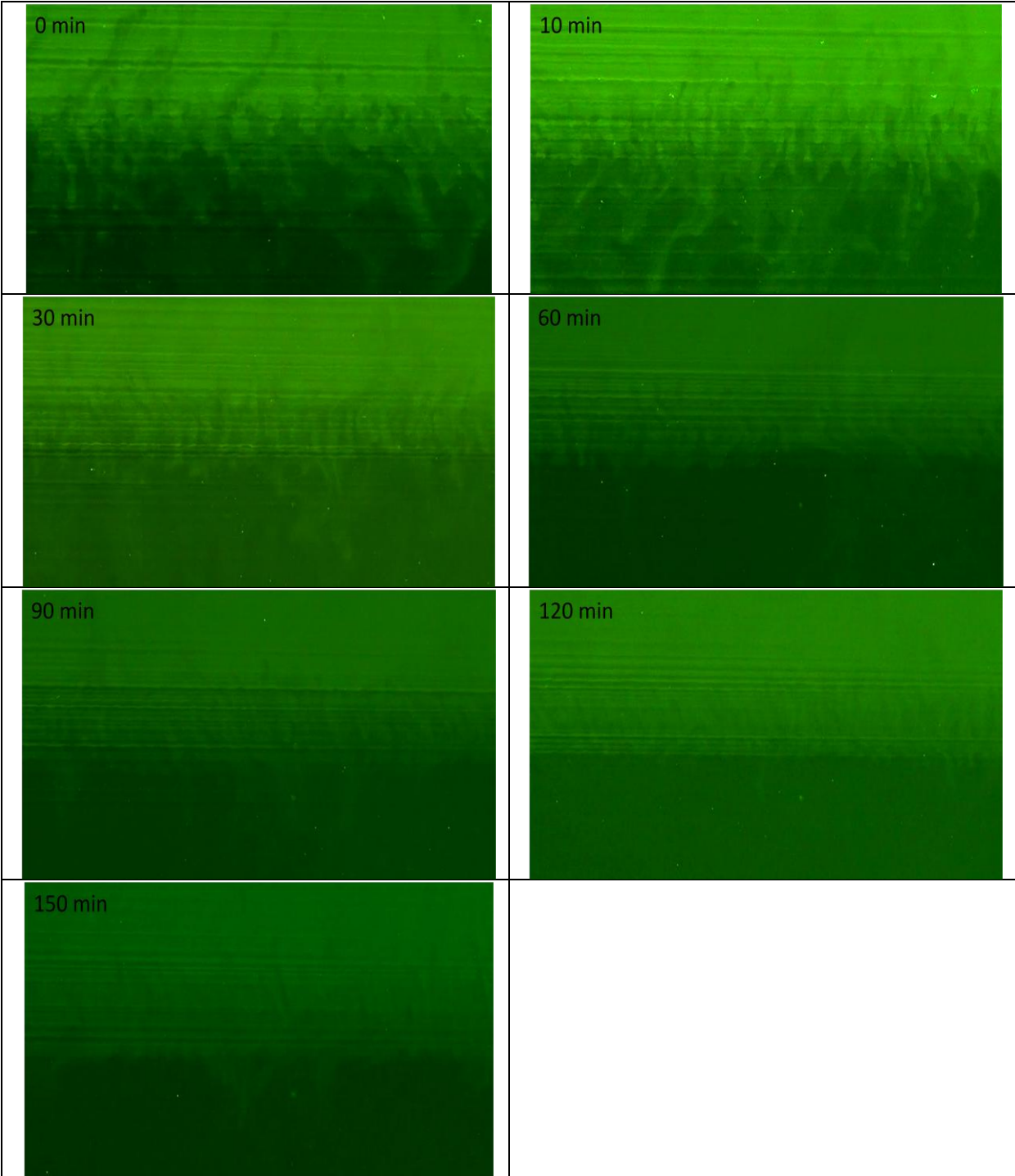


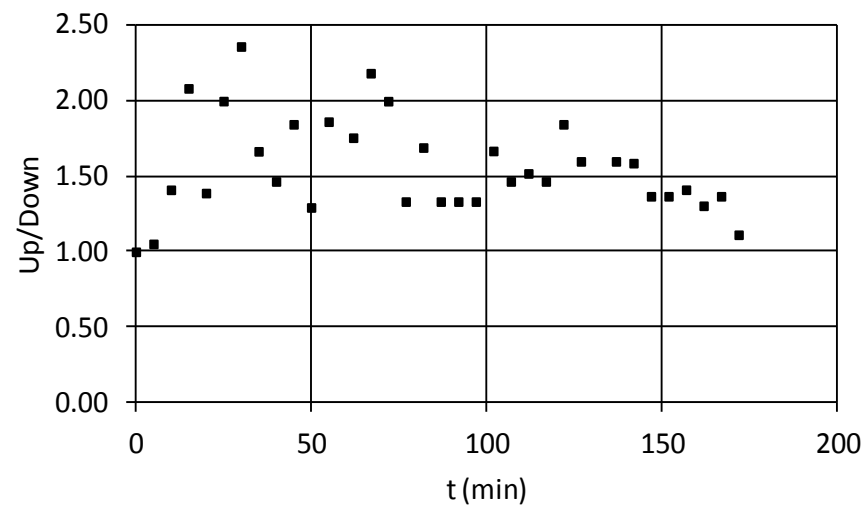
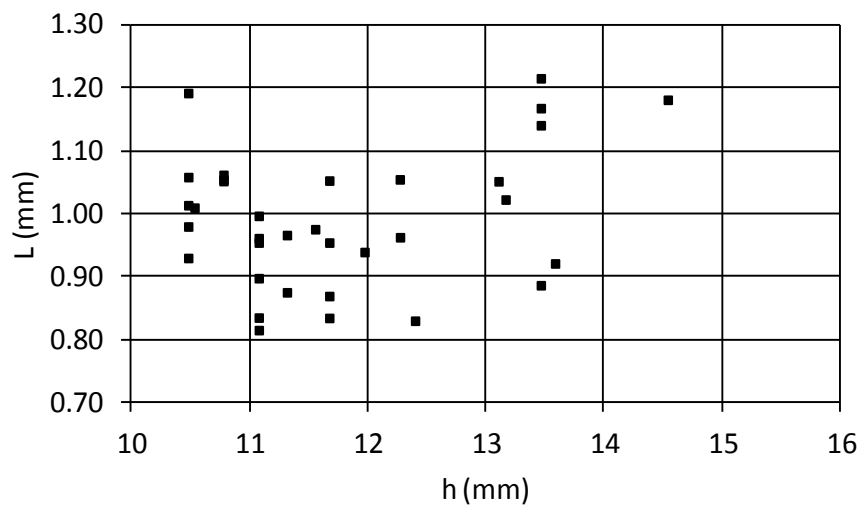
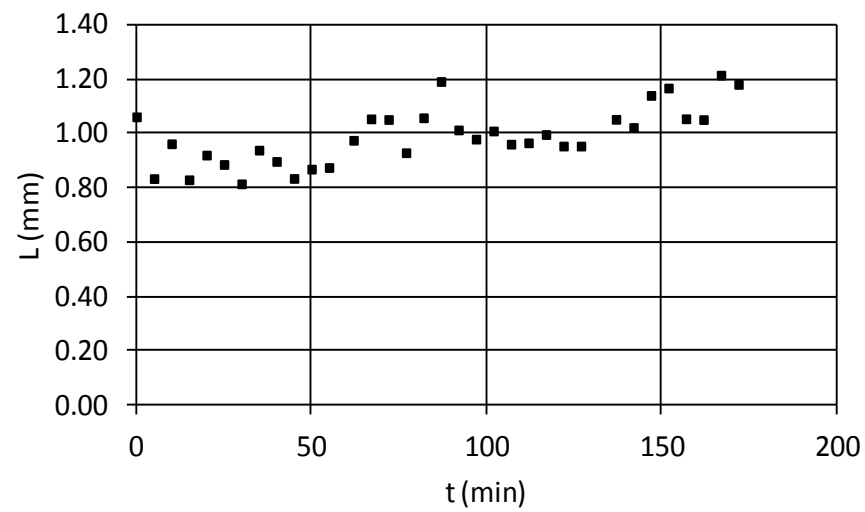
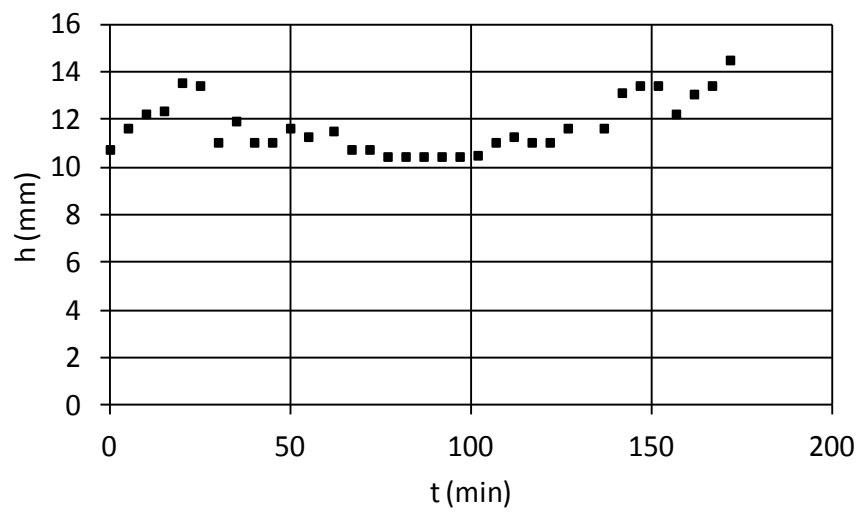


Experiment: **EXP_i_5** | Date: 11/4/2012

All Data are for the Initial State			Hydrometer Indication		Ruddick & Shirtcliffe (1979)		
T (gr/L)	S (gr/L)	θ ($^{\circ}$ C)	ρ_T (gr/cm ³)	ρ_S (gr/cm ³)	ρ_T (gr/cm ³)	ρ_S (gr/cm ³)	$\Delta\rho$ (gr/cm ³)
10	18	15.9	1.00725	1.00725	1.0062	1.0060	0.00015

K_T^{25} (cm ² /s)	K_S^{25} (cm ² /s)	v_T^{20} (cm ² /s)	v_S^{20} (cm ² /s)	β_T	β_S	R_p	R6G Quantity in 4 L Sugar Solution (mL)
1.48E-05	4.87E-06	1.01E-02	1.04E-02	0.716	0.391	1.02	0.2

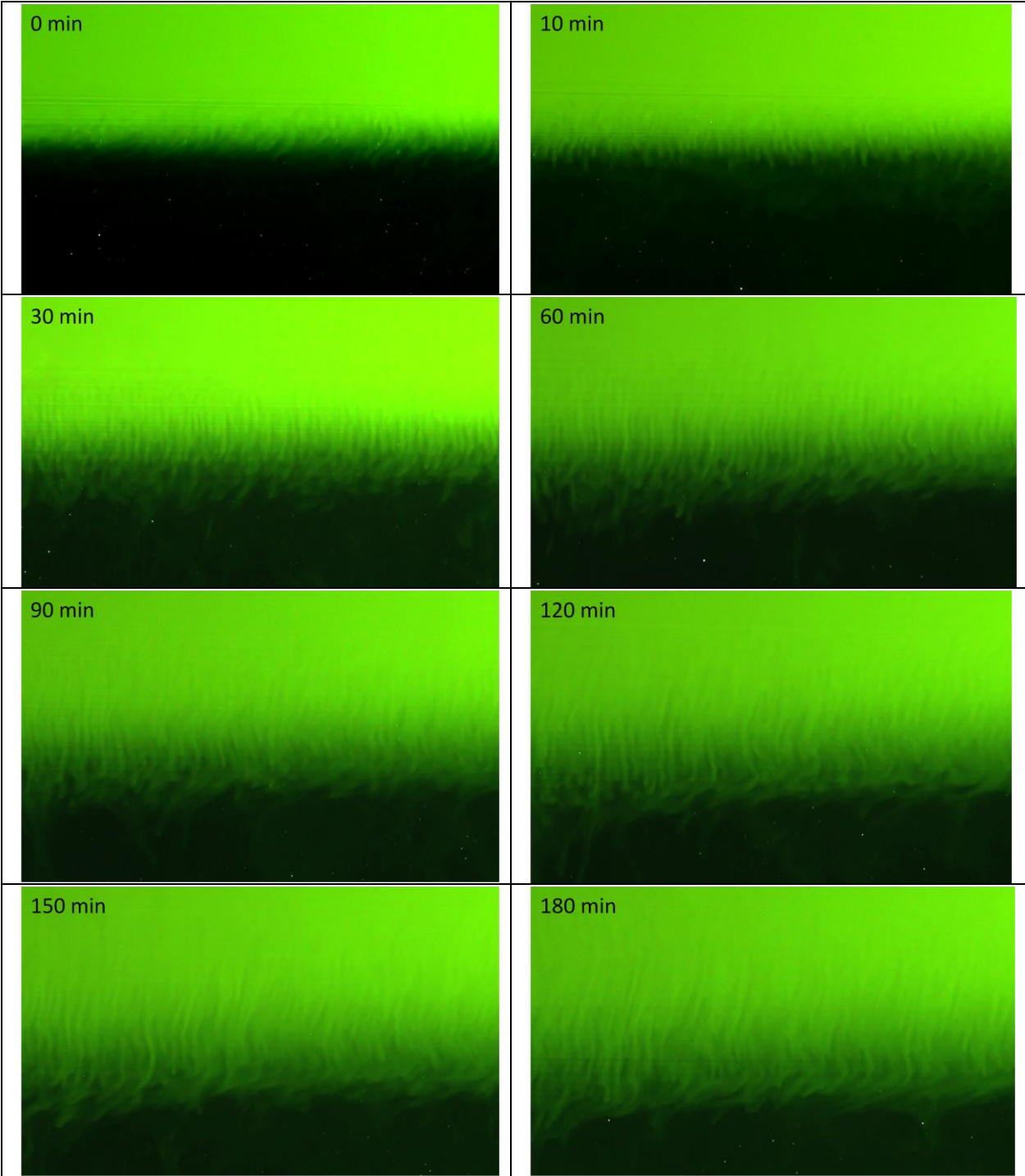


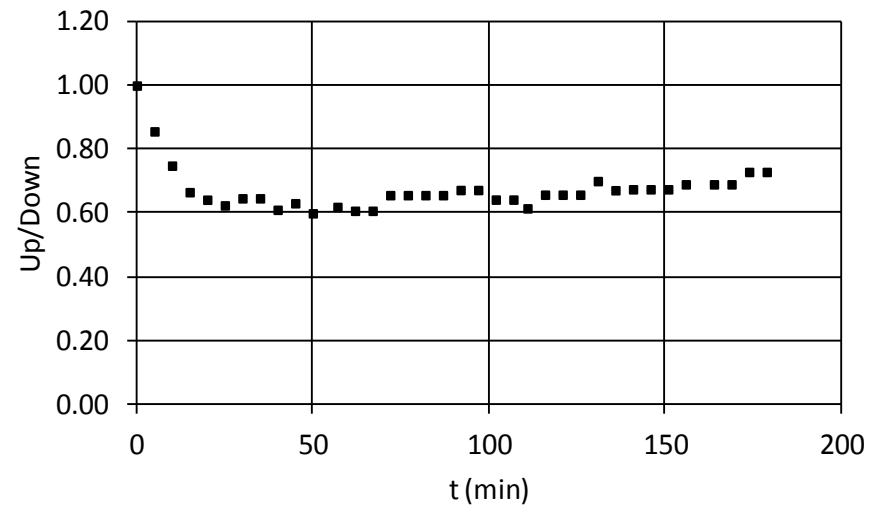
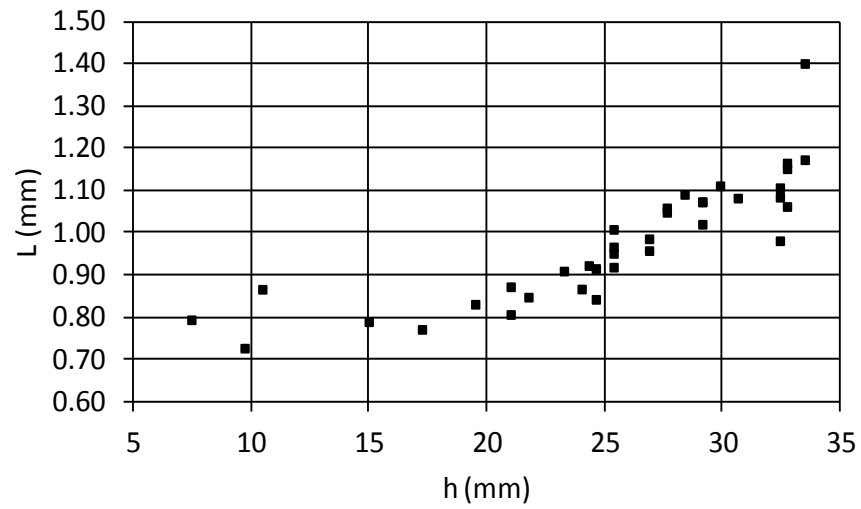
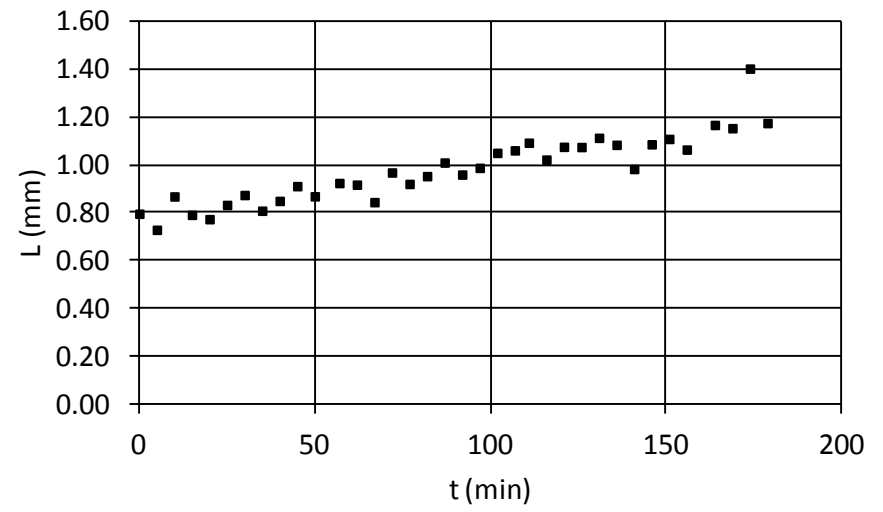
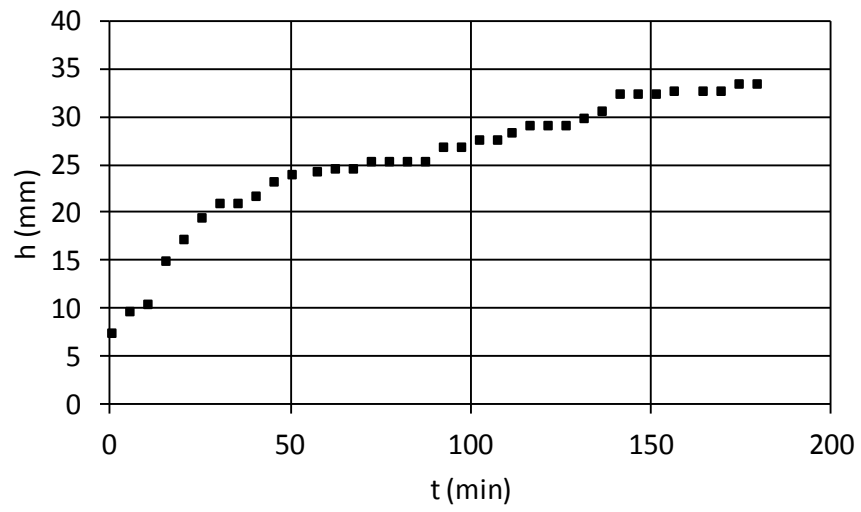


Experiment: **EXP_i_6** | Date: 11/4/2012

All Data are for the Initial State			Hydrometer Indication		Ruddick & Shirtcliffe (1979)		
T (gr/L)	S (gr/L)	θ (°C)	ρ_T (gr/cm ³)	ρ_S (gr/cm ³)	ρ_T (gr/cm ³)	ρ_S (gr/cm ³)	$\Delta\rho$ (gr/cm ³)
10	8	16.6	1.00725	1.0035	1.0060	1.0020	0.00406

K_T^{25} (cm ² /s)	K_S^{25} (cm ² /s)	v_T^{20} (cm ² /s)	v_S^{20} (cm ² /s)	β_T	β_S	R_p	R6G Quantity in 4 L Sugar Solution (mL)
1.48E-05	5.07E-06	1.01E-02	1.02E-02	0.715	0.390	2.29	1.0

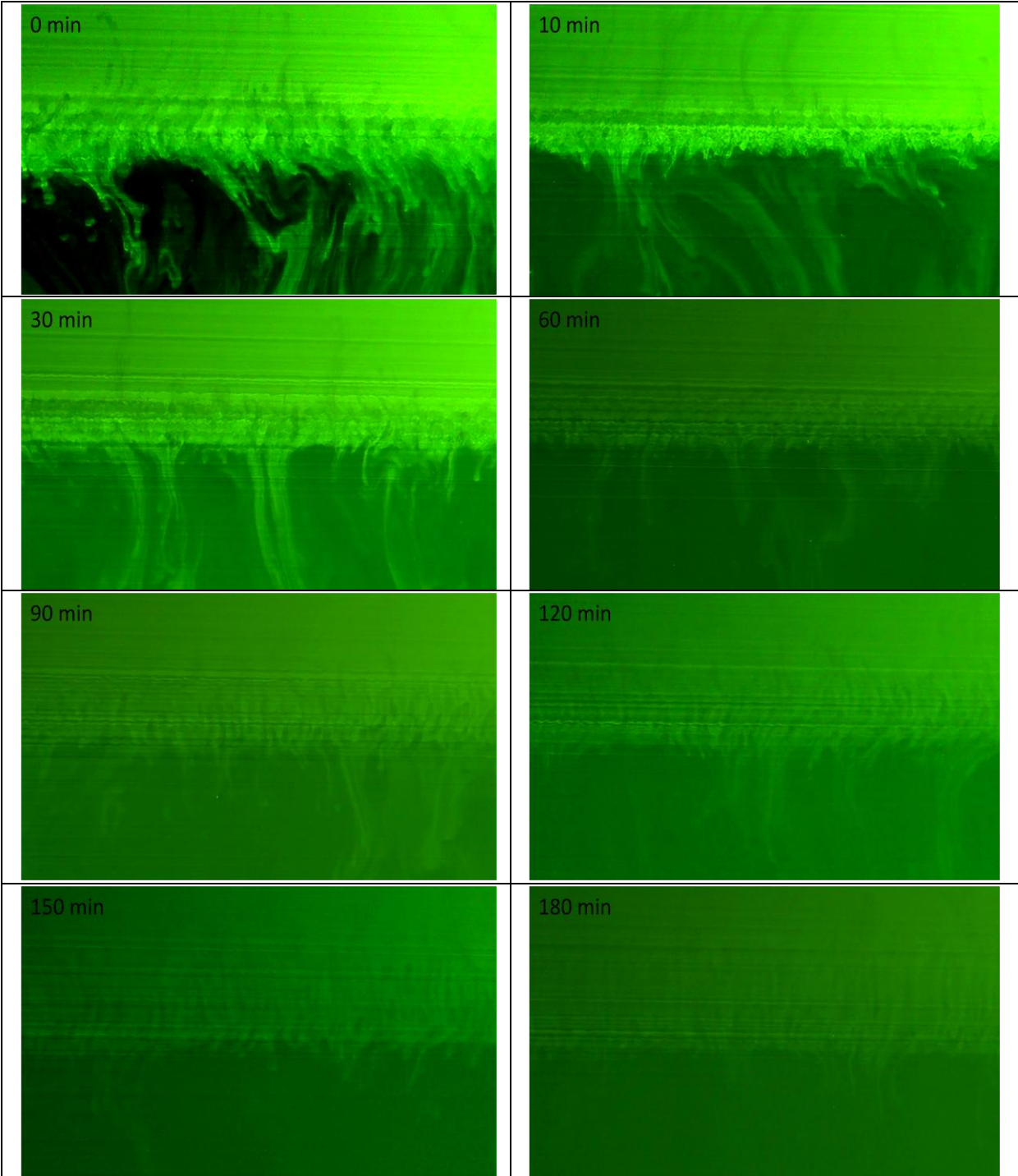


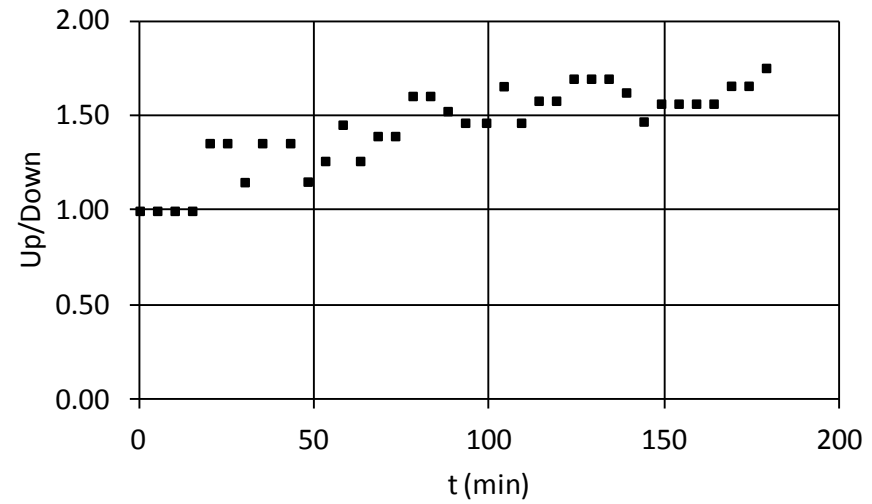
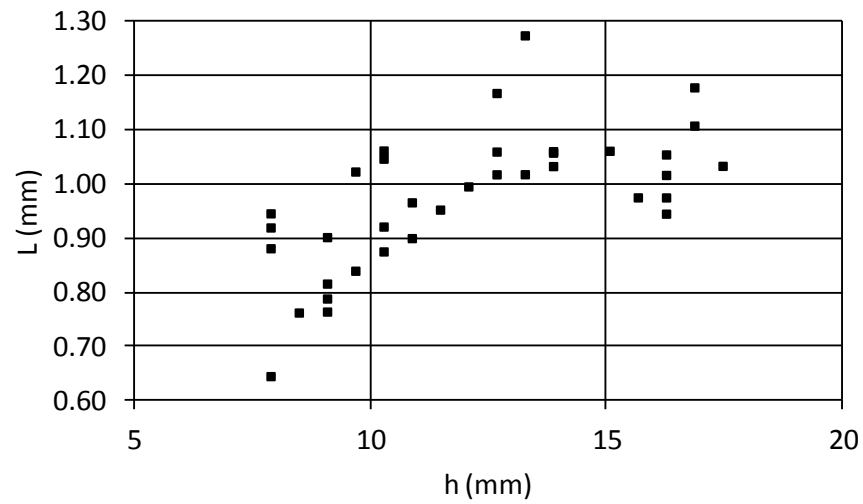
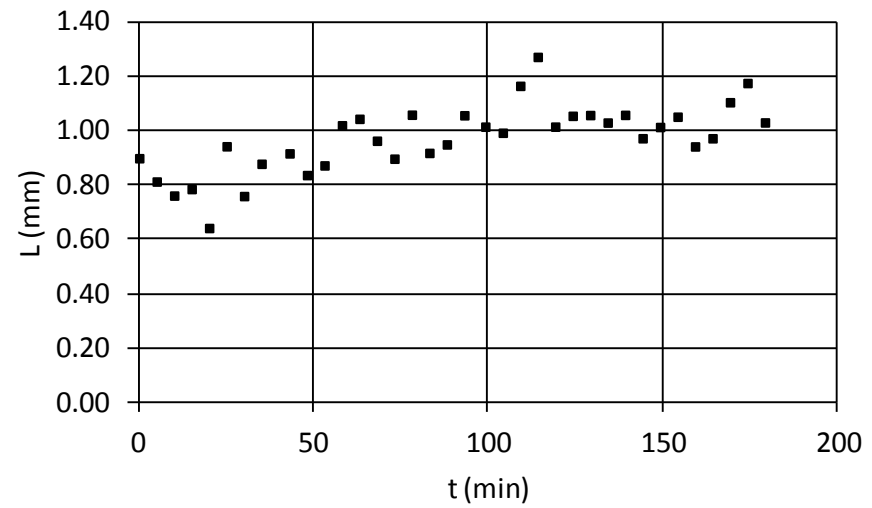
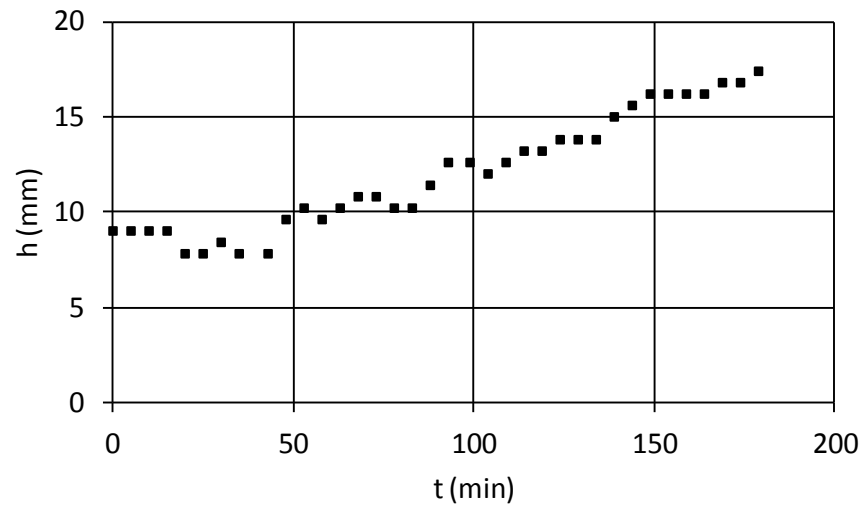


Experiment: **EXP_i_7** | Date: 12/4/2012

All Data are for the Initial State			Hydrometer Indication		Ruddick & Shirtcliffe (1979)		
T (gr/L)	S (gr/L)	θ (°C)	ρ_T (gr/cm ³)	ρ_S (gr/cm ³)	ρ_T (gr/cm ³)	ρ_S (gr/cm ³)	$\Delta\rho$ (gr/cm ³)
10	16	16.7	1.00725	1.0065	1.0060	1.0051	0.00093

K_T^{25} (cm ² /s)	K_S^{25} (cm ² /s)	v_T^{20} (cm ² /s)	v_S^{20} (cm ² /s)	β_T	β_S	R_p	R6G Quantity in 4 L Sugar Solution (mL)
1.48E-05	4.91E-06	1.01E-02	1.04E-02	0.714	0.391	1.14	2.0

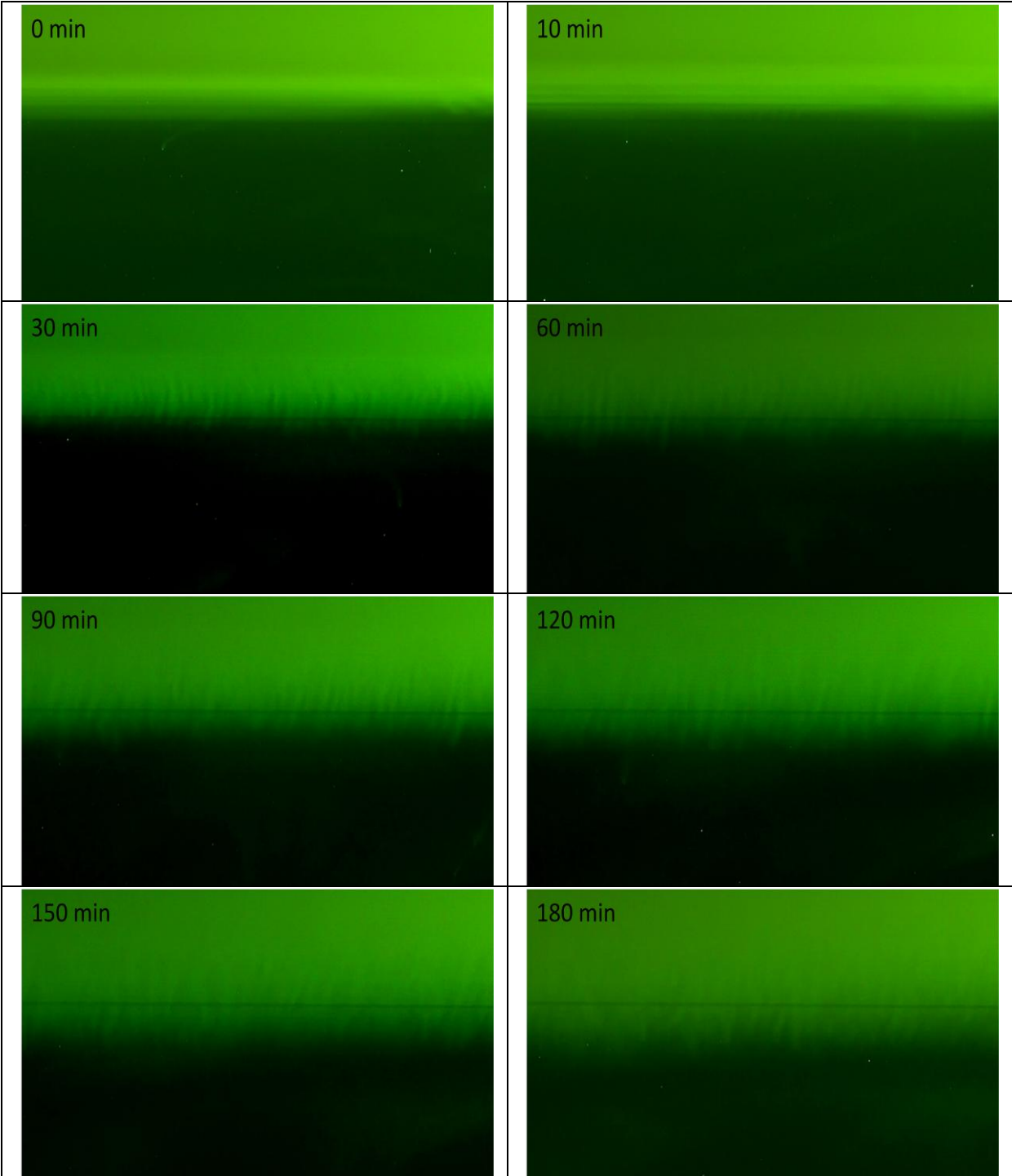


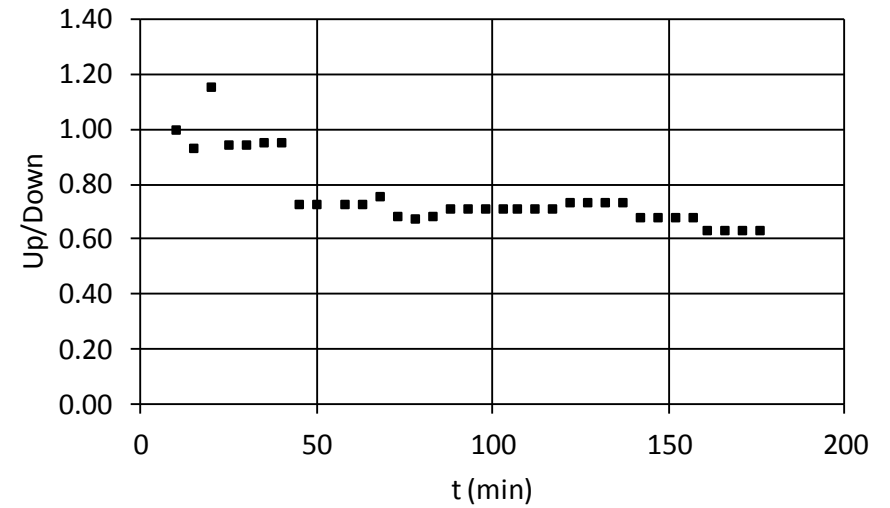
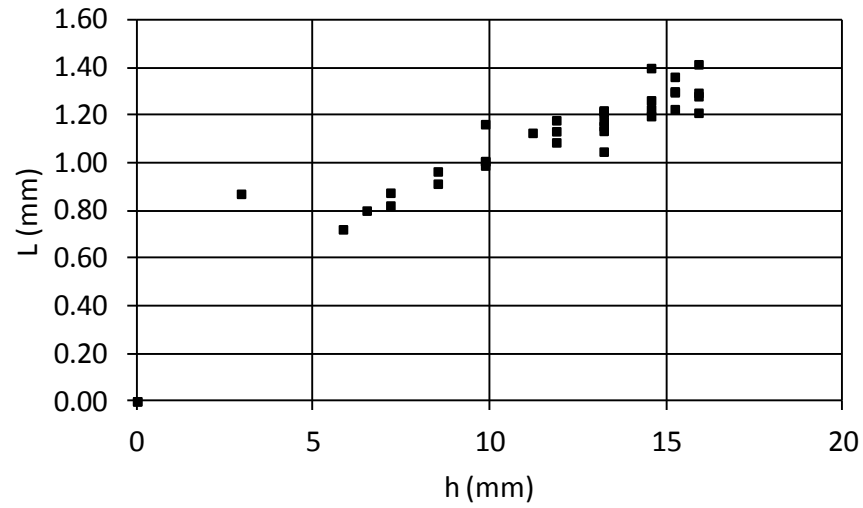
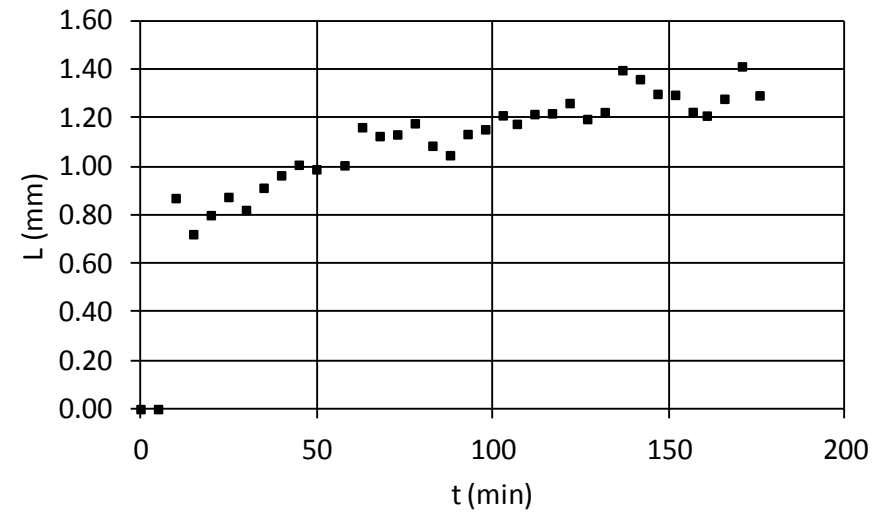
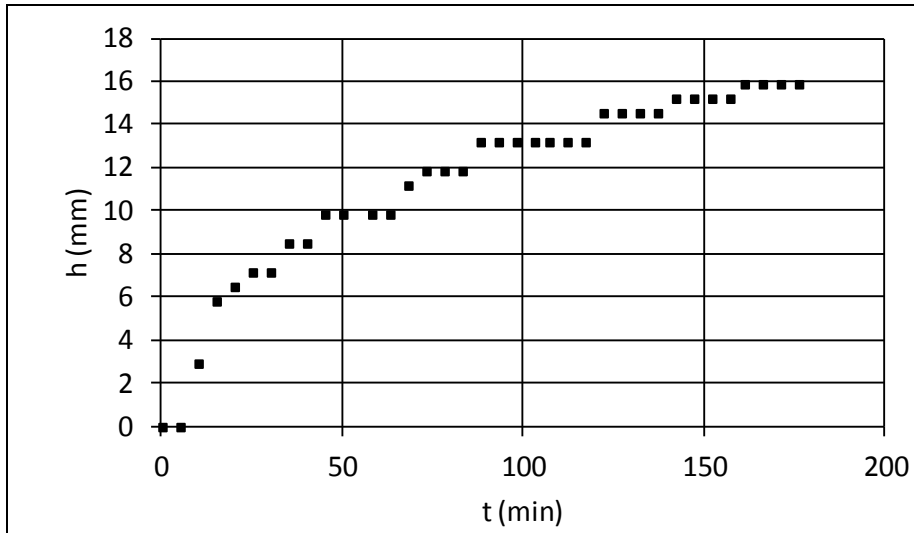


Experiment: **EXP_i_8** | Date: 16/4/2012

All Data are for the Initial State			Hydrometer Indication		Ruddick & Shirtcliffe (1979)		
T (gr/L)	S (gr/L)	θ ($^{\circ}$ C)	ρ_T (gr/cm ³)	ρ_S (gr/cm ³)	ρ_T (gr/cm ³)	ρ_S (gr/cm ³)	$\Delta\rho$ (gr/cm ³)
10	6	18.4	1.00725	1.0025	1.0057	1.0009	0.00481

K_T^{25} (cm ² /s)	K_S^{25} (cm ² /s)	v_T^{20} (cm ² /s)	v_S^{20} (cm ² /s)	β_T	β_S	R_p	R6G Quantity in 4 L Sugar Solution (mL)
1.48E-05	5.11E-06	1.01E-02	1.01E-02	0.711	0.389	3.05	1.5

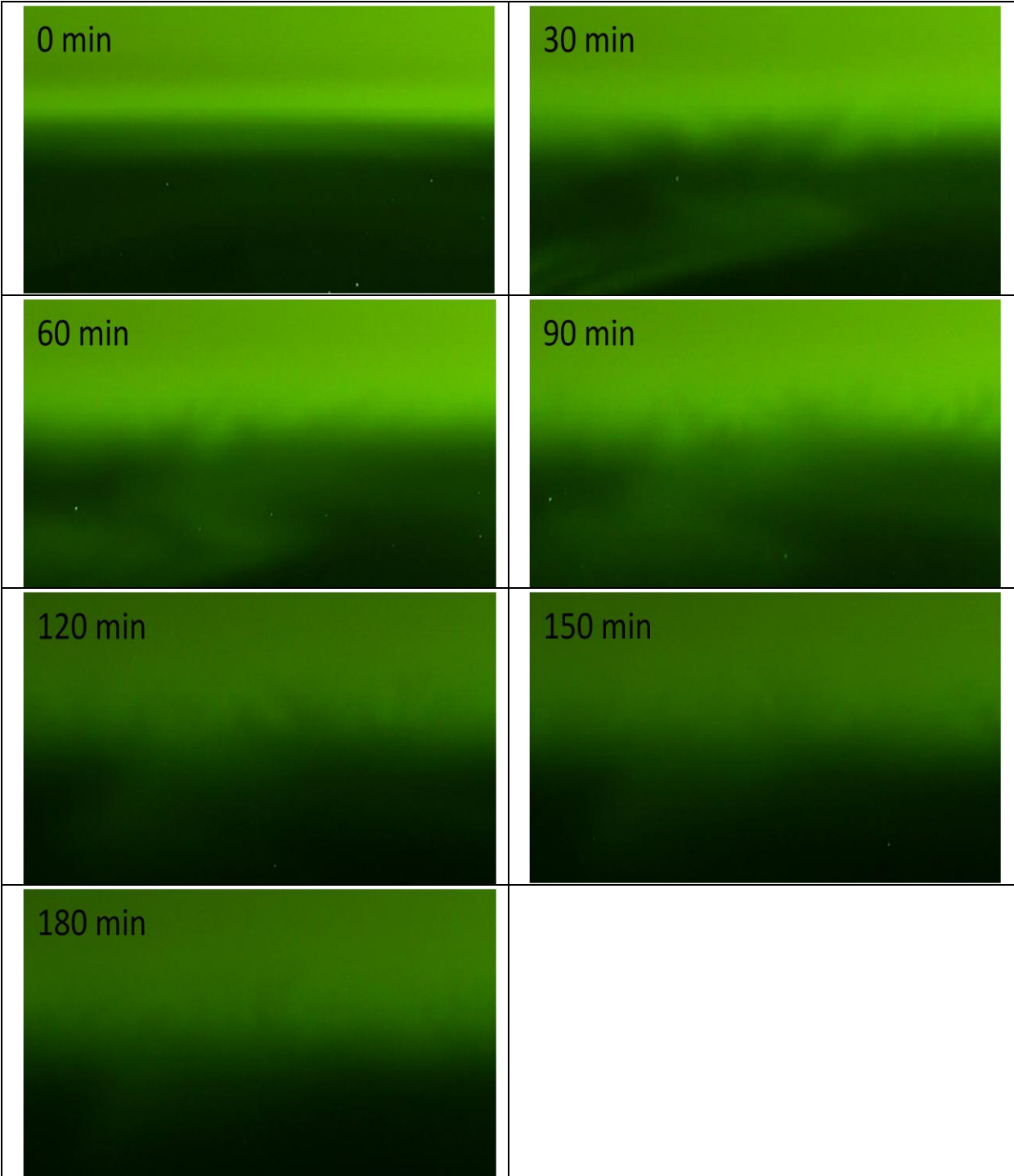


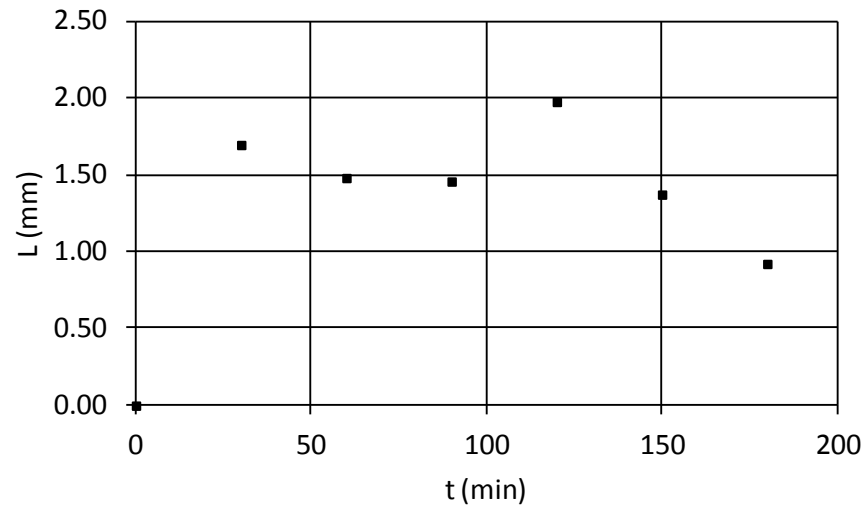
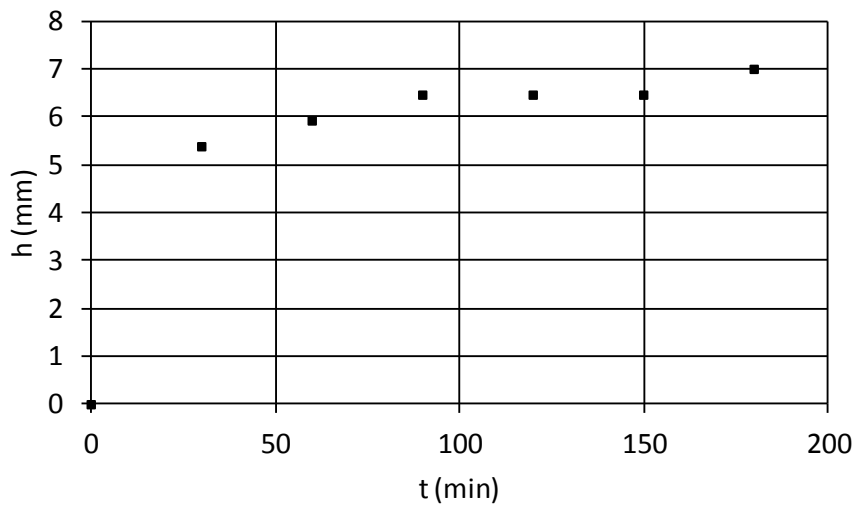


Experiment: **EXP_i_9** | Date: 16/4/2012

All Data are for the Initial State			Hydrometer Indication		Ruddick & Shirtcliffe (1979)		
T (gr/L)	S (gr/L)	θ ($^{\circ}$ C)	ρ_T (gr/cm ³)	ρ_S (gr/cm ³)	ρ_T (gr/cm ³)	ρ_S (gr/cm ³)	$\Delta\rho$ (gr/cm ³)
10	4	19.0	1.00725	1.0015	1.0055	0.99997	0.00557

K_T^{25} (cm ² /s)	K_S^{25} (cm ² /s)	v_T^{20} (cm ² /s)	v_S^{20} (cm ² /s)	β_T	β_S	R_p	R6G Quantity in 4 L Sugar Solution (mL)
1.48E-05	5.15E-06	1.01E-02	1.01E-02	0.710	0.388	4.57	1.5

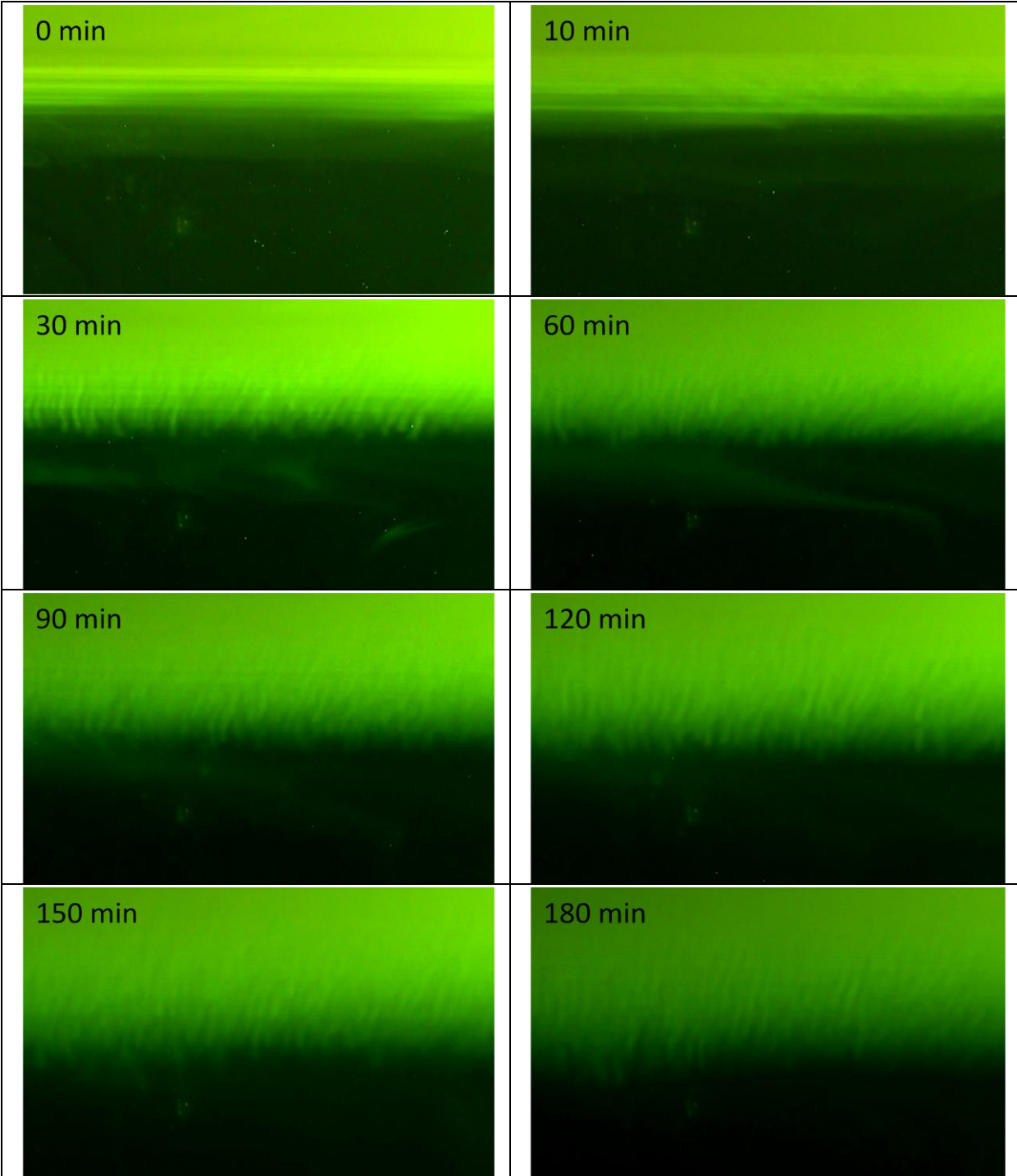


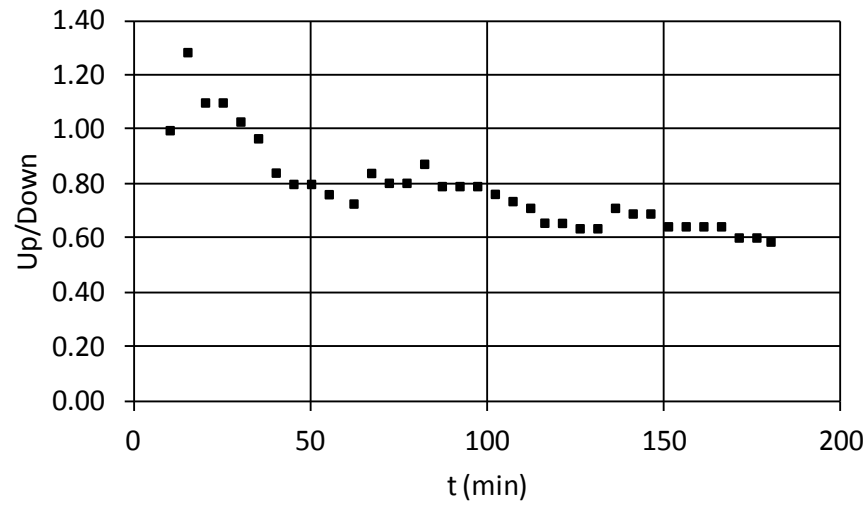
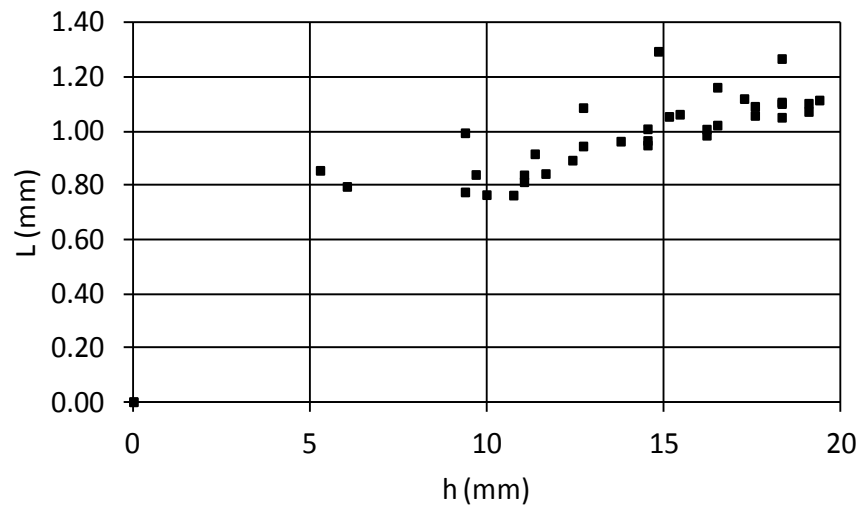
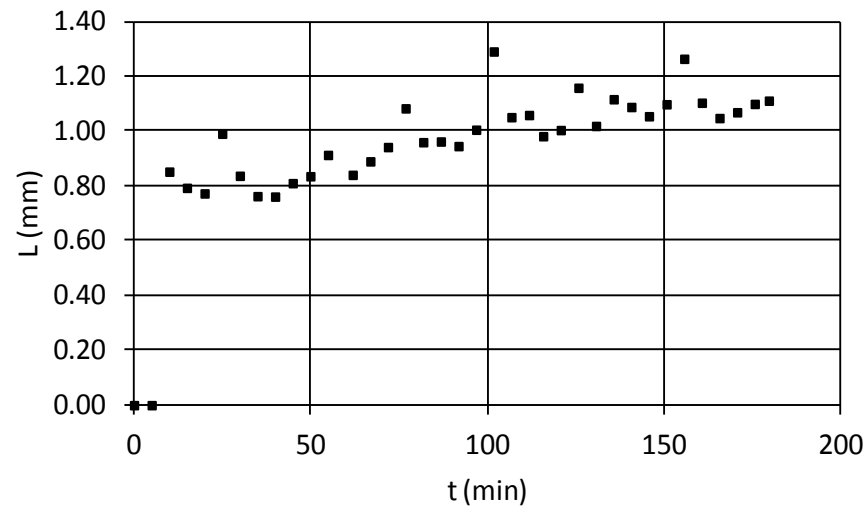
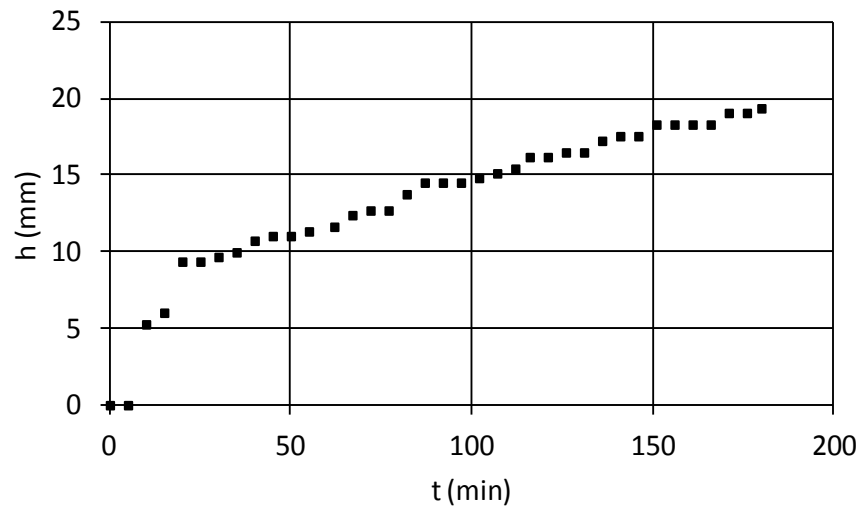


Experiment: **EXP_i_10** | Date: 11/5/2012

All Data are for the Initial State			Hydrometer Indication		Ruddick & Shirtcliffe (1979)		
T (gr/L)	S (gr/L)	θ ($^{\circ}$ C)	ρ_T (gr/cm ³)	ρ_S (gr/cm ³)	ρ_T (gr/cm ³)	ρ_S (gr/cm ³)	$\Delta\rho$ (gr/cm ³)
10	7	24.2	1.00625	1.0020	1.0043	0.99998	0.00432

K_T^{25} (cm ² /s)	K_S^{25} (cm ² /s)	v_T^{20} (cm ² /s)	v_S^{20} (cm ² /s)	β_T	β_S	R_p	R6G Quantity in 4 L Sugar Solution (mL)
1.48E-05	5.09E-06	1.01E-02	1.02E-02	0.701	0.387	2.59	2.0

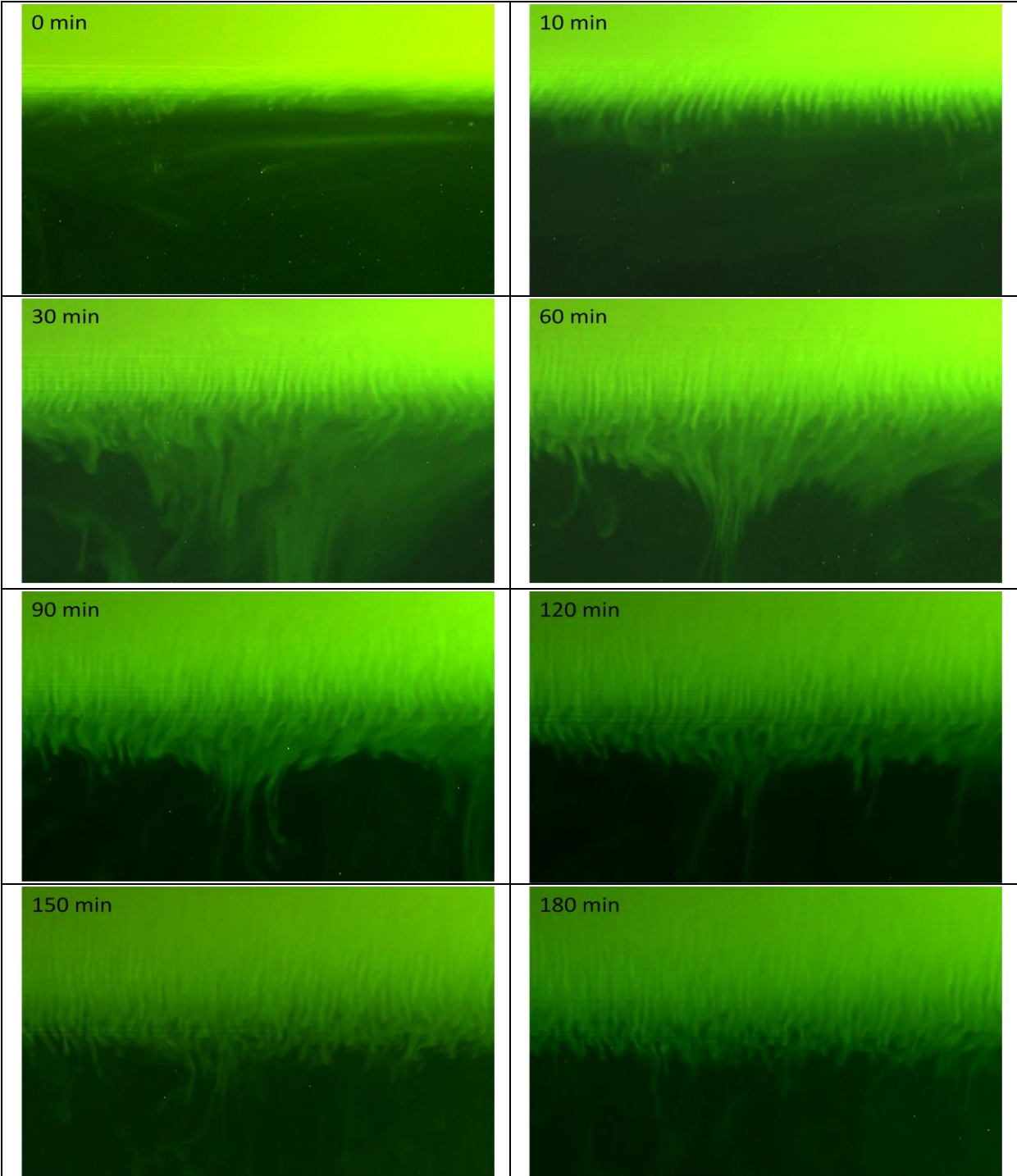


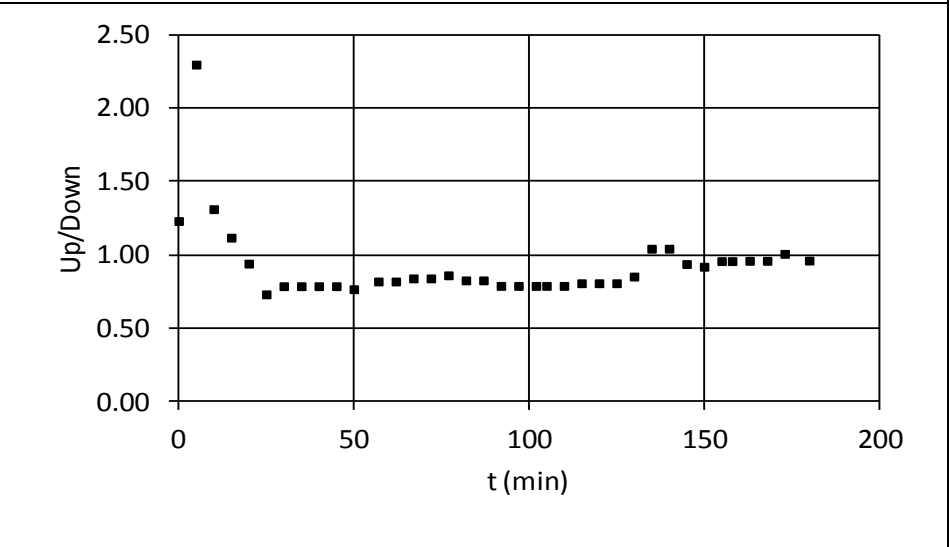
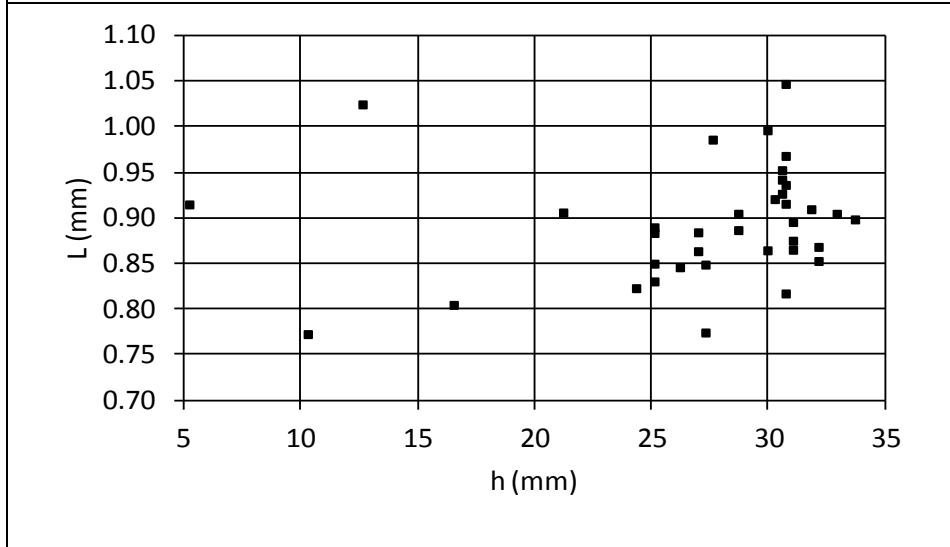
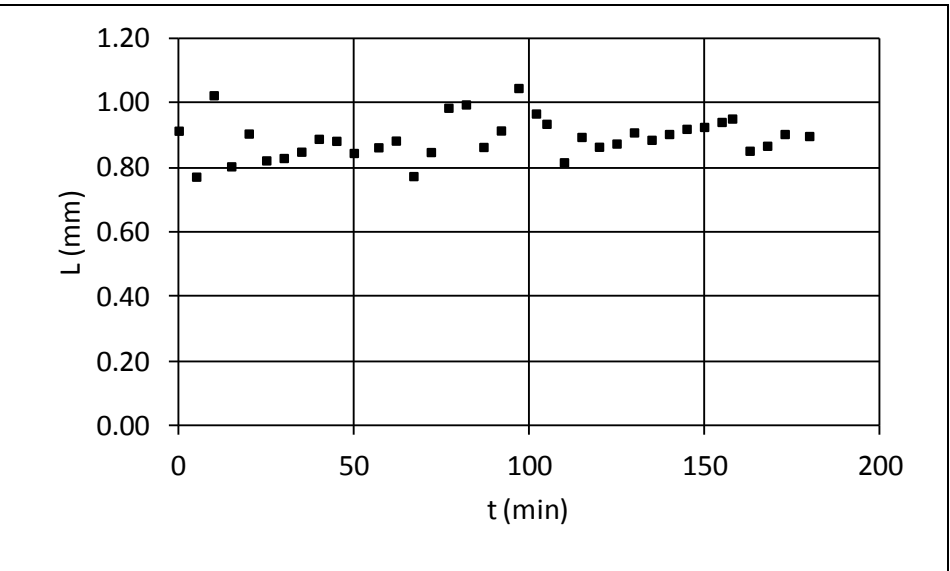
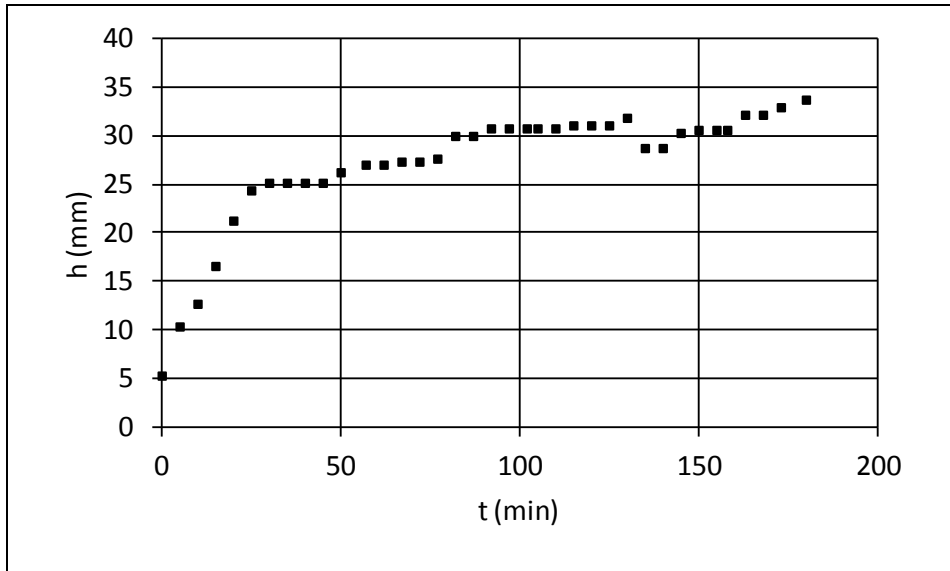


Experiment: **EXP_i_11** | Date: 11/5/2012

All Data are for the Initial State			Hydrometer Indication		Ruddick & Shirtcliffe (1979)		
T (gr/L)	S (gr/L)	θ ($^{\circ}$ C)	ρ_T (gr/cm ³)	ρ_S (gr/cm ³)	ρ_T (gr/cm ³)	ρ_S (gr/cm ³)	$\Delta\rho$ (gr/cm ³)
10	9	23.8	1.00625	1.0030	1.0044	1.0009	0.00355

K_T^{25} (cm ² /s)	K_S^{25} (cm ² /s)	v_T^{20} (cm ² /s)	v_S^{20} (cm ² /s)	β_T	β_S	R_p	R6G Quantity in 4 L Sugar Solution (mL)
1.48E-05	5.05E-06	1.01E-02	1.02E-02	0.702	0.387	2.01	2.0

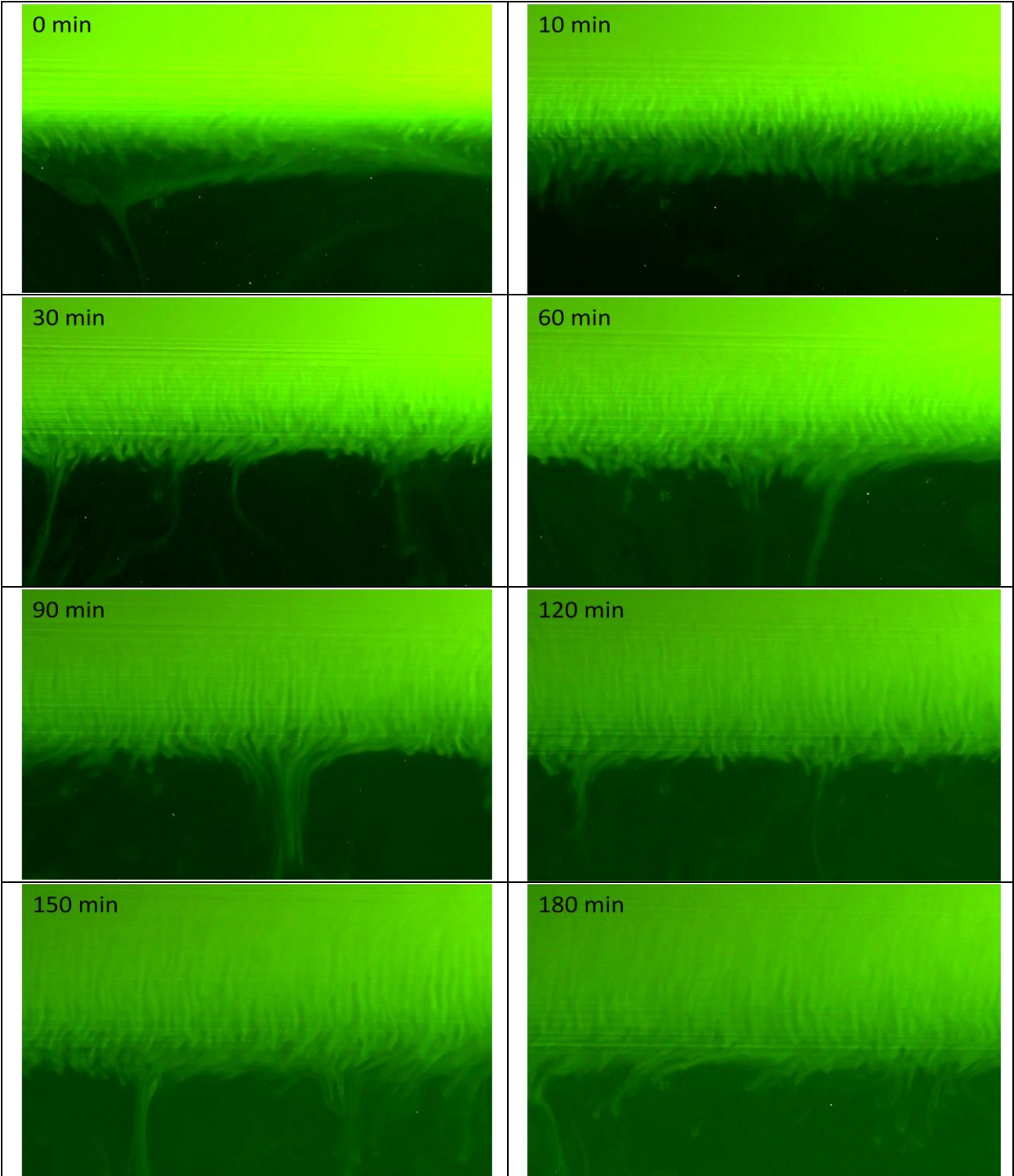


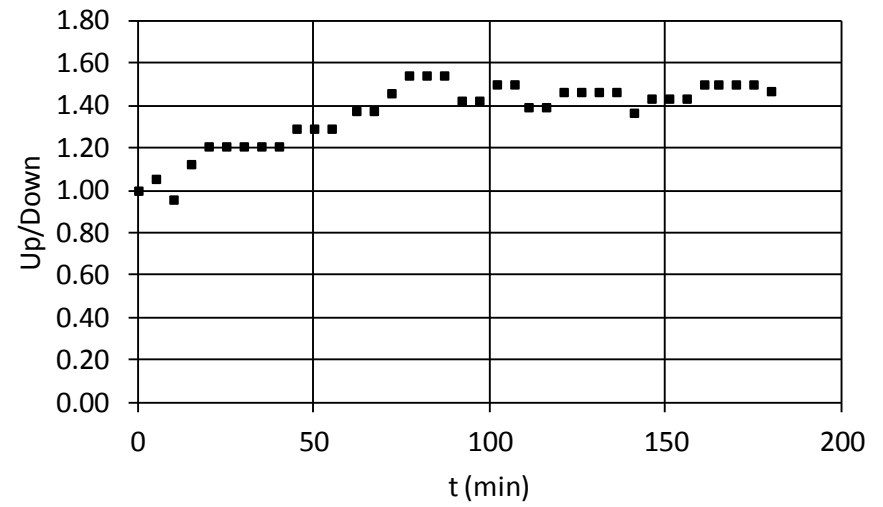
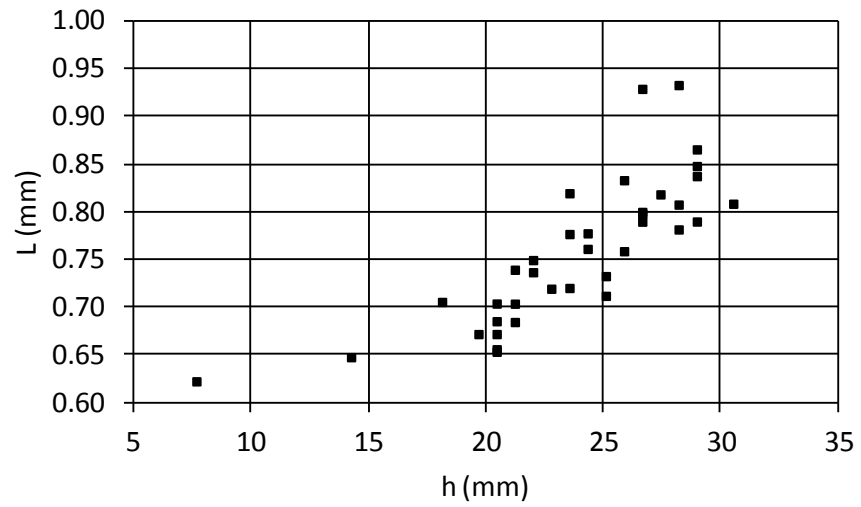
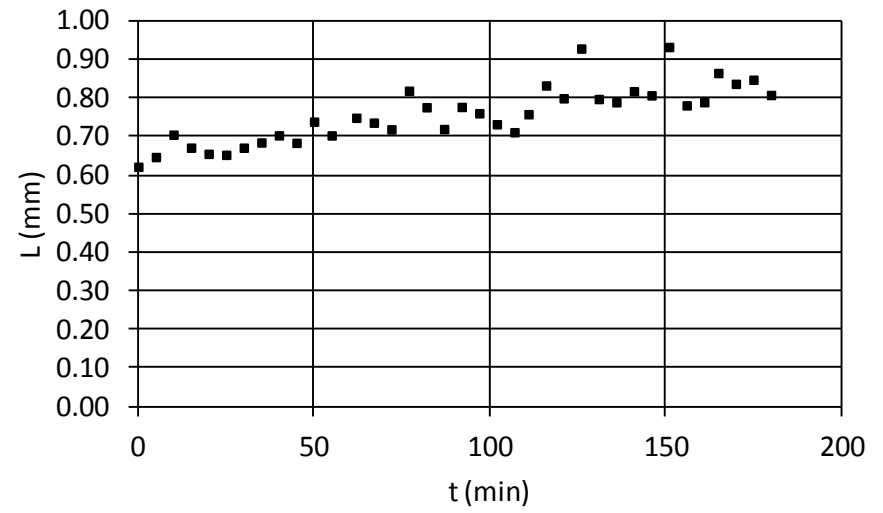
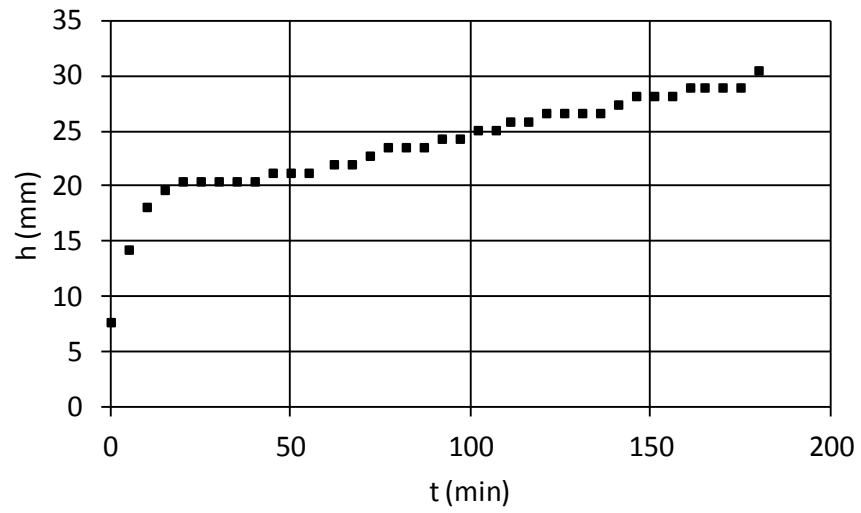


Experiment: **EXP_i_12** | Date: 5/4/2012

All Data are for the Initial State			Hydrometer Indication		Ruddick & Shirtcliffe (1979)		
T (gr/L)	S (gr/L)	θ ($^{\circ}$ C)	ρ_T (gr/cm ³)	ρ_S (gr/cm ³)	ρ_T (gr/cm ³)	ρ_S (gr/cm ³)	$\Delta\rho$ (gr/cm ³)
10	10	24.0	1.00625	1.0025	1.0044	1.0012	0.00316

K_T^{25} (cm ² /s)	K_S^{25} (cm ² /s)	v_T^{20} (cm ² /s)	v_S^{20} (cm ² /s)	β_T	β_S	R_p	R6G Quantity in 4 L Sugar Solution (mL)
1.48E-05	5.03E-06	1.01E-02	1.02E-02	0.701	0.388	1.81	2.0

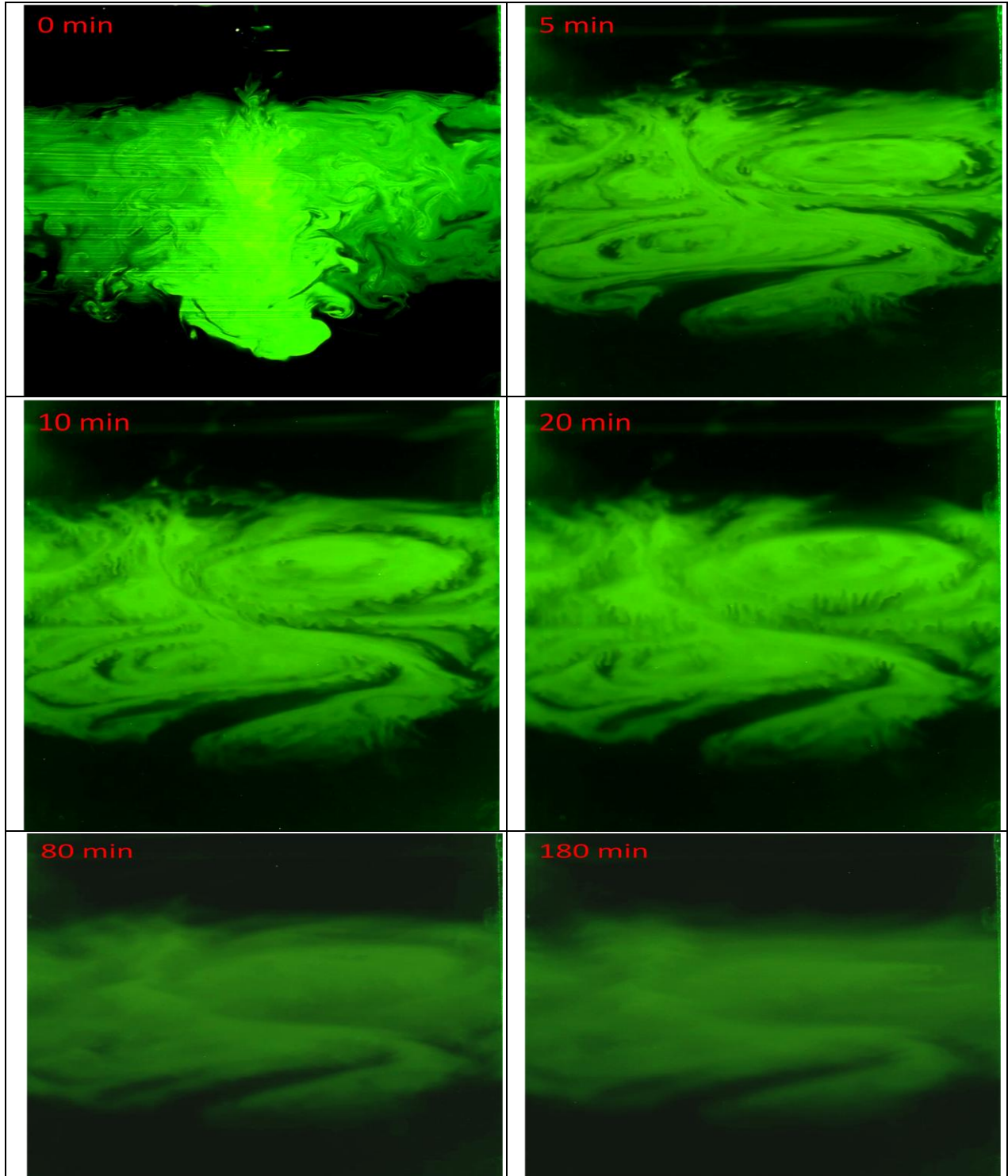


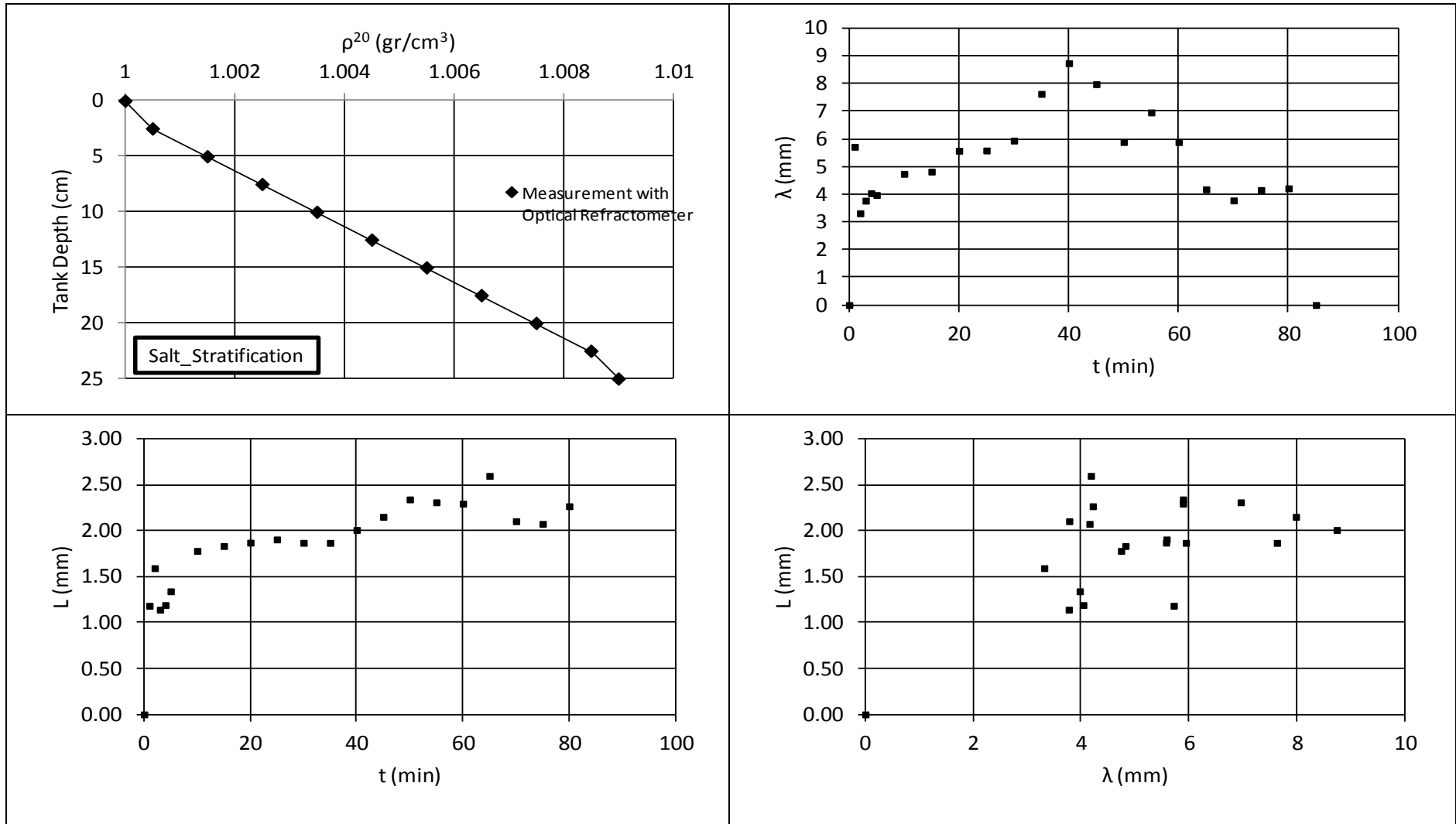


Experiment: EXP_ii_1	Date: 20/4/2012	All Data are for the Initial State
-----------------------------	-----------------	------------------------------------

Exp_Tank – Ambient Characteristics			Jet Characteristics						
θ_a (°C)	N^{20} (s ⁻¹)	K^{25} (cm ² /s)	θ_j (°C)	S or T (gr/L)	ρ^{20} (gr/cm ³)	v^{20} (cm ² /s)	Re^{20}	K^{25} (cm ² /s)	R6G in 4L (mL)
18.1	0.624	1.48E-05	18.1	4	1.00000	1.01E-02	1684	5.15E-06	1.5

Injection Characteristics				Tree-like structures
F	Q (cm ³ /s)	D (mm)	Duration of disposal (s)	
16	3.67	2.75	45	No

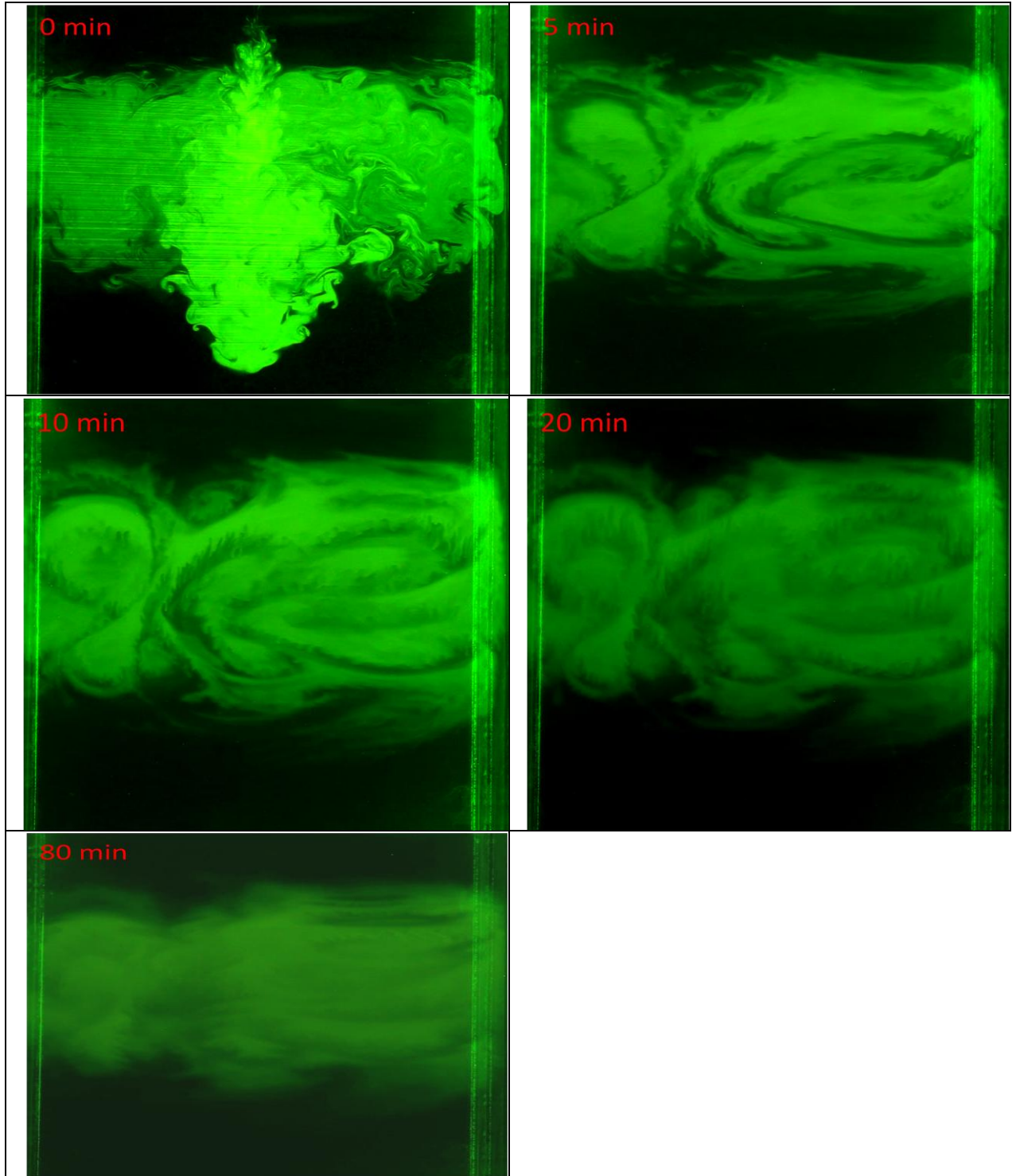


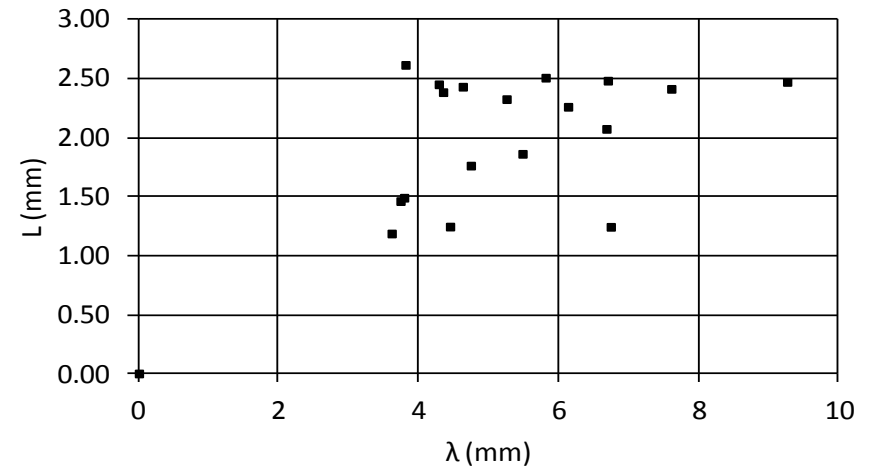
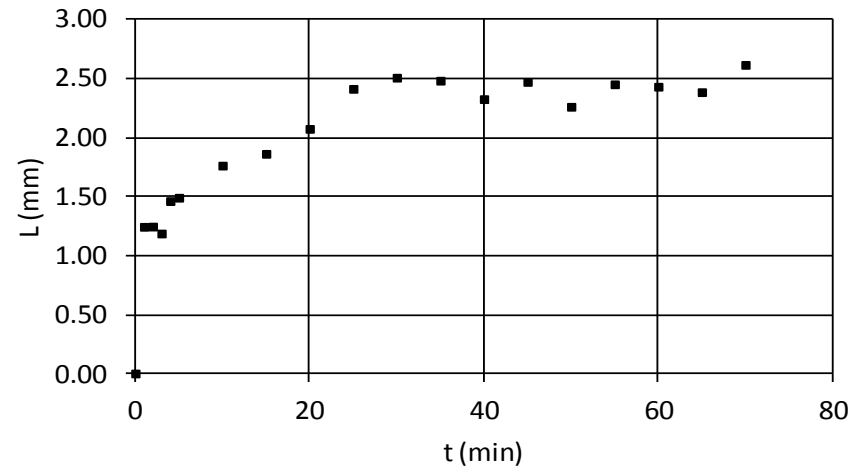
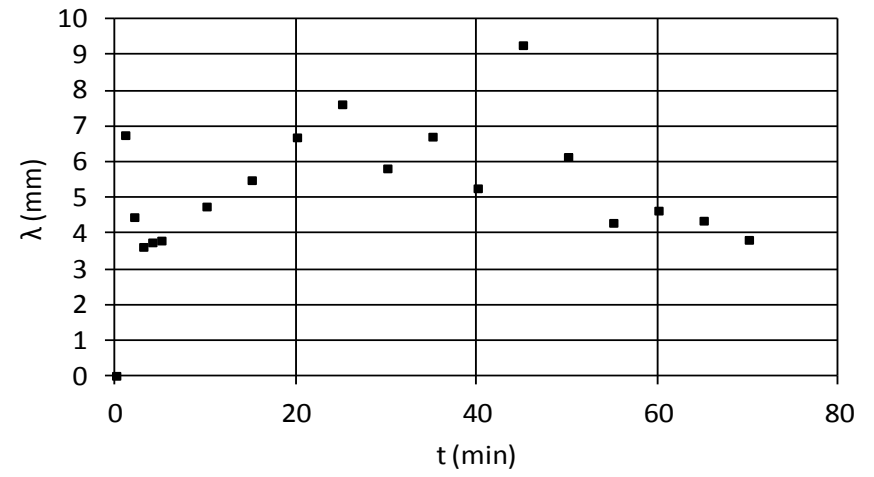
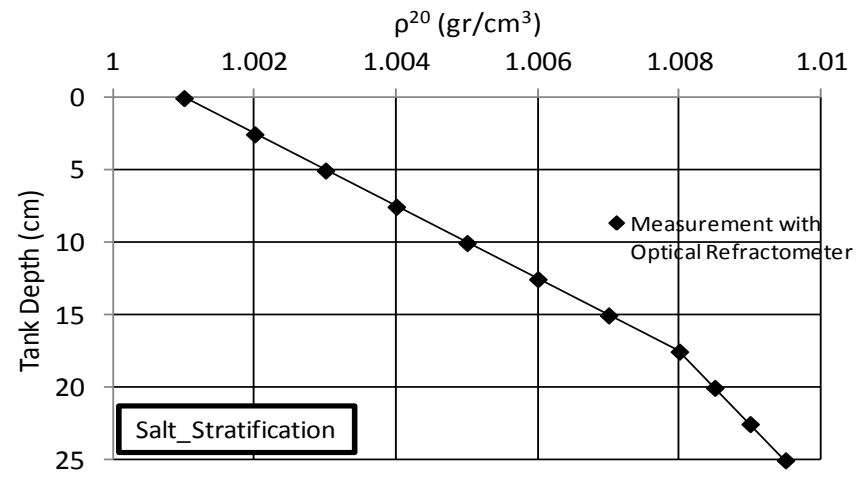


Experiment: EXP_ii_2	Date: 28/4/2012	All Data are for the Initial State
-----------------------------	-----------------	------------------------------------

Exp_Tank – Ambient Characteristics			Jet Characteristics						
θ_a (°C)	N^{20} (s ⁻¹)	K^{25} (cm ² /s)	θ_j (°C)	S or T (gr/L)	ρ^{20} (gr/cm ³)	v^{20} (cm ² /s)	Re^{20}	K^{25} (cm ² /s)	R6G in 4L (mL)
20.2	0.624	1.48E-05	20.2	6	1.00051	1.01E-02	1623	5.11E-06	2

Injection Characteristics				Tree-like structures
F	Q (cm ³ /s)	D (mm)	Duration of disposal (s)	
16	3.67	2.84	45	No

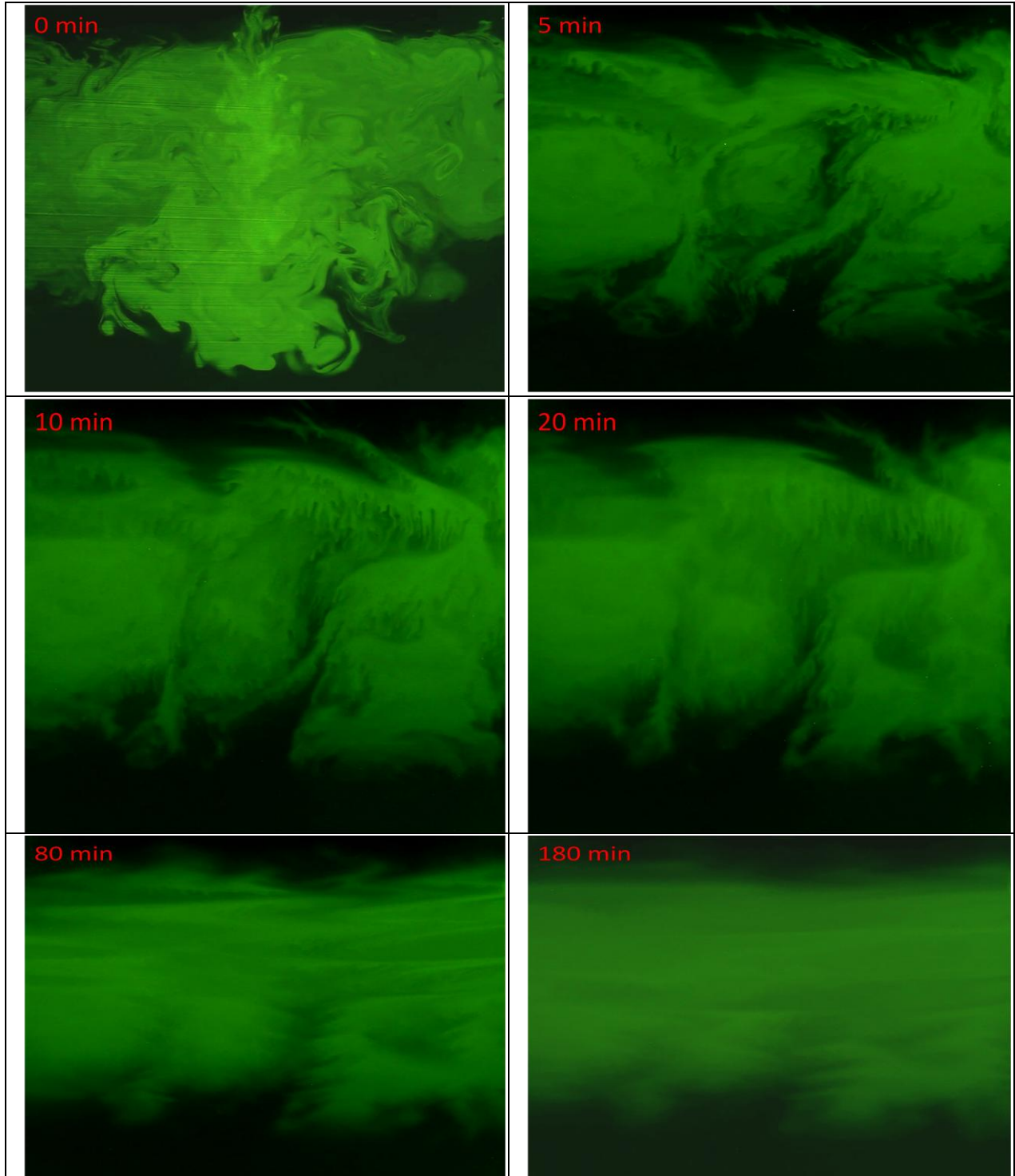


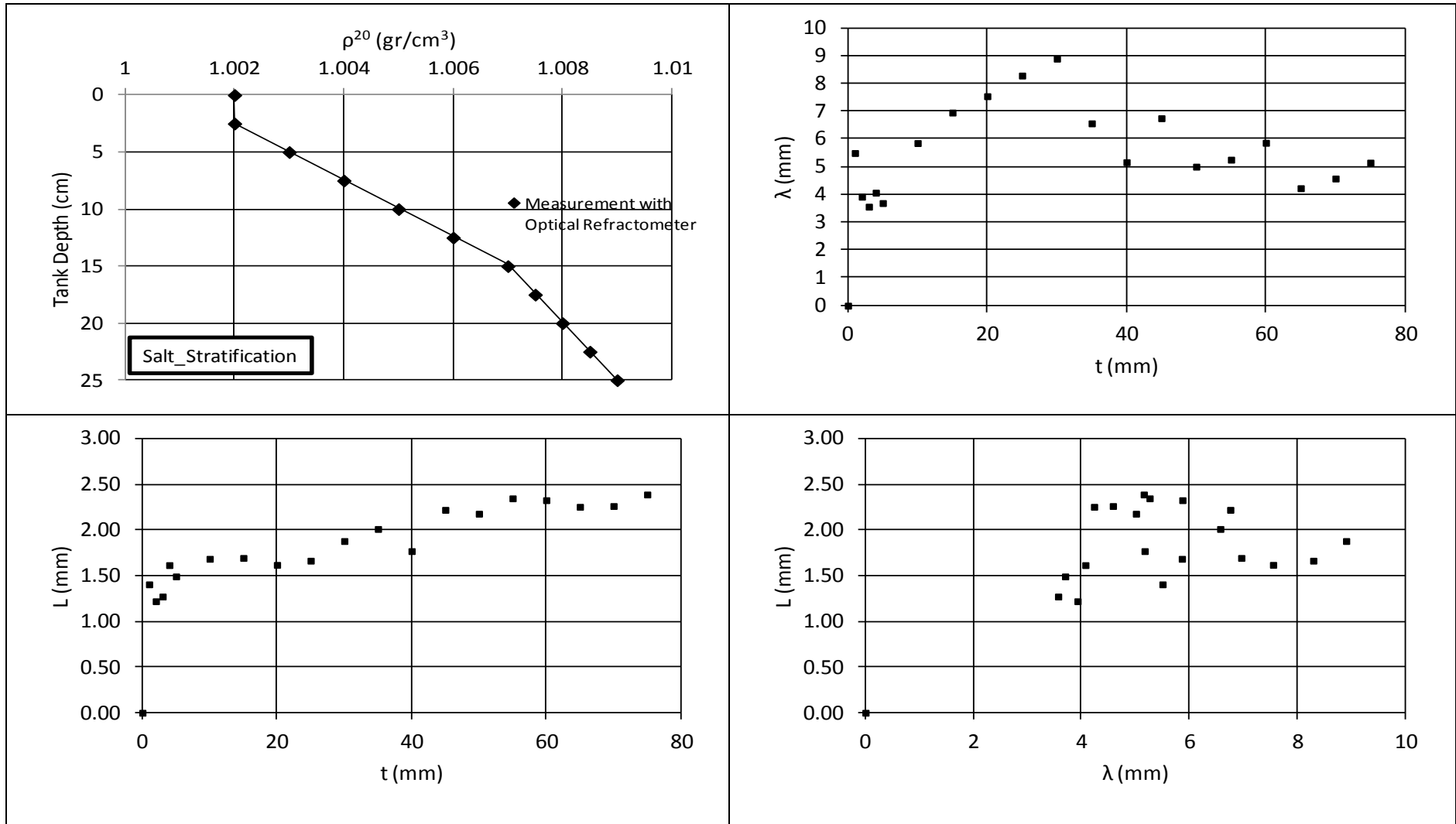


Experiment: EXP_ii_3	Date: 28/4/2012	All Data are for the Initial State
-----------------------------	-----------------	------------------------------------

Exp_Tank – Ambient Characteristics			Jet Characteristics						
θ_a (°C)	N^{20} (s ⁻¹)	K^{25} (cm ² /s)	θ_j (°C)	S or T (gr/L)	ρ^{20} (gr/cm ³)	v^{20} (cm ² /s)	Re^{20}	K^{25} (cm ² /s)	R6G in 4L (mL)
21.2	0.550	1.48E-05	21.2	8	1.00129	1.02E-02	1771	5.07E-06	2

Injection Characteristics				Tree-like structures
F	Q (cm ³ /s)	D (mm)	Duration of disposal (s)	
16	3.67	2.59	45	No

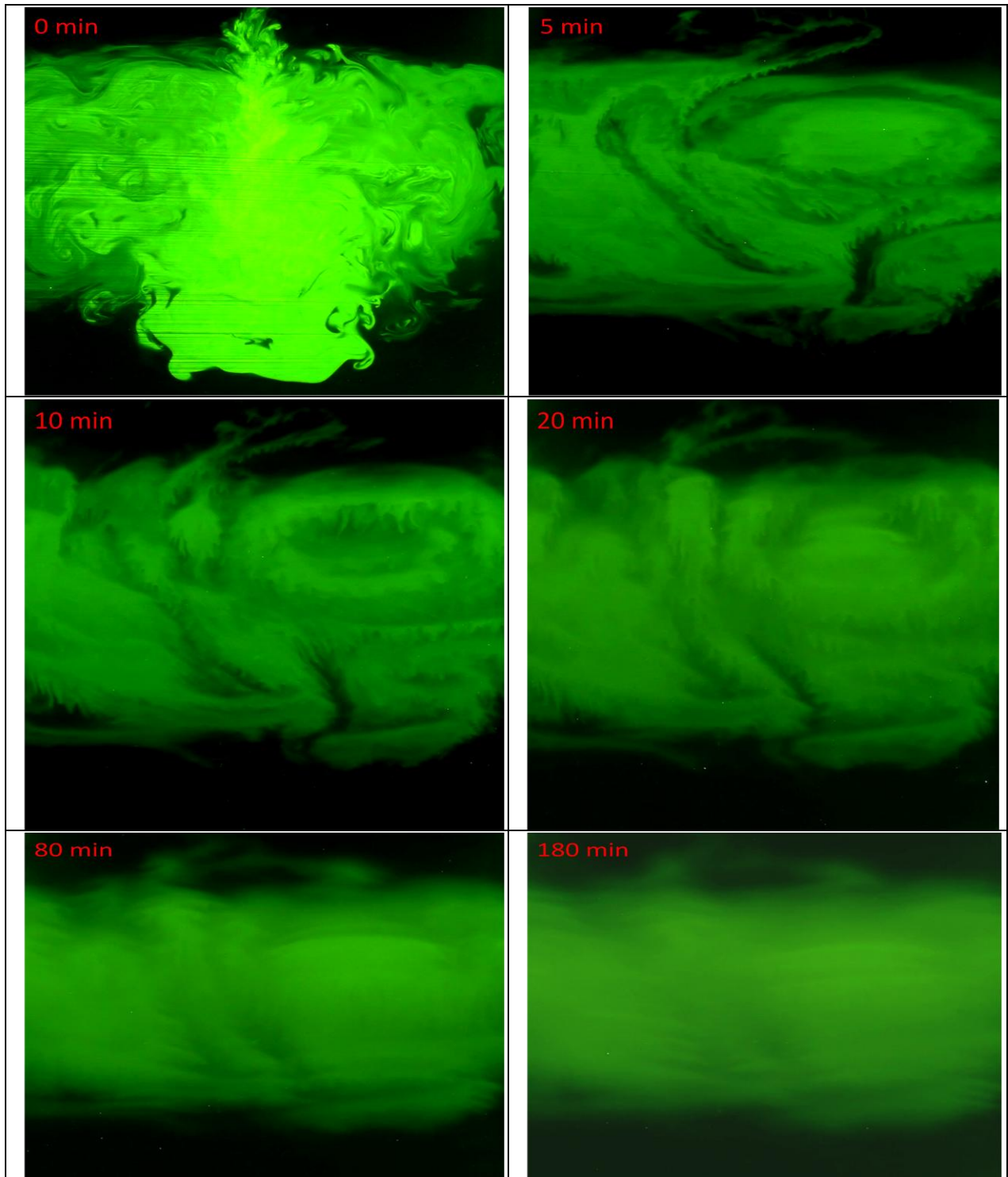


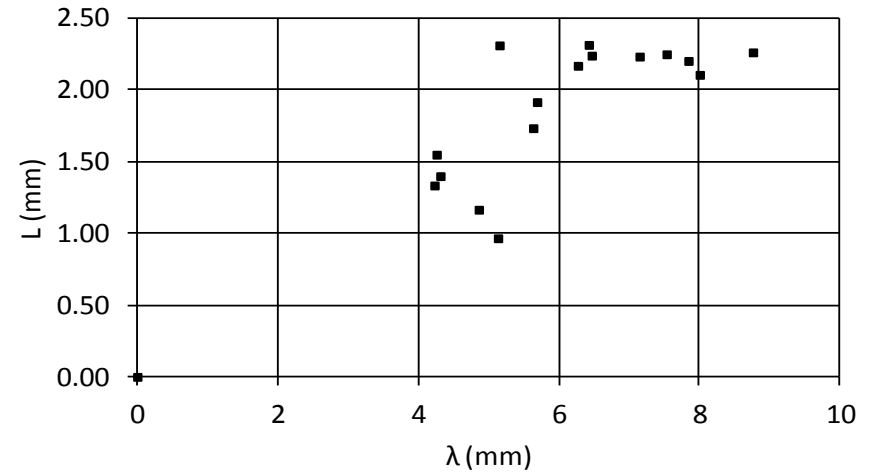
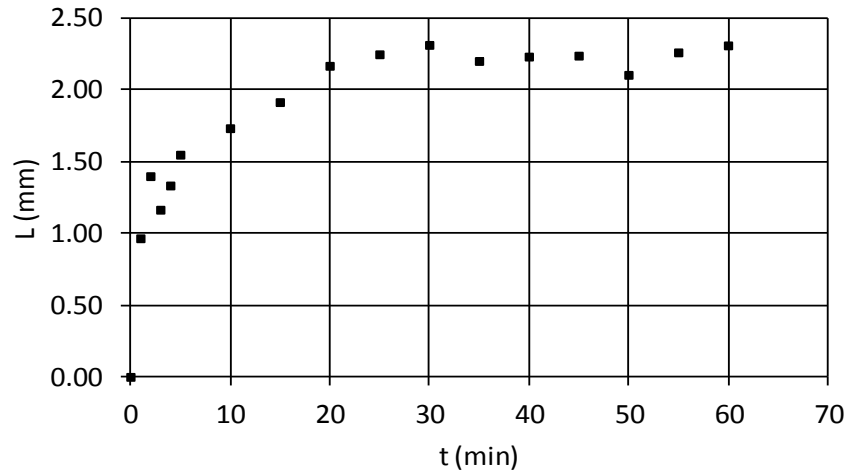
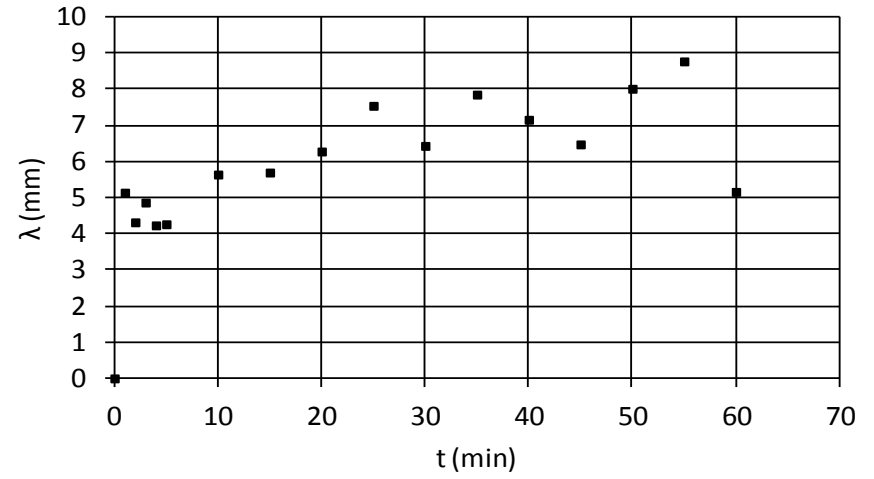
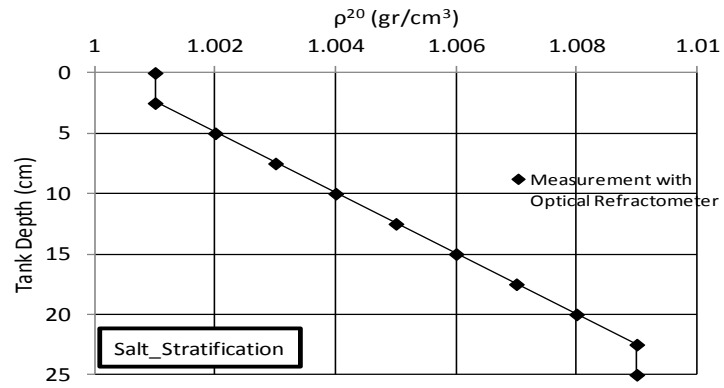


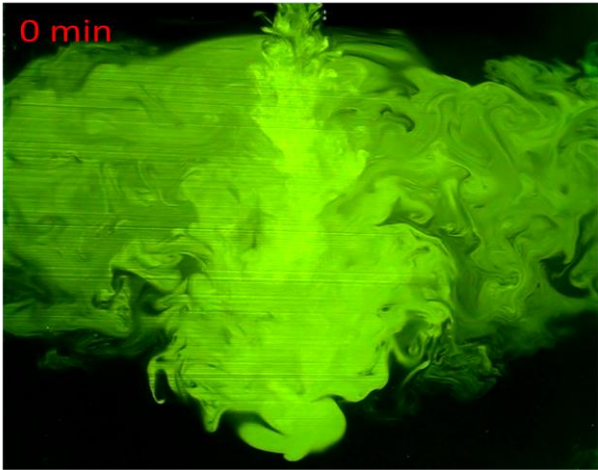
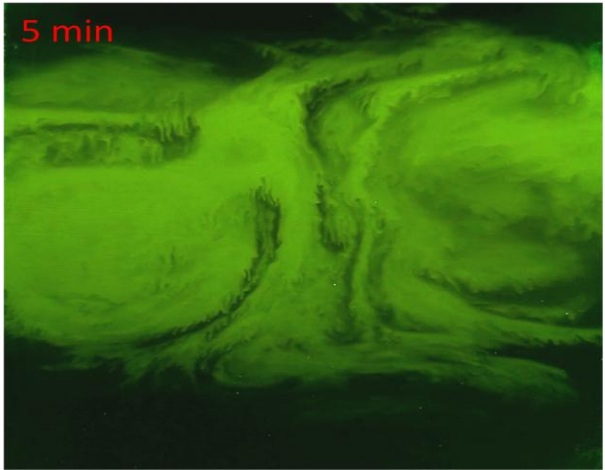
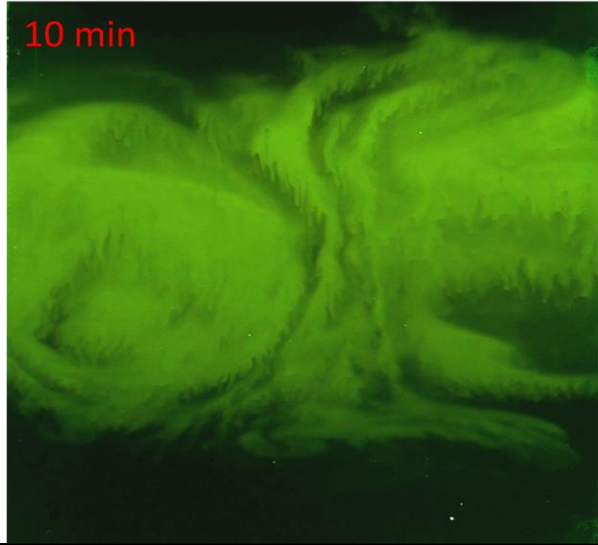
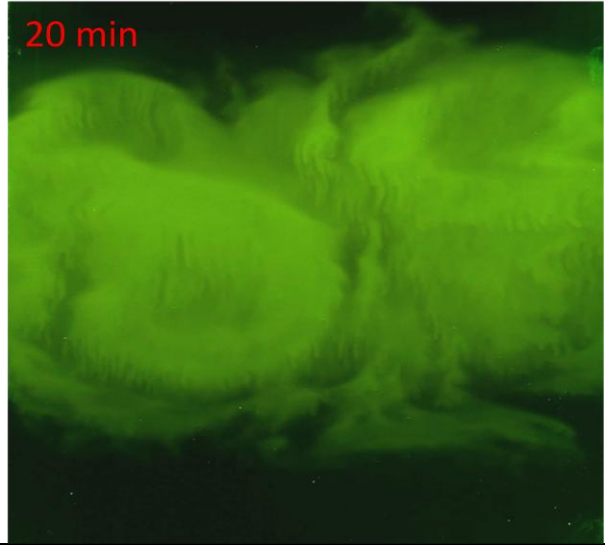
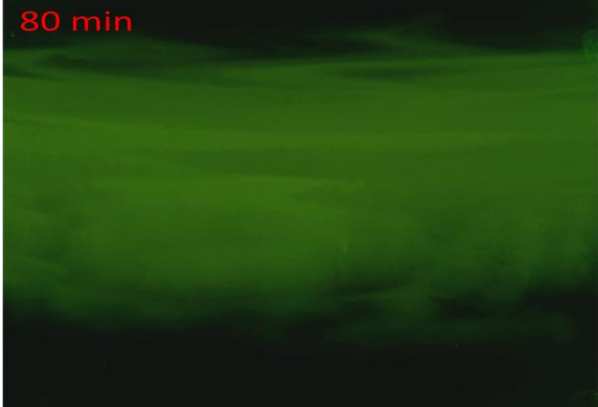
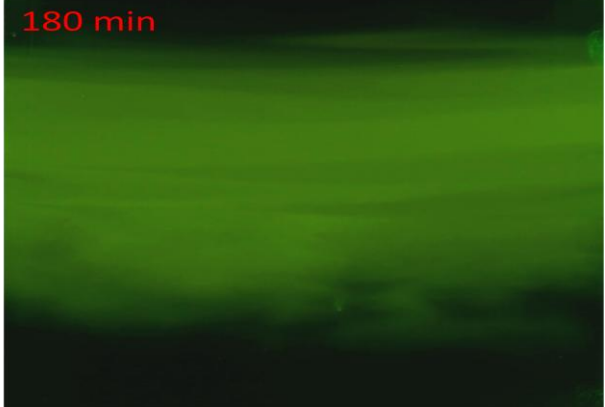
Experiment: EXP_ii_4	Date: 29/4/2012	All Data are for the Initial State
-----------------------------	-----------------	------------------------------------

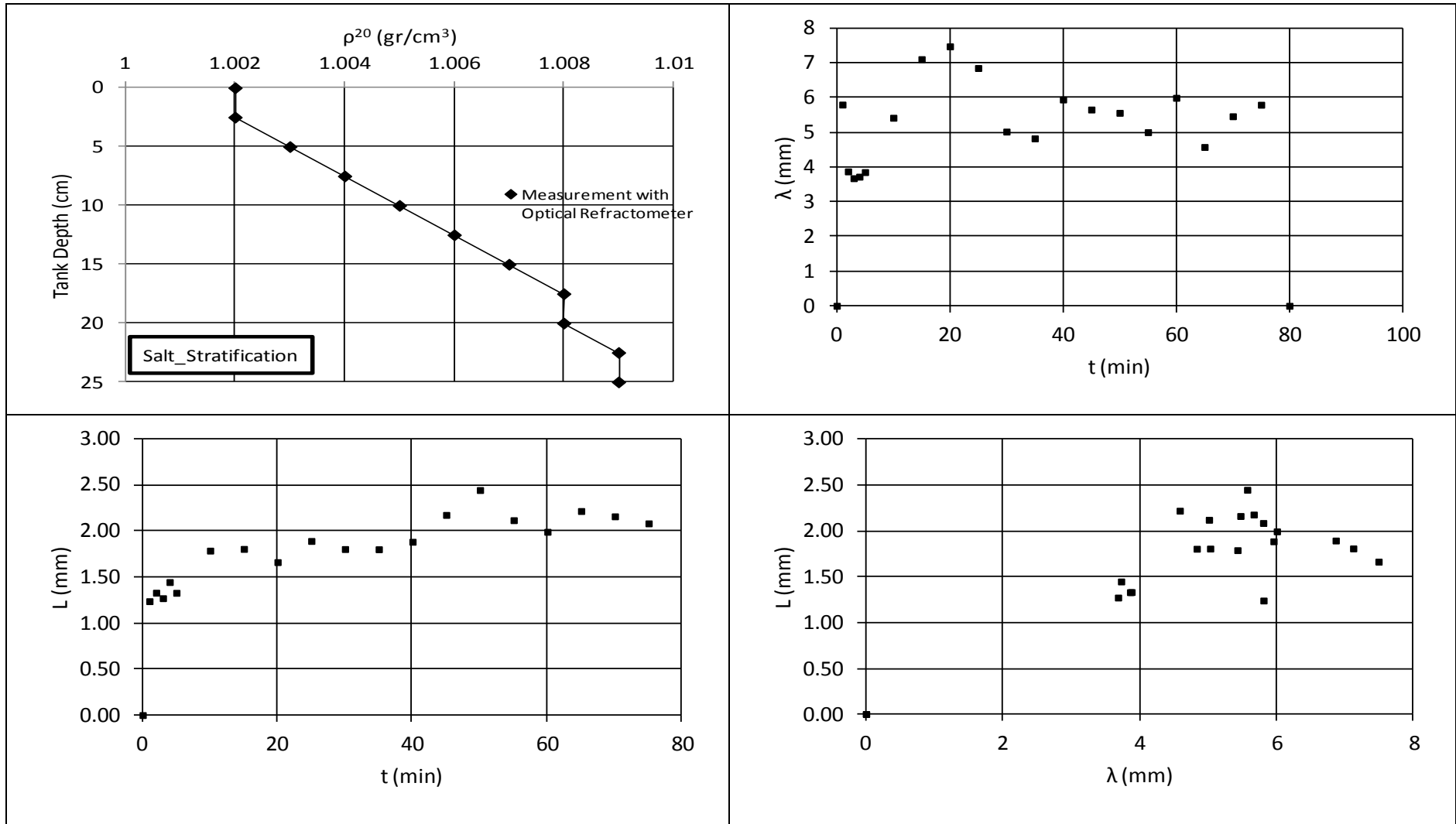
Exp_Tank – Ambient Characteristics			Jet Characteristics						
θ_a (°C)	N^{20} (s ⁻¹)	K^{25} (cm ² /s)	θ_j (°C)	S or T (gr/L)	ρ^{20} (gr/cm ³)	v^{20} (cm ² /s)	Re^{20}	K^{25} (cm ² /s)	R6G in 4L (mL)
20.5	0.624	1.48E-05	20.5	10	1.00207	1.02E-02	1602	5.03E-06	2

Injection Characteristics				Tree-like structures
F	Q (cm ³ /s)	D (mm)	Duration of disposal (s)	
16	3.67	2.85	45	No

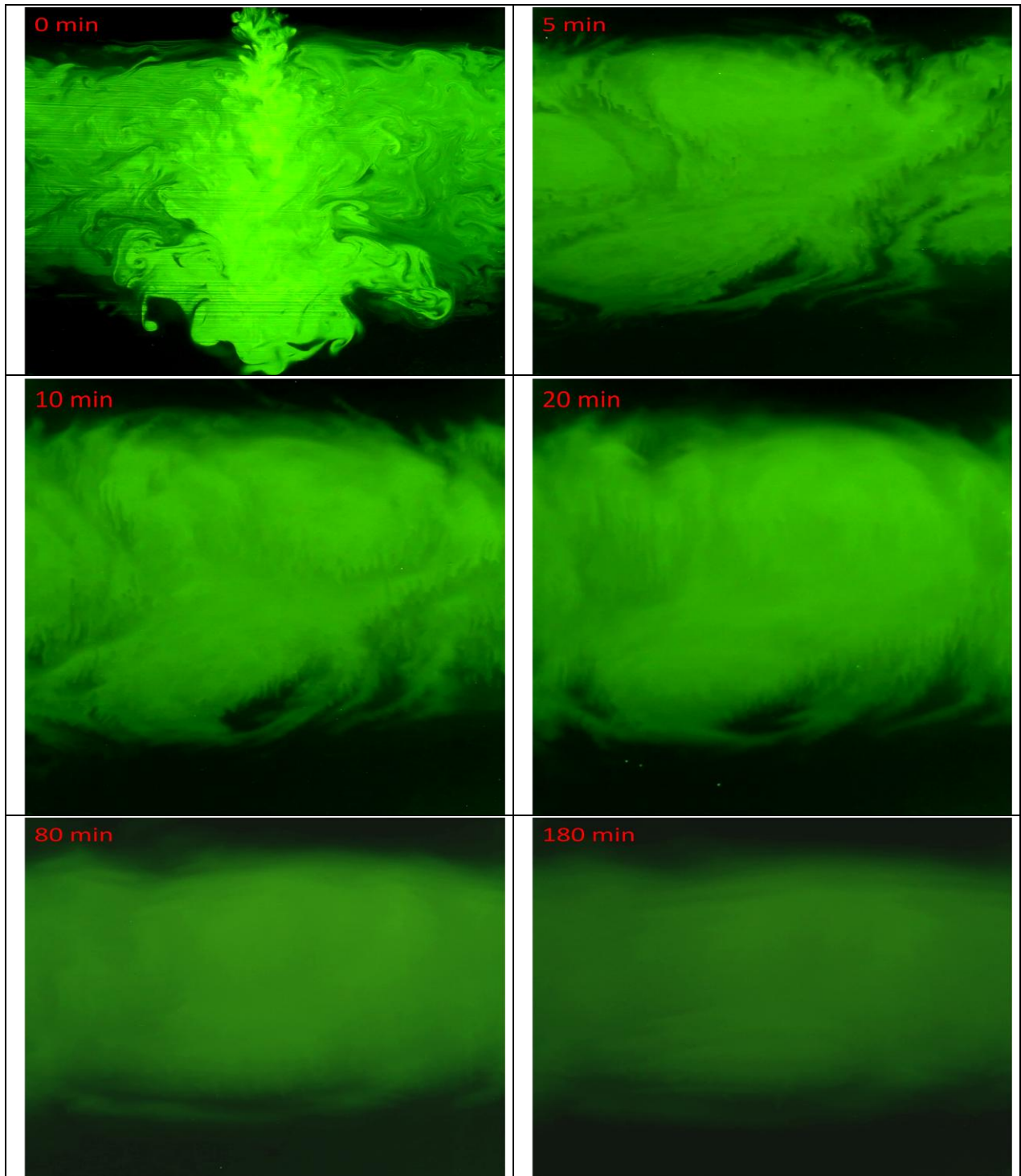


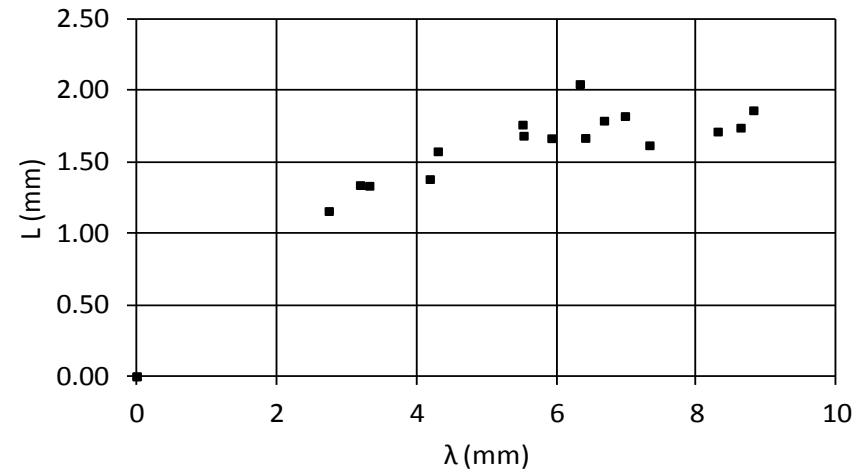
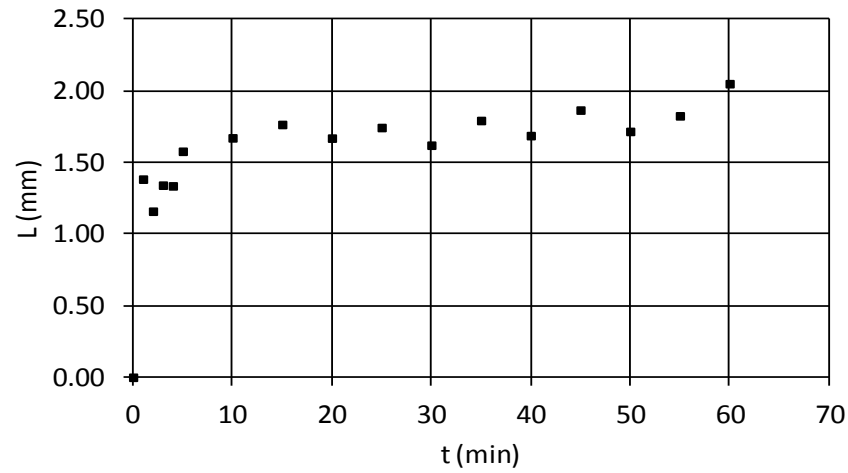
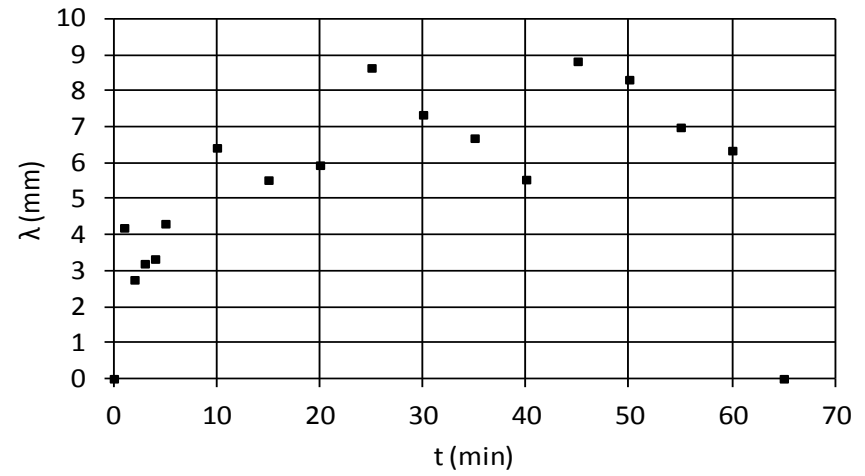
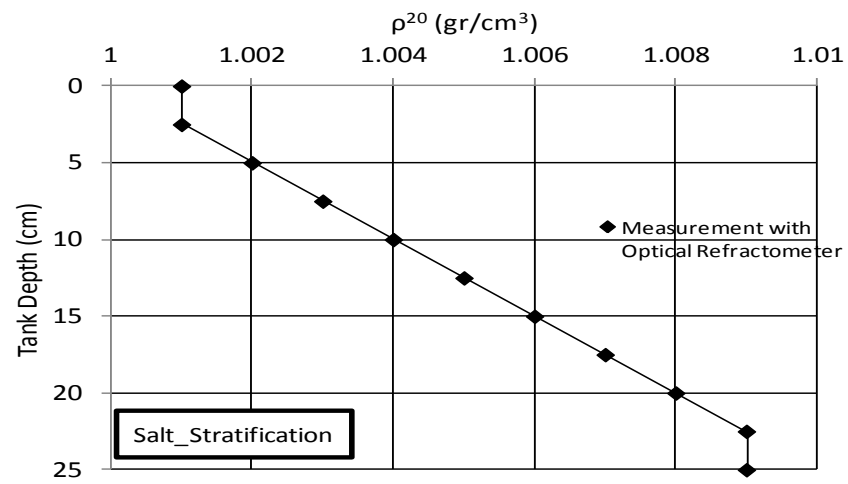


Experiment: EXP_ii_5			Date: 29/4/2012			All Data are for the Initial State			
Exp_Tank – Ambient Characteristics			Jet Characteristics						
θ_a (°C)	N^{20} (s ⁻¹)	K^{25} (cm ² /s)	θ_j (°C)	S or T (gr/L)	ρ^{20} (gr/cm ³)	v^{20} (cm ² /s)	Re^{20}	K^{25} (cm ² /s)	R6G in 4L (mL)
20.9	0.624	1.48E-05	20.9	12	1.00285	1.03E-02	1682	4.99E-06	2
Injection Characteristics									
F	Q (cm ³ /s)	D (mm)	Duration of disposal (s)		Tree-like structures				
16	3.67	2.70	45		No				
0 min					5 min				
									
10 min					20 min				
									
80 min					180 min				
									

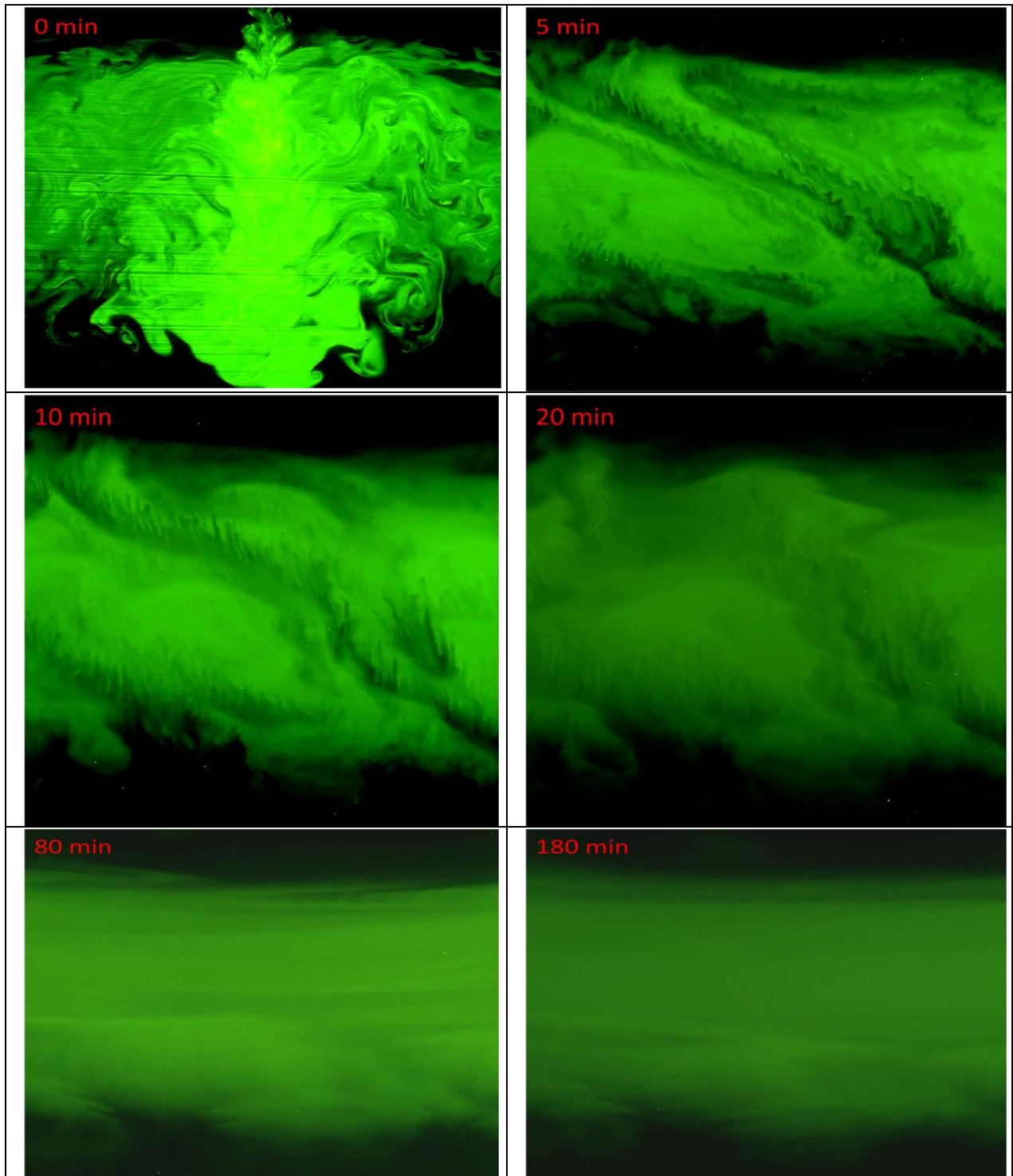


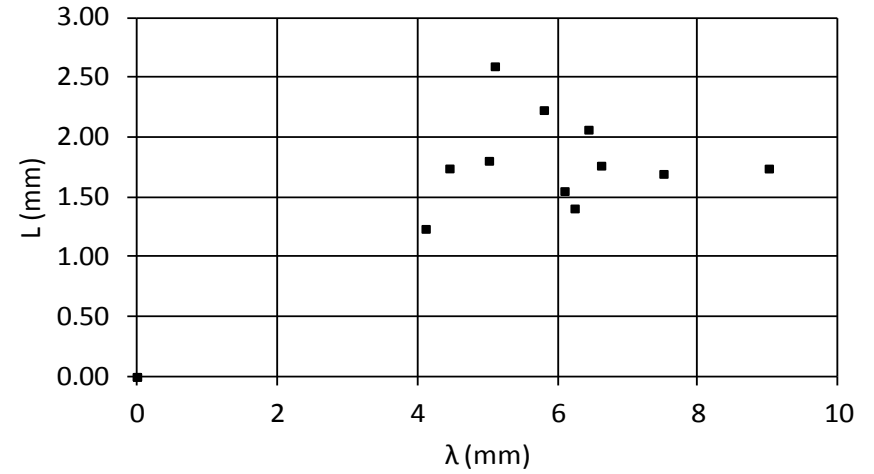
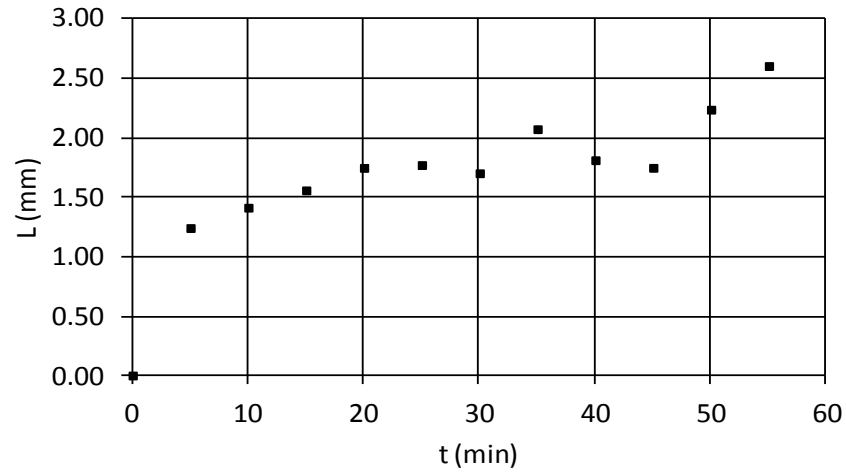
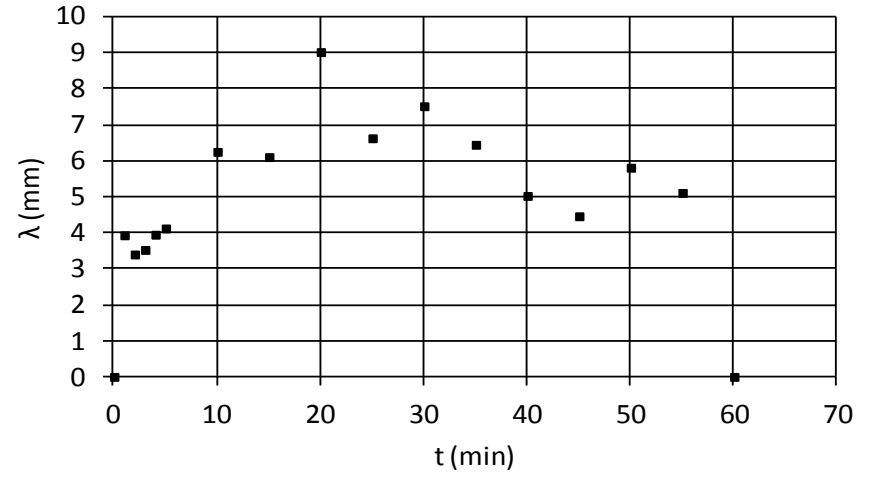
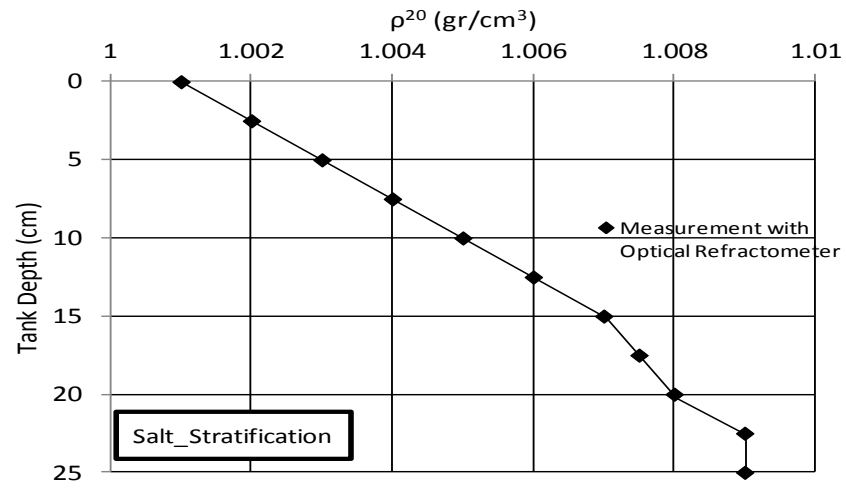
Experiment: EXP_ii_6			Date: 30/4/2012		All Data are for the Initial State				
Exp_Tank – Ambient Characteristics			Jet Characteristics						
θ_a (°C)	N^{20} (s ⁻¹)	K^{25} (cm ² /s)	θ_j (°C)	S or T (gr/L)	ρ^{20} (gr/cm ³)	v^{20} (cm ² /s)	Re^{20}	K^{25} (cm ² /s)	R6G in 4L (mL)
21.4	0.624	1.48E-05	21.4	14	1.00363	1.03E-02	1598	4.95E-06	2
Injection Characteristics				Tree-like structures					
F	Q (cm ³ /s)	D (mm)	Duration of disposal (s)						
16	3.67	2.83	45	No					





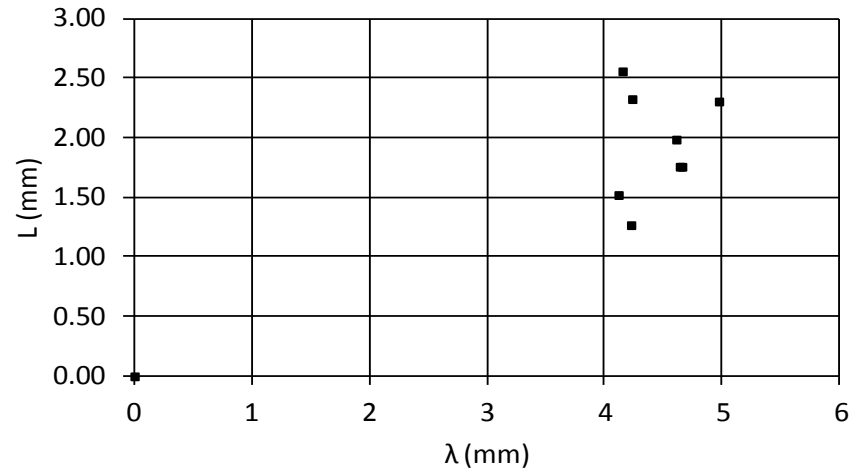
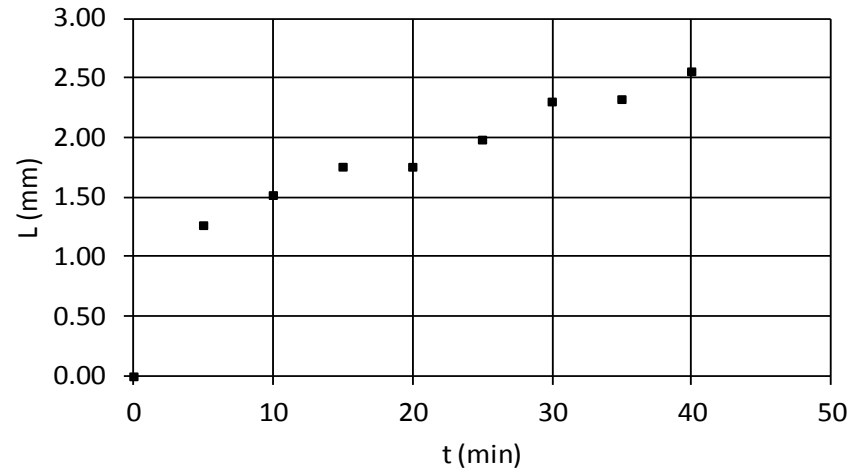
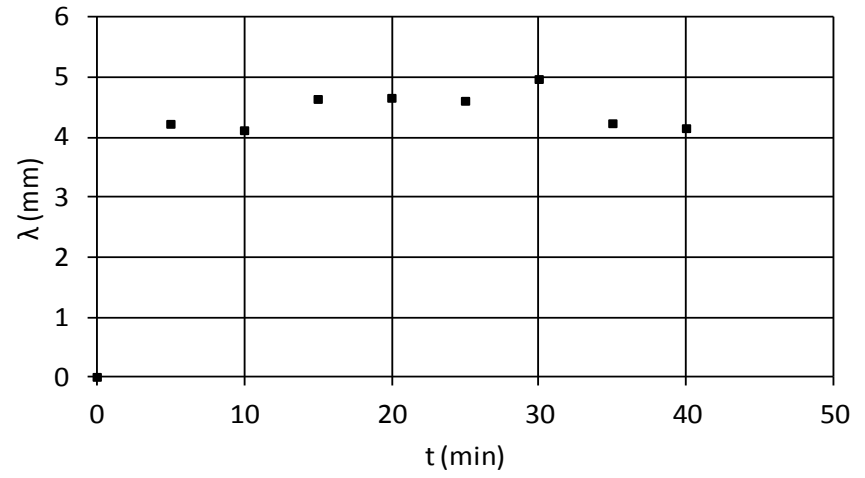
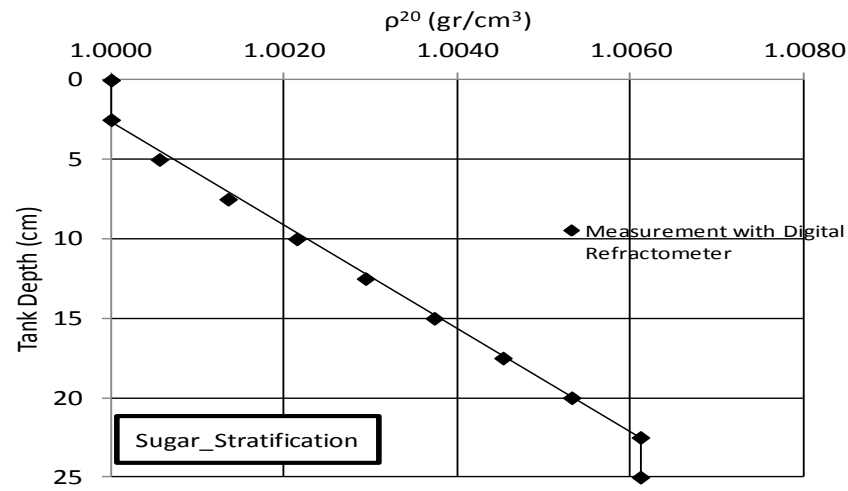
Experiment: EXP_ii_7			Date: 30/4/2012		All Data are for the Initial State				
Exp_Tank – Ambient Characteristics			Jet Characteristics						
θ_a (°C)	N^{20} (s ⁻¹)	K^{25} (cm ² /s)	θ_j (°C)	S or T (gr/L)	ρ^{20} (gr/cm ³)	v^{20} (cm ² /s)	Re^{20}	K^{25} (cm ² /s)	R6G in 4L (mL)
21.7	0.588	1.48E-05	21.7	16	1.00441	1.04E-02	1578	4.91E-06	2
Injection Characteristics				Tree-like structures					
F	Q (cm ³ /s)	D (mm)	Duration of disposal (s)						
16	3.67	2.85	45	No					





Experiment: EXP_ii_8			Date: 14/5/2012			All Data are for the Initial State			
Exp_Tank – Ambient Characteristics			Jet Characteristics						
θ_a (°C)	N^{20} (s ⁻¹)	K^{25} (cm ² /s)	θ_j (°C)	S or T (gr/L)	ρ^{20} (gr/cm ³)	v^{20} (cm ² /s)	Re^{20}	K^{25} (cm ² /s)	R6G in 4L (mL)
24.7	0.546	4.99E-06	24.7	4	1.00106	1.01E-02	1664	1.50E-05	2
Injection Characteristics				Tree-like structures					
F	Q (cm ³ /s)	D (mm)	Duration of disposal (s)						
16	3.67	2.78	45	Yes					

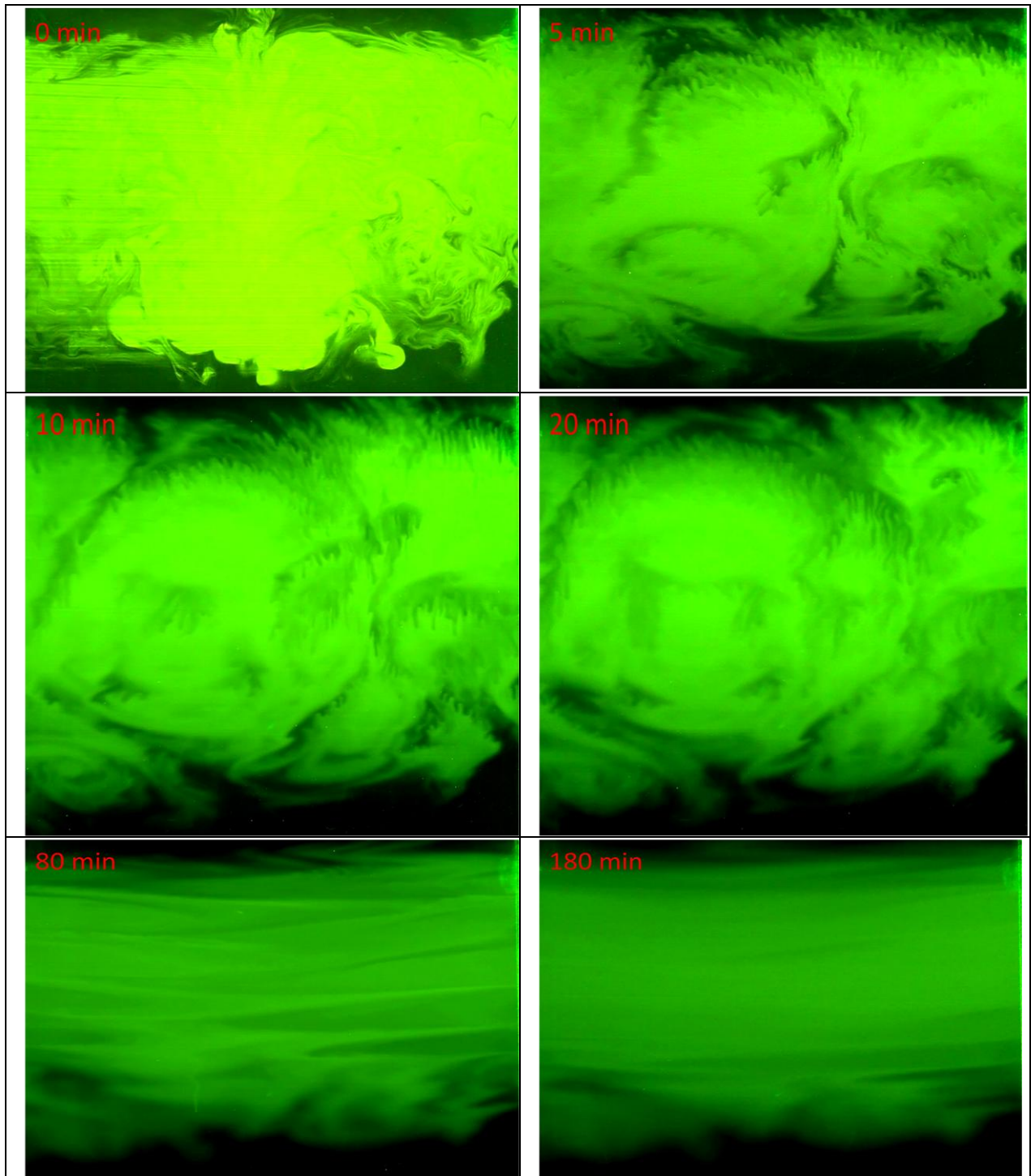
0 min	5 min
10 min	20 min
80 min	180 min

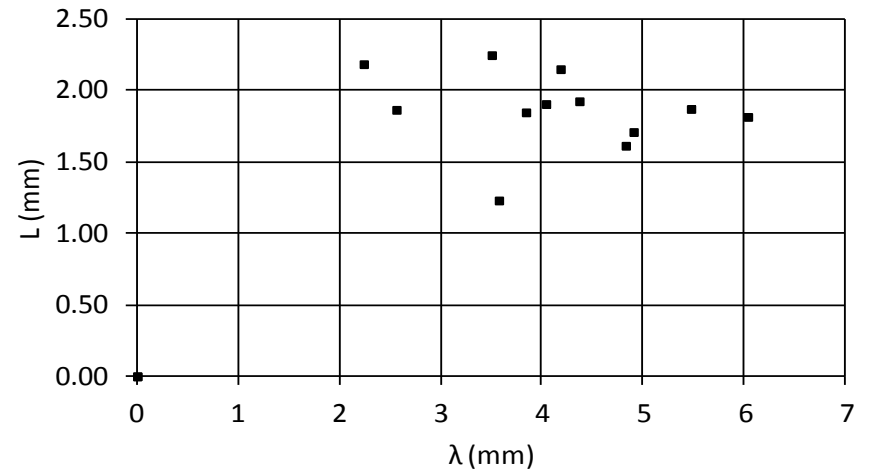
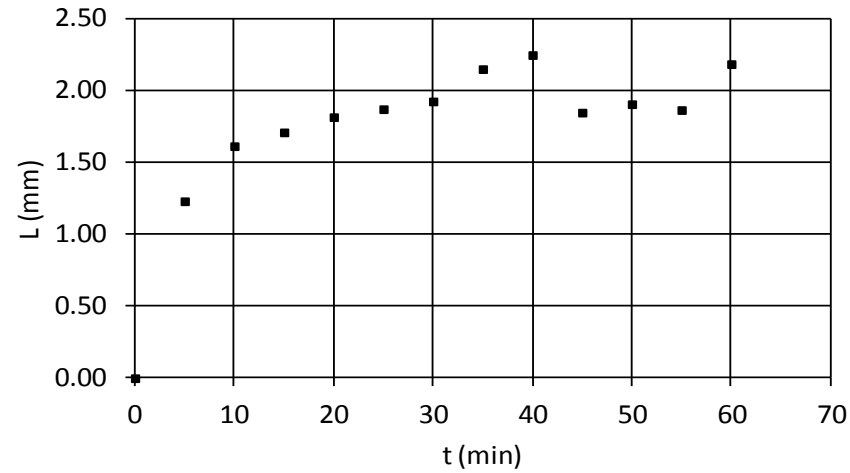
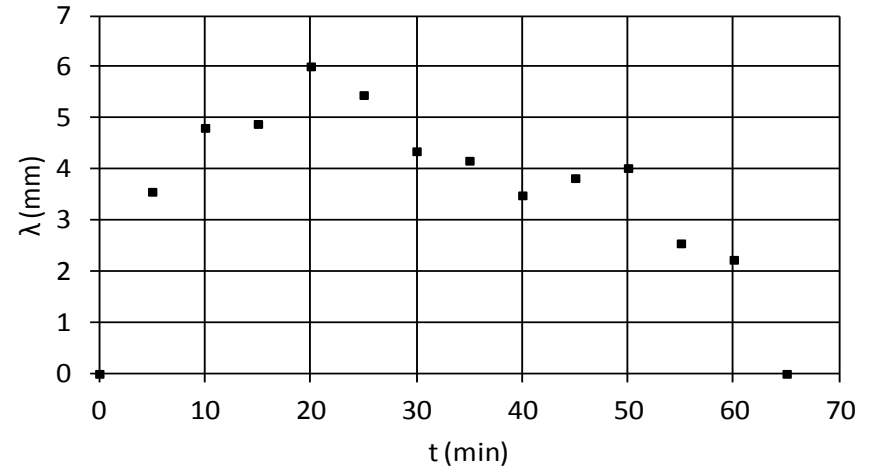
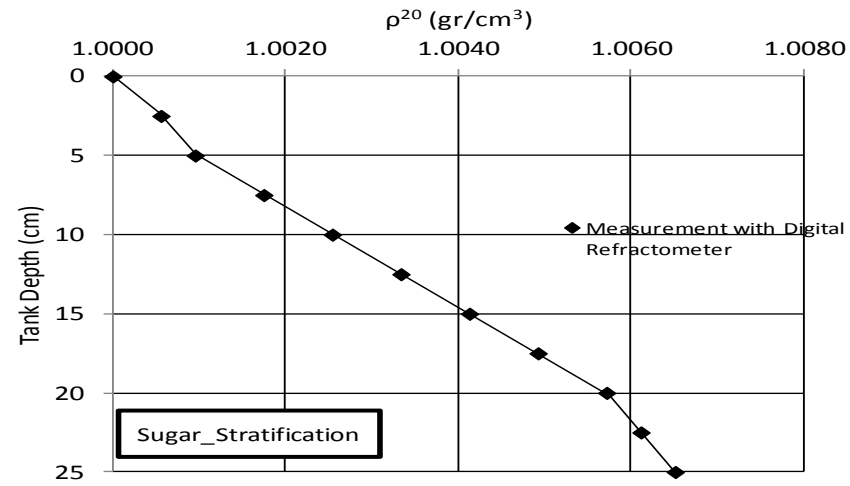


Experiment: EXP_ii_9	Date: 14/5/2012	All Data are for the Initial State
-----------------------------	-----------------	------------------------------------

Exp_Tank – Ambient Characteristics			Jet Characteristics						
θ_a (°C)	N^{20} (s ⁻¹)	K^{25} (cm ² /s)	θ_j (°C)	S or T (gr/L)	ρ^{20} (gr/cm ³)	v^{20} (cm ² /s)	Re^{20}	K^{25} (cm ² /s)	R6G in 4L (mL)
24.2	0.521	4.99E-06	24.2	6	1.00249	1.01E-02	1478	1.49E-05	2

Injection Characteristics				Tree-like structures
F	Q (cm ³ /s)	D (mm)	Duration of disposal (s)	
16	3.67	3.12	45	No

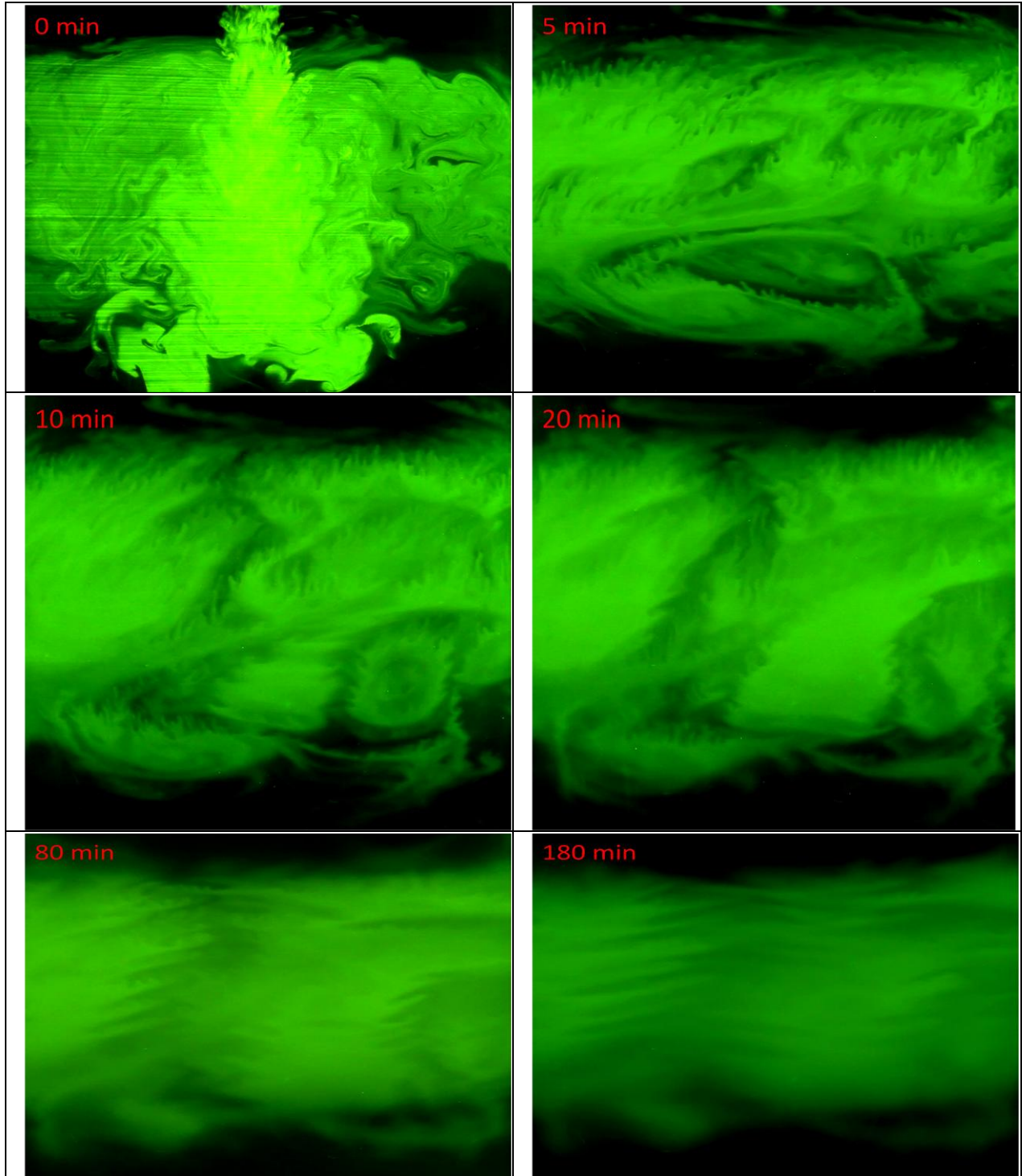


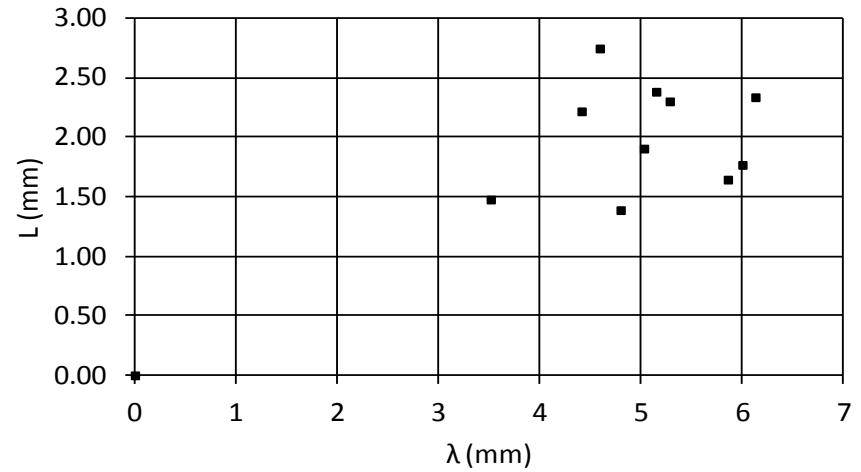
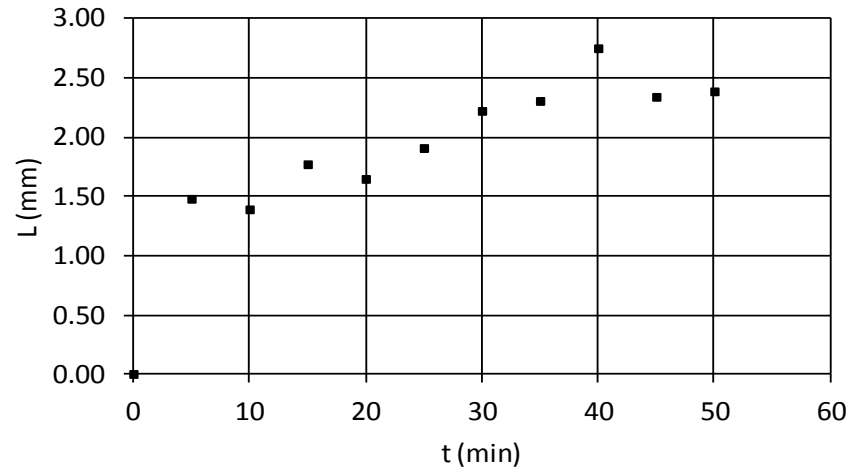
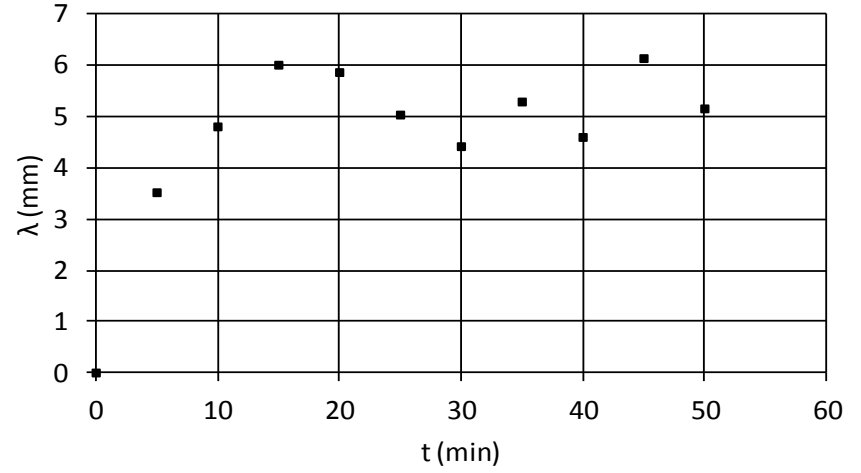
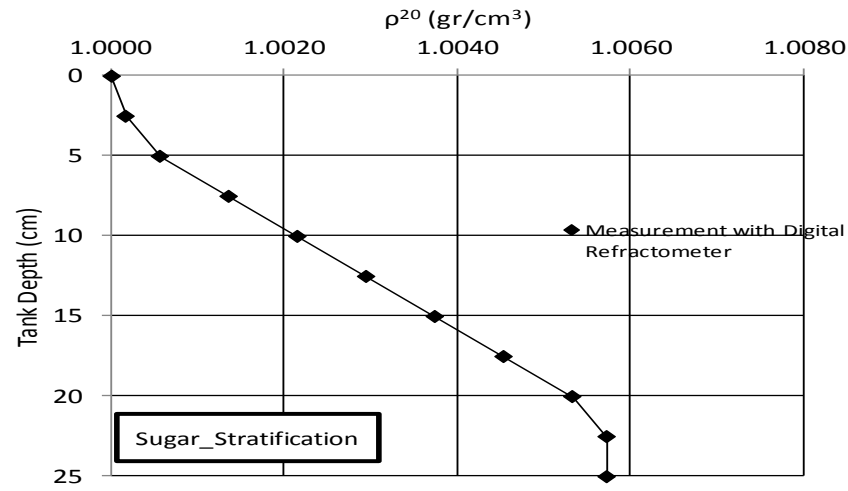


Experiment: EXP_ji_10	Date: 15/5/2012	All Data are for the Initial State
------------------------------	-----------------	------------------------------------

Exp_Tank – Ambient Characteristics			Jet Characteristics						
θ_a (°C)	N^{20} (s ⁻¹)	K^{25} (cm ² /s)	θ_j (°C)	S or T (gr/L)	ρ^{20} (gr/cm ³)	v^{20} (cm ² /s)	Re^{20}	K^{25} (cm ² /s)	R6G in 4L (mL)
23.9	0.521	4.99E-06	23.9	8	1.00392	1.01E-02	1524	1.49E-05	2

Injection Characteristics				Tree-like structures
F	Q (cm ³ /s)	D (mm)	Duration of disposal (s)	
16	3.67	3.02	45	Yes

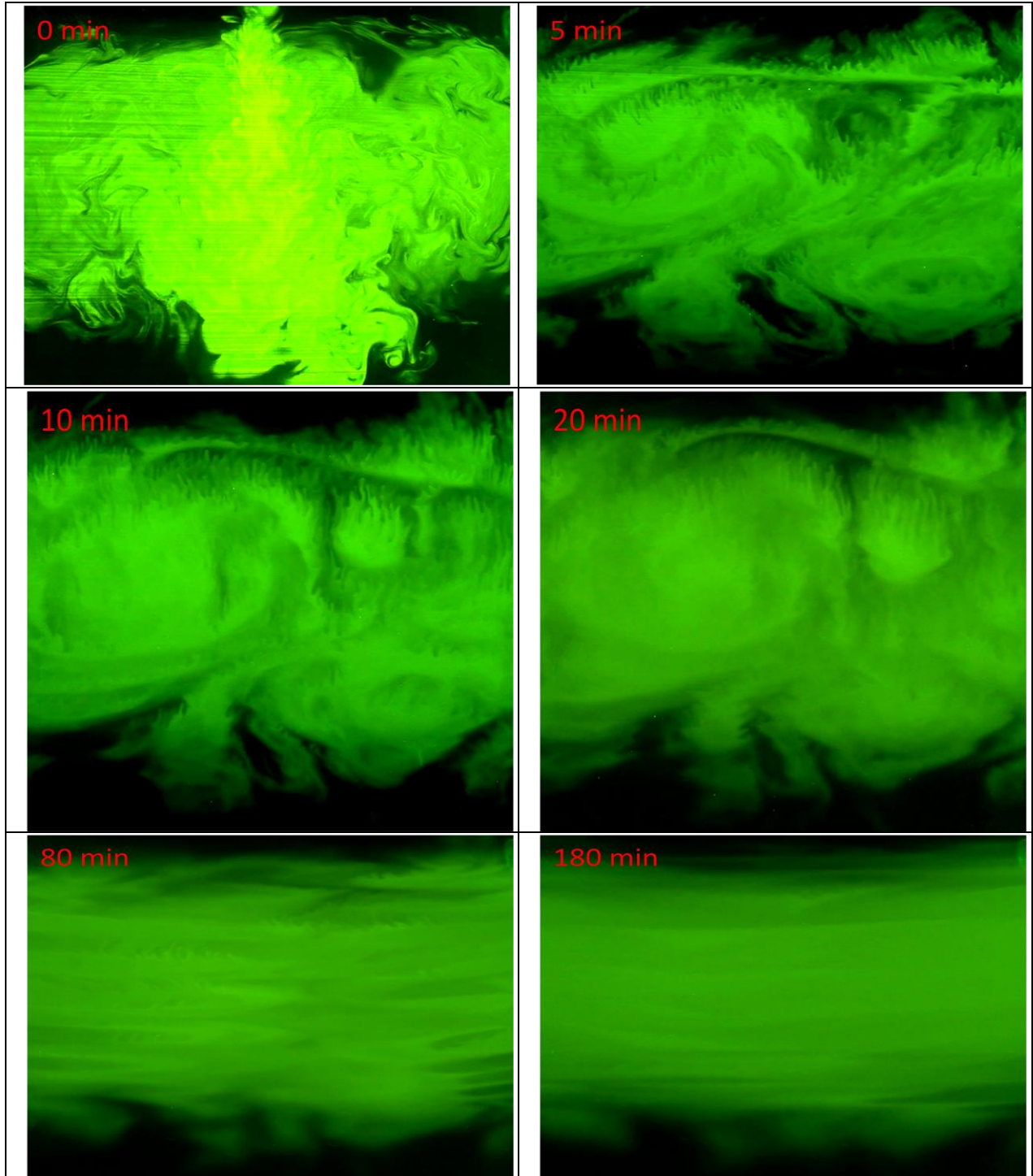


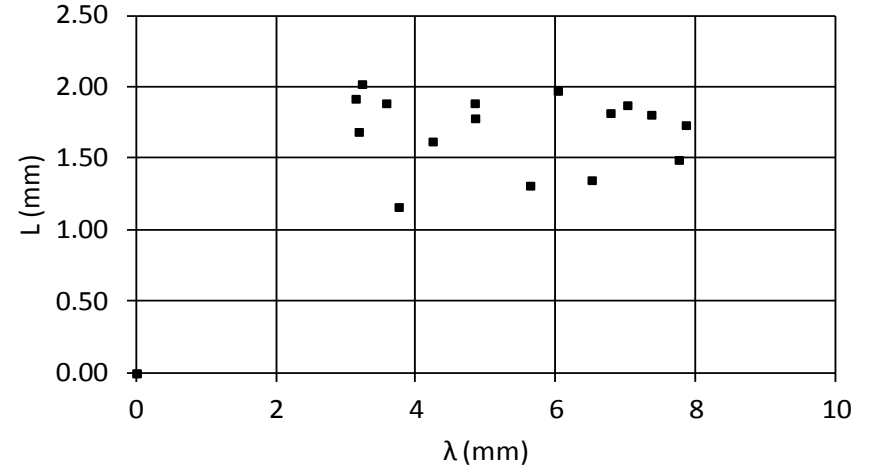
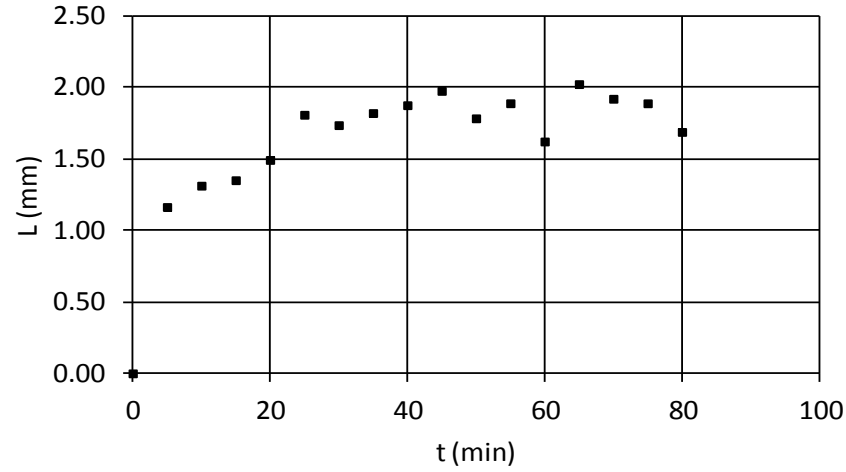
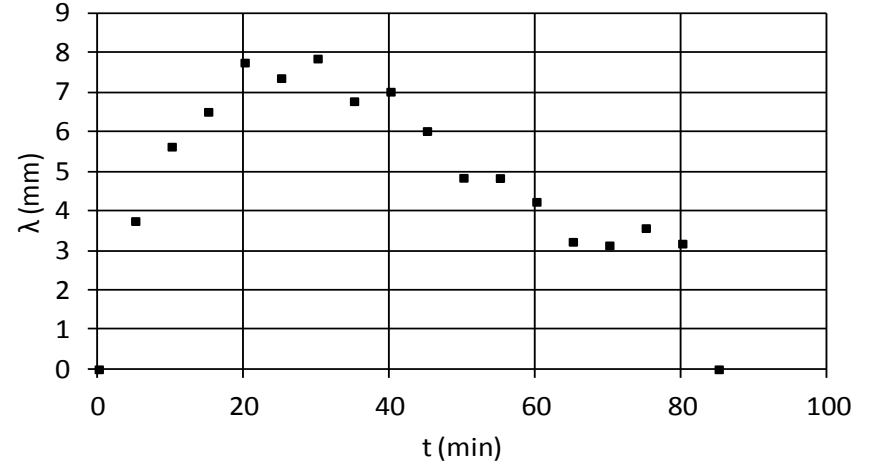
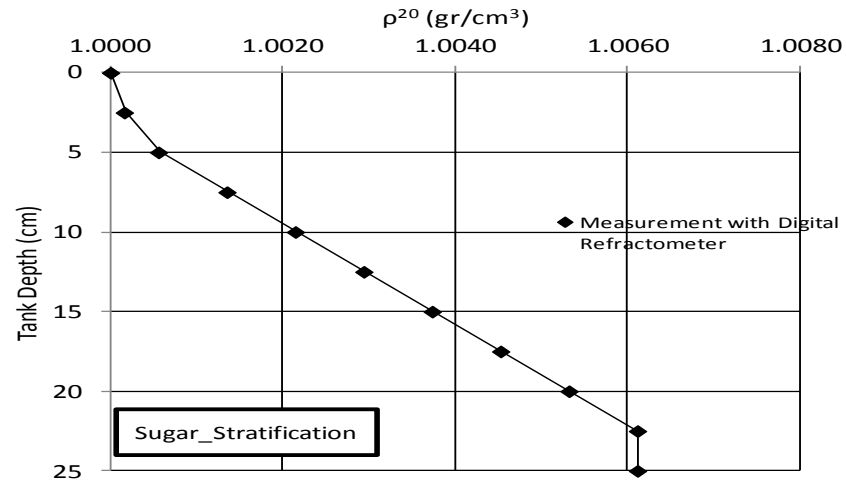


Experiment: EXP_ji_11	Date: 15/5/2012	<i>All Data are for the Initial State</i>
------------------------------	-----------------	-------------------------------------------

Exp_Tank – Ambient Characteristics			Jet Characteristics						
θ_a (°C)	N^{20} (s ⁻¹)	K^{25} (cm ² /s)	θ_j (°C)	S or T (gr/L)	ρ^{20} (gr/cm ³)	v^{20} (cm ² /s)	Re^{20}	K^{25} (cm ² /s)	R6G in 4L (mL)
23.7	0.508	4.99E-06	23.7	10	1.00534	1.01E-02	1487	1.48E-05	2.5

Injection Characteristics				Tree-like structures
F	Q (cm ³ /s)	D (mm)	Duration of disposal (s)	
16	3.67	3.10	45	No

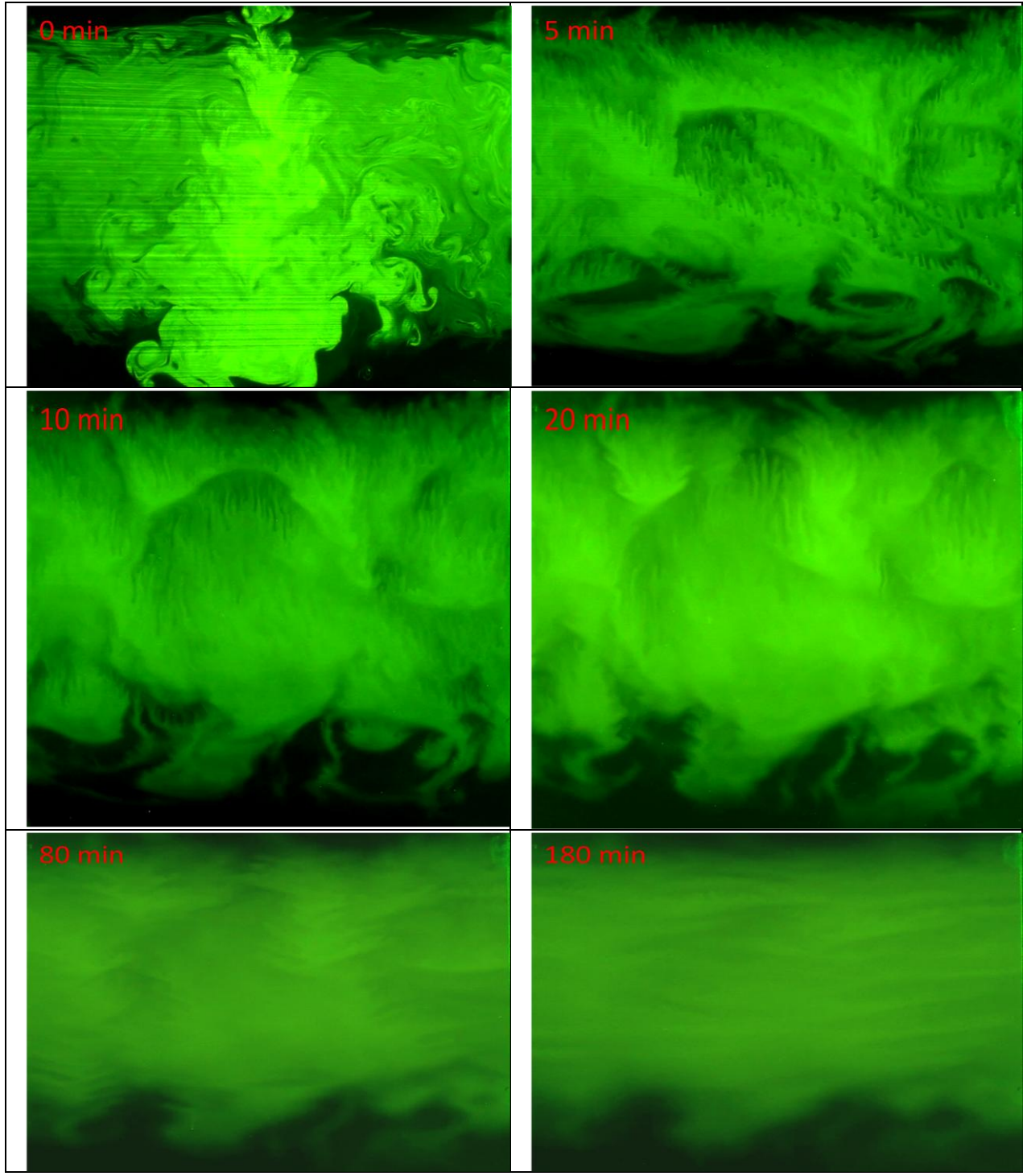


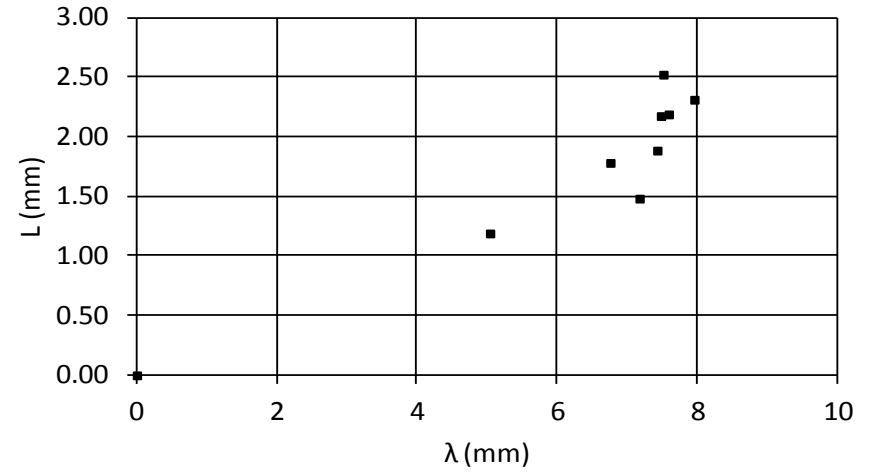
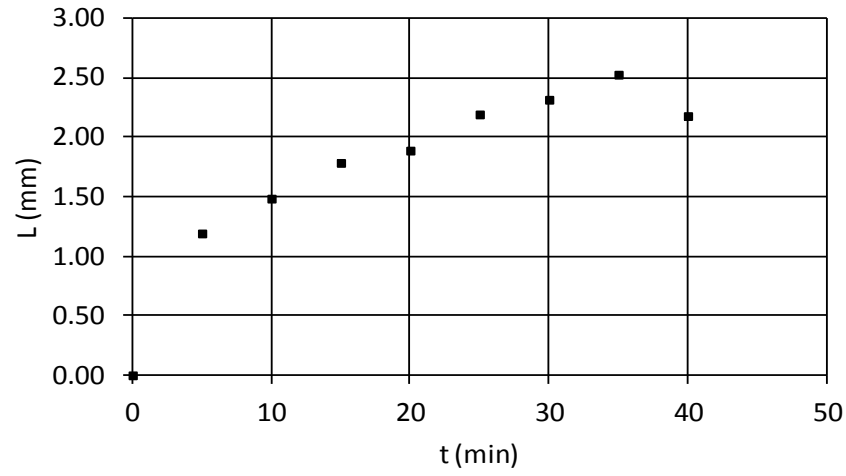
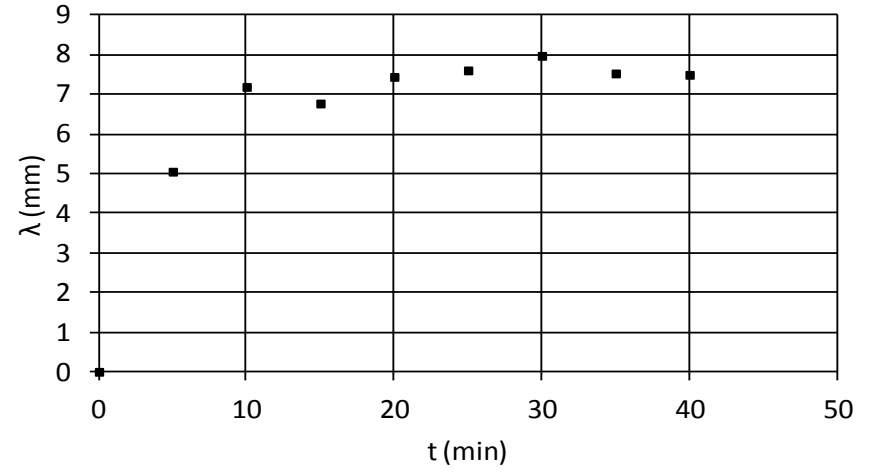
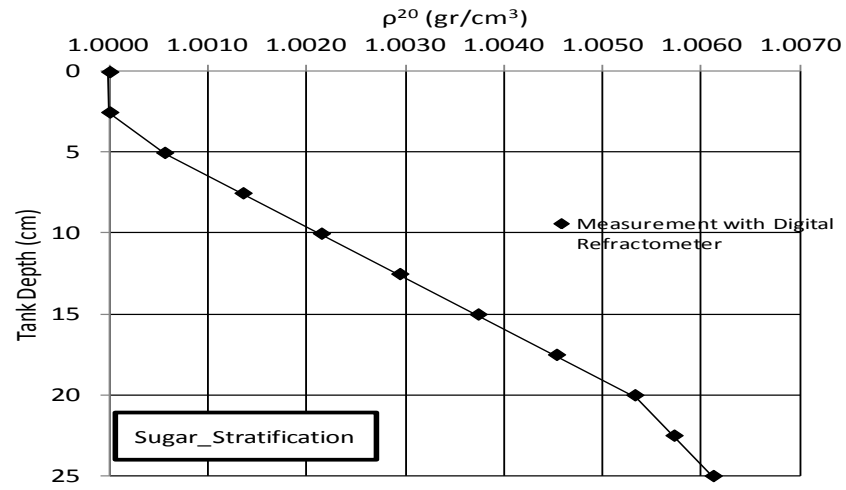


Experiment: EXP_ji_12	Date: 16/5/2012	<i>All Data are for the Initial State</i>
------------------------------	-----------------	-------------------------------------------

Exp_Tank – Ambient Characteristics			Jet Characteristics						
θ_a (°C)	N^{20} (s ⁻¹)	K^{25} (cm ² /s)	θ_j (°C)	S or T (gr/L)	ρ^{20} (gr/cm ³)	v^{20} (cm ² /s)	Re^{20}	K^{25} (cm ² /s)	R6G in 4L (mL)
23.9	0.528	4.99E-06	23.9	12	1.00677	1.02E-02	1554	1.48E-05	2.5

Injection Characteristics				Tree-like structures
F	Q (cm ³ /s)	D (mm)	Duration of disposal (s)	
16	3.67	2.96	45	Yes

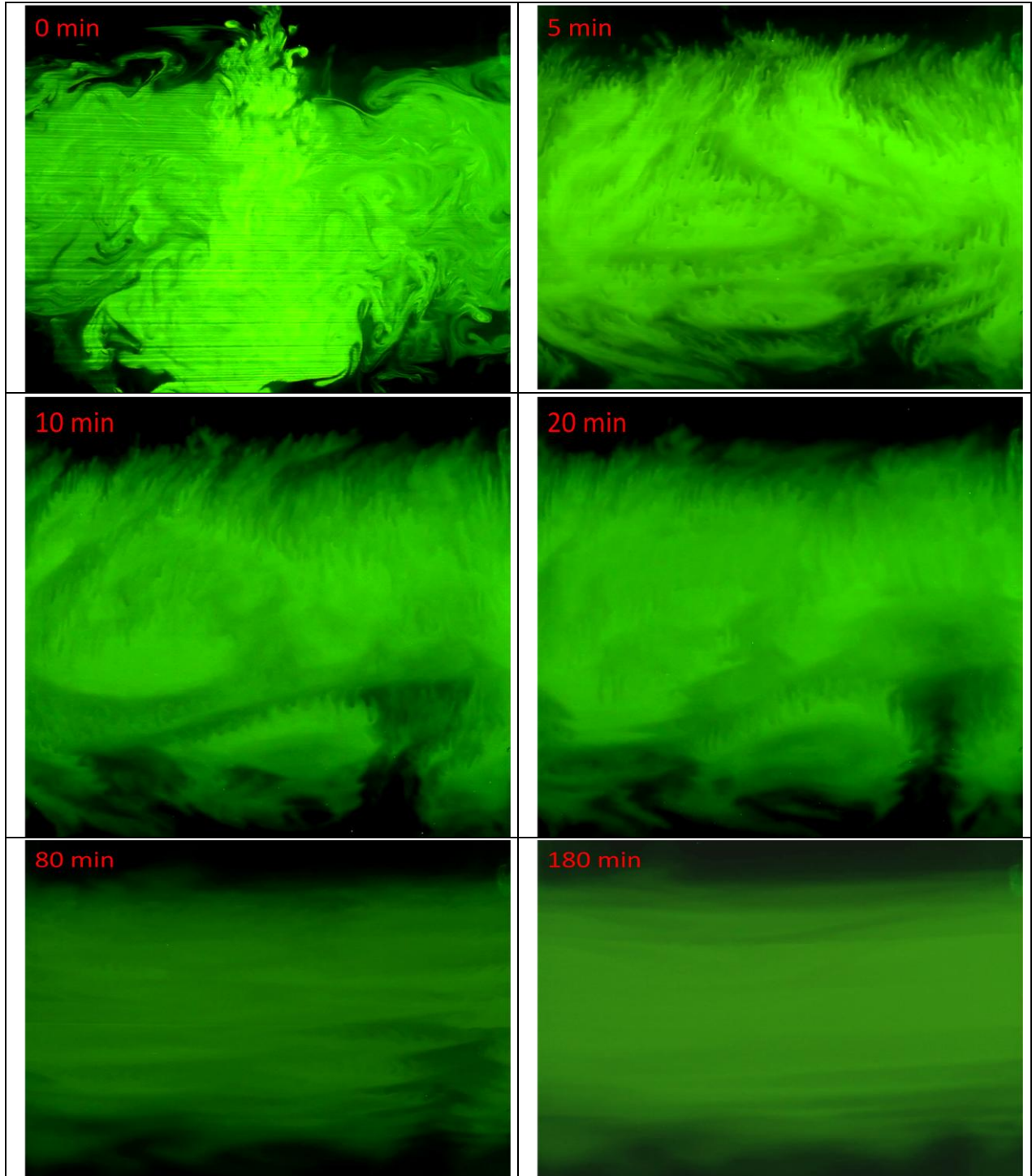


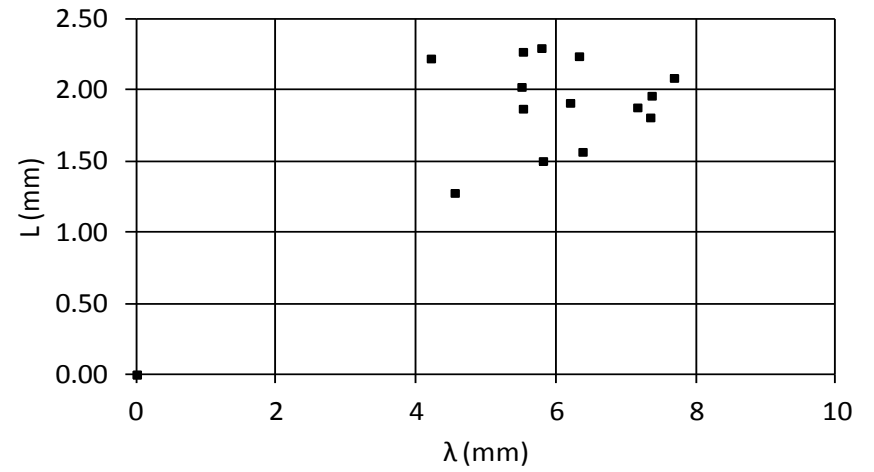
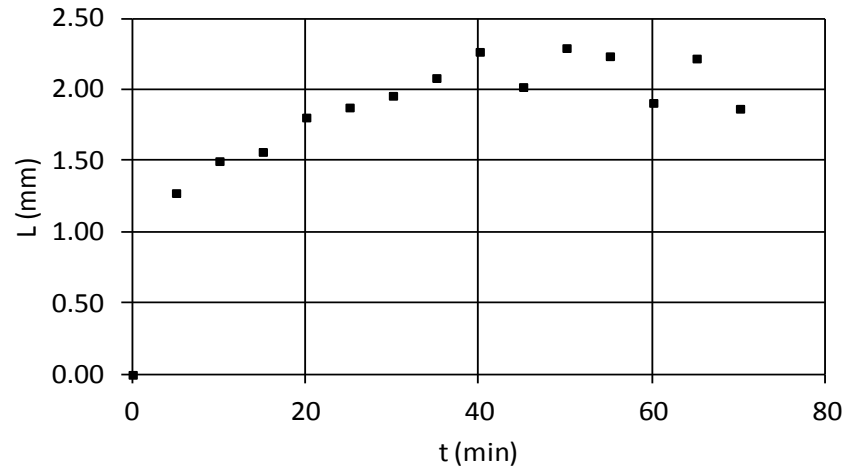
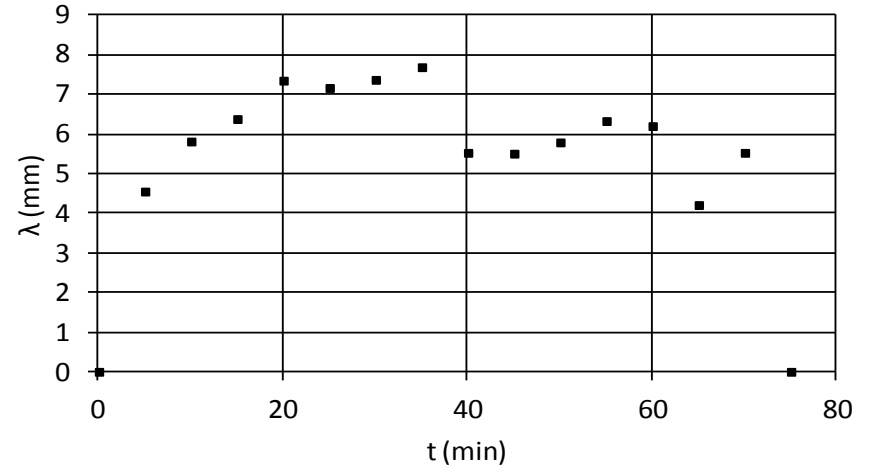
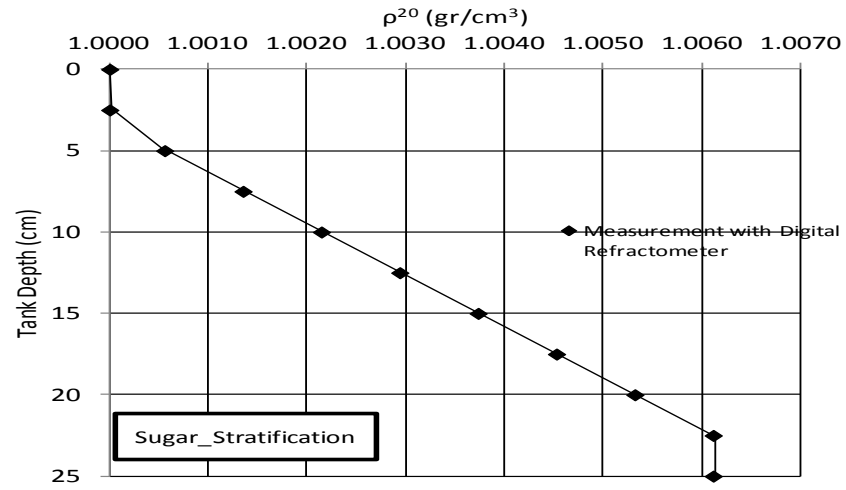


Experiment: EXP_ji_13	Date: 16/5/2012	<i>All Data are for the Initial State</i>
------------------------------	-----------------	-------------------------------------------

Exp_Tank – Ambient Characteristics			Jet Characteristics						
θ_a (°C)	N^{20} (s ⁻¹)	K^{25} (cm ² /s)	θ_j (°C)	S or T (gr/L)	ρ^{20} (gr/cm ³)	v^{20} (cm ² /s)	Re^{20}	K^{25} (cm ² /s)	R6G in 4L (mL)
22.8	0.546	4.99E-06	22.8	14	1.00820	1.02E-02	1548	1.48E-05	2

Injection Characteristics				Tree-like structures
F	Q (cm ³ /s)	D (mm)	Duration of disposal (s)	
16	3.67	2.96	45	No

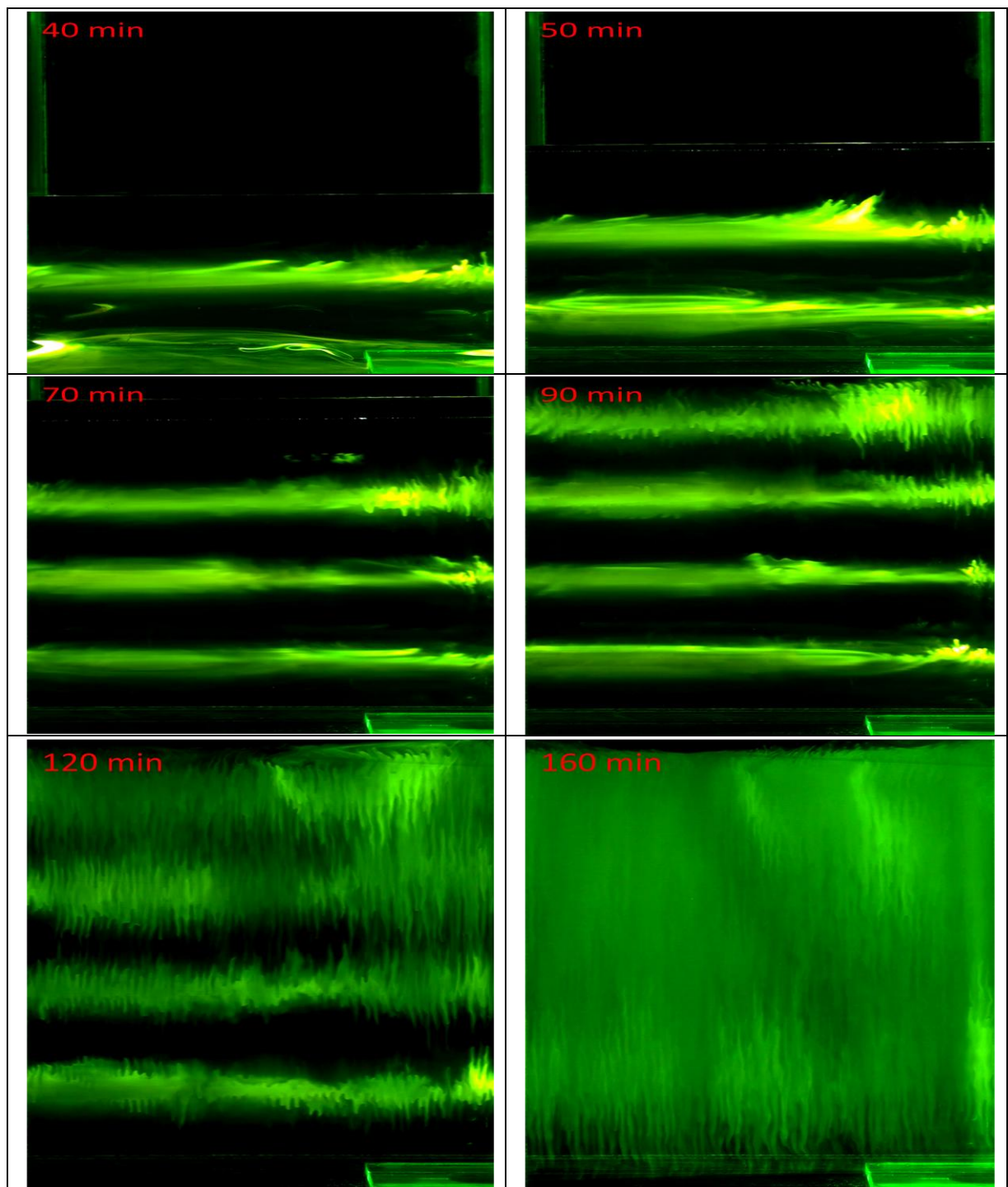


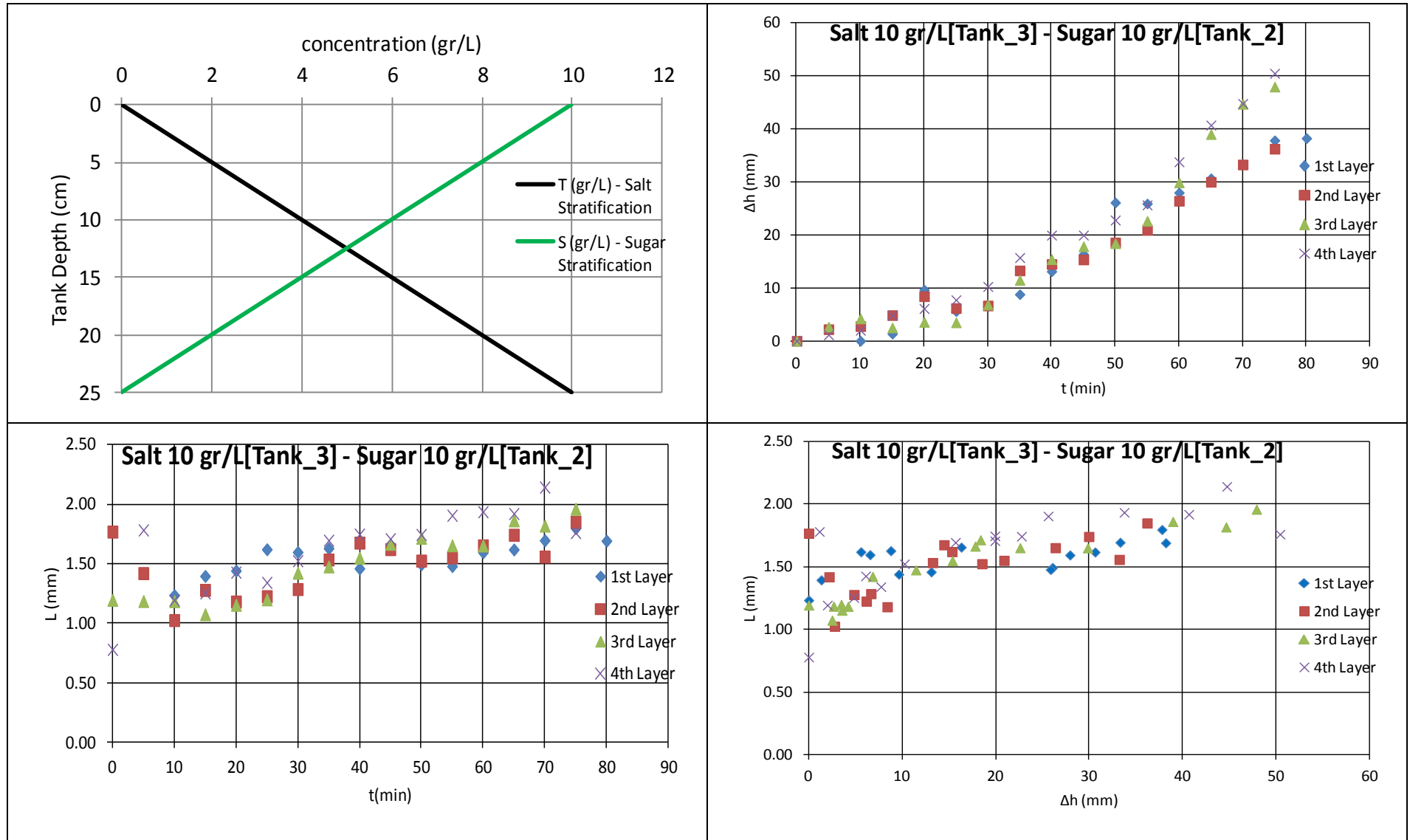


Experiment: EXP_iii_1	Date: 19/5/2012	All Data for the Initial State
------------------------------	-----------------	--------------------------------

Tank_3				Tank_2			
T (gr/L)	θ ($^{\circ}$ C)	Hydrometer (gr/cm ³)	ρ_T (gr/cm ³) Ruddick&Shirtcliffe	S (gr/L)	θ ($^{\circ}$ C)	Hydrometer (gr/cm ³)	ρ_S (gr/cm ³) Ruddick&Shirtcliffe
10	20.4	1.0065	1.0052	10	20.4	1.0035	1.0020

Duration of Stratification process (min)	Duration until total mixing of Exp_Tank (min)	ρ_{surface} (gr/cm ³)	ρ_{bottom} (gr/cm ³)	N (s ⁻¹)
85	160	1.0021	1.0042	0.318

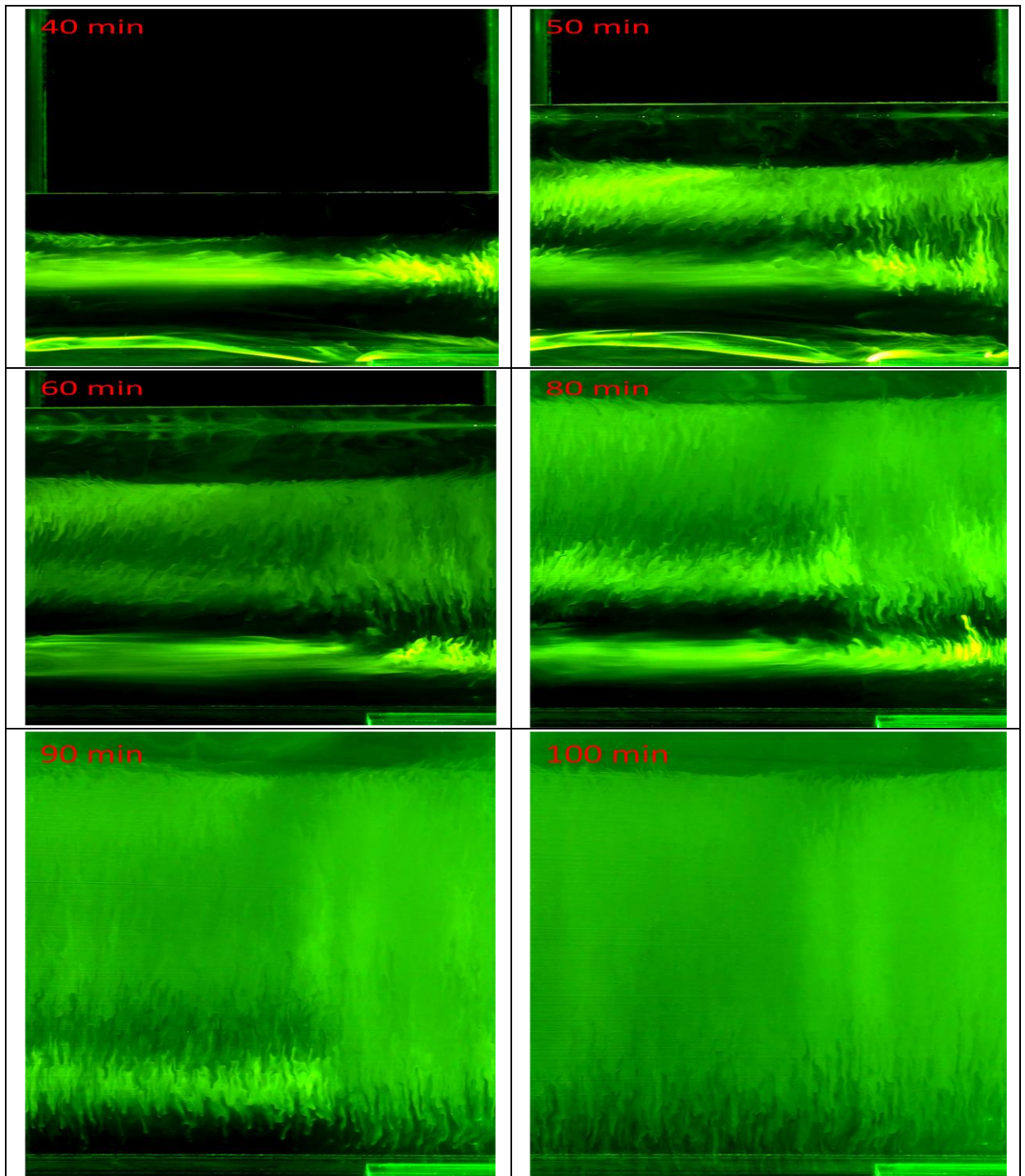


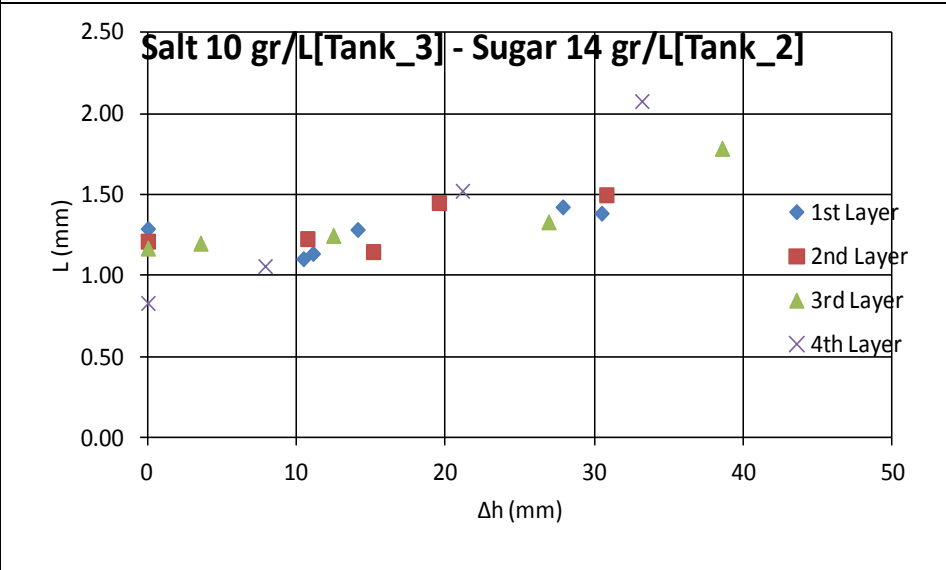
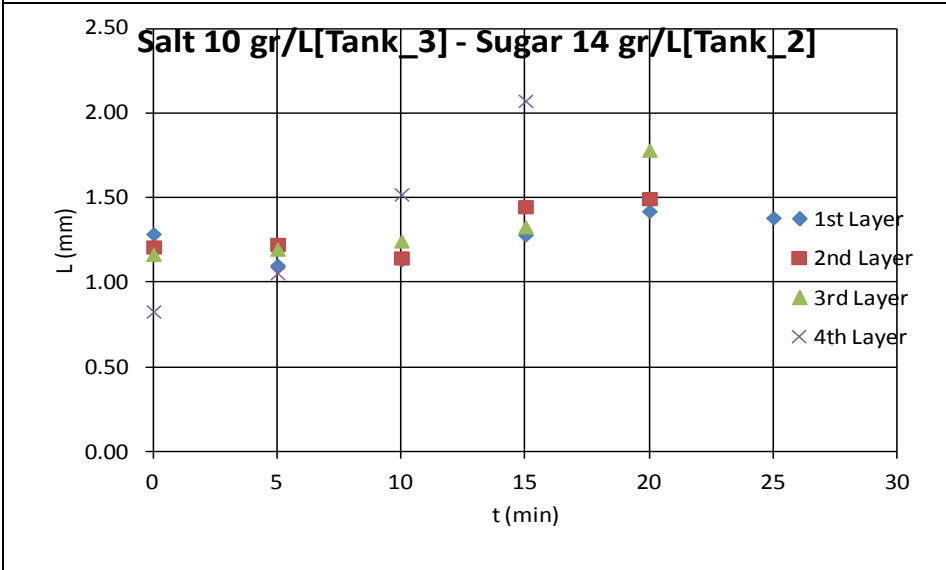
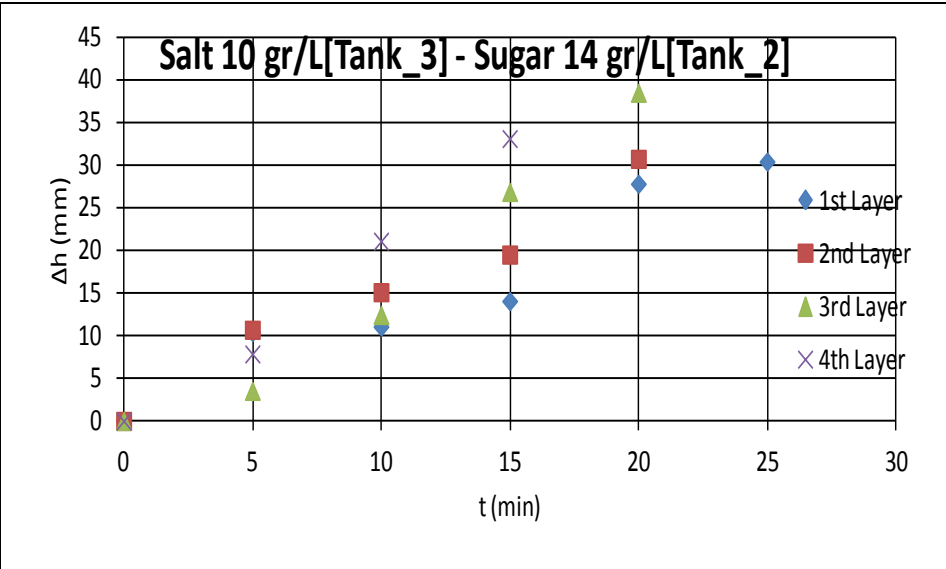
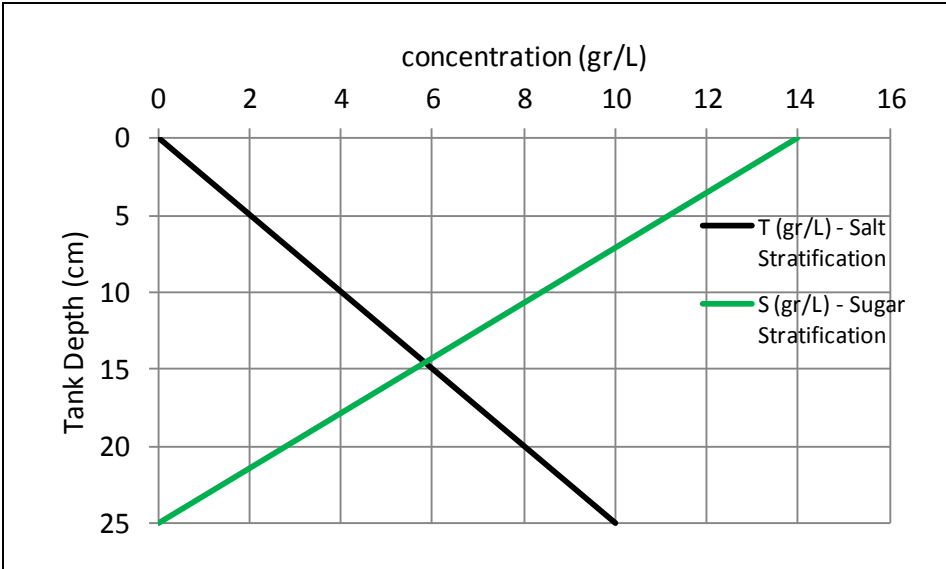


Experiment: EXP_iii_2	Date: 20/5/2012	<i>All Data for the Initial State</i>
------------------------------	-----------------	---------------------------------------

Tank_3				Tank_2			
T (gr/L)	θ ($^{\circ}\text{C}$)	Hydrometer (gr/cm ³)	ρ_T (gr/cm ³) Ruddick&Shirtcliffe	S (gr/L)	θ ($^{\circ}\text{C}$)	Hydrometer (gr/cm ³)	ρ_S (gr/cm ³) Ruddick&Shirtcliffe
10	21.5	1.0065	1.0050	14	21.5	1.0055	1.0033

Duration of Stratification process (min)	Duration until total mixing of Exp_Tank (min)	ρ_{surface} (gr/cm ³)	ρ_{bottom} (gr/cm ³)	N (s ⁻¹)
80	100	1.0034	1.0045	0.227

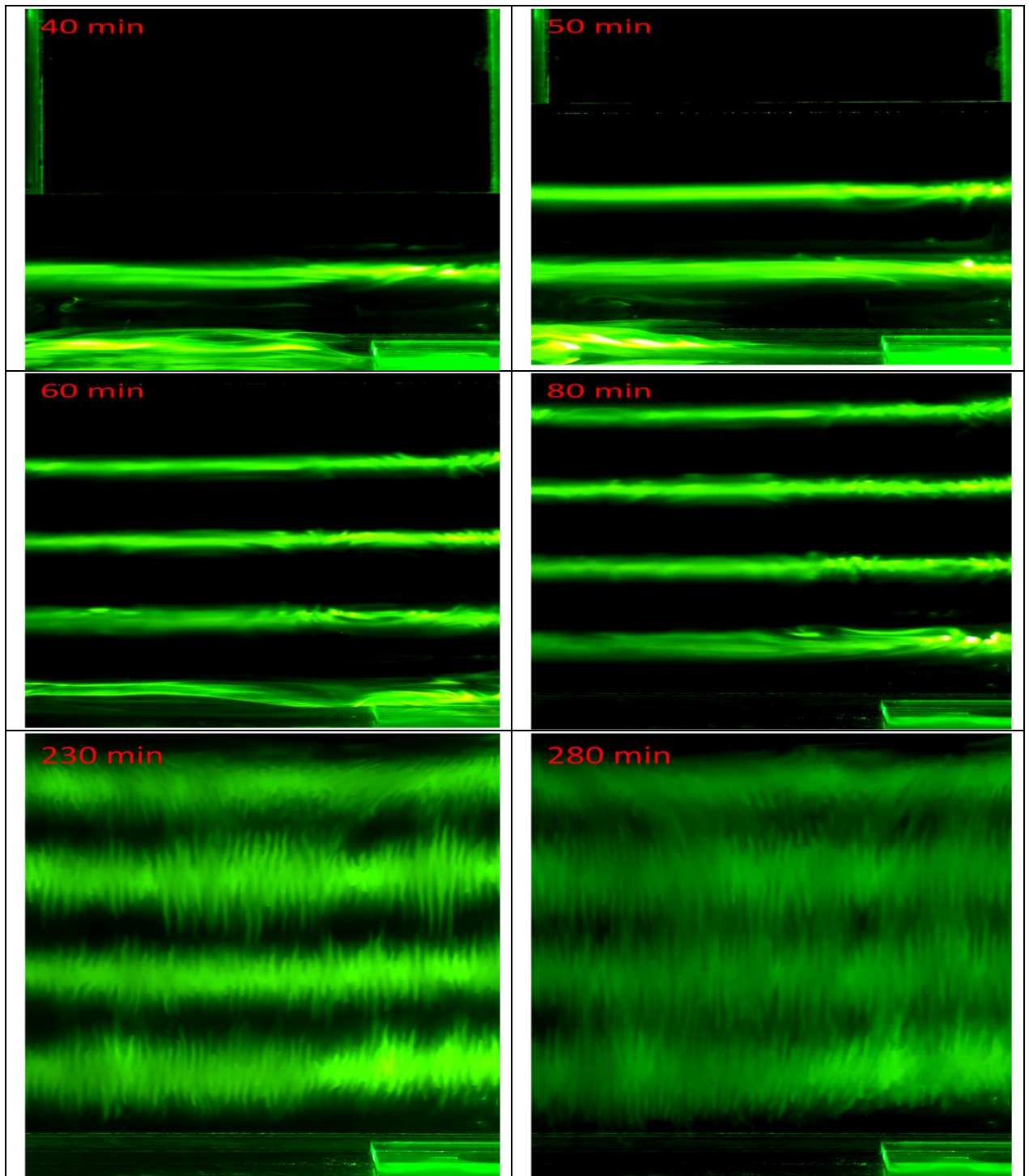


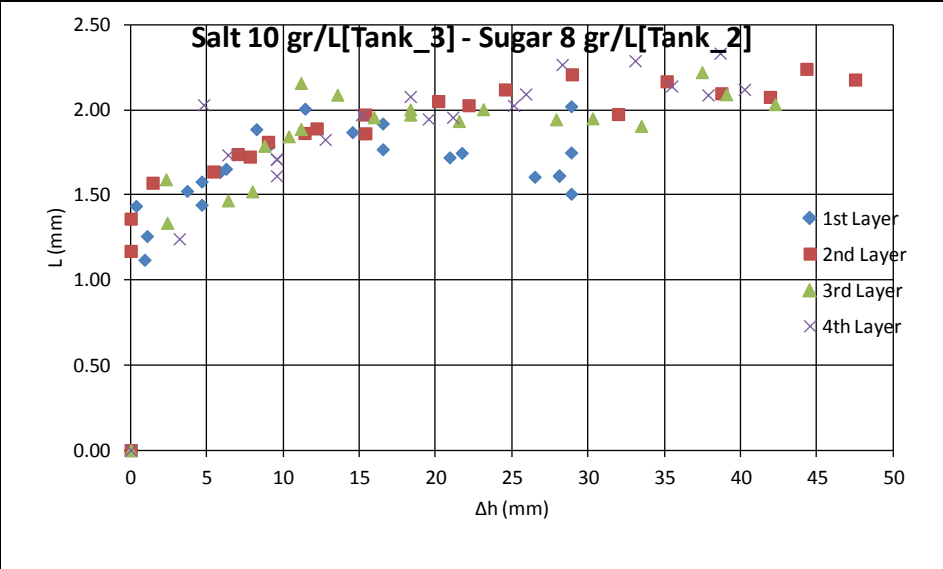
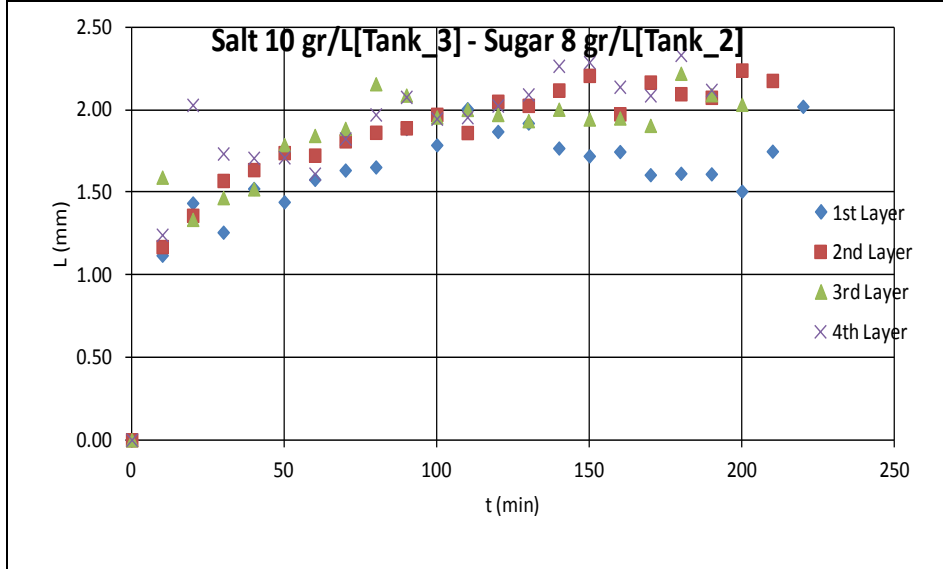
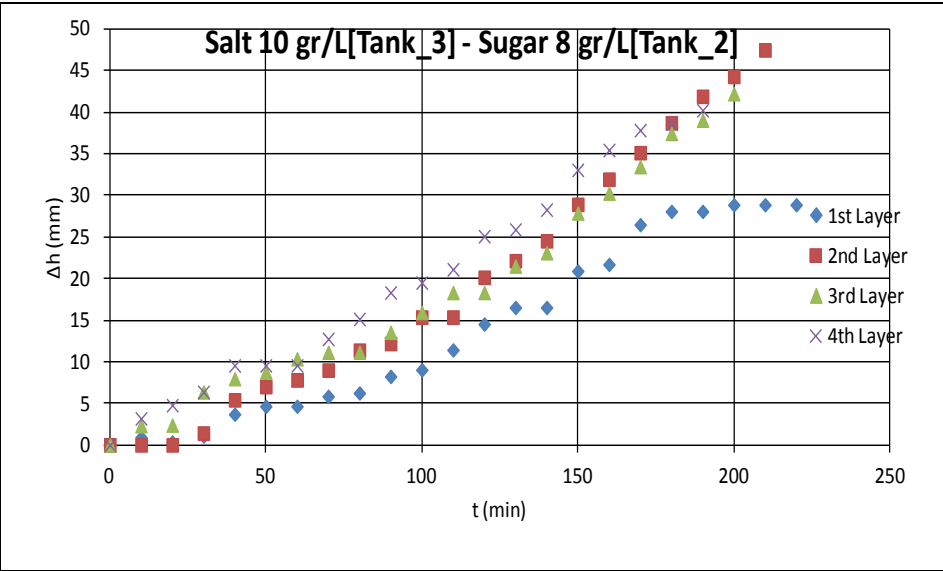
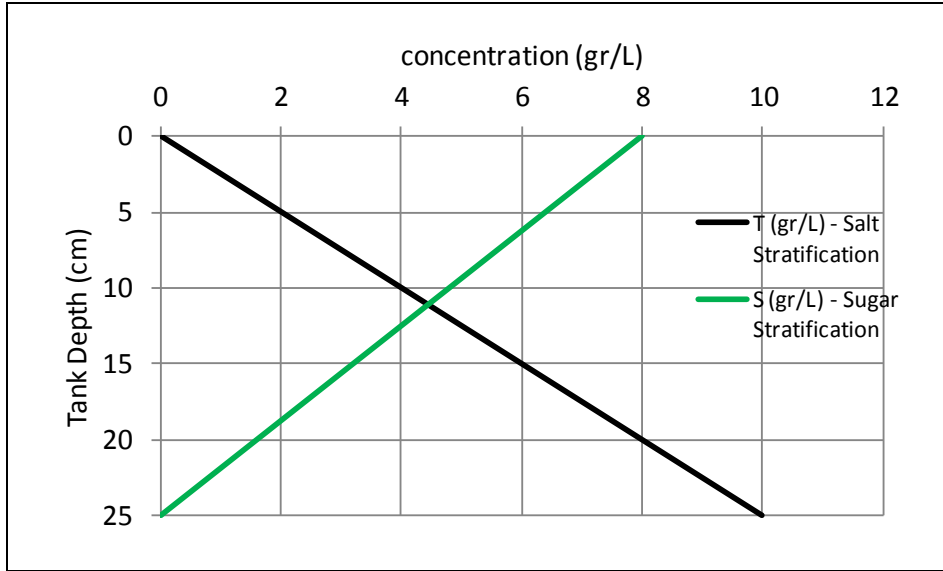


Experiment: EXP_iii_3	Date: 21/5/2012	<i>All Data for the Initial State</i>
------------------------------	-----------------	---------------------------------------

Tank_3				Tank_2			
T (gr/L)	θ ($^{\circ}\text{C}$)	Hydrometer (gr/cm ³)	ρ_T (gr/cm ³) Ruddick&Shirtcliffe	S (gr/L)	θ ($^{\circ}\text{C}$)	Hydrometer (gr/cm ³)	ρ_S (gr/cm ³) Ruddick&Shirtcliffe
10	21.4	1.007	1.0050	8	21.4	1.003	1.0010

Duration of Stratification process (min)	Duration until total mixing of Exp_Tank (min)	ρ_{surface} (gr/cm ³)	ρ_{bottom} (gr/cm ³)	N (s ⁻¹)
75	320	1.0012	1.0037	0.353

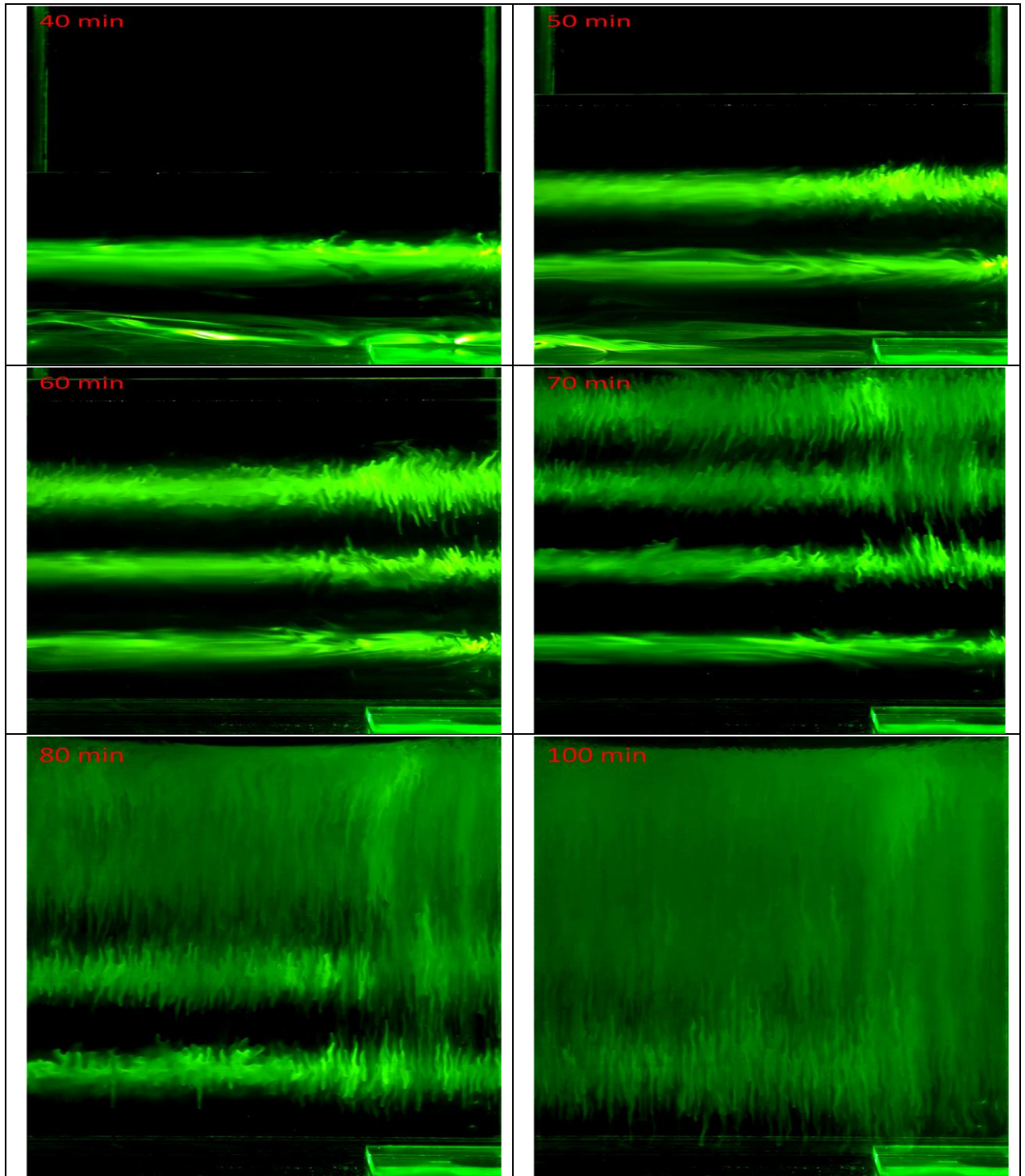


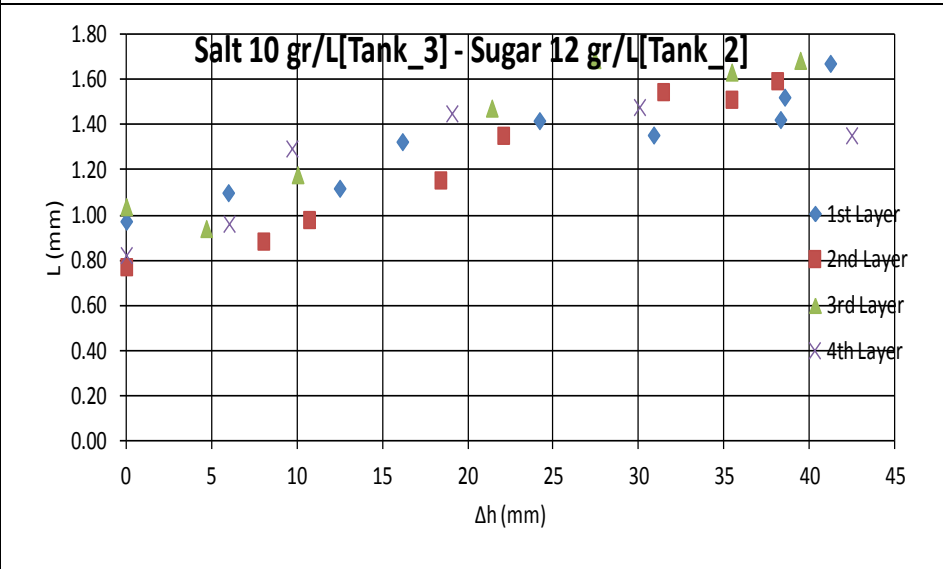
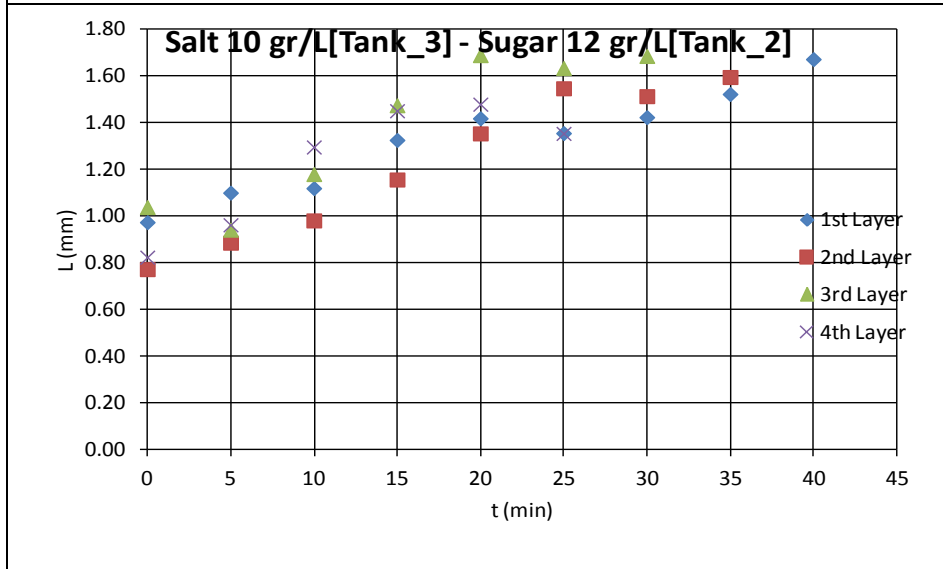
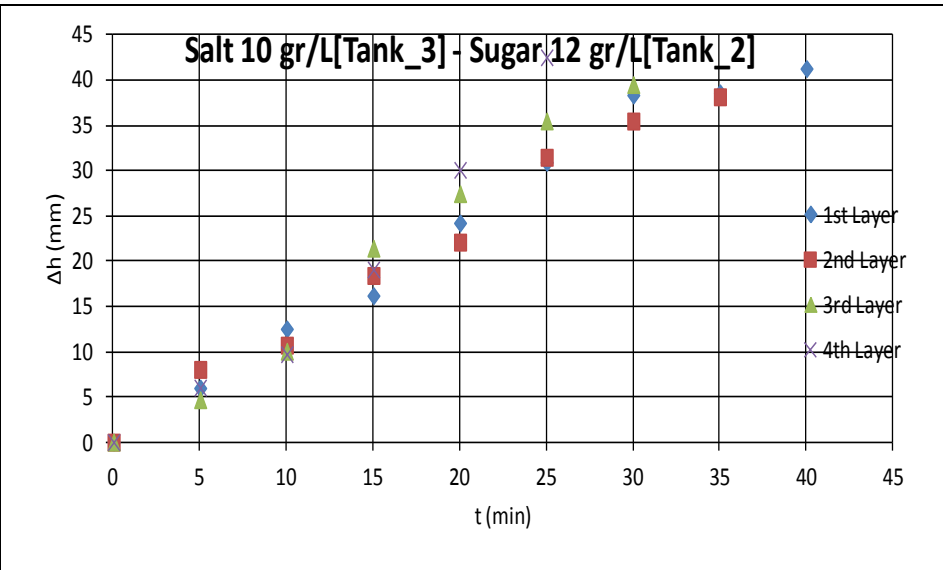
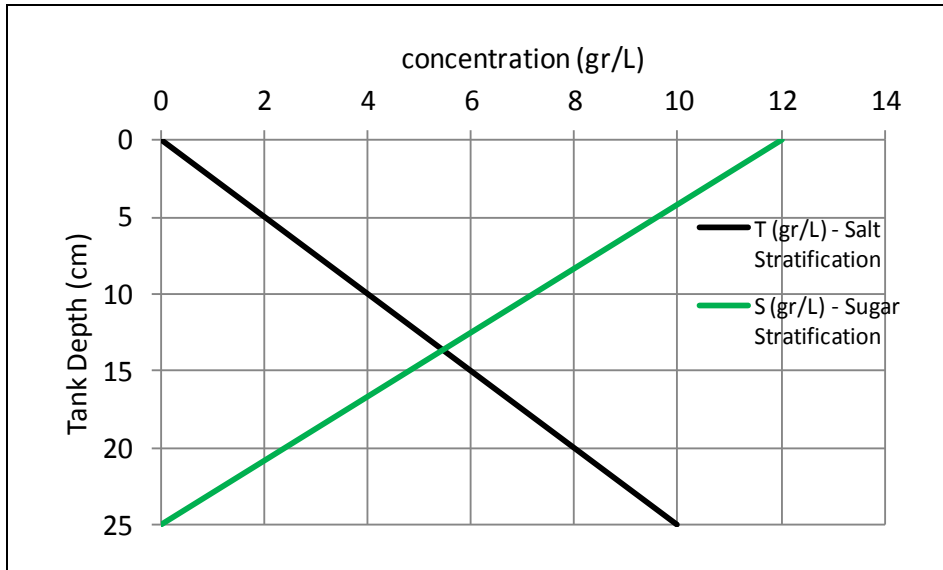


Experiment: EXP_iii_4	Date: 22/5/2012	<i>All Data for the Initial State</i>
------------------------------	-----------------	---------------------------------------

Tank_3				Tank_2			
T (gr/L)	θ ($^{\circ}\text{C}$)	Hydrometer (gr/cm ³)	ρ_T (gr/cm ³) Ruddick&Shirtcliffe	S (gr/L)	θ ($^{\circ}\text{C}$)	Hydrometer (gr/cm ³)	ρ_S (gr/cm ³) Ruddick&Shirtcliffe
10	21.4	1.0065	1.0050	12	21.4	1.004	1.0026

Duration of Stratification process (min)	Duration until total mixing of Exp_Tank (min)	ρ_{surface} (gr/cm ³)	ρ_{bottom} (gr/cm ³)	N (s ⁻¹)
60	100	1.0027	1.0042	0.276

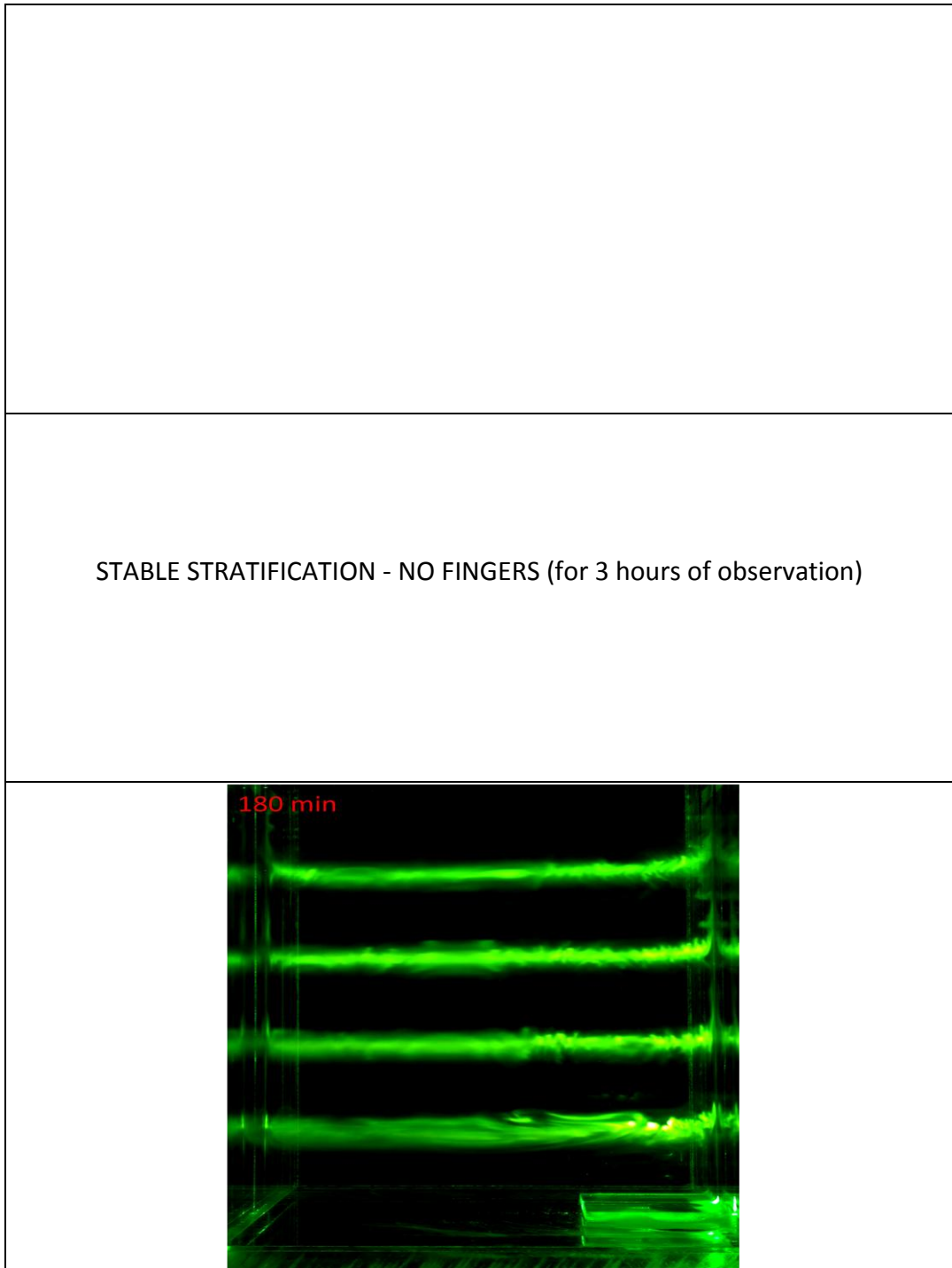




Experiment: EXP_iii_5	Date: 27/5/2012	<i>All Data for the Initial State</i>
------------------------------	-----------------	---------------------------------------

Tank_3				Tank_2			
T (gr/L)	θ ($^{\circ}\text{C}$)	Hydrometer (gr/cm ³)	ρ_T (gr/cm ³) Ruddick&Shirtcliffe	S (gr/L)	θ ($^{\circ}\text{C}$)	Hydrometer (gr/cm ³)	ρ_S (gr/cm ³) Ruddick&Shirtcliffe
10	21.5	1.0065	1.0050	6	21.5	1.002	1.0002

Duration of Stratification process (min)	Duration until total mixing of Exp_Tank (min)
60	STABLE STRATIFICATION

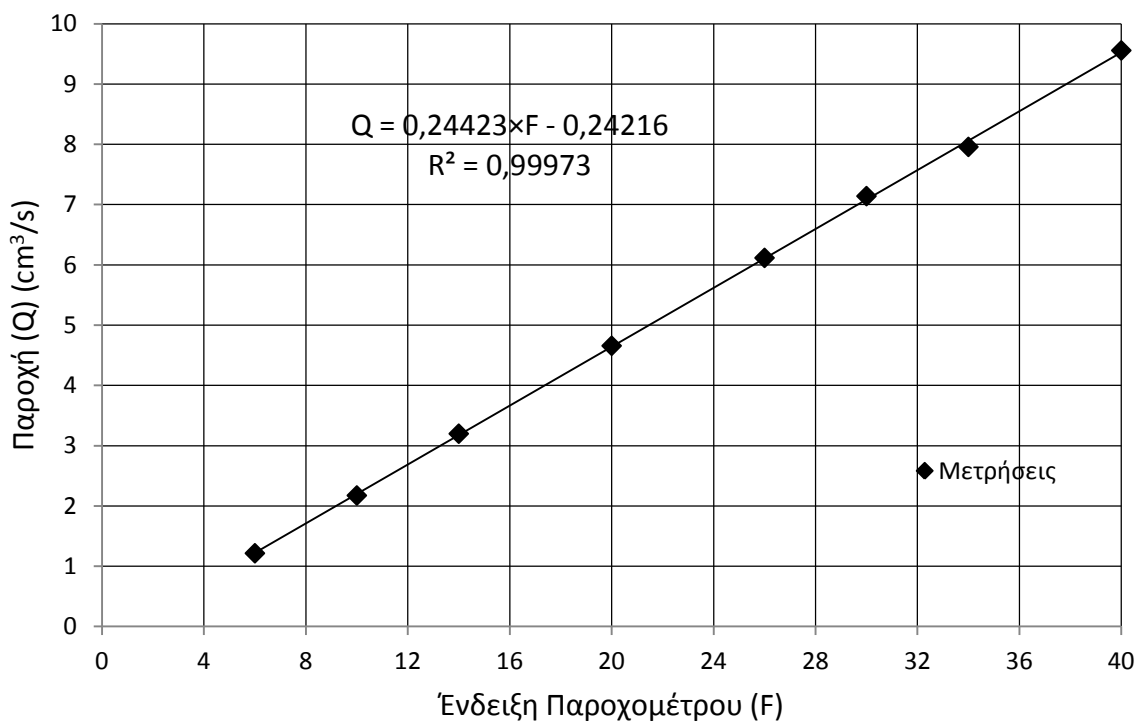


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – APPENDIX B / Βαθμονόμηση ροομέτρου – Flow meter

calibration

Η διαδικασία βαθμονόμησης έχει περιγραφεί στο Κεφάλαιο 2.3.3. Παρακάτω δίνεται ο πίνακας βαθμονόμησης και η προσαρμοσμένη καμπύλη με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

Χρόνος μέτρησης όγκου 1 min			
Ένδειξη Παροχομέτρου (F)	Όγκος1 (mL)	Όγκος2 (mL)	Παροχή Q (cm ³ /s)
6	73	73	1.217
10	131	130	2.175
14	193	191	3.200
20	287	272	4.658
26	367	367	6.117
30	427	430	7.142
34	475	480	7.958
40	575	572	9.558
Θερμοκρασία Μετρήσεων T = 18.7 °C			
1 mL = 1 cm ³ (cc)			

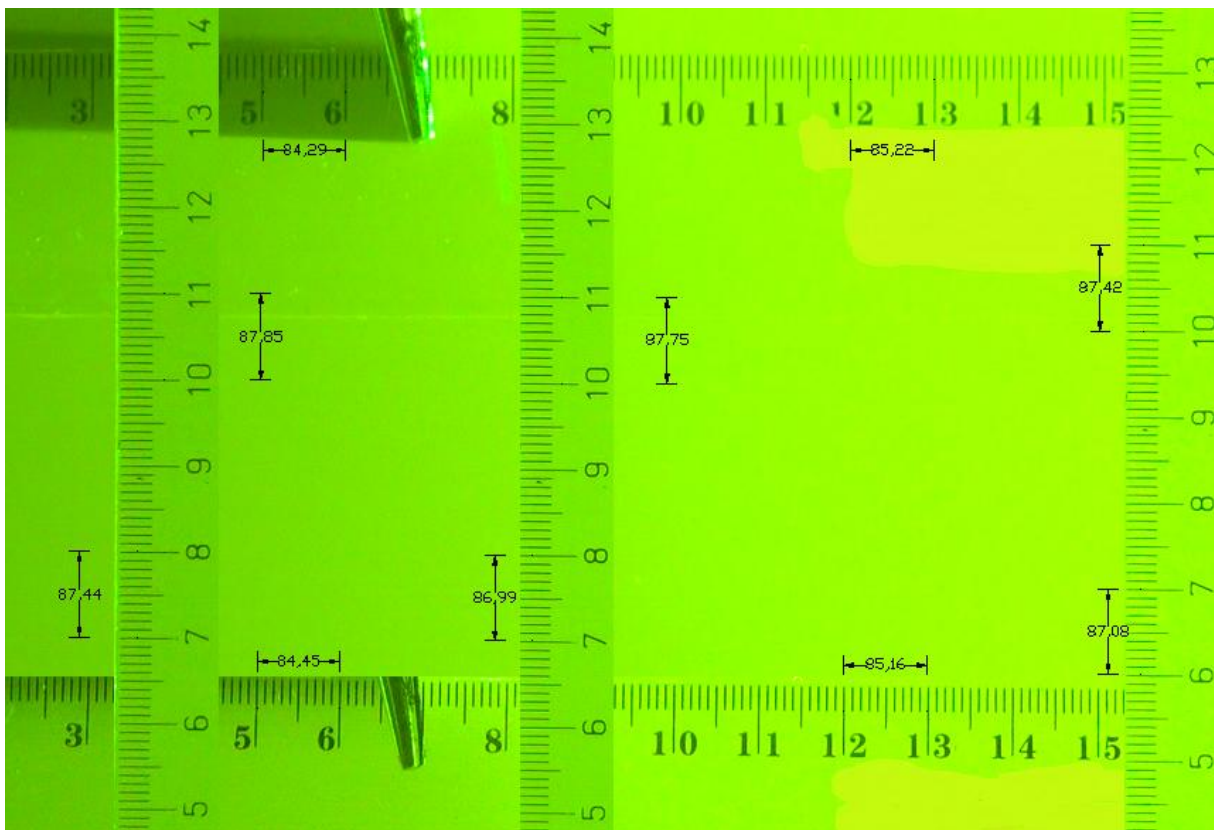


**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ – APPENDIX C / Κλίμακα μήκους και στρέβλωση εικόνας –
Length Scale and Image distortion**

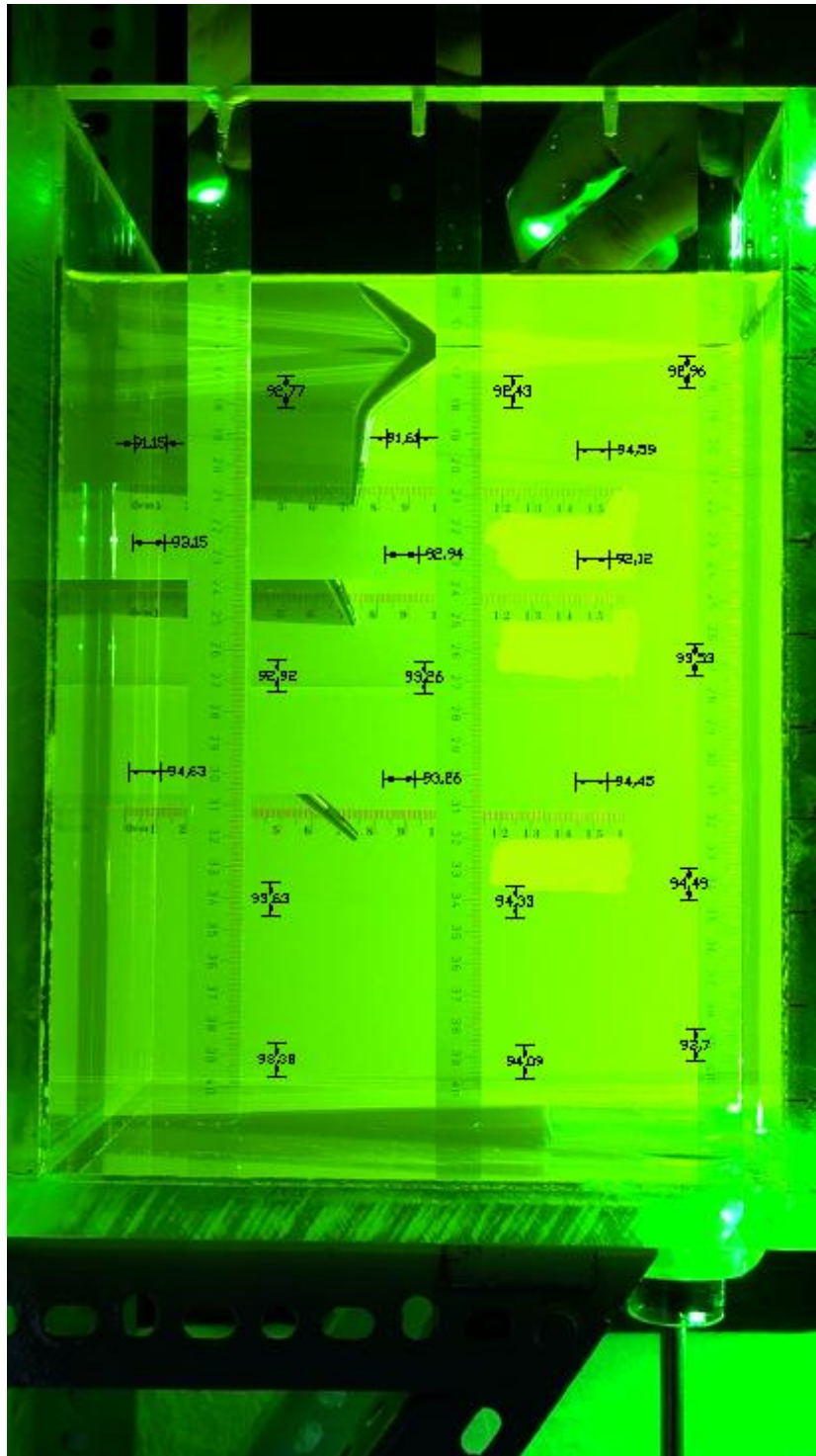
Σε αυτήν την ενότητα εξετάζεται το κατά πόσο στρεβλώνει η βιντεοσκόπηση το πραγματικό πεδίο λήψης. Για το σκοπό αυτό, για τρία διαφορετικά παράθυρα λήψης, βιντεοσκοπήθηκε διαδικασία κατά την οποία ο κανόνας τοποθετήθηκε σε διαφορετικές θέσεις του επιπέδου παρακολούθησης οριζοντίως και καθέτως. Για το κάθε βίντεο που προέκυψε (τρία παράθυρα λήψης / τρία βίντεο) ακολουθήθηκαν τα παρακάτω βήματα:

- (1) Αποκόπηκαν από τα βίντεο στιγμιότυπα, όπου στο καθένα φαινόταν μια διαφορετική θέση του χάρακα.
- (2) Όλα τα στιγμιότυπα τοποθετήθηκαν το ένα πάνω στο άλλο και κατ' αυτόν τον τρόπο ο χάρακας φαινόταν στην ίδια εικόνα σε πολλές διαφορετικές θέσεις.
- (3) Αυτές οι σύνθετες εικόνες τοποθετήθηκαν στο AutoCAD και μετρήθηκε το 1 cm σε πολλές διαφορετικές θέσεις του παραθύρου λήψης (βλ. Σχήμα 1 / 2 / 3).

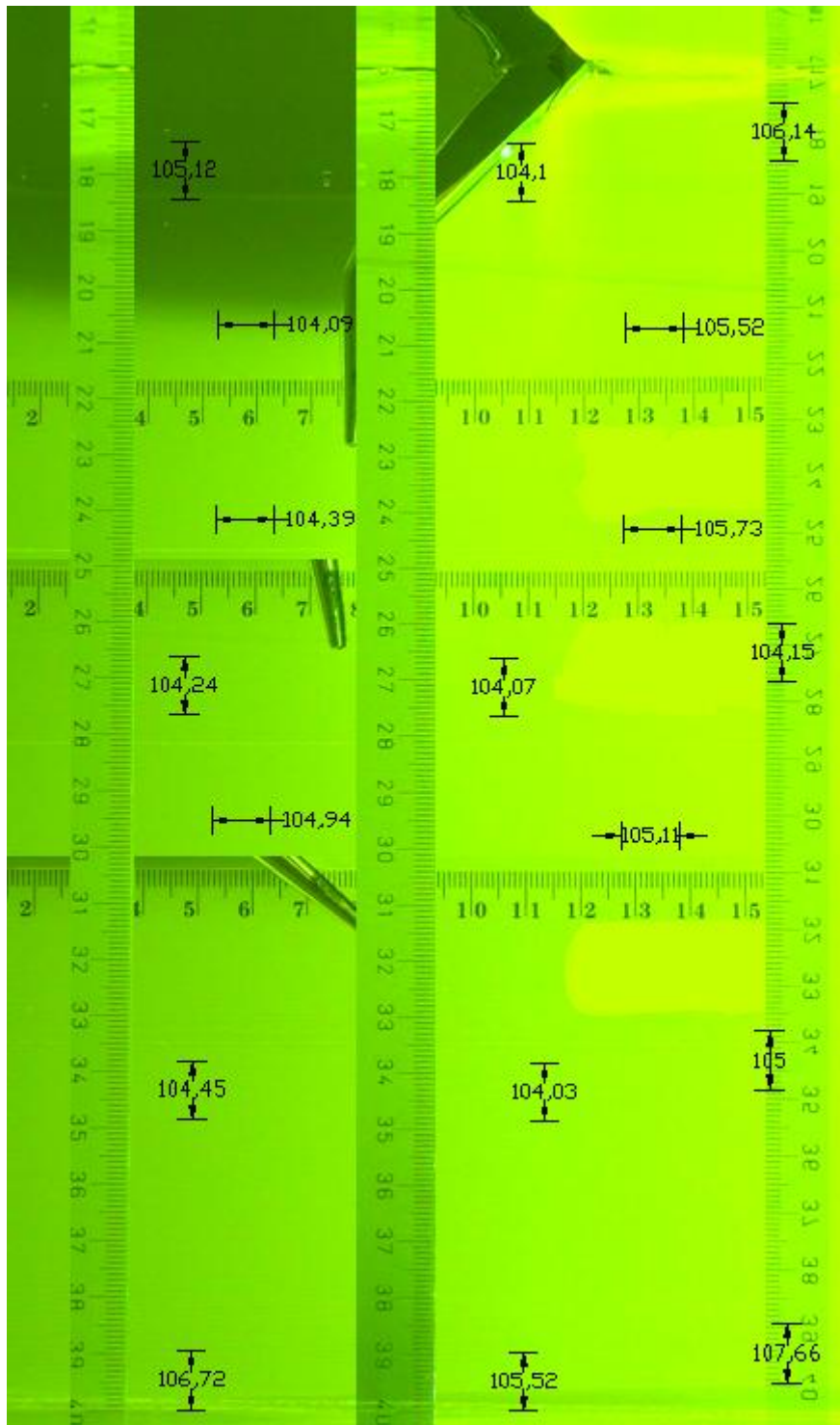
Τελικά, παρατηρήθηκε ότι η απόκλιση του 1 cm από θέση σε θέση, ήταν πολύ μικρή. Πρακτικά τοποθετώντας το χάρακα σε μια τυχαία θέση εντός του επιπέδου παρακολούθησης (είτε οριζόντια, είτε κατακόρυφα) μπορεί να γίνει σύνδεση του μετρούμενου μεγέθους με την πραγματική κλίμακα μήκους. Αυτό ακολουθήθηκε και στην παρούσα πειραματική εργασία.



Σχήμα 1



Σχήμα 2



Σχήμα 3

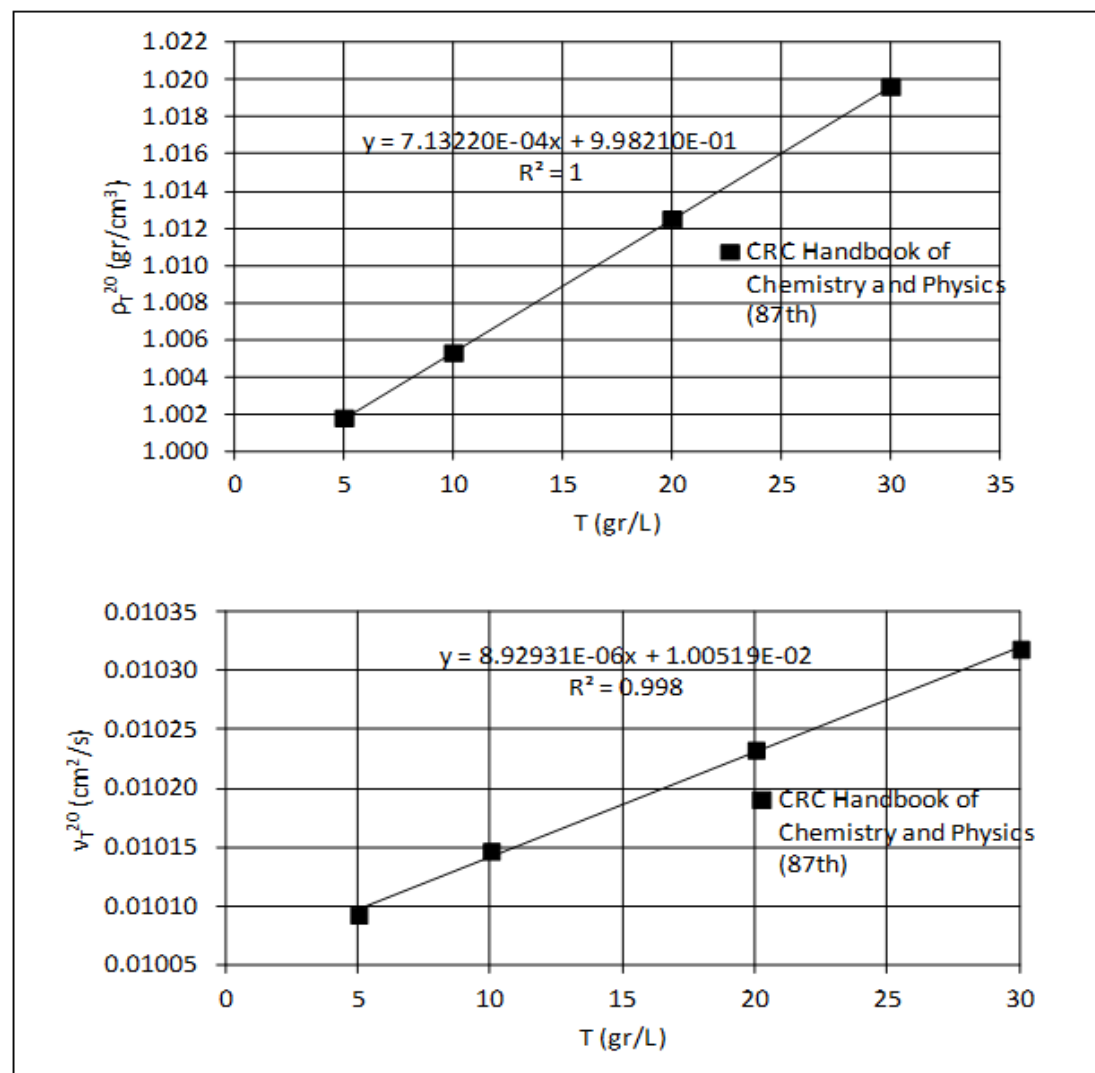
**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ – APPENDIX D / Ιδιότητες υδατικών διαλυμάτων – Properties
of aqueous solutions**

Τα διαγράμματα αυτής της ενότητας δείχνουν μόνο τις περιοχές ενδιαφέροντος για την παρούσα πειραματική εργασία. Ο σκοπός είναι η μεγαλύτερη ακρίβεια προσαρμογής καμπυλών στην εξεταζόμενη περιοχή.

Αλατόνερο

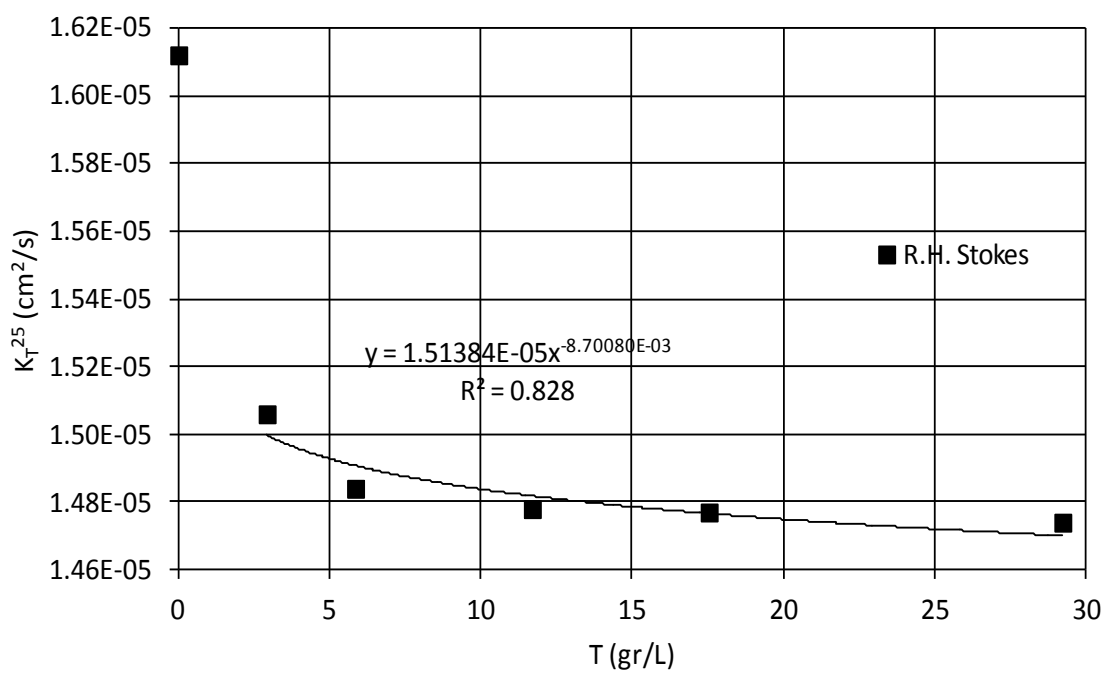
CRC Handbook of Chemistry and Physics

Temperature at 20 °C				
Mass (%)	T (gr/L)	ρ_T (gr cm ⁻³)	η (gr cm ⁻¹ s ⁻¹)	ν_T (cm ² /s)
0.5	5.0	1.0018	1.01100E-02	1.00918E-02
1.0	10.0	1.0053	1.02000E-02	1.01462E-02
2.0	20.0	1.0125	1.03600E-02	1.02321E-02
3.0	30.0	1.0196	1.05200E-02	1.03178E-02
4.0	40.0	1.0268	1.06800E-02	1.04012E-02
5.0	50.0	1.034	1.08500E-02	1.04932E-02
6.0	60.0	1.0413	1.10400E-02	1.06021E-02
7.0	70.0	1.0486	1.12400E-02	1.07191E-02
8.0	80.0	1.0559	1.14500E-02	1.08438E-02
9.0	90.0	1.0633	1.16800E-02	1.09847E-02
10.0	100.0	1.0707	1.19300E-02	1.11422E-02
12.0	120.0	1.0857	1.25000E-02	1.15133E-02
14.0	140.0	1.1008	1.31700E-02	1.19640E-02
16.0	160.0	1.1162	1.38800E-02	1.24350E-02
18.0	180.0	1.1319	1.46300E-02	1.29252E-02
20.0	200.0	1.1478	1.55700E-02	1.35651E-02
22.0	220.0	1.164	1.67600E-02	1.43986E-02
24.0	240.0	1.1804	1.82100E-02	1.54270E-02
26.0	260.0	1.1972	1.99000E-02	1.66221E-02



Stokes (1950)

1 mole NaCl = 58.44 gr		
Temperature at 25 °C		
moles solute /L	T (gr/L)	K_T (cm ² /s)
0.00	0.00	1.612E-05
0.05	2.92	1.506E-05
0.10	5.84	1.484E-05
0.20	11.69	1.478E-05
0.30	17.53	1.477E-05
0.50	29.22	1.474E-05
0.70	40.91	1.475E-05
1.00	58.44	1.483E-05
1.50	87.66	1.495E-05
2.00	116.88	1.514E-05
2.50	146.10	1.529E-05
3.00	175.32	1.544E-05
3.50	204.54	1.559E-05
4.00	233.76	1.584E-05

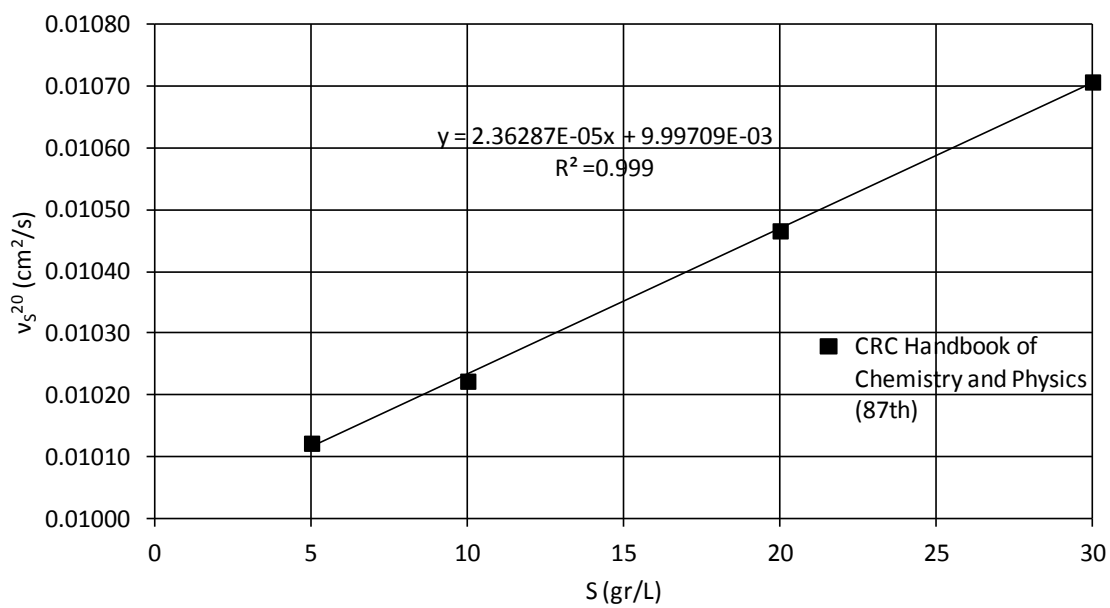
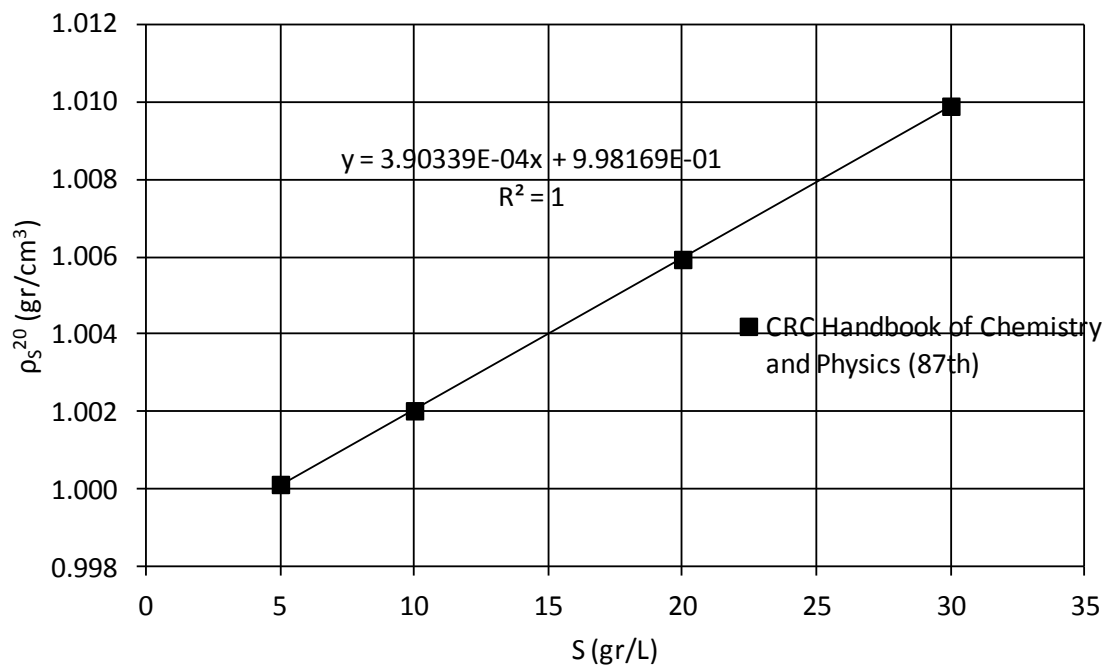


Ζαχαρόνερο (σαν μέση τιμή δεδομένων Φρουκτόζης και Γλυκόζης)

CRC Handbook of Chemistry and Physics (87th)

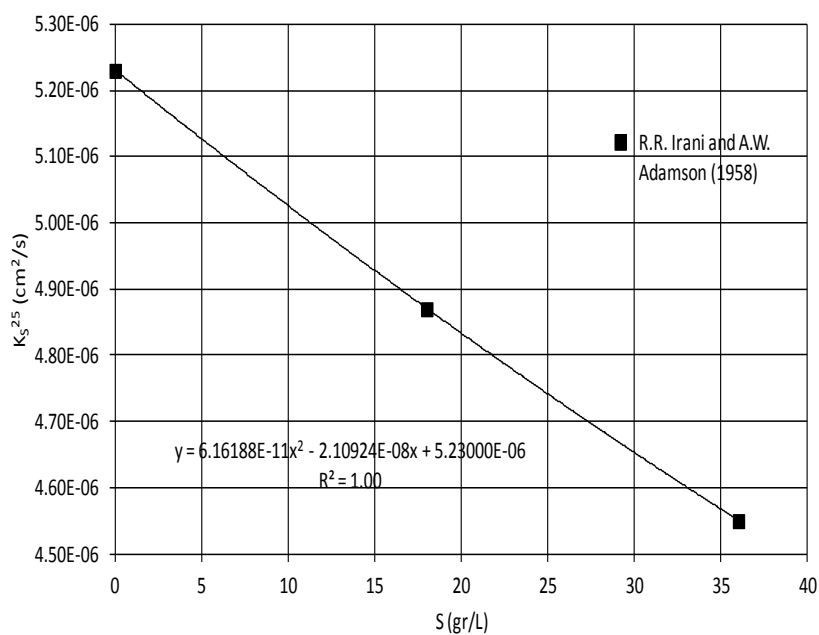
172

	Temperature at 20 °C						Temperature at 20 °C				
	BRIX (%)	S (gr/L)	ρ (gr cm ⁻³)	η (gr cm ⁻¹ s ⁻¹)	ν_s (cm ² /s)		BRIX (%)	S (gr/L)	ρ (gr cm ⁻³)	η (gr cm ⁻¹ s ⁻¹)	ν_s (cm ² /s)
FRUCTOSE	0.5	5.0	1.0002	1.0150E-02	1.0148E-02	GLUCOSE	0.5	5.0	1.0001	1.0100E-02	1.0099E-02
	1.0	10.0	1.0021	1.0280E-02	1.0258E-02		1.0	10.0	1.002	1.0210E-02	1.0190E-02
	2.0	20.0	1.0061	1.0540E-02	1.0476E-02		2.0	20.0	1.0058	1.0520E-02	1.0459E-02
	3.0	30.0	1.0101	1.0800E-02	1.0692E-02		3.0	30.0	1.0097	1.0830E-02	1.0726E-02
	4.0	40.0	1.014	1.1060E-02	1.0907E-02		4.0	40.0	1.0136	1.1130E-02	1.0981E-02
	5.0	50.0	1.0181	1.1340E-02	1.1138E-02		5.0	50.0	1.0175	1.1450E-02	1.1253E-02
	6.0	60.0	1.0221	1.1650E-02	1.1398E-02		6.0	60.0	1.0214	1.1790E-02	1.1543E-02
	7.0	70.0	1.0262	1.1980E-02	1.1674E-02		7.0	70.0	1.0254	1.2140E-02	1.1839E-02
	8.0	80.0	1.0303	1.2320E-02	1.1958E-02		8.0	80.0	1.0294	1.2500E-02	1.2143E-02
	9.0	90.0	1.0344	1.2700E-02	1.2278E-02		9.0	90.0	1.0334	1.2890E-02	1.2473E-02
	10.0	100.0	1.0385	1.3090E-02	1.2605E-02		10.0	100.0	1.0375	1.3300E-02	1.2819E-02
	12.0	120.0	1.0469	1.3910E-02	1.3287E-02		12.0	120.0	1.0457	1.4160E-02	1.3541E-02
	14.0	140.0	1.0554	1.4830E-02	1.4052E-02		14.0	140.0	1.054	1.5120E-02	1.4345E-02
	16.0	160.0	1.064	1.5870E-02	1.4915E-02		16.0	160.0	1.0624	1.6250E-02	1.5296E-02
	18.0	180.0	1.0728	1.7030E-02	1.5874E-02		18.0	180.0	1.071	1.7570E-02	1.6405E-02
	20.0	200.0	1.0816	1.8370E-02	1.6984E-02		20.0	200.0	1.0797	1.9040E-02	1.7635E-02
	22.0	220.0	1.0906	1.9860E-02	1.8210E-02		22.0	220.0	1.0884	2.0630E-02	1.8954E-02
	24.0	240.0	1.0996	2.1540E-02	1.9589E-02		24.0	240.0	1.0973	2.2420E-02	2.0432E-02
	26.0	260.0	1.1089	2.3480E-02	2.1174E-02		26.0	260.0	1.1063	2.4580E-02	2.2218E-02
	28.0	280.0	1.1182	2.5620E-02	2.2912E-02		28.0	280.0	1.1154	2.7070E-02	2.4269E-02
30.0	300.0	1.1276	2.8170E-02	2.4982E-02	30.0	300.0	1.1246	2.9980E-02	2.6658E-02		
32.0	320.0	1.1372	3.1120E-02	2.7365E-02	32.0	320.0	1.134	3.3240E-02	2.9312E-02		
34.0	340.0	1.1469	3.4620E-02	3.0186E-02	34.0	340.0	1.1434	3.7040E-02	3.2395E-02		
36.0	360.0	1.1568	3.8990E-02	3.3705E-02	36.0	360.0	1.1529	4.1930E-02	3.6369E-02		
38.0	380.0	1.1668	4.4180E-02	3.7864E-02	38.0	380.0	1.1626	4.7860E-02	4.1166E-02		
40.0	400.0	1.1769	5.0460E-02	4.2875E-02	40.0	400.0	1.1724	5.4930E-02	4.6853E-02		
42.0	420.0	1.1871	5.7730E-02	4.8631E-02	42.0	420.0	1.1823	6.2880E-02	5.3184E-02		
44.0	440.0	1.1975	6.6440E-02	5.5482E-02	44.0	440.0	1.1924	7.2350E-02	6.0676E-02		
46.0	460.0	1.208	7.7530E-02	6.4180E-02	46.0	460.0	1.2026	8.4540E-02	7.0298E-02		
48.0	480.0	1.2187	9.0600E-02	7.4342E-02	48.0	480.0	1.213	9.8830E-02	8.1476E-02		



Irani and Adamson (1958)

1 mole "SUGAR" = 180.16 gr		
Temperature at 25 °C		
moles solute /L	S (gr/L)	K _s (cm ² /s)
0.0	0.0	5.23E-06
0.1	18.0	4.87E-06
0.2	36.0	4.55E-06
0.3	54.0	4.26E-06
0.4	72.1	3.97E-06
0.5	90.1	3.68E-06
0.6	108.1	3.39E-06
0.7	126.1	3.04E-06
0.8	144.1	2.88E-06
1.0	180.2	2.40E-06
1.2	216.2	2.23E-06
1.4	252.2	1.98E-06
1.6	288.3	1.76E-06
1.8	324.3	1.55E-06
2.0	360.3	1.34E-06
2.2	396.4	1.14E-06
2.4	432.4	9.30E-07
2.5	450.4	8.30E-07
2.6	468.4	7.30E-07



Σύμβολα που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτήν την ενότητα

η = Viscosity

ν = Kinematic Viscosity

Mass (%) = Mass of Solute / Mass of Solution

K = Diffusion coefficient

1 L Solution = 1000 gr (προσέγγιση για λίγα γραμμάρια διαλυμένης ουσίας)

