

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

Διπλωματική Εργασία

**«ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΥΓΡΟΥ ΥΜΕΝΑ ΠΑΝΩ ΑΠΟ
ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΜΕΝΟ ΤΟΙΧΩΜΑ ΜΕ ΣΥΣΤΗΜΑ
ΕΓΧΥΣΗΣ»**

υπό

ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ ΣΑΜΑΝΤΑ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας
2007

© 2007 Αθανάσιος Σαμαντάς

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 5526/1

Ημερ. Εισ.: 18-07-2007

Δωρεά: Συγγραφέα

Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ

2007

ΣΑΜ

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής Δρ. Βλαχογιάννης Μιχαήλ
(Επιβλέπων) Διδάσκων (Π.Δ. 407/80), Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Μποντόζογλου Βασίλειος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Ανδρίτσος Νικόλαος
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ροή υγρού υμένα είναι ένα φαινόμενο που συναντάται σε πολλές τεχνολογικές εφαρμογές. Κυριότερο πεδίο εφαρμογής είναι οι συσκευές εναλλαγής θερμότητας ή μάζας.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, μελετάται η ροή υγρού υμένα πάνω από περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα με σύστημα έγχυσης. Σκοπός, είναι η οπτικοποίηση της εξέλιξης του φαινομένου της διαμήκους και εγκάρσιας διάχυσης καθώς επίσης η παρατήρηση των σχηματιζόμενων ζωνών ανακυκλοφορίας στις κοιλότητες του τοιχώματος. Σε κανάλι ροής μήκους 0,8m, τοποθετήθηκε το περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα. Έγινε διάνοιξη οπών και προσαρμόσθηκε το σύστημα έγχυσης το οποίο συνδέθηκε με δοσομετρική αντλία με δυνατότητα ρύθμισης της παροχής. Το φαινόμενο παρατηρήθηκε σε διάφορες συνθήκες ροής και η οπτικοποίησή του έγινε με χρήση βιντεοκάμερας.

Στα κεφάλαια της εργασίας, παρουσιάζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση της ροής του υγρού υμένα, η πειραματική διαδικασία που πραγματοποιήθηκε και παρατίθενται εικόνες από την οπτικοποίηση. Τέλος δίνονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την παρατήρηση και μελέτη του φαινομένου

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας των κύκλο των προπτυχιακών μου σπουδών θα ήθελα να ευχαριστήσω ορισμένους ανθρώπους που είχαν καταλυτική συμβολή αυτά τα πέντε χρόνια. Πρώτους από όλους πρέπει να γίνει δέκτης των ευχαριστιών ο κ. Βλαχογιάννης Μιχαήλ. Είναι ο άνθρωπος εκείνος ο οποίος με έμαθε να σκέφτομαι και μου κέντρισε το ενδιαφέρον για τις πειραματικές παρατηρήσεις. Μου εμπιστεύτηκε την εκπόνηση της παρούσας εργασίας και μου έδωσε τη δυνατότητα να δω την πρακτική εφαρμογή της θεωρίας. Η άριστη συνεργασία μαζί του και η ακαδημαϊκή βοήθεια που μου προσέφερε δε μπορούν να είναι τίποτε άλλο παρά **ανυπολόγιστες και αξέχαστες**.

Όλα αυτά τα χρόνια της φοιτητικής ζωής δε θα είχαν την ίδια αξία χωρίς τους φίλους και αυριανούς συναδέλφους. Αναφέρομαι στους Αργυρίου Χάρη, Δημητρακόπουλο Νικόλα, Δημητρίου Θέμη, Ζήση Γιώργο και Τόλη Ηλία.

Τέλος το πιο μεγάλο ευχαριστώ θέλω το αποδώσω στην οικογένεια μου ` τον πατέρα μου Βασίλη, τη μητέρα μου Δήμητρα και τον αδερφό μου Δημήτρη. Χωρίς τη στήριξή τους δε θα ήταν δυνατή η μέχρι τώρα εξέλιξή μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

• <u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή</u>	7
• <u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Βιβλιογραφική ανασκόπηση</u>	9
• 2.1 Βασική ροή σε επίπεδο τοίχωμα	9
• 2.2 Ροή υμένα σε περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα	10
• 2.2.1. Θεωρία-Υπολογισμοί μόνιμης ροής	10
• 2.2.2. Γραμμική ευστάθεια	13
• 2.2.3. Πειράματα	14
• <u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Πειραματική Διαδικασία</u>	24
• 3.1 Η πειραματική διάταξη	24
• 3.2 Το ημιτονοειδές τοίχωμα	26
• 3.3 Το σύστημα έγχυσης	27
• 3.4 Μέθοδος απεικόνισης με φθορισμό	28
• 3.5 Ευθυγράμμιση της διάταξης με σύστημα εξωτερικής διαταραχής	28
• 3.7 Έναρξη του πειράματος	30
• 3.8 Τετραγωνικό τοίχωμα	31
• 3.9 Χρήση του H/Y	32
• <u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Πειραματικά Αποτελέσματα</u>	34
• <i>4.1 Πειραματικά αποτελέσματα για το ημιτονοειδές τοίχωμα</i>	35
• 4.1.1 Επίδραση ρευστού έγχυσης	35
• 4.1.2 Επίδραση αριθμού Reynolds	38
• 4.1.3 Επίδραση της κλίσης ϕ	40
• 4.1.4 Επίδραση του ακροφυσίου έγχυσης	42
• 4.1.5 Επίδραση της παροχής έγχυσης	45
• <i>4.2 Διάχυση του ρευστού έγχυσης στον υγρό υμένα(ημιτονοειδές τοίχωμα)</i>	47
• 4.2.1 Επίδραση ρευστού έγχυσης	47
• 4.2.2 Επίδραση αριθμού Reynolds	49
• 4.2.3 Επίδραση της κλίσης ϕ	50
• 4.2.4 Επίδραση του ακροφυσίου έγχυσης	51

4.2.5 Επίδραση της παροχής έγχυσης	52
4.3 Πειραματικά αποτελέσματα για το τετραγωνικό τοίχωμα	53
4.3.1 Επίδραση αριθμού Reynolds	53
4.3.2 Επίδραση της κλίσης ϕ	55
4.3.3 Επίδραση του ακροφυσίου έγχυσης	57
4.4 Διάχυση του ρευστού έγχυσης στον υγρό υμένα(τετραγωνικό τοίχωμα)	60
4.4.1 Επίδραση αριθμού Reynolds	60
4.4.2 Επίδραση της κλίσης ϕ	61
4.4.3 Επίδραση του ακροφυσίου έγχυσης	62
• <u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Συμπεράσματα</u>	64
5.1 Γενική κατανόηση του φαινομένου	64
5.2 Στοιχεία επίδρασης στη Ροή Υγρού Υμένα με σύστημα έγχυσης	64
5.3 Επίδραση στη Ροή	64

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Το πρόβλημα της ροής υγρού υμένα πάνω από κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα έχει απασχολήσει αρκετούς ερευνητές, εξαιτίας των θεωρητικών και πρακτικών εφαρμογών του. Ροή υγρού υμένα απαντάται σε συσκευές εναλλαγής θερμότητας, όπως εξατμιστήρες και συμπυκνωτές και σε συσκευές εναλλαγής μάζας, όπως στήλες απορρόφησης με πληρωτικά υλικά. Απαντάται επίσης και σε άλλες πιο σύγχρονες τεχνολογικές διεργασίες, όπως είναι οι ηλεκτροχημικές επιμεταλλώσεις και οι χημικές μετατροπές σε καταλυτικούς αντιδραστήρες.

Όπως έχει πρακτικά διαπιστωθεί από το πλήθος των εφαρμογών κατά τη ροή υγρού υμένα πάνω από επιφάνειες επίπεδες ή με κάποιου είδους διαμόρφωση, εντατικοποιούνται οι συντελεστές μεταφοράς μάζας και θερμότητας. Είναι προφανές τόσο από τα θεωρητικά, όσο και από τα πειραματικά αποτελέσματα, ότι αυτή η εντατικοποίηση των συντελεστών είναι συνάρτηση των ρευστοδυναμικών χαρακτηριστικών του υμένα, όπως του μέσου πάχους του υμένα, του ύψους των κυμάτων που εμφανίζονται, του είδους των κυμάτων, καθώς και των διαφόρων διαστάσεων και τρισδιάστατων ασταθειών.

Η περίπτωση της ροής πάνω σε περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα, παρά τις πολυάριθμες εφαρμογές της, έχει μελετηθεί πολύ λιγότερο από ότι αυτή του επίπεδου τοιχώματος. Τα περισσότερα από τα διαθέσιμα αποτελέσματα αφορούν την μόνιμη ροή, δηλαδή το ισοδύναμο της λύσης Nusselt για το επίπεδο τοίχωμα.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι μία πρώτη προσέγγιση της οπτικοποίησης της ροής υγρού υμένα σε δύο περιοδικά διαμορφωμένα τοιχώματα με την επιβολή συστήματος έγχυσης. Τα δύο τοιχώματα που χρησιμοποιήθηκαν τέθηκαν υπό κλίση και είχαν ημιτονοειδή και τετραγωνική μορφή. Η οπτικοποίηση της ροής έγινε με χρήση βιντεοκάμερας και επικεντρώθηκε στη διάχυση της εγχυνόμενης ουσίας καθώς επίσης στις δημιουργούμενες ζώνες ανακυκλοφορίας στις κοιλότητες των τοιχωμάτων. Η πειραματική διαδικασία έλαβε χώρα στο εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μία θεωρητική ανάλυση για τη ροή υγρού υμένα πάνω από περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα. Αναφέρεται η γραμμική ευστάθεια της ροής πάνω από κυματοειδές τοίχωμα και παρουσιάζονται πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί από τους Zhao & Cerro (1992) και Shetty & Cerro, Wienschem & Aksel και Vlachogiannis and Bontozoglou.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία του πειράματος. Δίνονται στοιχεία, σχέδια και φωτογραφίες της διάταξης που χρησιμοποιήθηκε. Αναφέρονται λεπτομερώς όλες οι κατασκευαστικές ενέργειες και ο τρόπος με τον οποίο έγινε η οπτικοποίηση της ροής.

Το τέταρτο κεφάλαιο δείχνει τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία. Παρατίθενται εικόνες από την οπτικοποίηση της ροής σε όμοιες συνθήκες πειραματικής διεξαγωγής με διαφορά μίας παραμέτρου. Το γεγονός αυτό στοχεύει στην επίδειξη της επίδρασης αυτής της παραμέτρου στην εξέλιξη του φαινομένου. Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

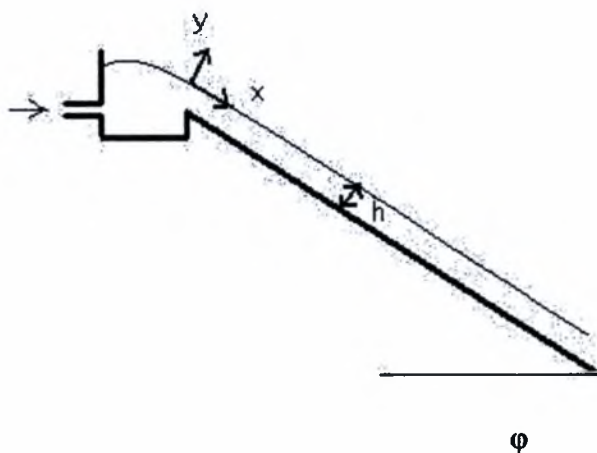
2.1 Βασική ροή σε επίπεδο τοίχωμα

Η πιο απλή μορφή του προβλήματος της ροής σε κεκλιμένο επίπεδο είναι αυτή της ροής Nusselt. Θεωρούμε δισδιάστατη ροή υγρού υμένα κατά μήκος μιας κεκλιμένης επίπεδης επιφάνειας μήκους L (σχήμα 2.1.1). Η περιοχή αυτή μήκους L βρίσκεται πολύ μακριά από τα άκρα στα οποία μπαίνει και βγαίνει ο υμένας ώστε να μην επηρεάζεται λόγω αυτών, δηλαδή η ταχύτητα κατά την x διεύθυνση δεν εξαρτάται από το μήκος x . Θεωρούμε επίσης ότι το υγρό είναι σταθερής πυκνότητας και ιξώδους.

$$\left(\begin{array}{c} \text{εισροή} \\ \text{x-ορμής} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{εκροή} \\ \text{x-ορμής} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{άθροισμα δυνάμεων} \\ \text{(παραγωγή x-ορμής)} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{συσσώρευση} \\ \text{ορμής} \end{array} \right)$$

Θεωρούμε στοιχειώδη όγκο ελέγχου. Η x -ορμή μπαίνει στον όγκο ελέγχου με τη ροή και λόγω της ιξώδους αλληλεπίδρασης. Το ισοζύγιο x -ορμής είναι το εξής:

$$[(Wdyu_x)(\rho u_x)|_x - (Wdyu_x)(\rho u_x)|_{x+L}] + [(WL\tau_{xy})|_y - (WL\tau_{xy})|_{y+dy}] + WLy\rho g \sin \phi = 0 \quad (2.1)$$



Σχήμα 2.1.1: Ροή σε κεκλιμένο επίπεδο.

Με απλοποιήσεις παίρνουμε:

$$-\frac{d(\tau_{yx})}{dy} + \rho g \sin \phi = 0 \quad (2.2)$$

με:

$$\tau_{yx} = -\mu \frac{du_x}{dy} \quad (2.3)$$

Οι συνοριακές συνθήκες που διέπουν το πρόβλημα είναι:

$$\text{στο } y=0 \quad u_x(0)=0 \quad (2.4)$$

$$\text{στο } y=h \quad \tau_{yx}=0 \quad (2.5)$$

Με βάση τα παραπάνω η κατανομή της ταχύτητας δίνεται από τη σχέση:

$$u_x(y) = \left(\frac{\rho g \sin \phi}{2\mu} \right) y(2h-y) \quad \text{στο } y=h \quad (2.6)$$

Το ύψος του υμένα δίνεται, συναρτήσει της ογκομετρικής παροχής ανά μονάδα πλάτους, από τη σχέση:

$$h_N = \sqrt[3]{\frac{3q\mu}{\rho g \sin \phi}} \quad (2.7)$$

και συναρτήσει της μέσης ταχύτητας από τη σχέση:

$$h_N = \sqrt{\frac{3\mu \cdot u_o}{\rho g \sin \phi}} \quad (2.8)$$

Αδιαστατοποιώντας το πρόβλημα μπορούμε να πούμε ότι η ροή περιγράφεται από τους αριθμούς Reynolds και Weber ή από τους Reynolds και Kapitza, οι οποίοι δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$Re = \frac{u_o \cdot h_N}{\nu} = \frac{q}{\nu} \quad (2.9)$$

$$We = \frac{\gamma}{(\rho \cdot u_o^2 \cdot h_N)} \quad (2.10)$$

$$Ka = \frac{\gamma}{(\rho \cdot \nu^{2/3} \cdot g^{1/3})} \quad (2.11)$$

όπου: u_o είναι η μέση ταχύτητα, h_N το πάχος του επίπεδου υμένα κατά Nusselt, ρ η πυκνότητα του ρευστού, γ η επιφανειακή τάση και g η επιτάχυνση της βαρύτητας. Συνήθως χρησιμοποιείται ο αριθμός Kapitza αντί του αριθμού Weber διότι είναι συνάρτηση μόνο των φυσικών ιδιοτήτων του ρευστού και ανεξάρτητος της παροχής.

Η μαθηματική ανάλυση του γενικού προβλήματος ροής με ελεύθερη επιφάνεια είναι αρκετά δύσκολη εξαιτίας του γεγονότος ότι η μορφή της επιφάνειας είναι άγνωστη και πρέπει να υπολογιστεί. Το πρόβλημα είναι μη-γραμμικό και για τη λύση του απαιτούνται πολύπλοκες μαθηματικές μέθοδοι.

2.2 Ροή υμένα σε περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα

2.2.1. Θεωρία-Υπολογισμοί μόνιμης ροής

Η περίπτωση της ροής πάνω σε περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα, παρά τις πολυάριθμες εφαρμογές της, έχει μελετηθεί πολύ λιγότερο από ότι αυτή του επίπεδου τοιχώματος. Τα

περισσότερα από τα διαθέσιμα αποτελέσματα αφορούν την μόνιμη ροή, δηλαδή το ισοδύναμο της λύσης Nusselt για το επίπεδο τοίχωμα. Πρώτος ο Wang (1981) επικεντρώνεται στη θεωρητική μελέτη της ροής ενός λεπτού υμένα σε κυματοειδές τοίχωμα, θεωρώντας μικρούς αριθμούς Re και μικρό πλάτος τοιχώματος (συγκρινόμενο με το πάχος του υμένα). Παρατήρησε λοιπόν ο Wang ότι στην ελεύθερη επιφάνεια εμφανίζεται μια στατική περιοδική δομή η οποία έχει μήκος κύματος ίδιο με αυτό του τοιχώματος. Σε μεγαλύτερους Re οι κυματοειδείς γραμμές του τοιχώματος προκαλούν ασταθή κύματα με μήκος κύματος παραπλήσιο με αυτό του τοιχώματος. Τα αποτελέσματα της επίδρασης του τοιχώματος στην ελεύθερη επιφάνεια συνοψίζονται στο διάγραμμα του σχήματος 2.1. Στο διάγραμμα φαίνεται ότι το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας A εξαρτάται από τον λόγο λ του μέσου πάχους του υμένα (h) προς το μήκος κύματος του τοιχώματος (l) καθώς και από την παράμετρο D . Η παράμετρος D εκφράζει την επίδραση της διατμητικής τάσης και της γωνίας κλίσης του τοιχώματος σύμφωνα με την σχέση:

$$D = \cot \alpha \cdot \sec \beta_0 + \frac{1}{3} \cdot \frac{4 \cdot \pi^2 T}{\rho \cdot \nu \cdot Q} \cdot \frac{h^3}{l^2} \quad (2.12)$$

όπου,

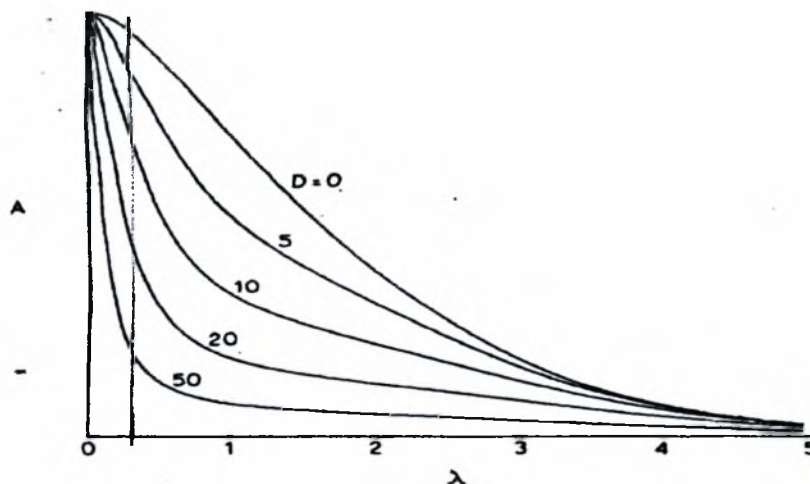
α : η μέση γωνία κλίσης του επιπέδου,

β_0 : γωνία των κυματοειδών γραμμών (wavy striations),

T : η επιφανειακή τάση και

Q : ο ρυθμός ροής (παροχή)

Από το σχήμα 2.1 φαίνεται ότι το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας αυξάνεται όσο μειώνεται το λ , δηλαδή όσο αυξάνεται το μήκος κύματος της διαμόρφωσης του κυματοειδούς τοιχώματος. Επίσης, το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας αυξάνεται με την μείωση του D δηλαδή με την αύξηση της γωνίας του τοιχώματος με την οριζόντιο ή την μείωση της επιφανειακής τάσης.

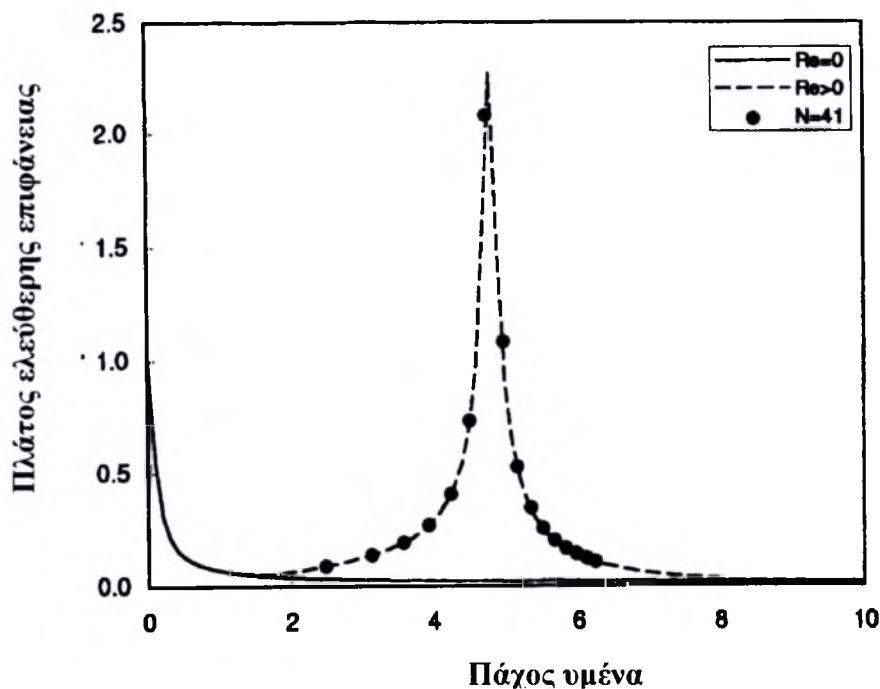


Σχήμα 2.1: Πρόβλεψη του πλάτους της ελεύθερης επιφάνειας από τον Wang (1981).

Επίσης, ο Pozrikidis (1988) υπολόγισε αριθμητικά την έρπουσα ροή πάνω από τοιχώματα με τυχαίο πλάτος και μορφή. Ενδιαφέροντα αποτελέσματα στην εργασία αυτή δόθηκαν για την περίπτωση του ημιτονοειδούς τοιχώματος. Έτσι, για σταθερό λόγο του πλάτους του τοιχώματος προς το μήκος κύματός του έχουμε μείωση του πλάτους της ελεύθερης επιφάνειας όσο μεγαλώνει ο Re . Επίσης, αν κρατήσουμε σταθερό το μήκος κύματος του τοιχώματος και την παροχή τότε αυξάνοντας το πλάτος του ημιτονοειδούς τοιχώματος το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας (A) αυξάνεται. Τέλος, αν θεωρήσουμε σταθερό το πλάτος του τοιχώματος και διατηρήσουμε σταθερή την παροχή, αυξάνοντας το μήκος κύματος l , αυξάνει το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας (A). Οι Dassori, Deiber & Cassano (1984) και οι Kang & Chen (1995) επέκτειναν την μελέτη σε διαχωρισμένη ροή μεταξύ δύο υγρών. Οι Shetty & Cerro (1994) απέδειξαν με ασυμπτωτική ανάλυση ότι με την παραδοχή αμελητέας αδράνειας και τριχοειδών φαινομένων η ροή ενός ιξώδους ρευστού κατάντη κυματοειδούς επιφάνειας υπακούει σε μια τοπική λύση Nusselt. Οι προηγούμενες μελέτες αφορούν ροή με αριθμό Re πολύ κοντά στο μηδέν (έρπουσα ροή). Επίσης κάποιες από τις παραπάνω εργασίες αφορούν ροή σε κατακόρυφο τοίχωμα με διαμορφώσεις μεγάλου πλάτους στην επιφάνεια.

Οι Aksel et al (2003, 2004) παρατήρησαν τόσο υπολογιστικά όσο και πειραματικά ότι στην περίπτωση που το πάχος του υμένα υπερβεί μια κρίσιμη τιμή, δημιουργούνται και αναπτύσσονται δίνες στη ροή. Και στην περίπτωση αυτή η ροή είναι έρπουσα πάνω από τοίχωμα μεγάλου πλάτους διαμόρφωσης. Πιο συγκεκριμένα, για συγκριτικά μικρά πλάτη τοιχώματος και μεγάλο πάχος υμένα, οι ροϊκές γραμμές ακολουθούν τη διαμόρφωση του τοιχώματος κοντά σε αυτό ενώ η ελεύθερη επιφάνεια είναι σχεδόν επίπεδη. Αυξάνοντας το πλάτος του κύματος έχουμε διαχωρισμό της ροής και εμφάνιση μιας περιοχής ανακυκλοφορίας. Οι δίνες αυτές εντοπίζονται στις κοιλότητες του τοιχώματος. Αυξάνοντας το πλάτος του τοιχώματος ακόμα περισσότερο εμφανίζεται και δεύτερη ή και περισσότερες περιοχές ανακυκλοφορίας. Συγχρόνως, η εμφάνιση των δινών εξαρτάται και από το πάχος του υμένα. Κρατώντας το ύψος κύματος σταθερό και μειώνοντας το πάχος του υμένα οι δίνες εξασθενούν σε ένταση και μέγεθος, μέχρι που εξαφανίζονται για αρκετά μικρά πάχη υμένα. Η επίδραση της γωνίας κλίσης στις δίνες είναι αμελητέα τη στιγμή που το πάχος του υμένα είναι συγκριτικά μεγάλο.

Οι Bontozoglou & Papapolymerou (1997) μελέτησαν τη μόνιμη ροή υμένα σε ημιτονοειδές τοίχωμα σε πεπερασμένους αριθμούς Re , μέσα στα όρια της στρωτής ροής. Για μηδενικό αριθμό Reynolds ($Re=0$), τα αποτελέσματα συμπίπτουν με αυτά του Wang (1981), ενώ για μη μηδενικούς αριθμούς Reynolds παρατηρείται εντελώς διαφορετική συμπεριφορά. Ο υπολογισμός του πλάτους της ελεύθερης επιφάνειας συναρτήσει του πάχους του υμένα παρουσιάζεται στο σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2: Σύγκριση μεταξύ των προβλέψεων των θεωριών στρωτής και έρπουσας ροής για το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας ($l=0,002m$, $\varphi=60^\circ$).

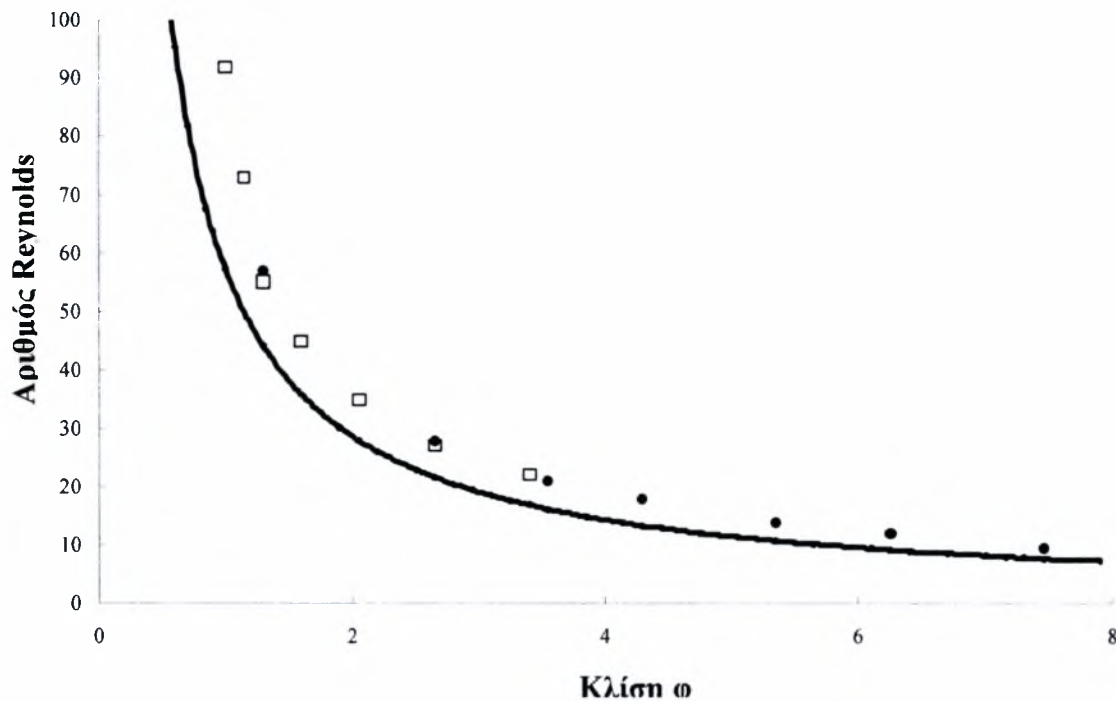
Τα αποτελέσματα για $Re=0$ και $Re>0$ συμπίπτουν καθώς το $h_N \rightarrow 0$. Τα παραπάνω αποτελέσματα αλλάζουν δραστικά όταν αυξηθεί το πάχος του υμένα (δηλ. με αύξηση του αριθμού Re), και προβλέπεται η ύπαρξη συντονισμού μεταξύ ελεύθερης επιφάνειας και τοιχώματος. Υπολογιστικές προσομοιώσεις για διδιάστατη μόνιμη ροή κατά μήκος επιφάνειας με μεγάλο πλάτους διαμορφώσης, έγιναν από τους Trifonov (1998), Malamataris & Bontozoglou (1999) και Bontozoglou (2000). Και σε αυτή την περίπτωση επαληθεύτηκε η εμφάνιση της στατικής μορφής της ελεύθερης επιφάνειας.

2.2.2. Γραμμική ευστάθεια

Η γραμμική ευστάθεια της μόνιμης ροής πάνω από κυματοειδές τοίχωμα είναι ένα σημαντικό θέμα που δεν έχει διερευνηθεί συστηματικά. Ο Trifonov (1998) πρόβλεψε υπολογιστικά ότι η ροή υγρού υμένα κατά μήκος ενός κατακόρυφου περιοδικού τοιχώματος γίνεται γραμμικά ασταθής πάνω από έναν πεπερασμένο (αλλά μικρό) αριθμό Re . Υπενθυμίζουμε ότι από την εξίσωση (2.12) το όριο αστάθειας κατακόρυφου επίπεδου τοιχώματος είναι $Re=0$, συνεπώς η παραπάνω υπολογιστική πρόβλεψη αντιστοιχεί σε (μικρή) αύξηση της ευσταθούς περιοχής.

Η μόνη πειραματική παρατήρηση δόθηκε από τους Bontozoglou & Vlachogiannis (2002) και αφορά ένα μόνον τοίχωμα με ορθογωνική περιοδικότητα ύψους. Τα αποτελέσματα φαίνονται

στο σχήμα 2.3 και δείχνουν ότι η περιοδικότητα του τοιχώματος επιδρά σταθεροποιητικά στη ροή και αυξάνει τον κρίσιμο αριθμό Re σε σχέση με αυτόν του επίπεδου τοιχώματος.



Σχήμα 2.3: Καμπύλη ευστάθειας της ροής υγρού υμένα σε διάφορες κλίσεις ως συνάρτηση του αριθμού Re για περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα. (□) $Ka=3365$, (●) $Ka=1102$, (—) $Re=5/6\cot\theta$.

Οι Aksel et al. (2003) ανέλυσαν γραμμικά την ψευδομόνιμη προσέγγιση της μόνιμης ροής σε ημιτονοειδές τοίχωμα και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η σταθεροποίηση της ροής είναι ισχυρή συνάρτηση του πλάτους των κυματισμών. Παράλληλα, διαπίστωσαν ότι σε κάποιες συνθήκες μπορεί να εμφανιστεί *τοπική* αστάθεια στη ροή σε αριθμό Re ακόμα και μικρότερο από τον κρίσιμο για επίπεδο τοίχωμα. Στην περίπτωση αυτή αναπτύσσονται προσωρινά επιφανειακά κύματα τα οποία είναι μικρά συγκρινόμενα με το μήκος της διαμόρφωσης του τοιχώματος αλλά μεγάλα σε σχέση με το πάχος του υμένα.

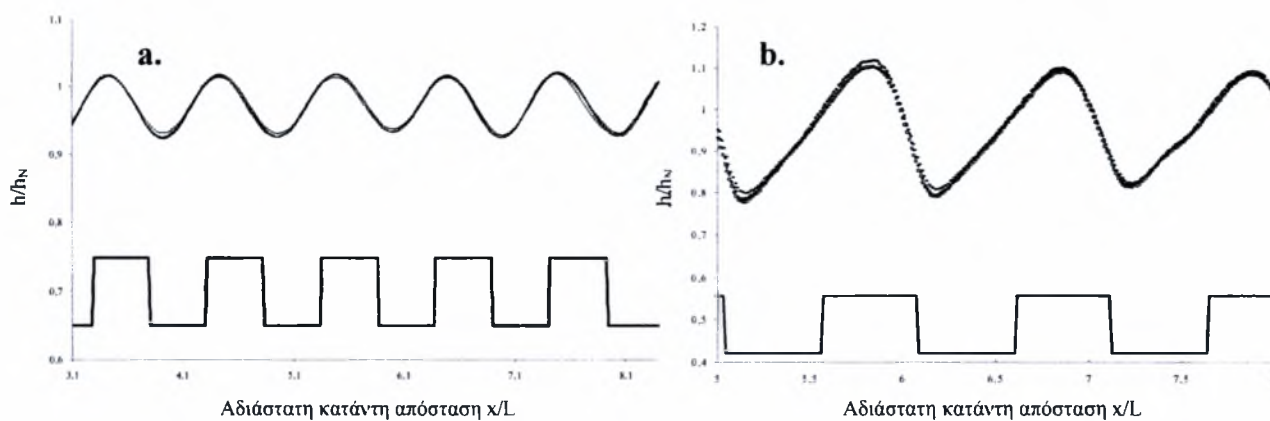
2.2.3. Πειράματα

Οι πειραματικές μελέτες πάνω στο πρόβλημα της ροής σε διαμορφωμένο τοίχωμα είναι περιορισμένες. Οι Zhao & Cerro (1992) και Shetty & Cerro (1993) μελέτησαν τέτοιου είδους ροή πάνω από κυματοειδές τοίχωμα σε πολύ χαμηλούς Re . Πιο πρόσφατα, οι Aksel et al. (2003) πιστοποίησαν πειραματικά την εμφάνιση δινών στις κοιλότητες της περιοδικής διαμόρφωσης του τοιχώματος, για έρπουσα ροή. Όπως προαναφέρθηκε, πάνω από έναν κρίσιμο αριθμό Re εμφανίζεται μια περιοχή ανακυκλοφορίας. Το μέγεθος της δίνης αυτής αυξάνεται με την αύξηση

του πάχους του υμένα μέχρι να πάρει ασυμπτωτικά μια μέγιστη τιμή για αρκετά μεγάλα πάχη. Συγχρόνως, και η ταχύτητα ανακυκλοφορίας των δινών είναι ανάλογη του πάχους του υμένα. Το ελάχιστο απαιτούμενο πάχος υμένα για την εμφάνισή τους αυξάνεται με την γωνία κλίσης και μειώνεται με την αύξηση της επιφανειακής τάσης. Παρόλα αυτά η μέγιστη τιμή του μεγέθους της δίνης είναι ανεξάρτητη από τις δύο παραπάνω παραμέτρους. Επίσης, υπάρχει ένα ελάχιστο πλάτος διαμόρφωσης του τοιχώματος του καναλιού κάτω από το οποίο δεν μπορούν να δημιουργηθούν οι δίνες. Το κρίσιμο πάχος υμένα για την εμφάνισή τους μειώνεται όσο αυξάνεται το πλάτος της περιοδικής διαμόρφωσης του τοιχώματος μέχρι που φτάνει την τιμή μηδέν (εμφάνιση περιοχών ανακυκλοφορίας ανεξάρτητα του πάχους του υμένα). Περαιτέρω αύξηση του πλάτους, έχει ως αποτέλεσμα την γένεση μιας δεύτερης δίνης η εμφάνιση της οποίας και πάλι εξαρτάται από το πάχος του υμένα. Η ταχύτητα της δεύτερης δίνης είναι αρκετά μικρότερη από αυτή της πρώτης. Όσον αφορά την ταχύτητα της ροής, είναι αρκετά μικρότερη πάνω από κυματοειδές τοίχωμα από την ταχύτητα της ροής πάνω από επίπεδο τοίχωμα για λεπτά πάχη υμένα. Όσο το πάχος του υμένα αυξάνεται η διαφορά αυτή τείνει να μηδενιστεί. Για αρκετά μεγάλα πάχη υμένα ο λόγος των δύο ταχυτήτων είναι μονάδα.

Πειράματα σε δύο υγρά διαφορετικού ιξώδους έδειξαν ότι η εμφάνιση των δινών είναι ανεξάρτητη από τον αριθμό Re . Με άλλα λόγια, έχουν το ίδιο μέγεθος για το ίδιο πάχος υμένα ακόμα και αν ο αριθμός Re διαφέρει κατά δύο τάξεις μεγέθους. Ο λόγος της ανεξαρτησίας από τον Re βρίσκεται στο γεγονός ότι οι ταχύτητες στο τοίχωμα μέσα στις κοιλότητες είναι αρκετά μικρότερες από την ταχύτητα στην επιφάνεια. Έτσι, ενώ η μέση ταχύτητα της ελεύθερης επιφάνειας είναι ίδια με αυτή που έχει η ροή πάνω από επίπεδο κεκλιμένο τοίχωμα στις περιοχές ανακυκλοφορίας οι ταχύτητες δεν αλλάζουν αισθητά.

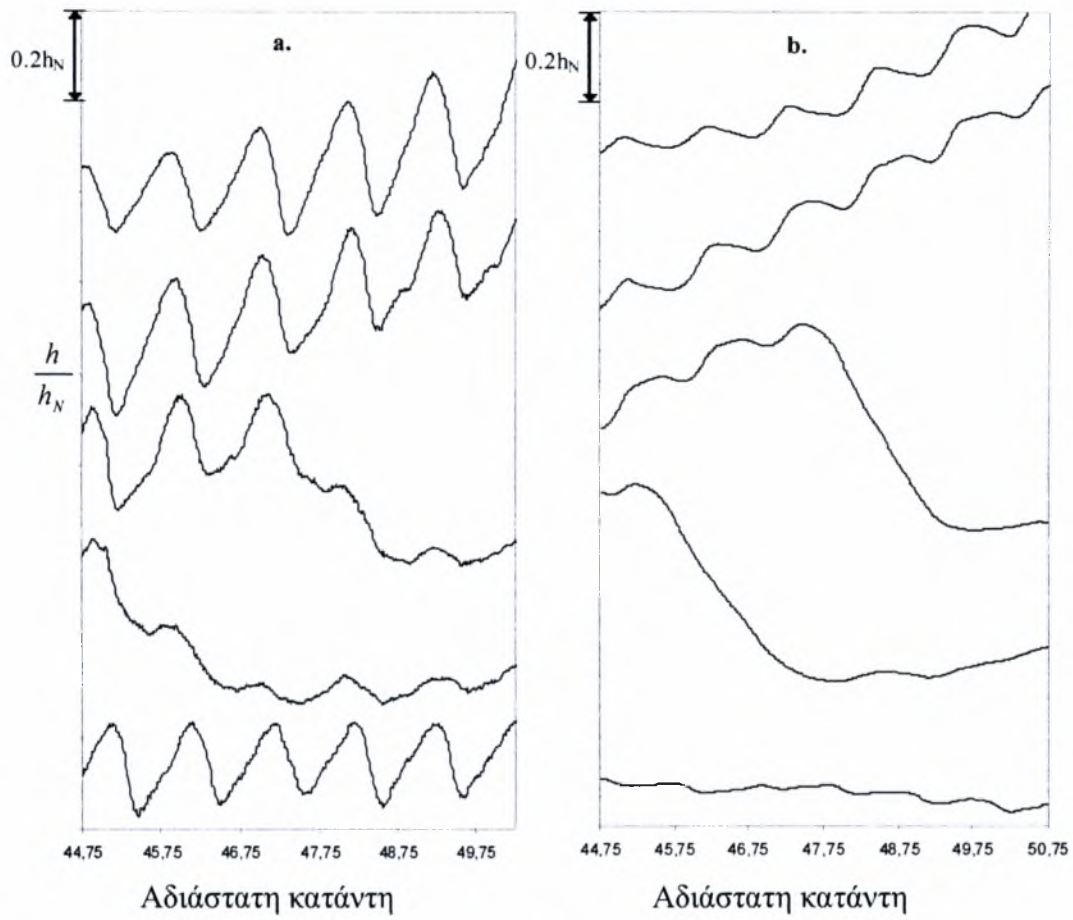
Για ροή σε πεπερασμένους αριθμούς Re , τα μόνα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάστηκαν από τους Vlachogiannis and Bontozoglou (2002) για ένα τοίχωμα ορθογωνικής διατομής μήκους κύματος 12mm, και πρόσφατα από τους Wienschem & Aksel (2004) για ημιτονοειδές τοίχωμα μήκους κύματος 300mm.



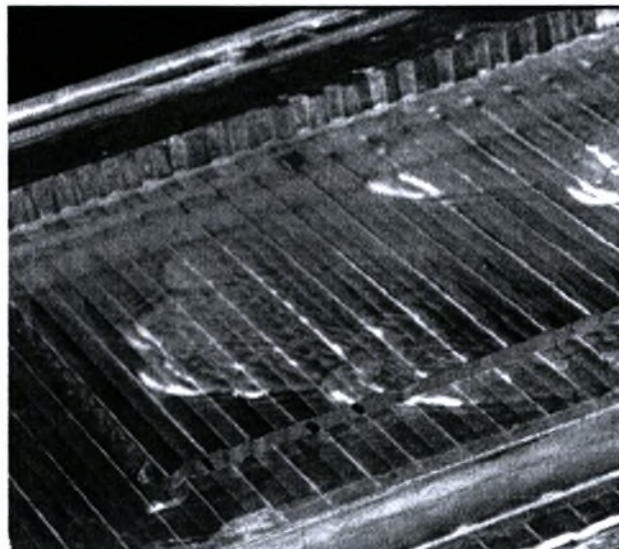
Σχήμα 2.4: Η μορφή της ελεύθερης επιφάνειας σε 4 διαδοχικές χρονικές στιγμές ($\Delta t=0,1 \text{ sec}$) **(a)** ημιτονοειδής μορφή και **(b)** μορφή με περισσότερες αρμονικές.

Σύμφωνα με τους Vlachogiannis and Bontozoglou (2002), η εξέλιξη της ροής σε περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα μπορεί να χωριστεί σε διαφορετικές περιοχές ανάλογα με τον αριθμό Re . Όπως προαναφέρθηκε στο διάγραμμα της ευστάθειας, για $Re \sim O(10^0-10^1)$ η ελεύθερη επιφάνεια είναι επίπεδη. Σε αριθμούς Reynolds $Re \sim O(10^2)$, το πάχος του υμένα αποκλίνει από τη θεωρητική πρόβλεψη κατά Nusselt και αναπτύσσεται μια στατική παραμόρφωση στην ελεύθερη επιφάνεια (σχήμα 2.16). Το φαινόμενο αυτό έχει προβλεφθεί θεωρητικά από τους Bontozoglou & Paparolymerou (1997), Trifonov (1998) και Bontozoglou (2000). Η μορφή της ελεύθερης επιφάνειας στη στατική περιοχή είναι πάντοτε περιοδική, με μήκος κύματος ίσο με αυτό της διαμόρφωσης του τοιχώματος. Το πλάτος της διαμόρφωσης αυτής και η διαφορά φάσης μεταξύ τοιχώματος και ελεύθερης επιφάνειας εξαρτώνται από τον αριθμό Re , τη γωνία κλίσης του καναλιού και το ιξώδες του ρευστού.

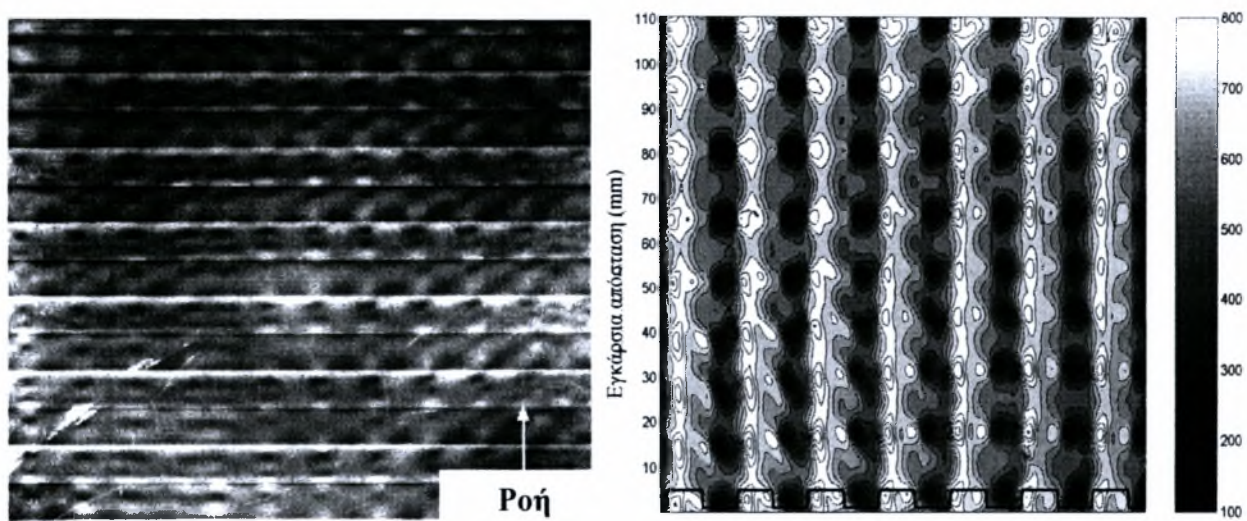
Σε μεγαλύτερους Re , οι Vlachogiannis and Bontozoglou (2002), παρατηρούν ότι η έντονη διέγερση του φυσικού θορύβου αλλά και η αλληλεπίδραση τοιχώματος – ελεύθερης επιφάνειας, επιδρά καταλυτικά στη δημιουργία μοναχικών κυμάτων σε κοντινές αποστάσεις από το σημείο δημιουργίας του υμένα. Τα μοναχικά κύματα υπερθέτονται της βασικής μορφής της επιφάνειας του υμένα (σχήμα 2.5). Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι εμφανίζονται με σχετικά σταθερή συχνότητα, κάτι το οποίο είναι αποτέλεσμα της επίδρασης του τοιχώματος αφού στις ίδιες συνθήκες αλλά για ροή πάνω από επίπεδο τοίχωμα δεν παρατηρείται κάτι ανάλογο. Με περαιτέρω αύξηση του Re , η μορφή της ελεύθερης επιφάνειας μετατρέπεται από διδιάστατη σε τρισδιάστατη με τη δημιουργία πεταλοειδών κυμάτων (horse shoe waves – σχήμα 2.6).



Σχήμα 2.5: (α) Το πέρασμα ενός πλήρους αναπτυγμένου μοναχικού κύματος πάνω από το διαμορφωμένο τοίχωμα. (β) το πέρασμα του ίδιου κύματος χωρίς την επίδραση του τοιχώματος.



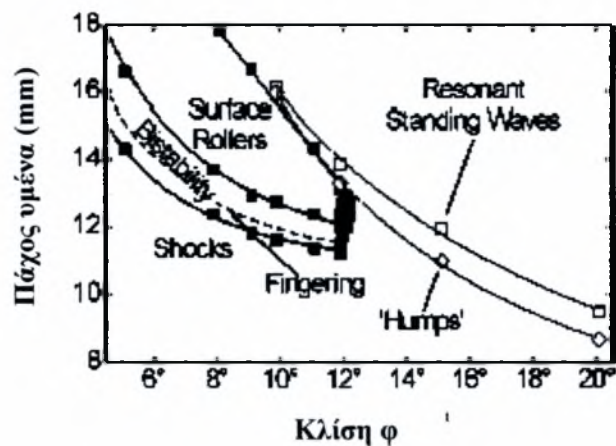
Σχήμα 2.6: Πεταλοειδή κύματα (horse – shoe waves)



Σχήμα 2.7: Η εμφάνιση των εγκάρσιων βαθουλωμάτων στην ελεύθερη επιφάνεια.

Τέλος, οι Vlachogiannis & Bontozoglou (2002) παρατήρησαν ότι η μετάβαση σε χαοτική δομή -όπως θα ήταν αναμενόμενο από τα αποτελέσματα της ροής πάνω από επίπεδο τοίχωμα- αναβάλλεται εξαιτίας της εμφάνισης μιας τρισδιάστατης δομής η οποία συνίσταται από εγκάρσιες σειρές από υψώματα και βαθουλώματα (σχήμα 2.7α,β). Η διαμόρφωση των εγκάρσιων αυτών δομών οδηγεί στην σταθεροποίηση της ροής, όπως καταδεικνύεται από: **(α)** τη μείωση του μέσου πάχους του υμένα, το οποίο πλέον αποκλίνει από την θεωρητική κατά Nusselt λύση, και **(β)** τη μείωση της έντασης ή ακόμα και την εξάλειψη των οδοντώντων κυμάτων.

Οι Wienschem & Aksel (2004) μελέτησαν τη ροή για αριθμούς Re τάξης 10-100 πάνω από ημιτονοειδές τοίχωμα μεγάλου μήκους κύματος ($L=30\text{cm}$). Οι ερευνητές παρατήρησαν δύο διαφορετικά φαινόμενα, τη δημιουργία υδραυλικού άλματος με απότομο μπροστινό μέρος και την εμφάνιση κυμάτων με δίνες (rolling waves). Μάλιστα, υπάρχει μια περιοχή, η οποία εξαρτάται από τη γωνία κλίσης και την επιφανειακή τάση, όπου εμφανίζονται και οι δύο παραπάνω δομές. Σε πιο μεγάλα πάχη υμένα τα κύματα με δίνες εξαφανίζονται και εμφανίζεται η στατική δομή συντονισμού, αποτέλεσμα αλληλεπίδρασης του υμένα με την επιφάνεια. Στην περιοχή μετάβασης από τη μια δομή στην άλλη παρουσιάζεται και το φαινόμενο την περιοδικής εμφάνισης των δύο δομών. Στο σχήμα 2.8 παρουσιάζεται ένας παραμετρικός χάρτης εμφάνισης των δομών συναρτήσει της γωνίας κλίσης και του πάχους του υμένα. Για μικρές γωνίες κλίσης αυξάνοντας το πάχος του υμένα εμφανίζονται υδραυλικά άλματα. Αυξάνοντας ακόμα περισσότερο το πάχος του υμένα, οι δομές αυτές χάνουν την ευστάθειά τους και εμφανίζονται τα κύματα με τις δίνες. Παρατηρούμε στο σχήμα και την περιοχή όπου έχουμε συνύπαρξη των δύο δομών.



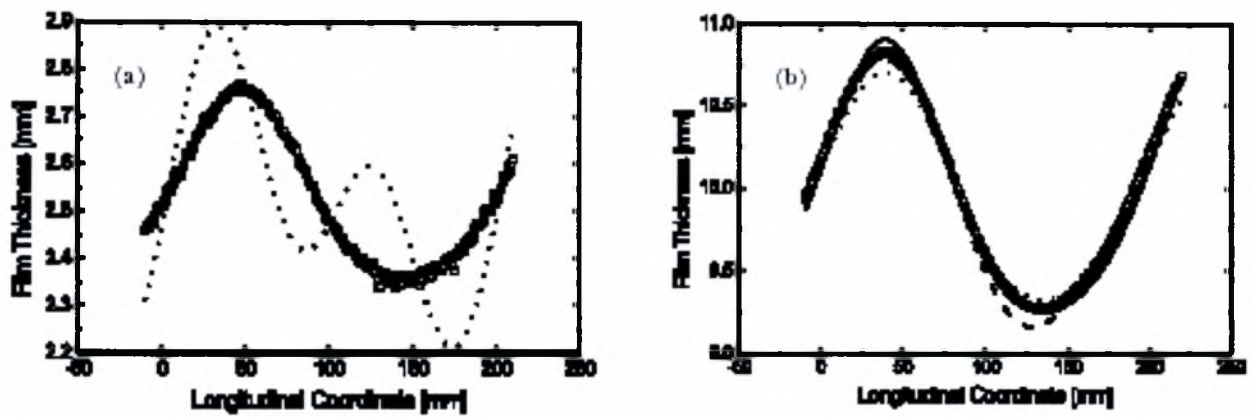
Σχήμα 2.8: Οι διαφορετικές περιοχές ροής πάνω από τοίχωμα μεγάλου πλάτους διαμόρφωσης για χαμηλούς αριθμούς Re κατά Aksel et al.



Τα αποτελέσματα των παραπάνω εργασιών αποτέλεσαν το έναυσμα για διάφορα ερωτήματα, με κυριότερο την επίδραση του πλάτους της γεωμετρικής διαμόρφωσης στα φαινόμενα που παρατηρούνται. Τονίζεται ότι τα συμπεράσματα των Vlachogiannis & Bontozoglou (2002) και Wierschem & Aksel (2004) βασίζονται σε ένα μόνον τοίχωμα. Επίσης, η μελέτη των χαρακτηριστικών των οδοντών κυμάτων αναμένεται να διευκολυνθεί με την εισαγωγή οργανωμένων διαταραχών σταθερής συχνότητας, κάτι που δεν έχει πραγματοποιηθεί ως τώρα.

Οι Wierschem, Schole, Aksel μελέτησαν την επίδραση της διαμορφωμένης επιφάνειας ενός τοιχώματος, στη ροή υγρού υμένα. Συγκεκριμένα προσέγγισαν το παραπάνω πρόβλημα θεωρώντας νευτωνικό ρευστό σε κεκλιμένο ημιτονοειδές τοίχωμα. Το πείραμα περιγράφεται από τον αριθμό Reynolds, τη γωνία κλίσης του τοιχώματος και από τέσσερις ακόμα παραμέτρους: μήκος κύματος, μήκος ημιτονοειδούς τοιχώματος, πάχος υμένα και μήκος τριχοειδών κυμάτων.

Μελετήθηκε η ροή υγρού υμένα σιλικονούχων λαδιών με δυναμικό ιξώδες από 1000 mPas έως 5000 mPas (σχήμα 2.9 a,b). Το πάχος του υμένα μετρήθηκε από τα πλάγια με χρήση CCD κάμερας εφοδιασμένη με μικροσκόπιο. Η κάμερα ήταν συνδεδεμένη με μία XYZ εγκάρσια μονάδα και σκάνανε τον πυθμένα και την ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού.



Σχήμα 2.9: Σύγκριση των μετρήσεων του πάχους του υγρού υμένα με τις θεωρητικές προσεγγίσεις. Τα διάσπαρτα τετράγωνα υποδεικνύουν τα σημεία μέτρησης. Τα αποτελέσματα του Wang φαίνονται με τις συμπαγή γραμμή και οι θεωρητικές προσεγγίσεις σαν διάσπαρτη καμπύλη. Το κοίλωμα και η κορυφή του κυματισμού, κυμαίνεται από 0 mm έως 100 mm. Μήκος κύματος 200 mm, πλάτος 4 mm και $Re: 10^{-3}$, a) 10° , b) γωνία κλίσης 30°

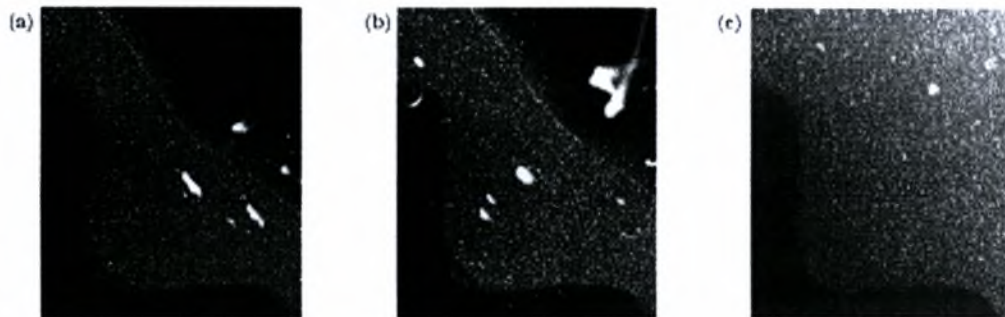
Η έρπουσα ροή σε ασθενή κυματοειδή τοιχώματα περιγράφεται πολύ καλά από τις θεωρητικές προσεγγίσεις. Οι λεπτοί υμένες περιγράφονται άριστα από τις παρατηρήσεις των Wang, Wierschem, Schole, Aksel .

Μία άλλη πτυχή της έρευνας τους έχει να κάνει με την οπτικοποίηση της ροής του υγρού υμένα. Το σχήμα 2.10 δείχνει μία σειρά από εικόνες της ροής υγρού υμένα σε ημιτονοειδή τοίχωμα με μήκος κύματος 5 mm και πλάτους 1 mm. Μιας και στην εικόνα 2.10a δεν είναι δυνατή η παρατήρηση των ζωνών ανακυκλοφορίας, μία μικρή αύξηση στο πάχος του υμένα έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία της πρώτης δίνης, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.10b. Η δίνη έχει μέγεθος 100 μm περίπου. Αύξηση του πάχους του υμένα οδηγεί σε αύξηση του μεγέθους των σχηματιζόμενων δινών (εικόνα 2.10c). Γενικά μέχρι έναν κρίσιμο αριθμό Re , δεν υπάρχουν δίνες στο τοίχωμα. Πέρα από αυτό τον αριθμό το μέγεθος των δινών είναι ισχυρή συνάρτηση του συγκεκριμένου αριθμού.

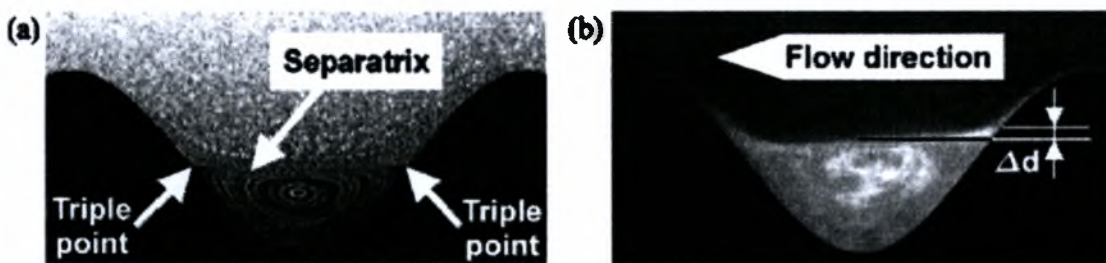
Συμπερασματικά, βρέθηκε ότι κάτω από καθεστώς στρωτής ροής, το μέγεθος των σχηματιζόμενων ζωνών ανακυκλοφορίας αυξάνεται συναρτήσει του αριθμού Froude. Η αδράνεια λόγω των επιφανειακών κυμάτων, επιφέρει παραμόρφωση και διάλυση της δίνης. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε ροή μάζας και συγκεκριμένα σε ανταλλαγή υλικού μεταξύ των δινών και του υπερκείμενου υμένα. Υπάρχουν δύο μηχανισμοί με τους οποίους γίνεται η ανταλλαγή υλικού: α) μία έλικα εισροής και εκροής στο κέντρο της δίνης και β) μία ακτινική κίνηση σωματιδίων διάφορων από την κύρια ροή του ρευστού.

Τέλος πρέπει να γίνει αναφορά στην ταχύτητα της ροής του υγρού υμένα σε ένα περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα. Κλειδί σε αυτό το σημείο είναι η κατανόηση του γεγονότος ότι το κύριο

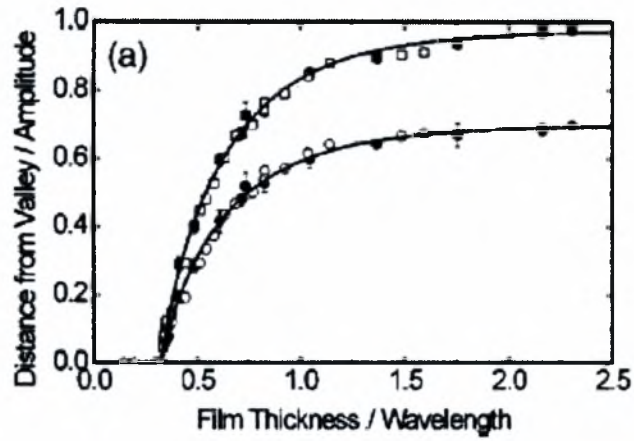
αίτιο για τη δημιουργία των στροβιλισμών είναι η γωνία κλίσης του τοιχώματος. Σε μικρούς αριθμούς Reynolds που κυμαίνονται από $3 \cdot 10^{-5}$ έως 1,2 φαινομενικά ο αριθμός Reynolds δεν διαδραματίζει κανένα ρόλο στην ανάπτυξη των ζωνών ανακυκλοφορίας. Όπως δείχνει το σχήμα 2.12, ο στροβιλισμός έχει το ίδιο μέγεθος με το μέγεθος του υμένα άσχετα από την τιμή του αριθμού Reynolds.



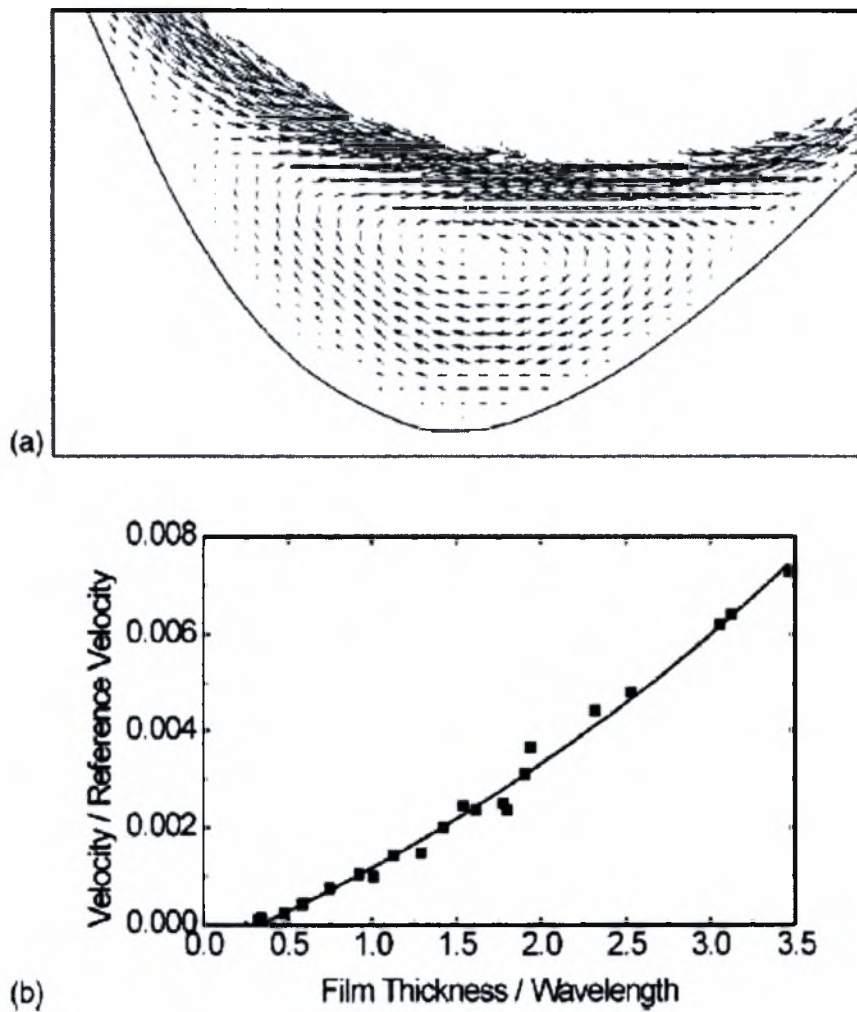
Σχήμα 2.10: Ροή υγρού υμένα όπως οπτικοποιήθηκε , με την παράταξη διακριτών εικόνων. Το κυματοειδές τοίχωμα είναι στο αριστερό κάτω μέρος, ενώ ο υμένας διακρίνεται στην περιοχή με τα πολλά στίγματα. Η ελεύθερη επιφάνεια απεικονίζεται ως η λεπτή φωτεινή γραμμή . Κάποια ίχνη πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια , οφείλονται στην αντανάκλαση του εκπεμπόμενου φωτός από την ελεύθερη επιφάνεια. Στην εικόνα 1a δεν μπορεί να παρατηρηθεί κάποια ζώνη ανακυκλοφορίας. Στην εικόνα 1b φαίνεται η γέννηση μίας μικρής δίνης. Στην 1c φαίνεται ξεκάθαρα η δίνη



Σχήμα 2.11: Ζώνες ανακυκλοφορίας στον πυθμένα του τοιχώματος. Η κύρια ροή του ρευστού είναι από τα δεξιά προς τα αριστερά. Η εικόνα (a) δείχνει τη σχηματιζόμενη δίνη στο μέγιστο μέγεθός της, παρατηρηθείσα σε μικρό αριθμό Reynolds. Η (b) δείχνει τη ζώνη ανακυκλοφορίας του υλικού B200 silicone oil σε πάχος υγρού υμένα 14,2 mm. Η ανύψωση της δίνης στο αντίθετο προς τη ροή τρισδιάστατο σημείο συμβολίζεται με Δd και φαίνεται στην εικόνα b, με γωνία κλίσης 45° και αριθμό Reynolds: 0.2 (a), 228 (b)



Σχήμα 2.12 Μέγεθος των δινών συναρτήσει του πάχους του υμένα.



Σχήμα 2.13 Πεδίο ταχυτήτων των ζωνών ανακυκλοφορίας στο αυλάκι του πυθμένα (a) μέγιστη ταχύτητα ανακυκλοφορίας συναρτήσει του πάχους του υμένα (b)

Η κύρια υπόθεση για τη μη εξάρτηση των ζωνών ανακυκλοφορίας από τον αριθμό Reynolds έγκειται στο γεγονός ότι η ταχύτητα στον πυθμένα του διαμορφωμένου τοιχώματος είναι πολύ μικρότερη από την ταχύτητα στην ελεύθερη επιφάνεια. Η ταχύτητα στην ελεύθερη επιφάνεια είναι όμοια με την ταχύτητα στο επίπεδο τοίχωμα. Η ταχύτητα ανακυκλοφορίας όπως δείχνει το σχήμα 2.13 είναι τρεις με τέσσερις τάξεις μικρότερη από αυτή στην ελεύθερη επιφάνεια.

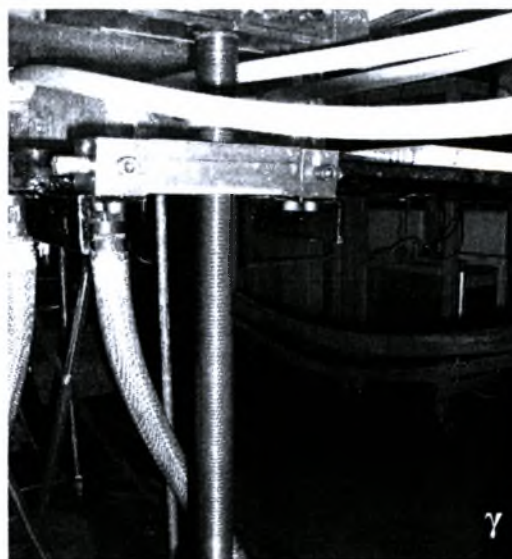
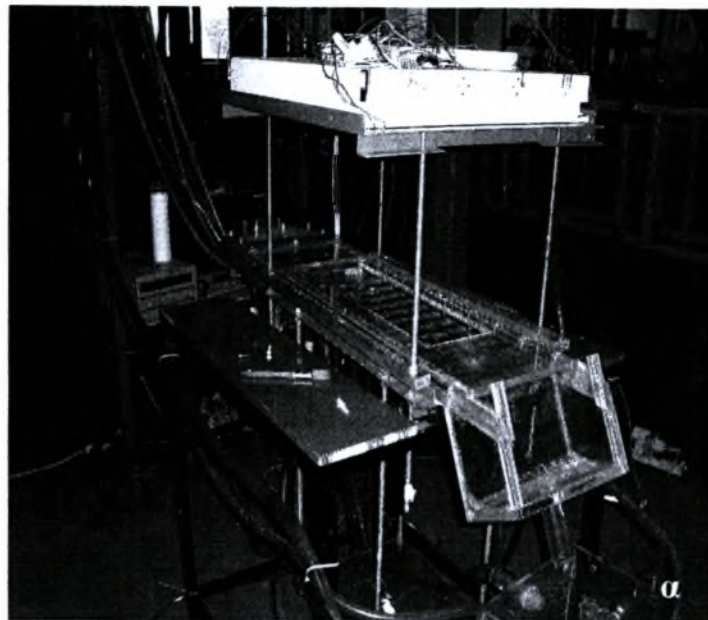
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Πειραματική Διαδικασία

3.1 Η πειραματική διάταξη

Για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας, χρησιμοποιήθηκε πειραματική διάταξη, η οποία είχε κατασκευασθεί από τον κ. Βλαχογιάννη Μιχαήλ το έτος 2001 στα πλαίσια της διδακτορικής του διατριβής (εικ. 3.1 α). Η διάταξη αυτή είναι κατασκευασμένη από Plexiglas. Το πλάτος του καναλιού είναι 25 cm και το μήκος του 128 cm. Στηρίζεται πάνω σε σιδερένια βάση η οποία δίνει τη δυνατότητα ευθυγράμμισης του καναλιού. Σε ύψος 226 cm από το έδαφος, βρίσκεται η δεξαμενή που είναι συνδεδεμένη με την παροχή νερού. Στη δεξαμενή βρίσκονται δύο σωληνώσεις που οδηγούν στην αποχέτευση για την αποφυγή φαινομένων υπερχειλίσσης. Στην έξοδο της δεξαμενής είναι τοποθετημένη βαλβίδα για τη ρύθμιση της ροής του ρευστού(εικ. 3.1 β) όπου η λειτουργία της θα γίνει άμεσα κατανοητή παρακάτω. Με λάστιχο μικρής διαμέτρου $\Phi 8$ το ρευστό κατευθύνεται προς το δοχείο συλλογής. Στο τέλος του καναλιού υπάρχει μία ακόμα δεξαμενή όπου συγκεντρώνεται το εκάστοτε ρευστό λειτουργίας καθώς διαπεράσει το κανάλι. Η δεξαμενή αυτή οδηγεί στην αποχέτευση αλλά παρέχει και τη δυνατότητα ανακυκλοφορίας του ρευστού με τη βοήθεια εμβαπτιζόμενης αντλίας.

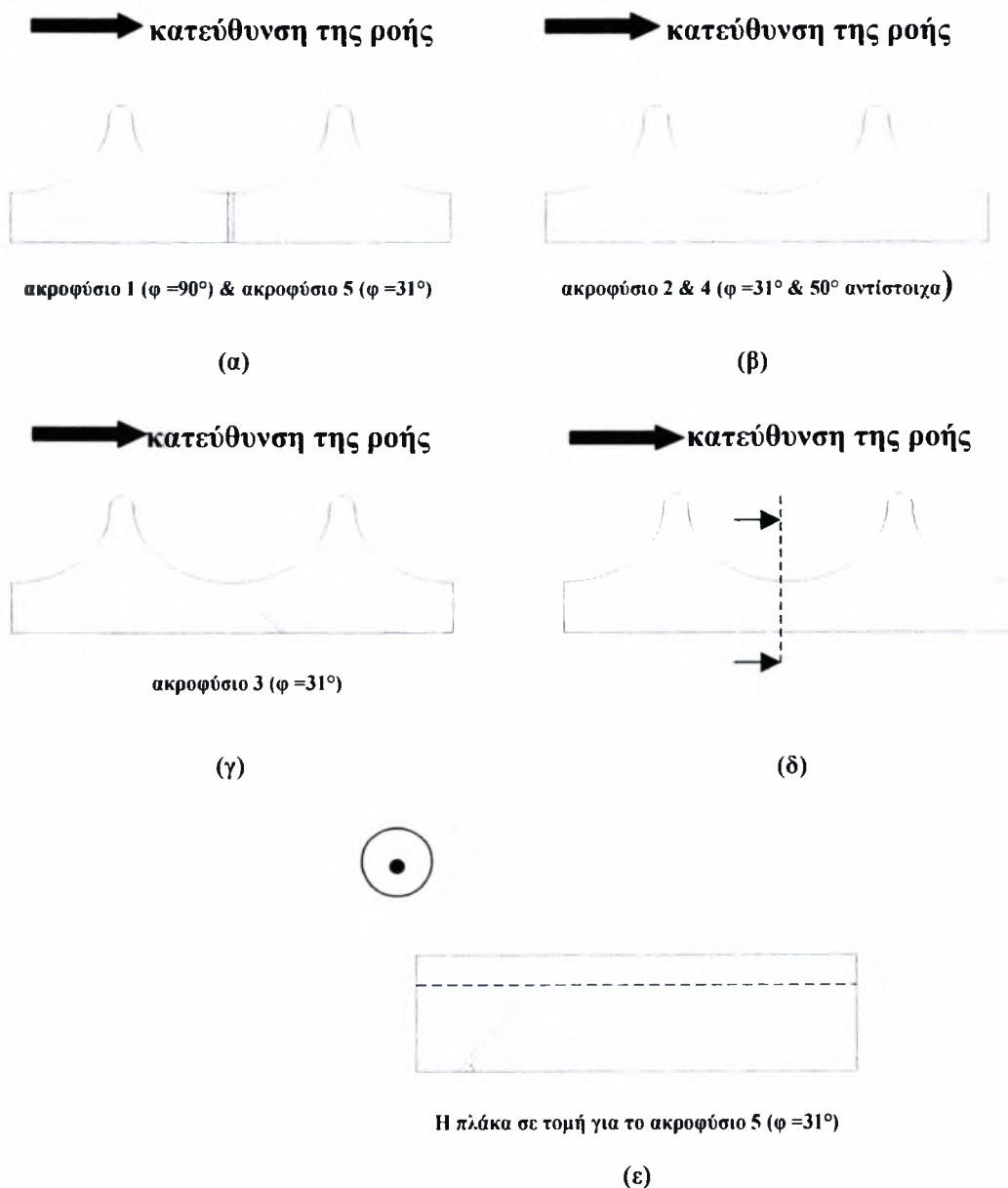
Το κανάλι είναι κατασκευασμένο με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι δυνατή η αλλαγή πλακών που καθορίζουν το είδος του τοιχώματος. Οι διαστάσεις της εν λόγω πλάκας είναι 25 cm πλάτος και 50 cm μήκος. Επιπλέον με τη βοήθεια ενός ατέρμονα κοχλία είναι δυνατή η δημιουργία ως και 67° γωνίας κλίσης ως προς το οριζόντιο επίπεδο(εικ. 3.1 γ). Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν το εύρος της γωνίας κλίσης κυμαίνεται από 3.4° έως 15° . Τέλος, για την καλύτερη απεικόνιση της ροής, ακριβώς πάνω από το τοίχωμα προσαρμόζεται ηλεκτρικό σύστημα λαμπών υπεριώδους ακτινοβολίας, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στη μέθοδο απεικόνισης με φθορισμό.



Εικόνα 3.1: (α) το κανάλι της ροής , (β) η δεξαμενή συγκέντρωσης του ρευστού μαζί με τη βαλβίδα ρύθμισης (γ) ο ατέρμονας κοχλίας

3.2 Το ημιτονοειδές τοίχωμα

Η πρώτη ενέργεια στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής ήταν ο καθαρισμός όλων των επιφανειών του καναλιού. Καθαρίστηκαν τα σταθερά τοιχώματα και η πρώτη επιλεχθείσα πλάκα. Η πλάκα αυτή διαθέτει περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα το οποίο έχει ημιτονοειδή μορφή με πλάτος $L=50\text{mm}$ και βάθος $H=10\text{mm}$. Στη συγκεκριμένη πλάκα υπήρχαν ήδη τρεις οπές. Για τις ανάγκες του πειράματος έγινε διάνοιξη και άλλων δύο οπών σε πλάγια κατά τη φορά θέσης της ροής. Η διάμετρος των συγκεκριμένων οπών ήταν 2mm οι οποίες και αριθμήθηκαν με τους αριθμούς 1(κάθετη), 2(κατά τη φορά της ροής), 3(αντίθετα της φοράς της ροής), 4(κατά τη φορά της ροής), 5(πλάγια). Στο σχήμα 3.1 φαίνεται το ημιτονοειδές περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα καθώς και οι οπές που το διαπερνούν. Στην εικόνα 3.2 φαίνεται το τοίχωμα με τα ακροφύσια.



Σχήμα 3.1: Γεωμετρία συστημάτων έγχυσης διαλύματος χρωστικής ουσίας από τον πυθμένα του τοιχώματος: **α.** ακροφύσιο 1 ($\varphi = 90^\circ$) & ακροφύσιο 5 ($\varphi = 31^\circ$) **β.** ακροφύσιο 2 & 4 ($\varphi = 31^\circ$ & 50° αντίστοιχα) **γ.** ακροφύσιο 3 ($\varphi = 31^\circ$) **δ, ε.** τομή για το ακροφύσιο 5



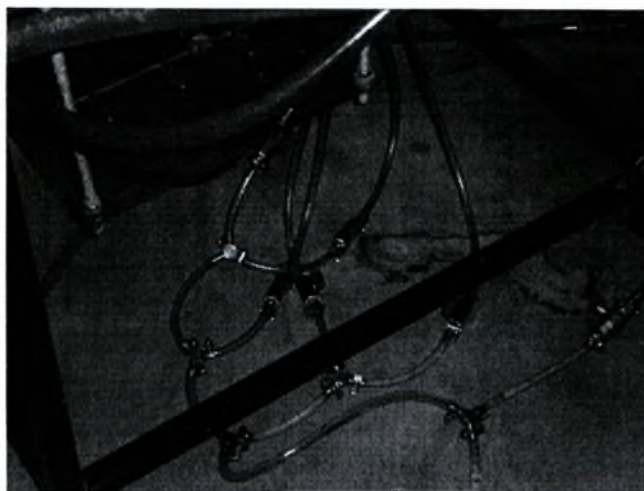
Εικόνα 3.2: το τοίχωμα με τα ακροφύσια

3.3 Το σύστημα έγχυσης

Καθώς ολοκληρώθηκε η διάνοιξη των οπών, σειρά είχε η μελέτη και κατασκευή του συστήματος έγχυσης. Η διαδικασία πορεύτηκε ως εξής: αρχικά από υπάρχουσες τετραγωνικές ράβδους plexiglas κόπηκαν με τον τροχό πέντε τεμάχια σε σχήμα κύβου. Σε αυτά τα τεμάχια ανοίχτηκαν διαμπερείς τρύπες διαμέτρου $\Phi 8$, οι οποίες και συμπληρώθηκαν από τη δημιουργία σπειρώματος. Οι σπειροτόμοι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν διαμέτρου $\Phi 8$. Το σπείρωμα έγινε με σκοπό το βίδωμα μικρών ακροφυσίων πάνω στους κύβους. Μεταξύ του σπειρώματος και των ακροφυσίων παρεμβλήθηκε υλικό τεφλόν για την αποφυγή τυχόν διαρροών. Το επόμενο βήμα , ήταν η κόλληση των κύβων με τα προσαρμοσμένα ακροφύσια στο κάτω μέρος της πλάκας. Εδώ έγινε χρήση υγρού Plexiglas δίνοντας βάση στο κεντράρισμα των ακροφυσίων με τις τρύπες στην πλάκα.

Το επόμενο βήμα στόχευε στη σύνδεση των πέντε ακροφυσίων με τη δοσομετρική αντλία. Λάστιχο ίδιας διαμέτρου με τα ακροφύσια, ξεκινούσε από αυτά και κατέληγε σε βάνες 1/2". Μετά από τις βάνες, παρεμβλήθηκε και άλλο κομμάτι λάστιχο, που κατέληγε σε διαχωριστές δύο διαδρομών. Το τελευταίο κομμάτι της κατασκευής περιλάμβανε την τοποθέτηση μιας on- off βάνας που θα λειτουργούσε ως by- pass και θα οδηγούσε στην αποχέτευση. Τοποθετήθηκε μία ακόμα on- off βάνα ασφαλείας και το τελευταίο κομμάτι από λάστιχο οδηγήθηκε στην έξοδο της δοσομετρικής αντλίας. Το by- pass και η βάνα ασφαλείας, στόχευαν στον καθαρισμό του συστήματος έγχυσης με αντίστροφη ροή του χρησιμοποιούμενου ρευστού(εικ. 3.3).

Η δοσομετρική αντλία βαθμονομήθηκε και με τα δύο διαλύματα έγχυσης για να διαπιστωθεί η μαζική παροχή του ρευστού στη χρονική διάρκεια του ενός λεπτού.



Εικόνα 3.3: το σύστημα έγχυσης με τις βάνες

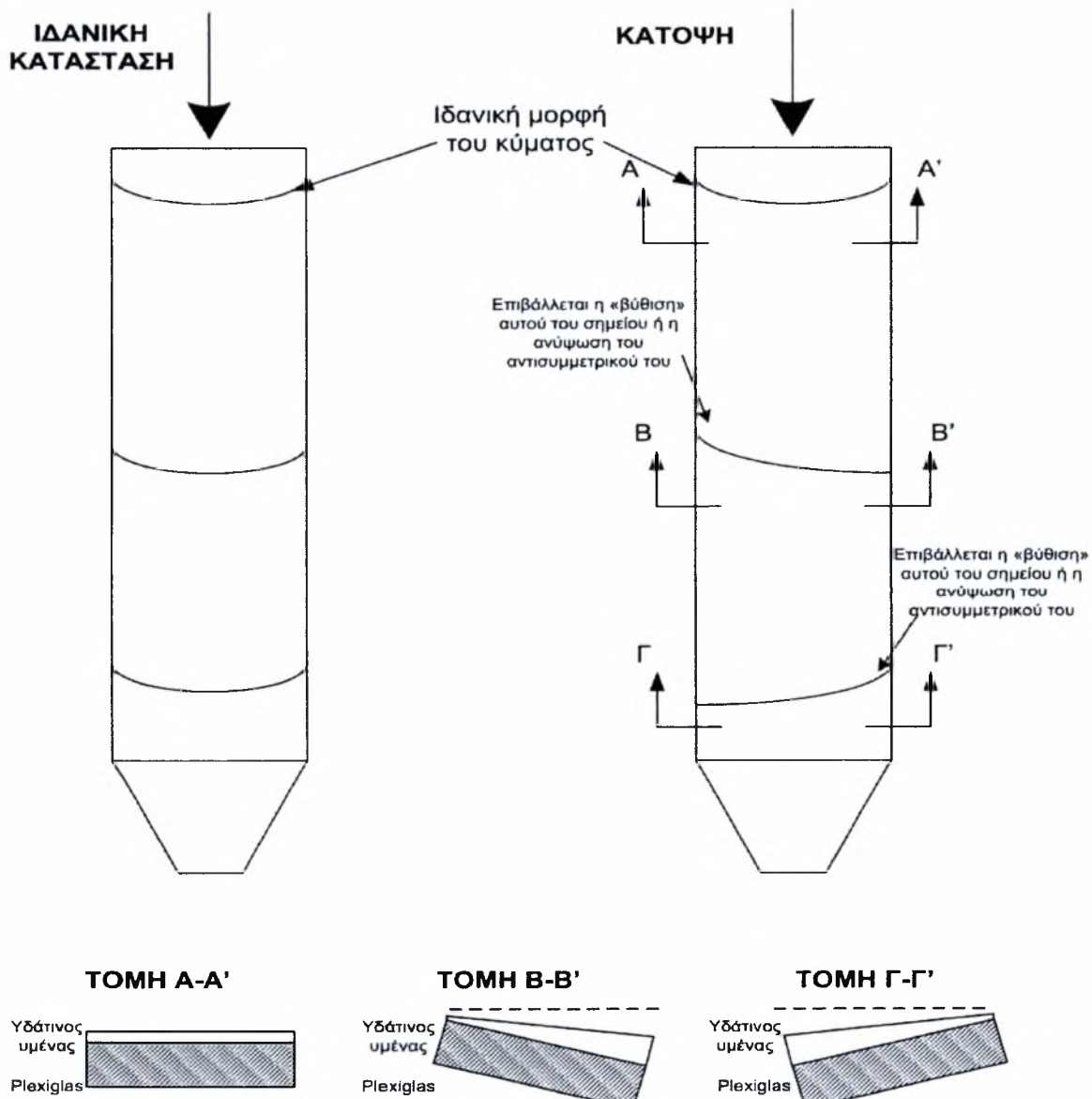
3.4 Μέθοδος απεικόνισης με φθορισμό

Για την εκτέλεση του πειράματος, έγινε χρήση δύο διαλυμάτων έγχυσης. Το πρώτο ήταν διάλυμα νερού- χρωστικής και το δεύτερο νερού- γλυκερίνης- χρωστικής. Η χρωστική ουσία που επιλέχθηκε ήταν η ουρανίνη (Sodium Salt of Fluorescein-). Η αναλογία των διαλυμένων ουσιών στα παραπάνω διαλύματα ήταν: 1000ppm χρωστική και στα δύο διαλύματα και 25%κ.β. γλυκερίνη στο δεύτερο (250gr γλυκερίνη σε 750 gr νερό). Η ανάδευση των διαλυμάτων έγινε στο σύστημα ανάδευσης χρησιμοποιώντας κυλινδρικούς μαγνήτες. Στη συνέχεια ακολούθησε βαθμονόμηση της δοσομετρικής αντλίας και με τα δύο διαλύματα, στο χαμηλότερο και υψηλότερο αριθμό στροφών με ίδια αποτελέσματα (10 gr/min και 95 gr/min και για τα δύο διαλύματα). Για την απεικόνιση της ροής υγρού υμένα χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος απεικόνισης με φθορισμό. Η προσθήκη της προαναφερθείσας χρωστικής ουσίας στο διάλυμα έχει ως αποτέλεσμα τον φθορισμό του διαλύματος κάτω από την επίδραση υπεριώδους φωτός. Η συγκεκριμένη χρωστική εκπέμπει πράσινο-κίτρινο φως σε κεντρικό μήκος κύματος 525-580nm όταν απορροφά το υπεριώδες φως. Οι ιδιότητες του ρευστού δεν επηρεάζονται με τη διάλυση της χρωστικής ουσίας. Η συλλογή των βίντεο και των εικόνων έγινε με βιντεοκάμερα. Η συγκεκριμένη κάμερα έδινε τη δυνατότητα οπτικής εστίασης 20x γεγονός που εξυπηρέτησε σε μεγάλο βαθμό τα πειράματα. Τα βίντεο και οι φωτογραφίες αποθηκεύονταν σε βιντεοκασέτες Hi8 των 8 mm. Καθώς έγιναν οι απαραίτητες ρυθμίσεις στο κυρίως μενού, η βιντεοκάμερα σταθεροποιήθηκε σε τρίποδο. Με αυτό τον τρόπο κατέστη δυνατή η προσαρμογή της κάμερας στην επιθυμητή θέση ύψους και κλίσης.

3.5 Ευθυγράμμιση της διάταξης με σύστημα εξωτερικής διαταραχής

Η καθαυτού πειραματική διαδικασία, προϋπόθετε αρχικά της ευθυγράμμιση του καναλιού ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Αυτό επιτεύχθηκε με τη χρήση της εξωτερικά επιβαλλόμενης

διαταραχής. Η επίτευξη εξωτερικά επιβαλλόμενων διαταραχών είναι εφικτή με τη προσθήκη μιας χρονιζόμενης ηλεκτροβαλβίδας (ON/OFF), η οποία τοποθετείται στο κάτω μέρος του δοχείου κατανομής, σε μία παράκαμψη εξόδου προς το δοχείο συλλογής. Το ρευστό με το άνοιγμα της ηλεκτροβαλβίδας οδηγείται από την παράκαμψη εξόδου στο δοχείο συλλογής. Έτσι, επιτυγχάνεται η εξωτερικά επιβαλλόμενη αυξομείωση του πάχους του υμένα με το χρόνο. Έχει προβλεφθεί από τον σχεδιασμό η δυνατότητα «τοπικής» ρύθμισης της σχετικής θέσης του καναλιού από το κριώμα. Δεδομένου ότι το κανάλι ‘ακουμπάει’ στις τέσσερις ντίζες που είναι βιδωμένες στο σιδερένια βάση, γυρνώντας με την κατάλληλη φορά την κατάλληλη ντίζα πετυχαίνουμε την τοπική ρύθμιση. Από την άλλη πλευρά η τοπική διόρθωση σε ένα σημείο του καναλιού επηρεάζει και τα γειτονικά του με συνέπεια η διαδικασία να απαιτεί πληθώρα επαναληπτικών διορθώσεων και δοκιμών. Έτσι κατά την διαδικασία της ευθυγράμμισης πρέπει να ρυθμίζουμε τις ντίζες με την σειρά που έχουνε κατάντη της ροής, κάνοντας μικρές κινήσεις σε κάθε επανάληψη. Τέλος πρέπει να βεβαιωθούμε ότι το κανάλι ακουμπάει σε όλες της ντίζες ώστε να αποφύγουμε το κίνδυνο να δημιουργηθούν στρεβλώσεις και μόνιμες παραμορφώσεις στο Plexiglas.



Σχήμα 3.2: Διαδικασία οριζοντίωσης του καναλιού.

Με το ένα άκρο του αλφαδολάστιχου στερεωμένο στο κάτω μέρος του καναλιού και το άλλο στην αρχή της διάταξης, δεμένο πάνω σε βαθμονομημένο γνώμονα κατέστη δυνατή η μέτρηση της κλίσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3. Από τη σχέση:

$$\epsilon\phi = \frac{(x-9.5)}{128}$$

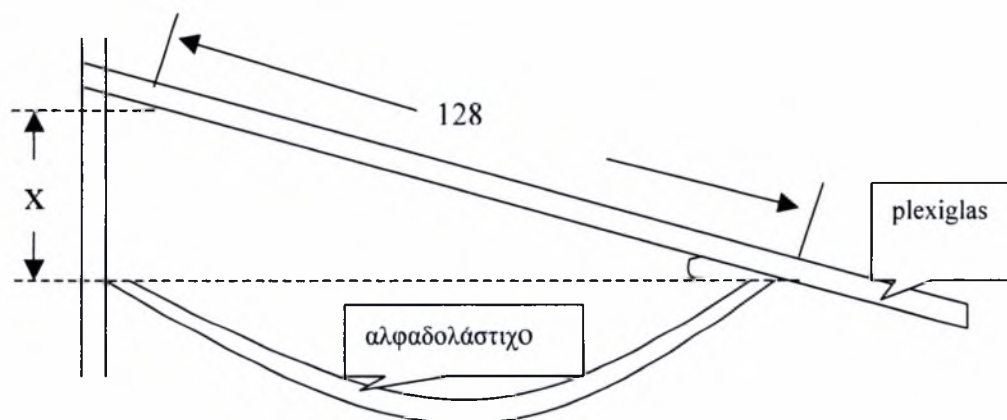
της κλίσης.

όπου x : μέτρηση στο χάρακα βασισμένη στη στάθμη του αλφαδολάστιχου

9.5: set-off (σημείο έναρξης)

128: μήκος καναλιού

Στο συγκεκριμένο πείραμα οι γωνίες κλίσεις στις οποίες σταθεροποιήθηκε το κανάλι ήταν: 3.4° , 7.5° , 11° , 15°



Σχήμα 3.3: Γεωμετρία συστήματος ευθυγράμμισης με χρήση αλφαδολάστιχου

3.7 Έναρξη του πειράματος

Με την έναρξη του πειράματος, ο εγκλωβισμός του αέρα δημιουργούσε ατέλειες στη ροή (φουσαλίδες κ.α.) με αποτέλεσμα να απαιτείται η πάροδος κάποιου χρονικού διαστήματος (περίπου

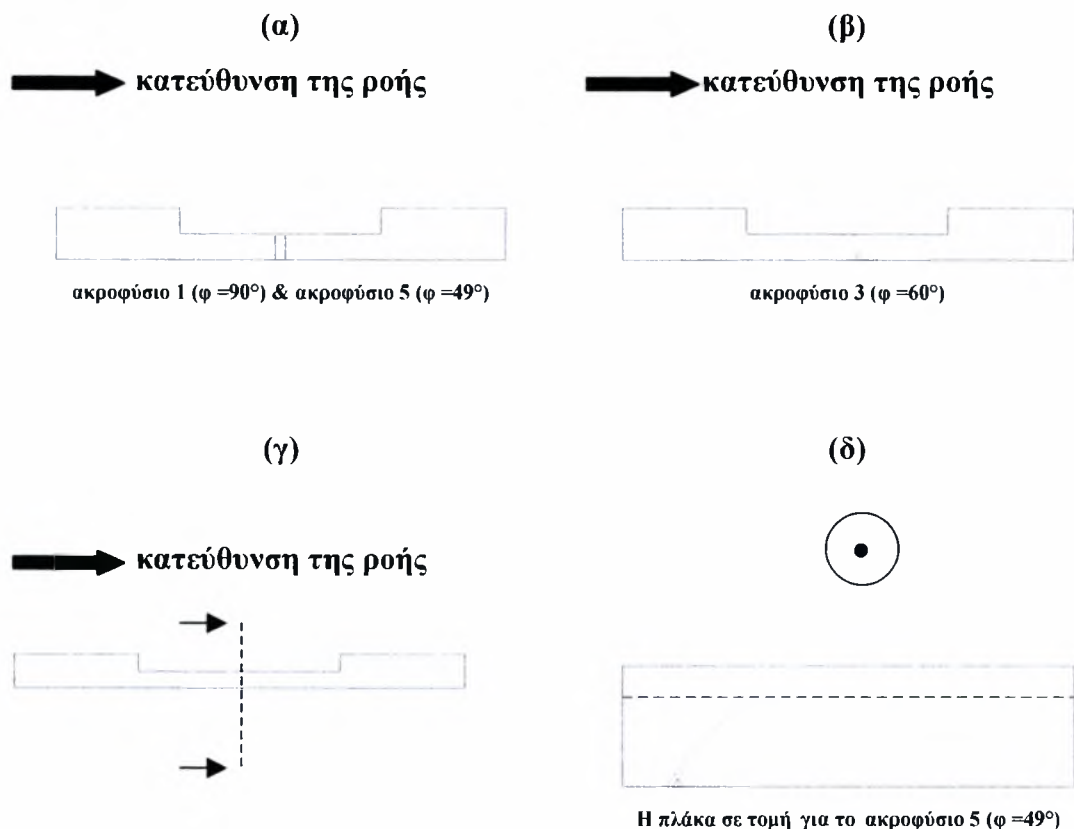
20-30 λεπτά) για την σταθεροποίηση της ροής. Για να προσπεραστεί το πρόβλημα διάσπασης του υμένα λόγω κακής διαβροχής της επιφάνειας του τοιχώματος, ιδιαίτερα σε χαμηλές παροχές με μικρούς αριθμούς Re, επικαλύφθηκε το τοίχωμα με το κολλοειδές ρευστό Sodium Silicate. Η ουσία αυτή δεν επηρεάζει τις φυσικές ιδιότητες του διαλύματος ούτε τη διαφανή επιφάνεια μέτρησης του καναλιού.

Με τη ρυθμιστική βάνα που βρίσκεται στην έξοδο της δεξαμενής υπερχειλίσης γινόταν η ρύθμιση του αριθμού Re. Καθώς επιλεγόταν ο επιθυμητός αριθμός Re, με χρήση υπολογιστικού αρχείου excel, υπολογιζόταν η παροχή του ρευστού στη χρονική διάρκεια του ενός λεπτού. Με ένα χρονόμετρο και ένα μικρό δοχείο μετρούνταν η πραγματική παροχή του ρευστού. Αν η ένδειξη της ζυγαριάς έδειχνε αριθμό μεγαλύτερο από το αποτέλεσμα του υπολογισμού του excel, στραγγαλίζαμε τη βάνα, μειώνοντας την παροχή. Σε αντίθετη περίπτωση, αυξάναμε την παροχή. Οι αριθμοί Re που επιλέχθηκαν ήταν: 30, 43.3, 60, 100, 150, 200 με αντίστοιχες παροχές 0.45 kg/s, 0.65 kg/s, 0.90 kg/s, 1.5 kg/s, 2.3 kg/s, 3 kg/s και οι γωνίες κλίσεις 3.4°, 7.5° και 15°. Το διάλυμα που αποτελούνταν από νερό- χρωστική, χρησιμοποιήθηκε για έγχυση και στα πέντε ακροφύσια. Το διάλυμα νερού- γλυκερίνης- χρωστικής χρησιμοποιήθηκε στα ακροφύσια 1, 3, 5. Όταν η τιμή του αριθμού Re ήταν η επιθυμητή, άρχιζε η καταγραφή του βίντεο. Μετά από την πάροδο μερικών δευτερολέπτων θέταμε σε λειτουργία τη δοσομετρική αντλία. Η καταγραφή λάμβανε χώρα σε όλο το μήκος του καναλιού και επικεντρωνόταν στη θέση του ακροφυσίου και το κάτω μέρος του καναλιού. Όταν το φαινόμενο είχε πλέον αναπτυχθεί, η δοσομετρική αντλία θέτονταν εκτός λειτουργίας. Η καταγραφή του βίντεο συνεχιζόταν μέχρις ότου το ρευστό λειτουργίας να συμπαρασύρει και την τελευταία ποσότητα της προς έγχυσης ουσίας.

3.8 Τετραγωνικό τοίχωμα

Με την ολοκλήρωση των μετρήσεων σε όλες τις ζητούμενες συνθήκες έγινε αλλαγή του τοιχώματος. Χρησιμοποιήθηκε και πάλι περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα τετραγωνικού σχήματος αυτή τη φορά με πλάτος $L=12\text{mm}$ και βάθος $H=0.4\text{mm}$. Μιας και το σύστημα έγχυσης ήταν έτοιμο, η μόνη ενέργεια που έπρεπε να γίνει ήταν η διάνοιξη οπών πάνω στην πλάκα σε διάφορες γωνίες και σημεία.. Αποφασίστηκε να ανοιχθούν τρεις οπές: η μία κάθετα στη ροή, η επόμενη με φορά αντίθετη από αυτή της ροής και η τελευταία σε πλάγια θέση, με διάμετρο $\Phi 3.5\text{ mm}$. Κατασκευάστηκαν ξανά κύβοι με σπείρωμα και τοποθετήθηκαν ακροφύσια. Κολλήθηκαν στο κάτω μέρος της πλάκας με υγρό plexiglas και αριθμήθηκαν με τους αριθμούς 1, 3 και 5 σε

αντιστοιχία με το προηγούμενο τοίχωμα. Στο σχήμα 3.2 φαίνεται το τοίχωμα και οι οπές που το διαπερνούν.



Σχήμα 3.4: Γεωμετρία συστημάτων έγχυσης διαλύματος χρωστικής ουσίας από το πυθμένα του τοιχώματος : α. ακροφύσιο 1 ($\varphi = 90^\circ$) β. ακροφύσιο 3 ($\varphi = 60^\circ$) γ, δ τομή για το ακροφύσιο 5

Η διαδικασία λήψης βίντεο ήταν ακριβώς ίδια με αυτή που περιγράφηκε παραπάνω. Οι αριθμοί Re που ζητήθηκαν ήταν: 30, 60, 90, 100, 150, 300 με παροχές 0.45 kg/s, 0.90 kg/s, 1.4 kg/s, 1.5 kg/s, 2.3 kg/s, 4.53 kg/s αντίστοιχα.. Οι γωνίες κλίσης ήταν 3.4° και 11° .

3.9 Χρήση του H/Y

Συνολικά για όλες τις ζητούμενες συνθήκες, κατεγράφη βίντεο διάρκειας πέντε ωρών περίπου και χρησιμοποιήθηκαν 5 κασέτες. Από το σημείο αυτό και μετά έγινε χρήση του ηλεκτρονικού υπολογιστή. Για να είναι δυνατή η επεξεργασία των βίντεο και των εικόνων έπρεπε πρώτα τα αναλογικά αρχεία της κάμερας να μετατραπούν σε ψηφιακά. Καθώς η κάμερα συνδέθηκε με τον υπολογιστή μέσω DV OUT ΕΞΟΔΟΥ, το « Pinnacle Studio, version 9» χρησιμοποιήθηκε για την μεταφορά των βίντεο από την κάμερα. Το συγκεκριμένο software επέτρεπε τη δυνατότητα μετατροπής των αναλογικών βίντεο σε ψηφιακά των εξής μορφών: AVI και MPEG. Επιλέχθηκε ο

τύπος MPEG με τα χαρακτηριστικά: video VHS 352x288, 2400 kbits/sec. Η επιλογή του τύπου, βασίστηκε στη σχέση μεταξύ ποιότητας- μεγέθους. Μία κασέτα για να μετατραπεί σε αρχείο AVI χρειαζόταν ελεύθερο αποθηκευτικό χώρο 1650 MB ενώ η μετατροπή σε MPEG αρχείο, περίπου 800 MB.

Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα αναπαραγωγής βίντεο «WIN dvd» και έγινε η «αιχμαλώτιση» (capturing) των φωτογραφιών. Στις προαναφερθείσες συνθήκες , τραβήχτηκαν φωτογραφίες που παρουσιάζουν την ανάπτυξη του φαινομένου της έγχυσης στο χρόνο και στο χώρο. Ο αριθμός των εικόνων ανέρχεται στις τέσσερις : 1^η στην αρχή του φαινομένου, 2^η και 3^η στο στάδιο της ανάπτυξης και η 4^η στην πλήρη ανάπτυξη.

Η τελευταία ενέργεια, περιλάμβανε πολύ κοντινές απεικονίσεις της ροής στις ζητούμενες συνθήκες. Όταν το φαινόμενο ήταν σε πλήρη πλέον ανάπτυξη τραβήχτηκαν τέσσερις φωτογραφίες με διαφορά ενός second η επόμενη από την προηγούμενη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Πειραματικά Αποτελέσματα

Η απεικόνιση της ροής υγρού υμένα έγινε με χρήση βιντεοκάμερας. Τόσο στο ημιτονοειδές όσο και το τετράγωνο τοίχωμα εφαρμόστηκαν διάφορες συνθήκες κάτω από τις οποίες πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα. Στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται όλες οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν τα διεξαχθέντα πειράματα.

α/α	Είδος τοιχώματος			Re	φ	Διάλυμα έγχυσης		
	τύπος	L(mm)	H(mm)			%κ.β GL	ακρο-φύσιο	παροχή
1	ημίτονο	50	10	30	3,4	0	1	min
2	ημίτονο	50	10	30	3,4	0	2	min
3	ημίτονο	50	10	30	3,4	0	3	min
4	ημίτονο	50	10	30	3,4	0	4	min
5	ημίτονο	50	10	30	3,4	0	5	min
6	ημίτονο	50	10	43,3	3,4	0	1	min
7	ημίτονο	50	10	43,3	3,4	0	2	min
8	ημίτονο	50	10	43,3	3,4	0	3	min
9	ημίτονο	50	10	43,3	3,4	0	4	min
10	ημίτονο	50	10	43,3	3,4	0	5	min
11	ημίτονο	50	10	60	3,4	0	1	min
12	ημίτονο	50	10	60	3,4	0	2	min
13	ημίτονο	50	10	60	3,4	0	3	min
14	ημίτονο	50	10	60	3,4	0	4	min
15	ημίτονο	50	10	60	3,4	0	5	min
16	ημίτονο	50	10	100	3,4	0	1	min
17	ημίτονο	50	10	100	3,4	0	1	max
18	ημίτονο	50	10	100	3,4	0	2	min
19	ημίτονο	50	10	100	3,4	0	3	min
20	ημίτονο	50	10	100	3,4	0	4	min
21	ημίτονο	50	10	100	3,4	0	5	min
22	ημίτονο	50	10	150	3,4	0	1	min
23	ημίτονο	50	10	150	3,4	0	2	min
24	ημίτονο	50	10	150	3,4	0	3	min
25	ημίτονο	50	10	150	3,4	0	4	min
26	ημίτονο	50	10	150	3,4	0	5	min
27	ημίτονο	50	10	150	3,4	0	5	max
28	ημίτονο	50	10	200	3,4	0	1	min
29	ημίτονο	50	10	200	3,4	0	2	min
30	ημίτονο	50	10	200	3,4	0	2	max
40	ημίτονο	50	10	200	3,4	0	3	min
41	ημίτονο	50	10	200	3,4	0	4	min
42	ημίτονο	50	10	200	3,4	0	5	min
43	ημίτονο	50	10	30	7,5	25	1	min
44	ημίτονο	50	10	30	7,5	25	1	max
45	ημίτονο	50	10	30	7,5	25	3	min

46	ημίτονο	50	10	30	7,5	25	5	min
47	ημίτονο	50	10	60	3,4	25	1	min
48	ημίτονο	50	10	60	3,4	25	3	min
49	ημίτονο	50	10	100	3,4	25	1	min
50	ημίτονο	50	10	100	3,4	25	3	min
51	ημίτονο	50	10	100	3,4	25	5	min
52	ημίτονο	50	10	200	3,4	25	1	min
53	ημίτονο	50	10	200	3,4	25	3	min
54	ημίτονο	50	10	200	3,4	25	5	min
55	ημίτονο	50	10	30	15	25	1	min
56	ημίτονο	50	10	30	15	25	1	max
57	ημίτονο	50	10	30	15	25	2	max
58	ημίτονο	50	10	30	15	25	3	min
59	ημίτονο	50	10	30	15	25	3	max
60	τετράγωνο	16	0,4	30	3,4	25	1	min
61	τετράγωνο	16	0,4	30	3,4	25	3	min
62	τετράγωνο	16	0,4	30	3,4	25	5	min
63	τετράγωνο	16	0,4	60	3,4	25	1	min
64	τετράγωνο	16	0,4	60	3,4	25	3	min
65	τετράγωνο	16	0,4	60	3,4	25	5	min
66	τετράγωνο	16	0,4	90	3,4	25	1	min
67	τετράγωνο	16	0,4	90	3,4	25	3	min
68	τετράγωνο	16	0,4	90	3,4	25	5	min
69	τετράγωνο	16	0,4	150	3,4	25	1	min
70	τετράγωνο	16	0,4	150	3,4	25	3	min
71	τετράγωνο	16	0,4	150	3,4	25	5	min
72	τετράγωνο	16	0,4	300	3,4	25	1	min
73	τετράγωνο	16	0,4	300	3,4	25	3	min
74	τετράγωνο	16	0,4	300	3,4	25	5	min
75	τετράγωνο	16	0,4	90	11	25	1	min
76	τετράγωνο	16	0,4	90	11	25	3	min
77	τετράγωνο	16	0,4	90	11	25	5	min
78	τετράγωνο	16	0,4	60	11	25	1	min
79	τετράγωνο	16	0,4	60	11	25	3	min
80	τετράγωνο	16	0,4	60	11	25	5	min

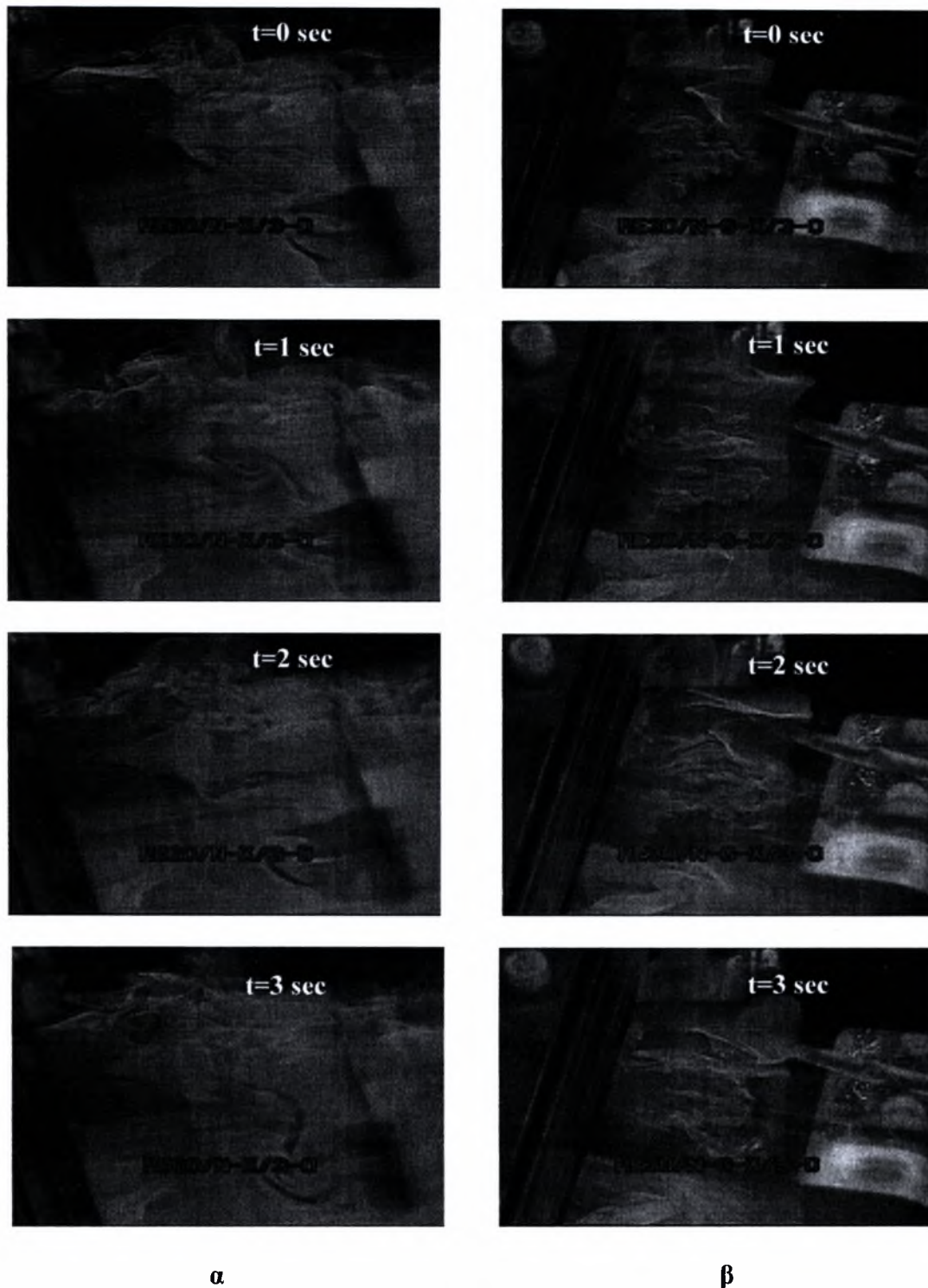
Πίνακας 4.1: Οι παράμετροι του πειράματος

4.1 Πειραματικά αποτελέσματα για το ημιτονοειδές τοίχωμα

4.1.1 Επίδραση ρευστού έγχυσης

Το χρησιμοποιούμενο προς έγχυση ρευστό, είναι εκείνο που θα καθορίσει τις ζώνες ανακυκλοφορίας. Από την οπτικοποίηση της ροής για τις συνθήκες $Re=60$, έγχυση από το ακροφύσιο 3, ελάχιστη παροχή αντλίας και κλίση $3,4^\circ$, σχήμα 4.1 παρατηρούμε ότι η διάχυση του διαλύματος νερού- χρωστικής είναι μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή του διαλύματος νερού-

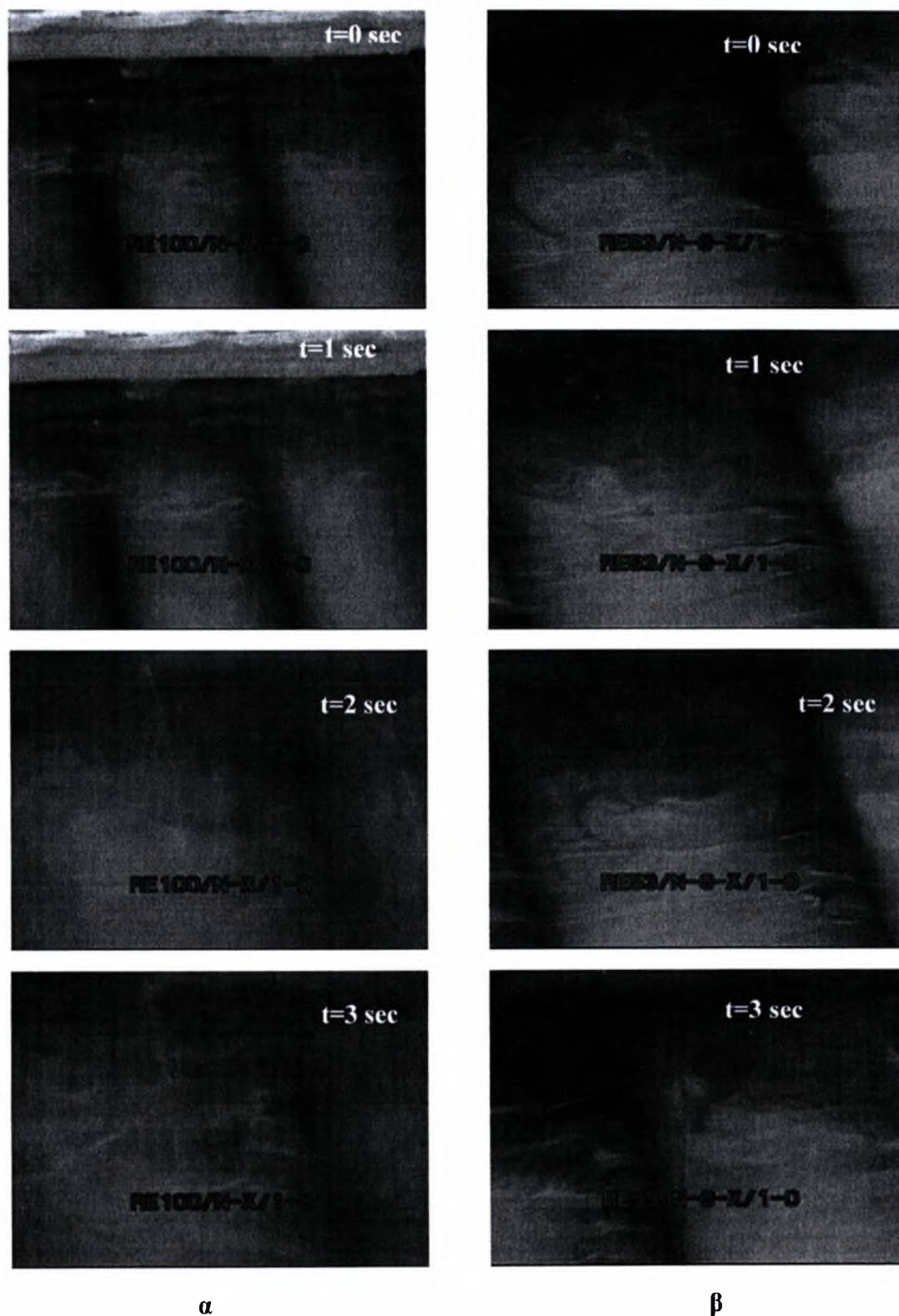
γλυκερίνης- χρωστικής. Το διάλυμα νερού- χρωστικής, επιτρέπει τον συμπαρασυρμό του από το ρευστό λειτουργίας με αποτέλεσμα το άλμα από τη μία κοιλότητα στην επόμενη να γίνεται εύκολα.



Σχήμα 4.1: Οπτικοποίηση της ροής για $Re=60$, με έγχυση από το ακροφύσιο 3, ελάχιστη παροχή αντλίας και κλίση $3,4^\circ$ α) ρευστό έγχυσης νερό- χρωστική β) ρευστό έγχυσης νερό- γλυκερίνη- χρωστική

Σε αντίθεση, το διάλυμα νερού- γλυκερίνης- χρωστικής εξαιτίας το βάρους και του μεγάλου του ιξώδους, καθιστά αυτό το άλμα δύσκολο. Παρόλα αυτά είναι έντονες οι ζώνες ανακυκλοφορίας με τη διαφορά ότι το διάλυμα νερού- χρωστικής, επιτρέπει και την εγκάρσια διάχυση της

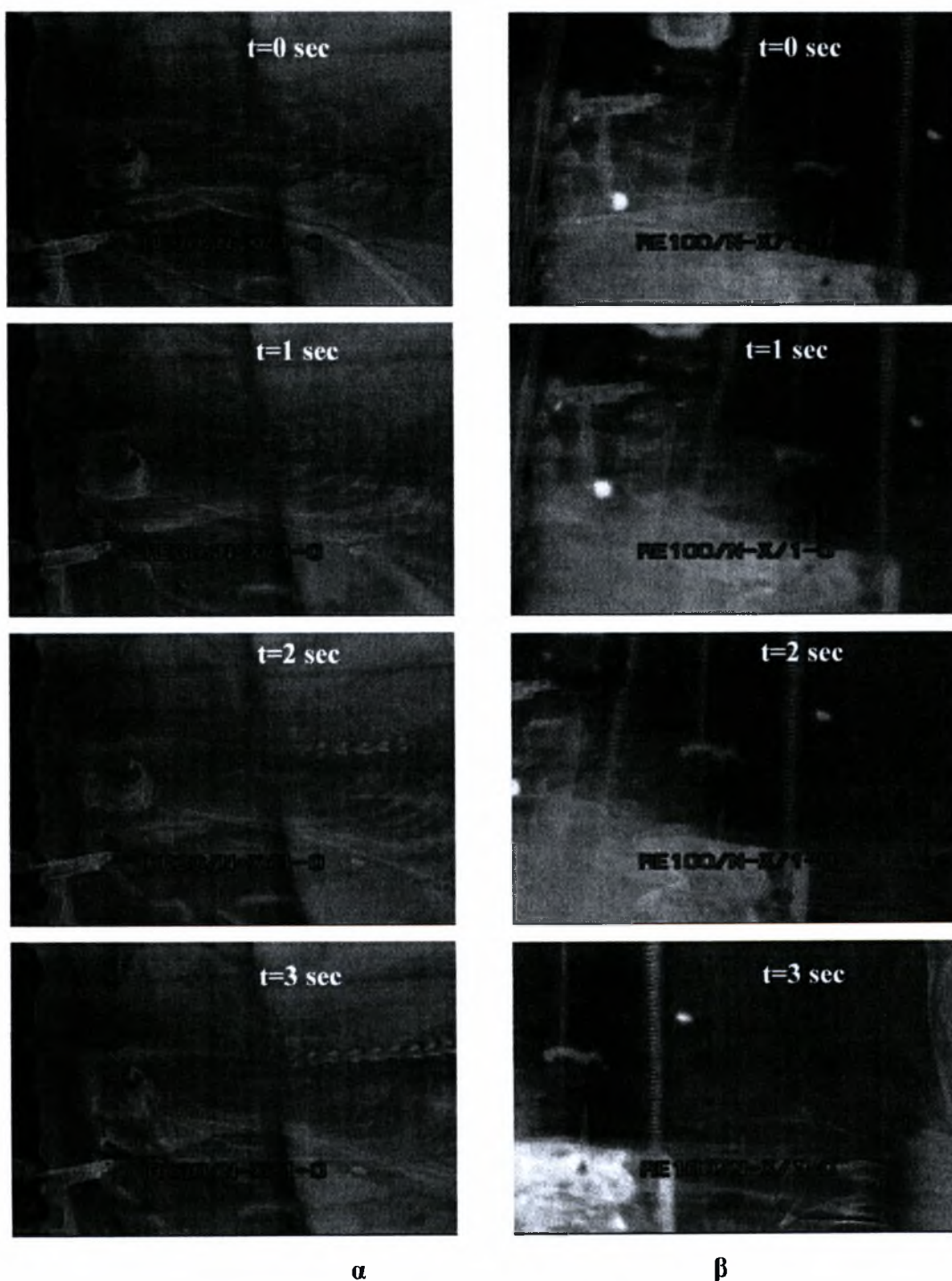
εγγυνομένης ουσίας. Για μεγαλύτερους αριθμούς Reynolds (σχήμα 4.2), όπως $Re=100$ είναι και πάλι έντονο το φαινόμενο των στροβιλισμών. Επειδή αυξήθηκε ο αριθμός Reynolds μεγάλωσε η ταχύτητα του ρευστού με αποτέλεσμα να αυξηθεί ο συμπαρασυρμός.



Σχήμα 4.2: Οπτικοποίηση της ροής για $Re=100$, με έγχυση από το ακροφύσιο 1, ελάχιστη παροχή αντλίας και κλίση $3,4^\circ$ α) ρευστό έγχυσης νερό- χρωστική β) ρευστό έγχυσης νερό- γλυκερίνη- χρωστική

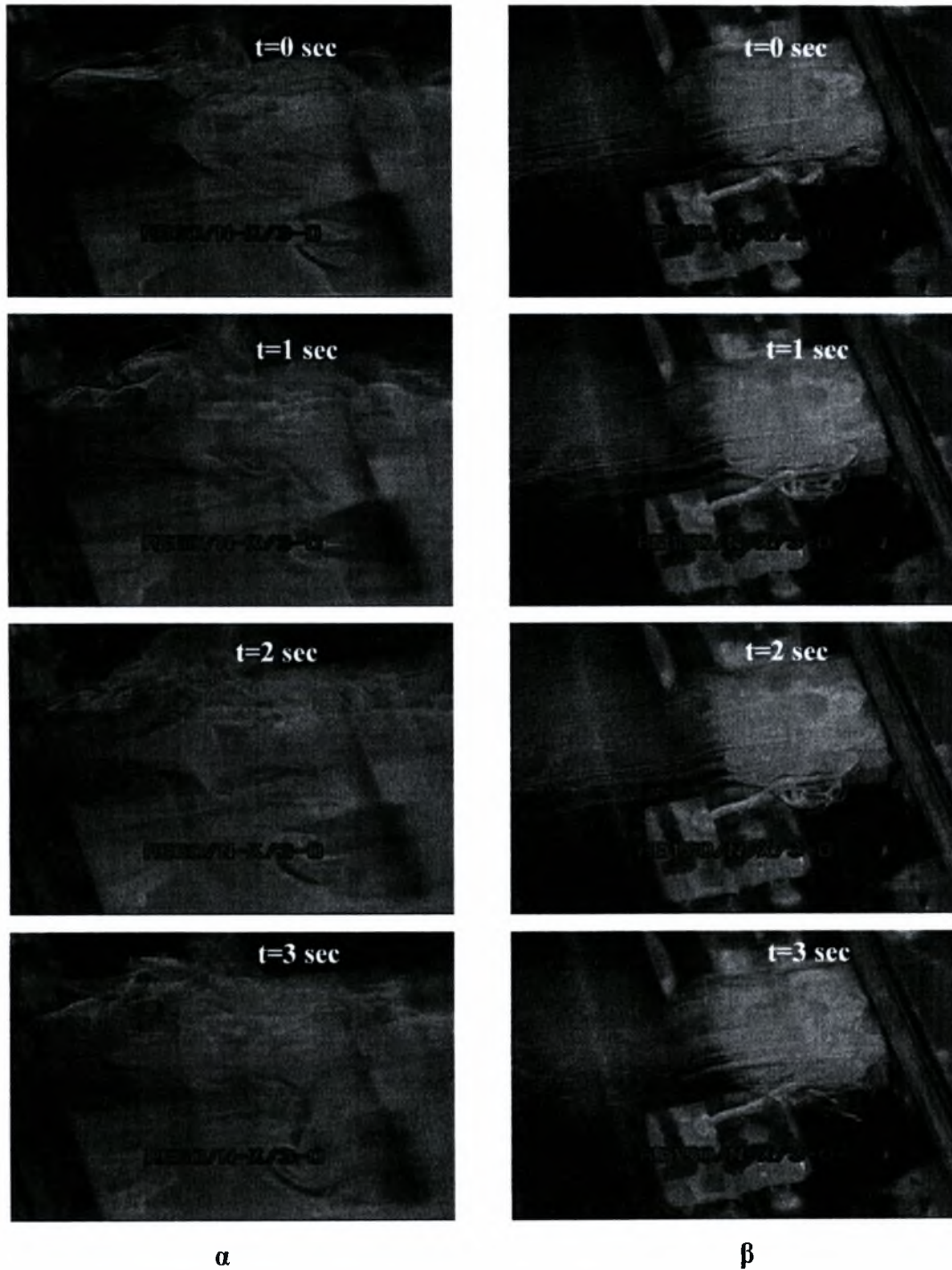
4.1.2 Επίδραση αριθμού Reynolds

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία το πάχος του υμένα είναι αυτό που θα ορίσει το σχηματισμό των δινών. Το πάχος του υμένα που είναι συνάρτηση του Reynolds είναι εκείνο που αν ξεπεράσει κάποια συγκεκριμένη τιμή $h_{critical}$ θα επιτρέψει το σχηματισμό στροβιλισμών. Όπως φαίνεται στα σχήματα 4.3, 4.4, 4.5 για ρευστό έγχυσης νερό- χρωστική, με έγχυση από το ακροφύσιο 1, ελάχιστη παροχή αντλίας και κλίση $3,4^\circ$ και μικρούς αριθμούς, Reynolds (έως 60) δεν είναι έντονο το φαινόμενο.

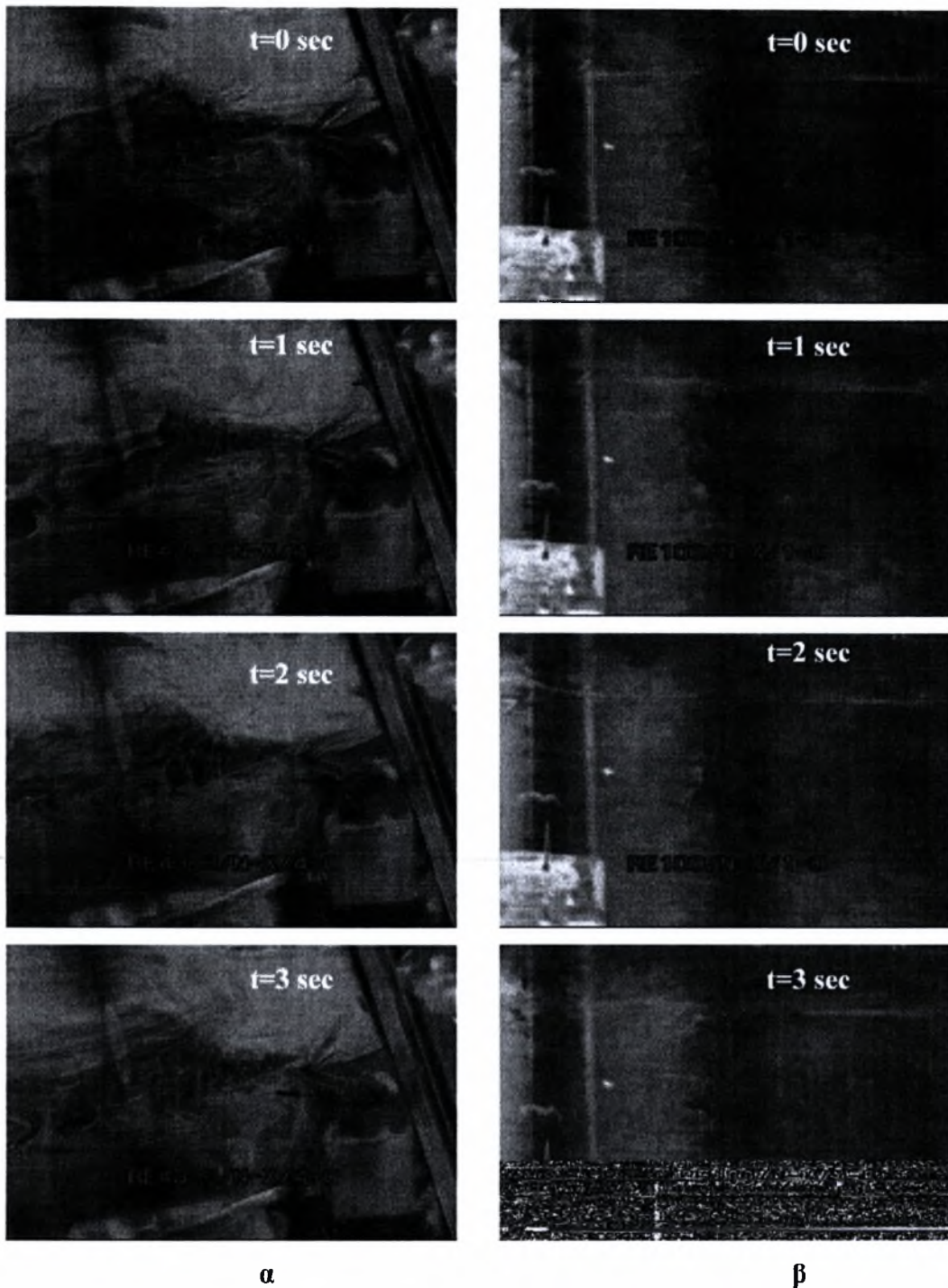


Σχήμα 4.3: Οπτικοποίηση της ροής για ρευστό έγχυσης νερό- χρωστική, με έγχυση από το ακροφύσιο 1, ελάχιστη παροχή αντλίας και κλίση $3,4^\circ$ α) Re 30 β) Re 100

. Αντίθετα, σε πιο μεγάλους Reynolds διακρίνονται ξεκάθαρα οι στροβιλισμοί. Η διαφορά αυτή έγκειται στο γεγονός ότι στην ελεύθερη επιφάνεια του τοιχώματος το ρευστό έχει την ταχύτητα των ροϊκών γραμμών, ενώ στον πυθμένα της διαμορφούμενης επιφάνειας η ταχύτητα είναι τρεις με τέσσερις τάξεις μικρότερη. Στους μικρούς αριθμούς Reynolds η ταχύτητα στον πυθμένα είναι περίπου ίση με αυτή στην ελεύθερη επιφάνεια. Επειδή δεν υπάρχει διαφορά στις ταχύτητες δεν έχουμε και δημιουργία ζωνών ανακυκλοφορίας.



Σχήμα 4.4: Οπτικοποίηση της ροής για ρευστό έγχυσης νερό- χρωστική, με έγχυση από το ακροφύσιο 1, ελάχιστη παροχή αντλίας και κλίση 3,4° α) Re 60 β) Re 150

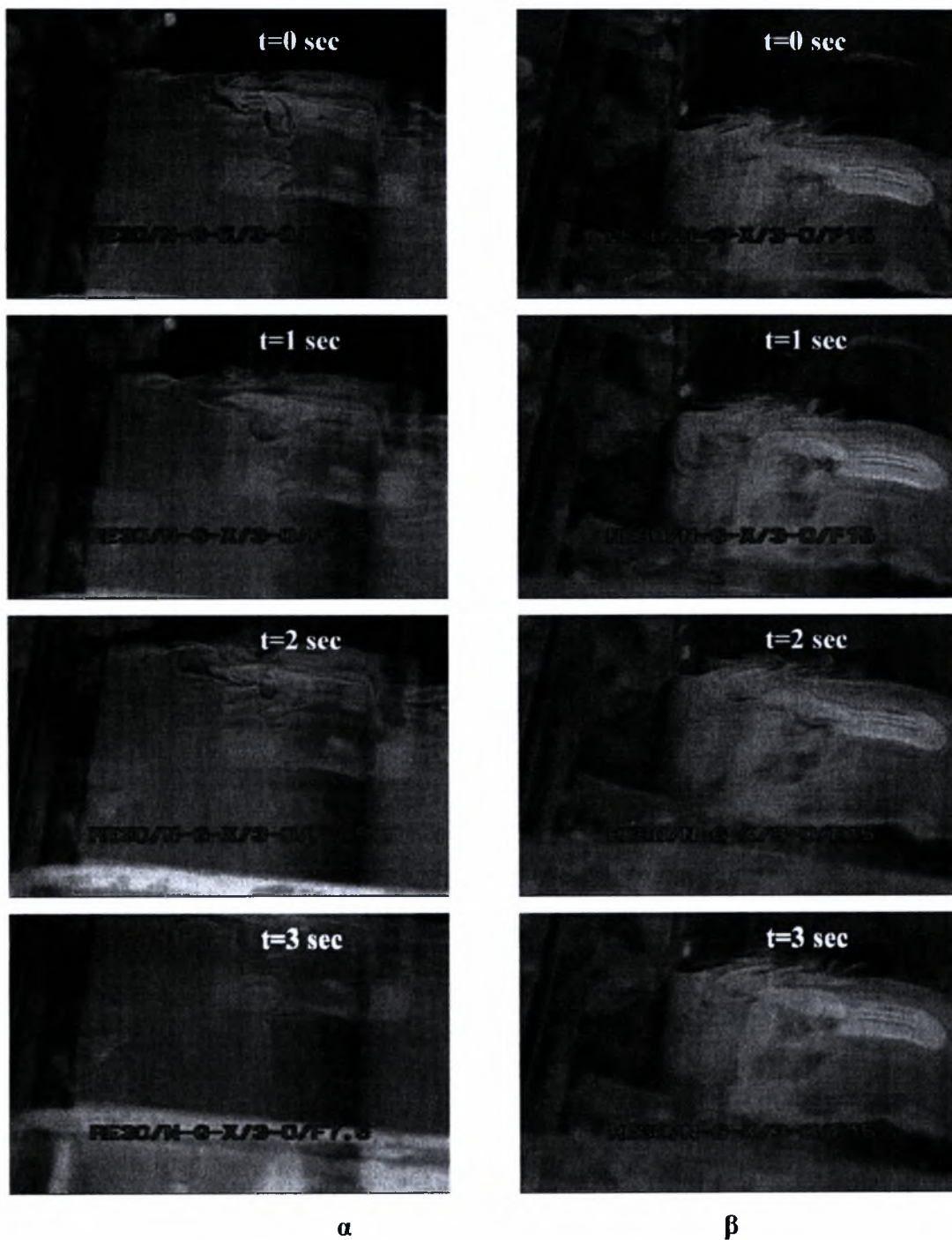


Σχήμα 4.5: Οπτικοποίηση της ροής για ρευστό έγχυσης νερό- χρωστική, με έγχυση από το ακροφύσιο 1, ελάχιστη παροχή αντλίας και κλίση $3,4^\circ$ α) $Re = 43,3$ β) $Re = 100$

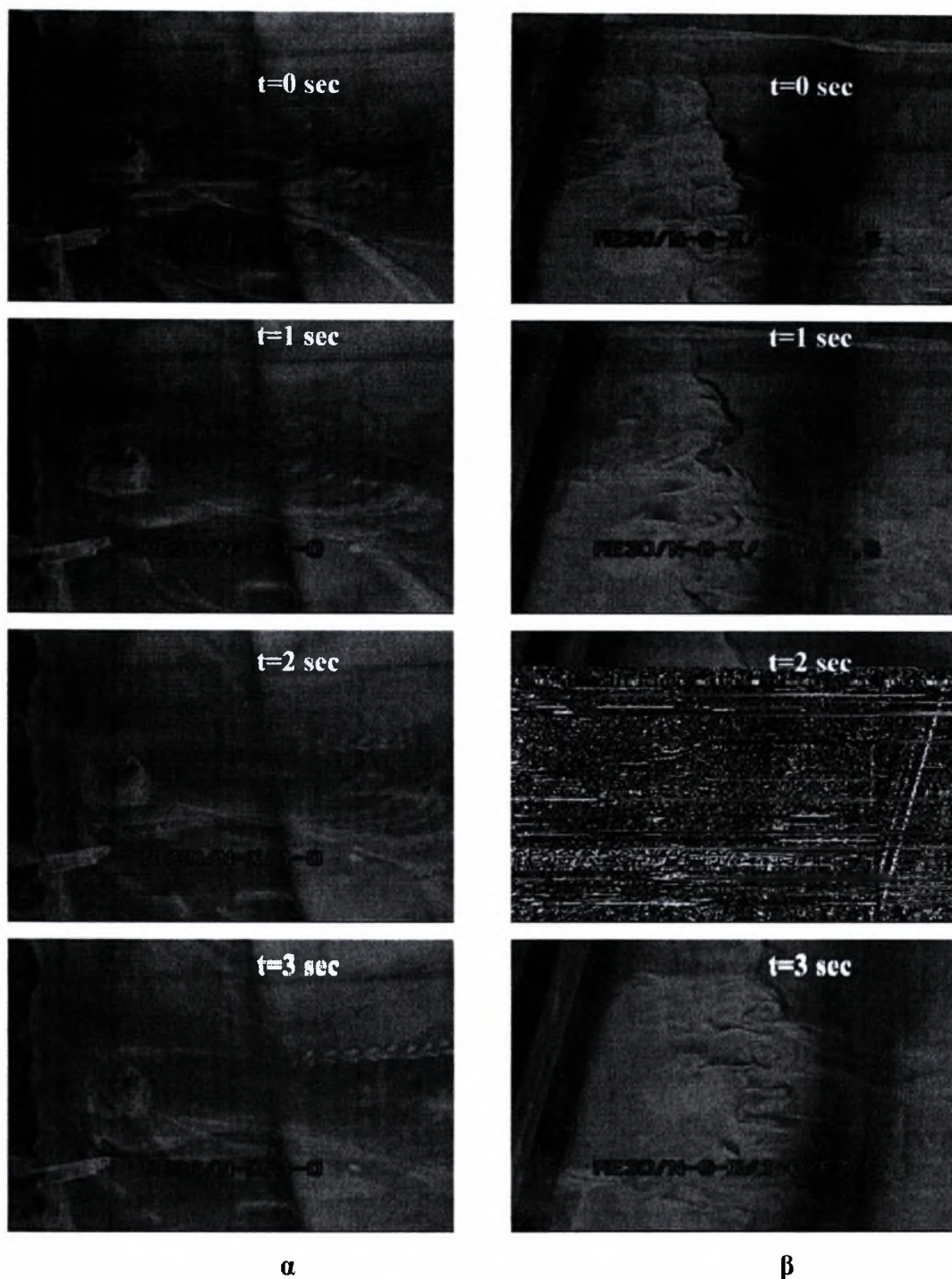
4.1.3 Επίδραση της κλίσης φ

Γενικά σε μεγάλα πάχη υμένα δηλαδή μεγάλους αριθμούς Reynolds, η επίδραση της κλίσης φ μπορεί να θεωρηθεί πολύ μικρή, έως αμελητέα. Όμως σε μικρούς αριθμούς Reynolds, η γωνία κλίσης του τοιχώματος έχει ισχυρή επίδραση. Για $Re=30$, ρευστό έγχυσης νερό-γλυκερίνη-χρωστική, με έγχυση από το ακροφύσιο 3 και ελάχιστη παροχή αντλίας στα σχήματα 4.6 και 4.7

φαίνεται ότι η αύξηση της κλίσης συνεπάγεται τη δημιουργία δινών σε μεγαλύτερο βαθμό. Παρατηρούμε επίσης, ότι μέχρι τις 7.5° για τις δεδομένες συνθήκες υπάρχει και εγκάρσια διάχυση. Στις 15° αυτό το φαινόμενο τείνει προς εξασθένηση. Η δύναμη της βαρύτητας από τις 7.5° και πάνω φαίνεται να είναι καταλυτική.



Σχήμα 4.6: Οπτικοποίηση της ροής για $Re=30$, ρευστό έγχυσης νερό-γλυκερίνη- χρωστική, με έγχυση από το ακροφύσιο 3 και ελάχιστη παροχή αντλίας α) $\varphi= 7,5^\circ$ β) $\varphi= 15^\circ$

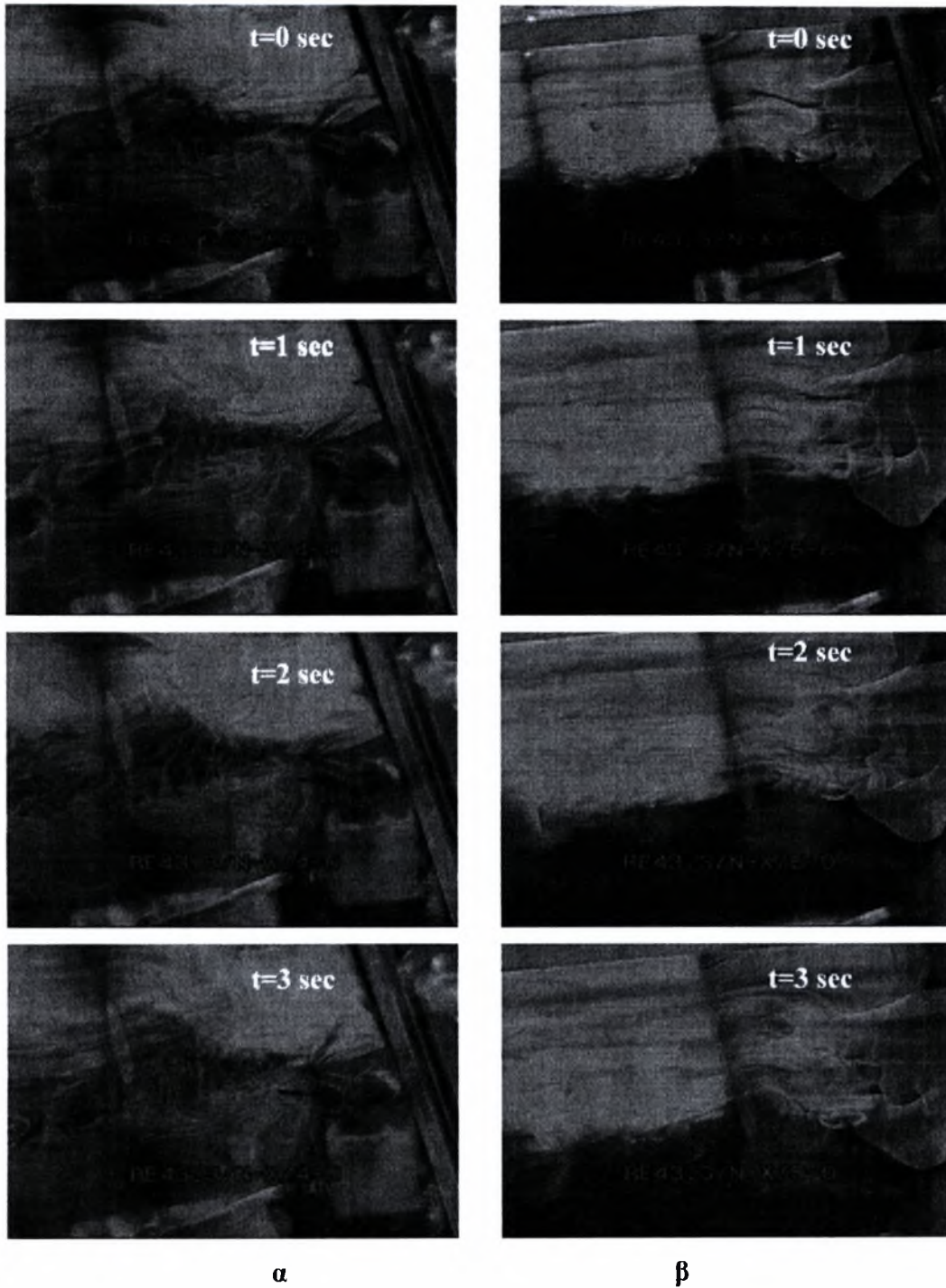


Σχήμα 4.7: Οπτικοποίηση της ροής για $Re=30$, ρευστό έγχυσης νερό - χρωστική, με έγχυση από το ακροφύσιο 1 και ελάχιστη παροχή αντλίας α) $\varphi= 3,4^\circ$ β) $\varphi= 7,5^\circ$

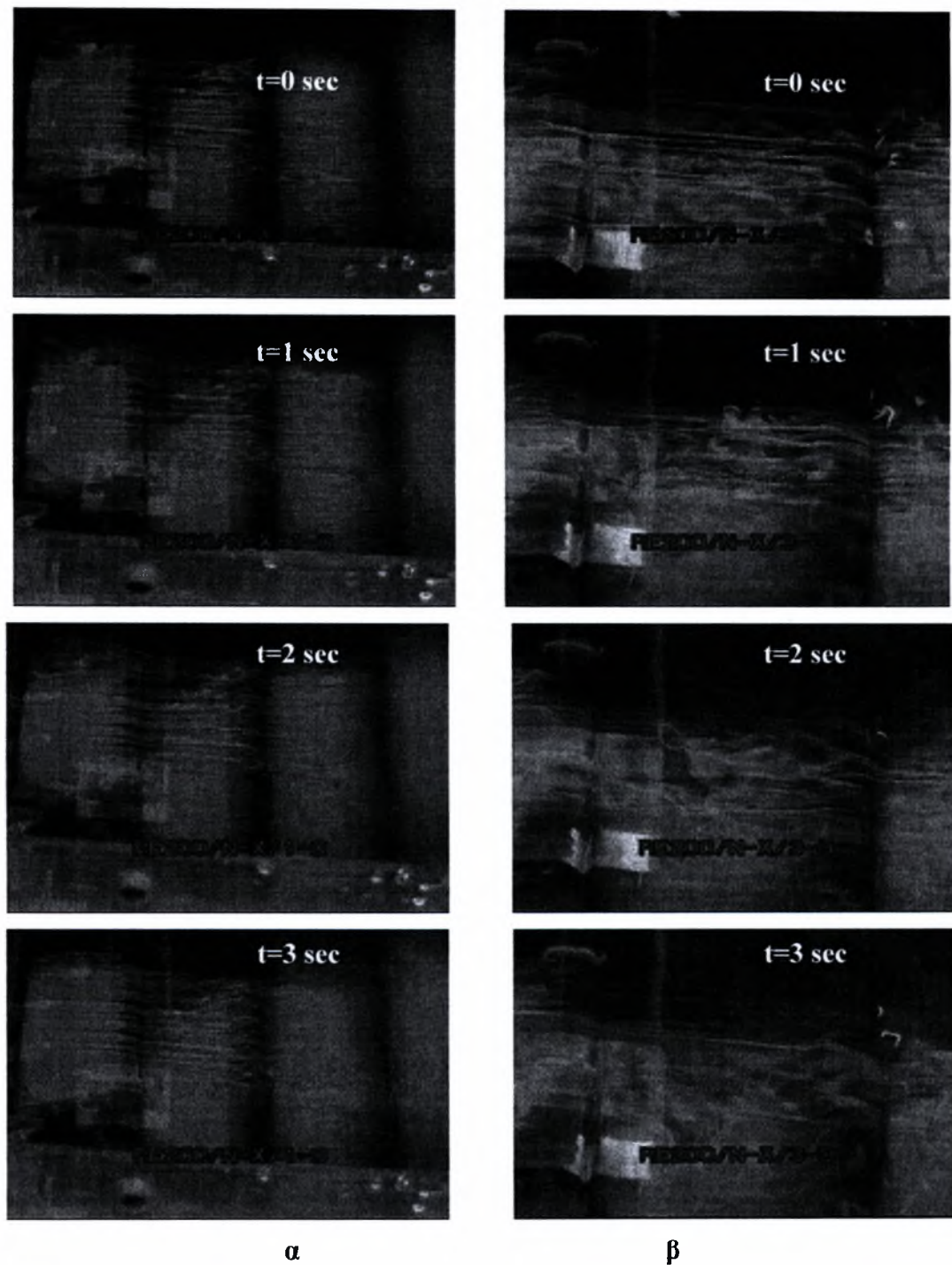
4.1.4 Επίδραση του ακροφυσίου έγχυσης

Το ακροφύσιο από το οποίο γίνεται η έγχυση είναι ένας παράγοντας που λειτουργεί καταλυτικά στην εξέλιξη του φαινομένου. Αν και δεν υπάρχει θεωρία για το συγκεκριμένο θέμα στα σχήματα 4.8, 4.9 και 4.10 βλέπουμε ότι τα ακροφύσια που είναι κάθετα και πλάγια στη ροή επιτρέπουν μία ομαλή διάχυση της ουσίας. Η κατεύθυνση της ροής μέσα από αυτά τα ακροφύσια επιτρέπει τον εύκολο συμπαρασυσμό. Και σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται δινών σε μικρή

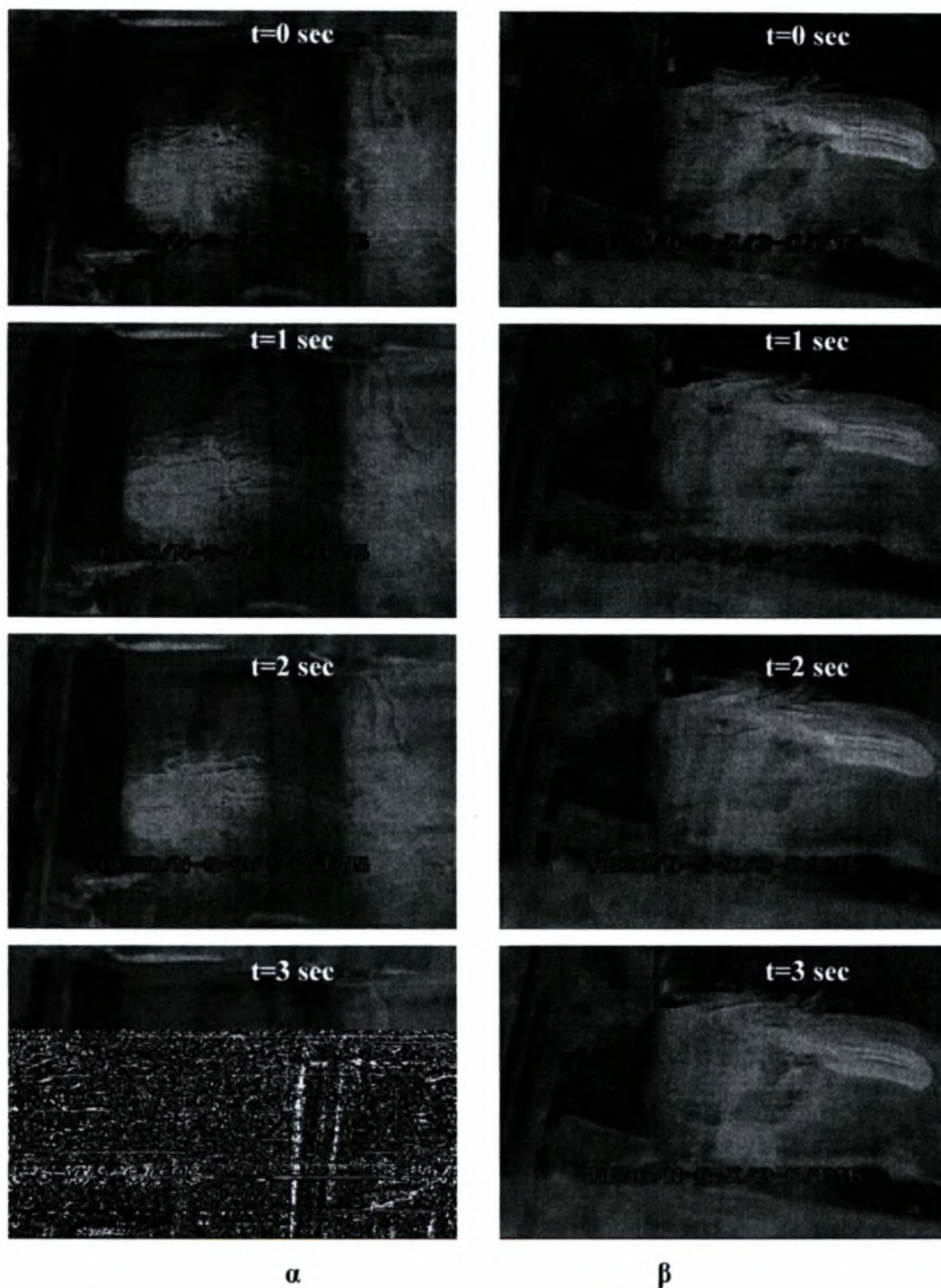
σχετικά έκταση. Εν αντιθέσει ακροφύσια που έχουν κατεύθυνση ενάντια στη ροή του υμένα δημιουργούν αναταραχή, με αποτέλεσμα την έντονη παρουσία ζωνών ανακυκλοφορίας..



Σχήμα 4.8: Οπτικοποίηση της ροής για $Re=43,3$, ρευστό έγχυσης νερό- χρωστική, ελάχιστη παροχή αντλίας και γωνία κλίσης $3,4^\circ$ α) ακροφύσιο έγχυσης 4 β) ακροφύσιο έγχυσης 5



Σχήμα 4.9: Οπτικοποίηση της ροής για $Re=200$, ρευστό έγχυσης νερό- χρωστική, ελάχιστη παροχή αντλίας και γωνία κλίσης $3,4^\circ$ α) ακροφύσιο έγχυσης 1 β) ακροφύσιο έγχυσης 4

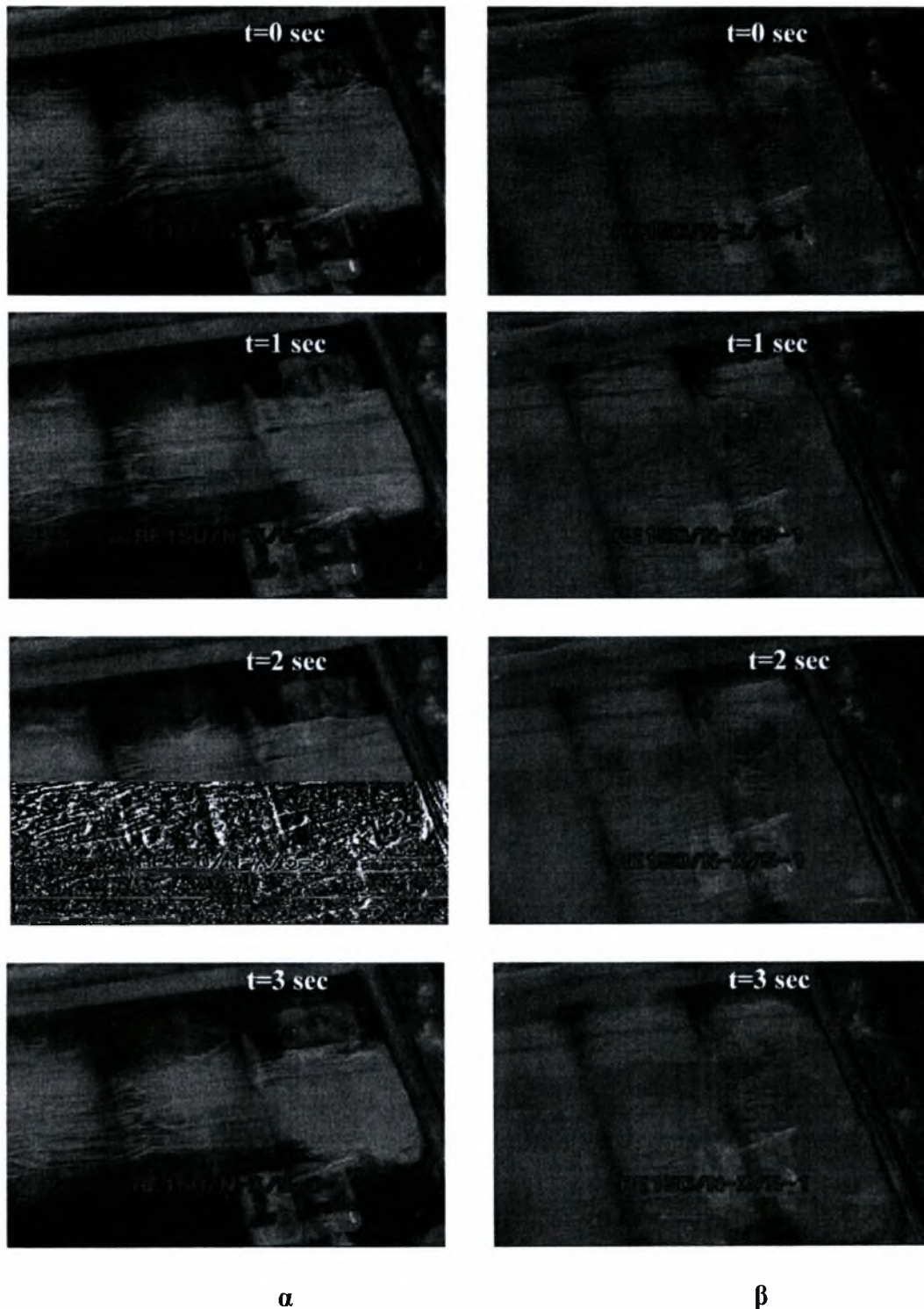


Σχήμα 4.10: Οπτικοποίηση της ροής για $Re=200$, ρευστό έγχυσης νερό- χρωστική, ελάχιστη παροχή αντλίας και γωνία κλίσης 15° α) ακροφύσιο έγχυσης 1 β) ακροφύσιο έγχυσης 3

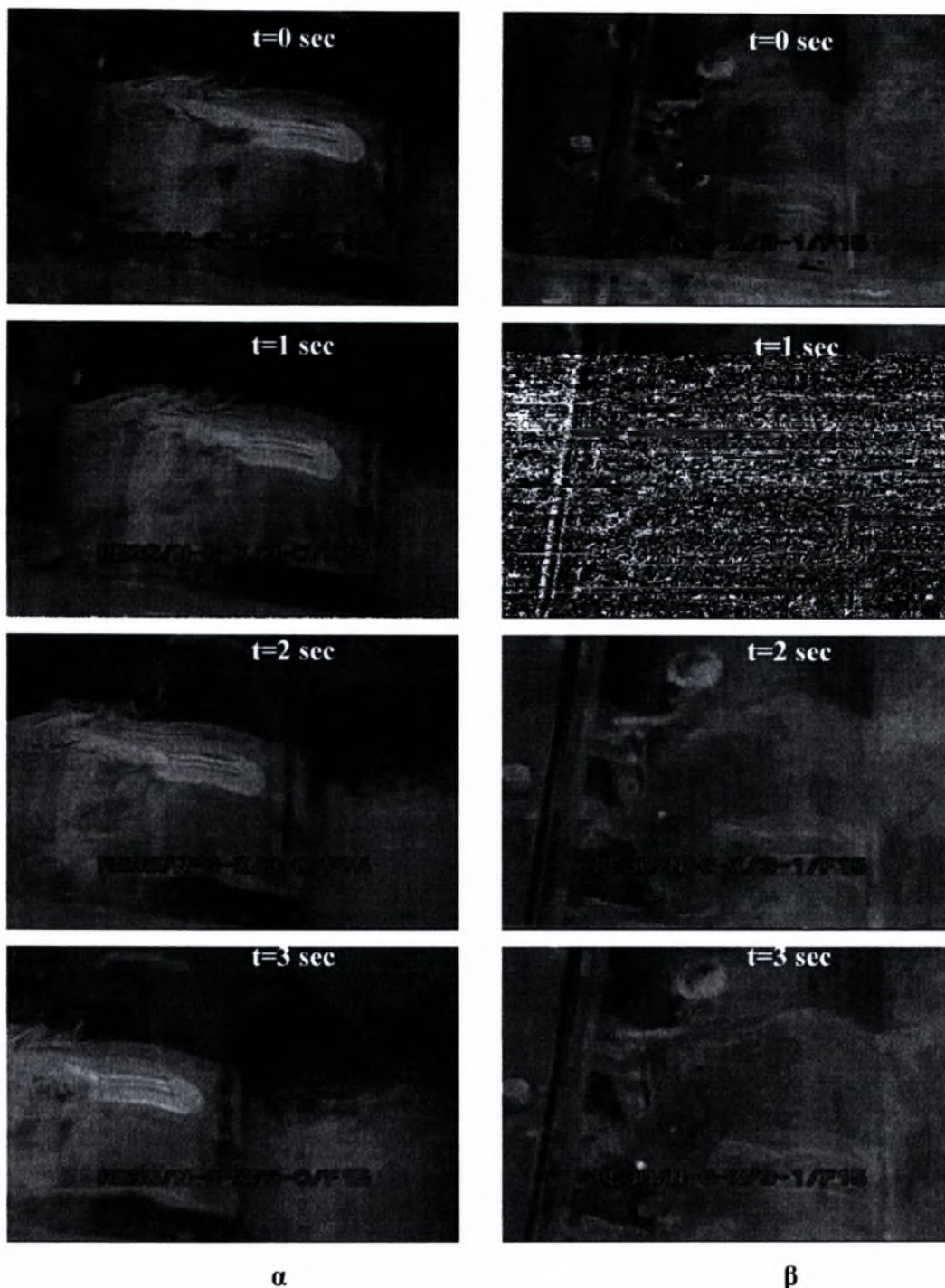
4.1.5 Επίδραση της παροχής έγχυσης

Όταν η παροχή της αντλίας είναι ελάχιστη, παρατηρείται ομαλή διεξαγωγή του φαινομένου. Είναι πιο καθαρή η οπτικοποίηση της ροής και υπάρχει εγκάρσια διάχυση σε μικρό βαθμό. Στη

μέγιστη παροχή αντλίας , το φαινόμενο αναπτύσσεται ραγδαία. Η διάχυση στην τρίτη κατεύθυνση είναι πλήρης και η ποσότητα της εγχυόμενης ουσίας είναι τόση ώστε να καθιστά δυσδιάκριτες τις ζώνες ανακυκλοφορίας. Σχήμα 4.11 και 4.12



Σχήμα 4.11: Οπτικοποίηση της ροής για $Re=150$, ρευστό έγχυσης νερό- χρωστική, ακροφύσιο έγχυσης 5, γωνία κλίσης 15° α)) min παροχή β))max παροχή



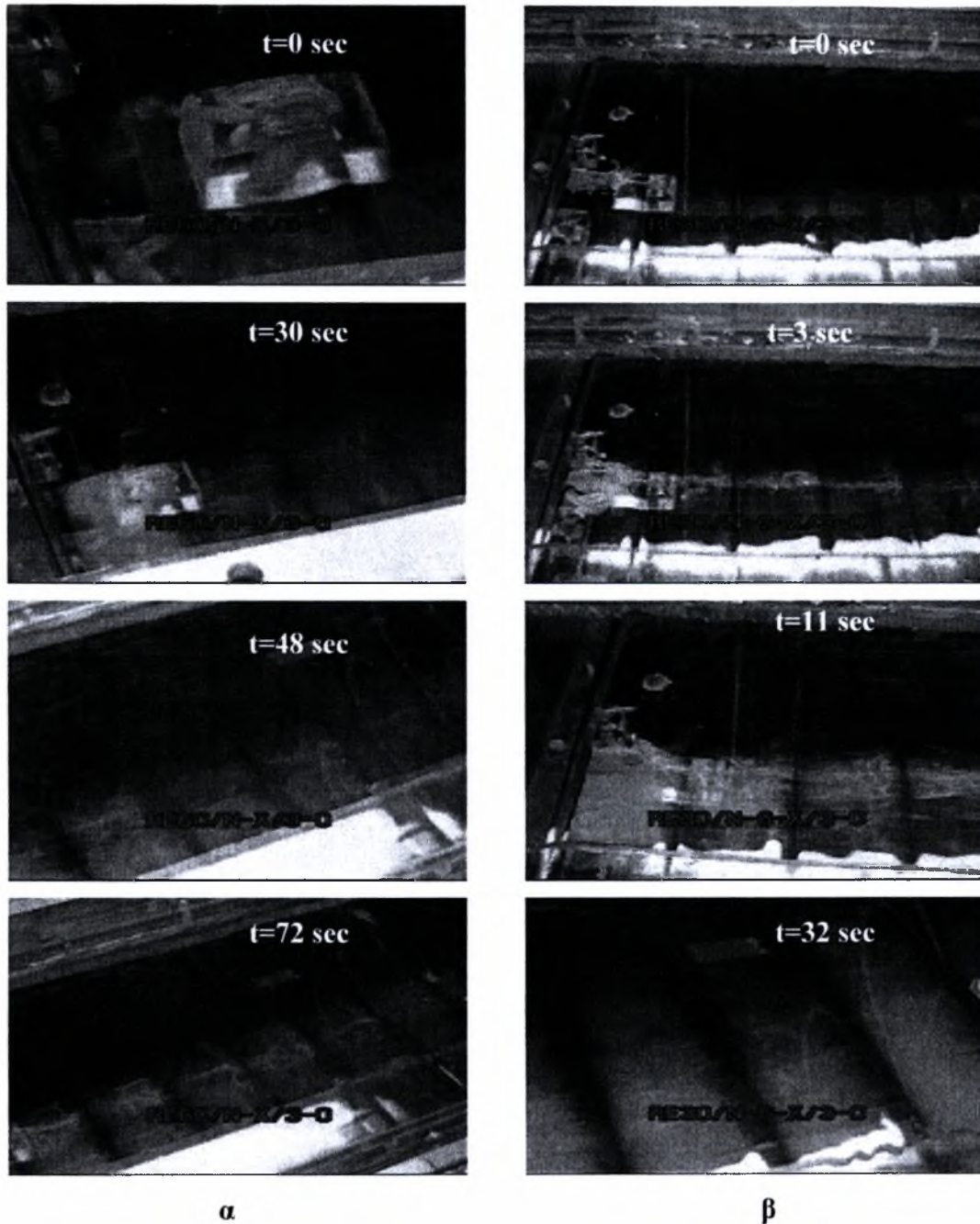
Σχήμα 4.12: Οπτικοποίηση της ροής για $Re=30$, ρευστό έγχυσης νερό-γλυκερίνη- χρωστική, ακροφύσιο έγχυσης 3, γωνία κλίσης 15° α)) min παροχή β))max παροχή

4.2 Διάχυση του ρευστού έγχυσης στον υγρό υμένα(ημιτονοειδές τοίχωμα)

4.2.1 Επίδραση ρευστού έγχυσης

Στο σχήμα 4.13 φαίνεται η επίδραση του ρευστού έγχυσης καθ' όλο το μήκος του τοιχώματος σε συνθήκες, $Re=60$, με έγχυση από το ακροφύσιο 3, ελάχιστη παροχή αντλίας και

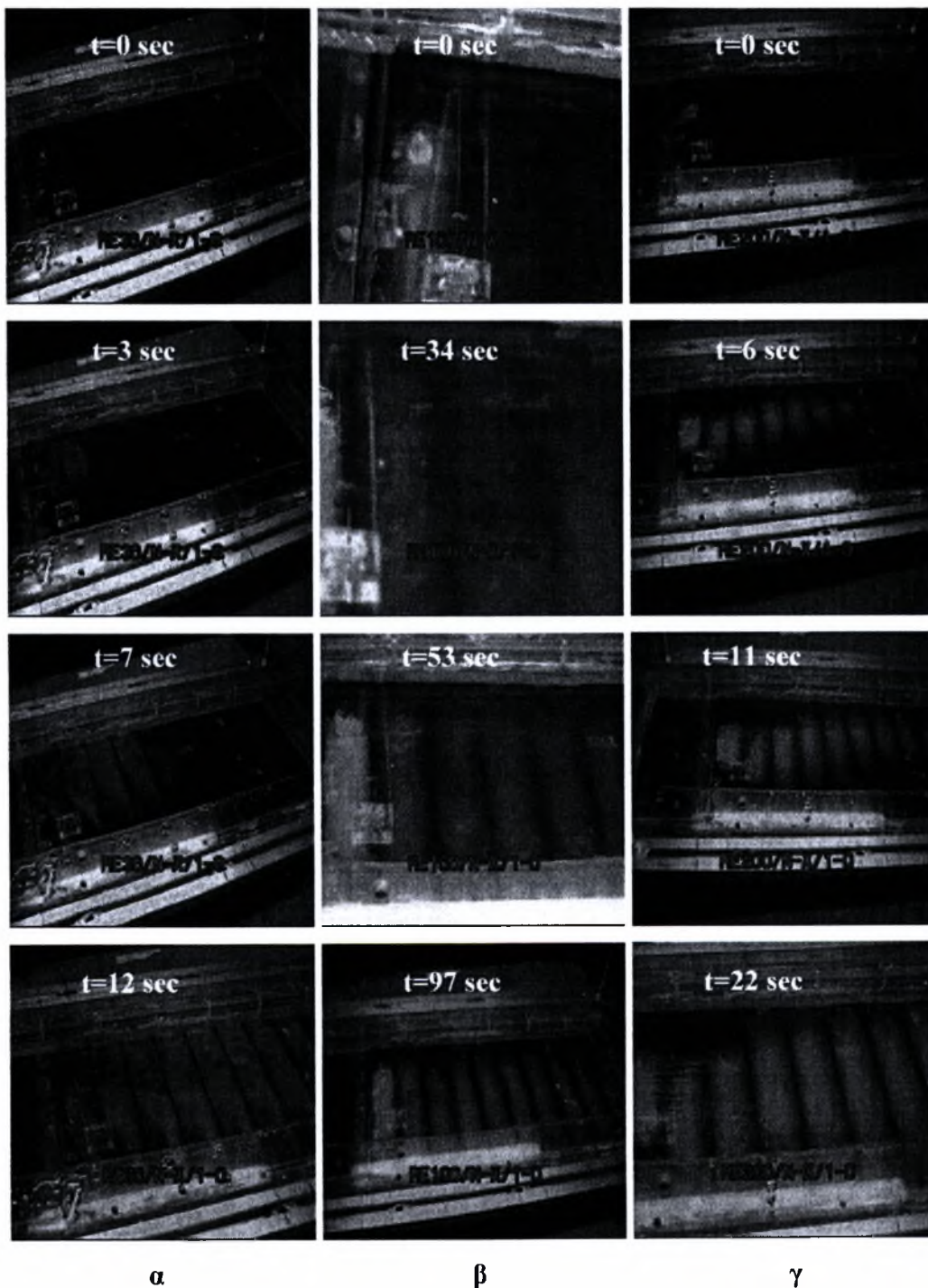
κλίση $3,4^\circ$. Το διάλυμα έγχυσης νερό-γλυκερίνη- χρωστική είναι εκείνο που διαχέεται γρηγορότερα. Η διάχυση και στην εγκάρσια κατεύθυνση είναι πιο εμφανής σε σχέση με το άλλο διάλυμα νερού- χρωστικής.



Σχήμα 4.13: Οπτικοποίηση της ροής για $Re=60$, με έγχυση από το ακροφύσιο 3, ελάχιστη παροχή αντλίας και κλίση $3,4^\circ$ α) ρευστό έγχυσης νερό- χρωστική β) ρευστό έγχυσης νερό- γλυκερίνη- χρωστική

4.2.2 Επίδραση αριθμού Reynolds

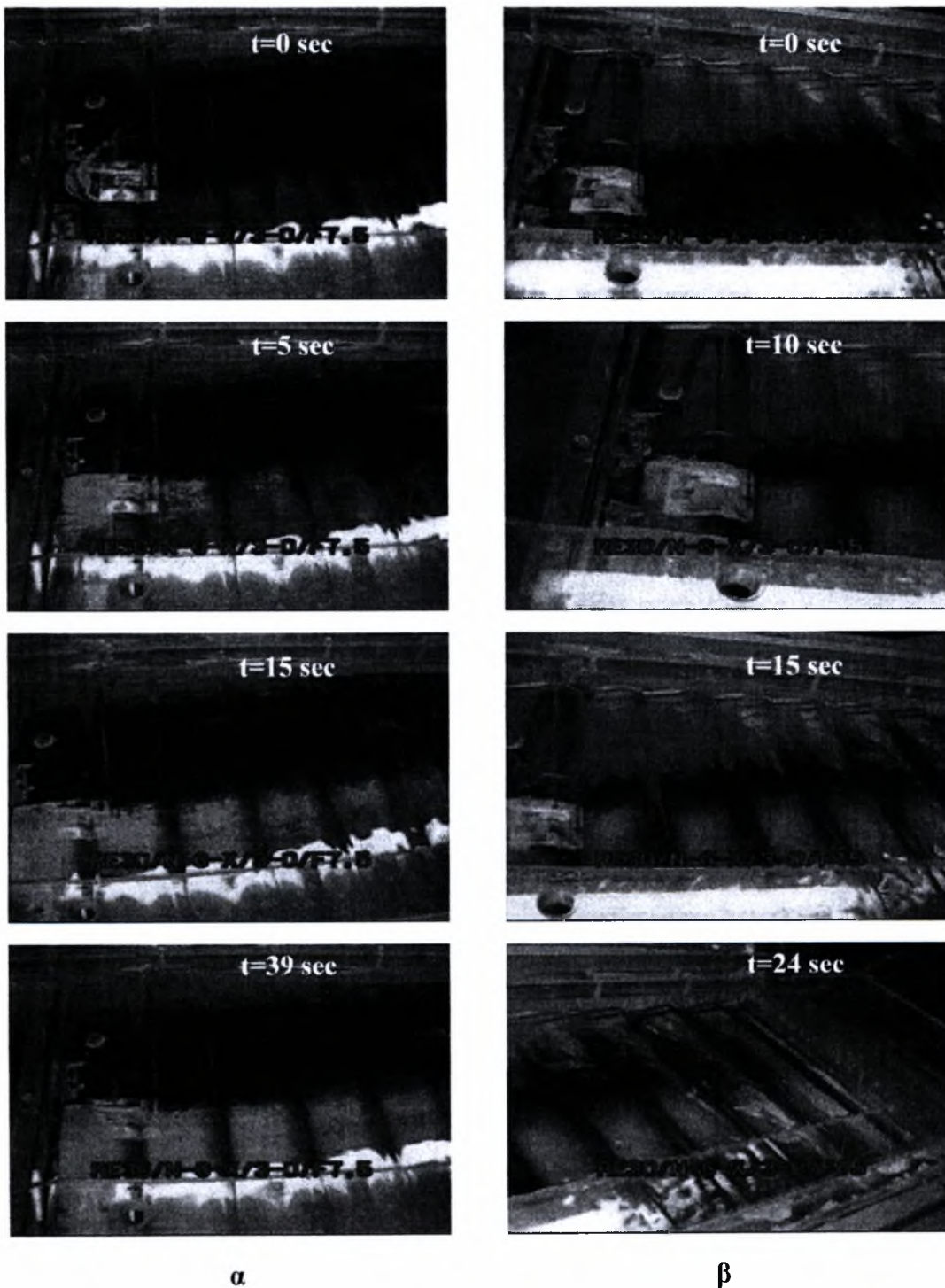
Η επίδραση του αριθμού Reynolds στη διάχυση του ρευστού έγχυσης είναι σημαντική. Το σχήμα 4.14 δείχνει την εξέλιξη του φαινομένου στο χώρο και το χρόνο. Σε μικρούς αριθμούς Reynolds η ουσία διαχέεται ομαλά προς όλες τις κατευθύνσεις σε σύντομο χρονικό διάστημα. Σε μεγαλύτερους αριθμούς Reynolds η ουσία χρειάζεται περισσότερο χρόνο για να διαχυθεί σε όλη την έκταση του τοιχώματος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο συμπαρασυρμός από το ρευστό λειτουργίας είναι εντονότερος σε μεγάλους αριθμούς Reynolds



Σχήμα 4.14: Οπτικοποίηση της ροής για ρευστό έγχυσης νερό- χρωστική, με έγχυση από το ακροφύσιο 1, ελάχιστη παροχή αντλίας και κλίση $3,4^\circ$ α) Re 30 β) Re 100 γ) Re200

4.2.3 Επίδραση της κλίσης φ

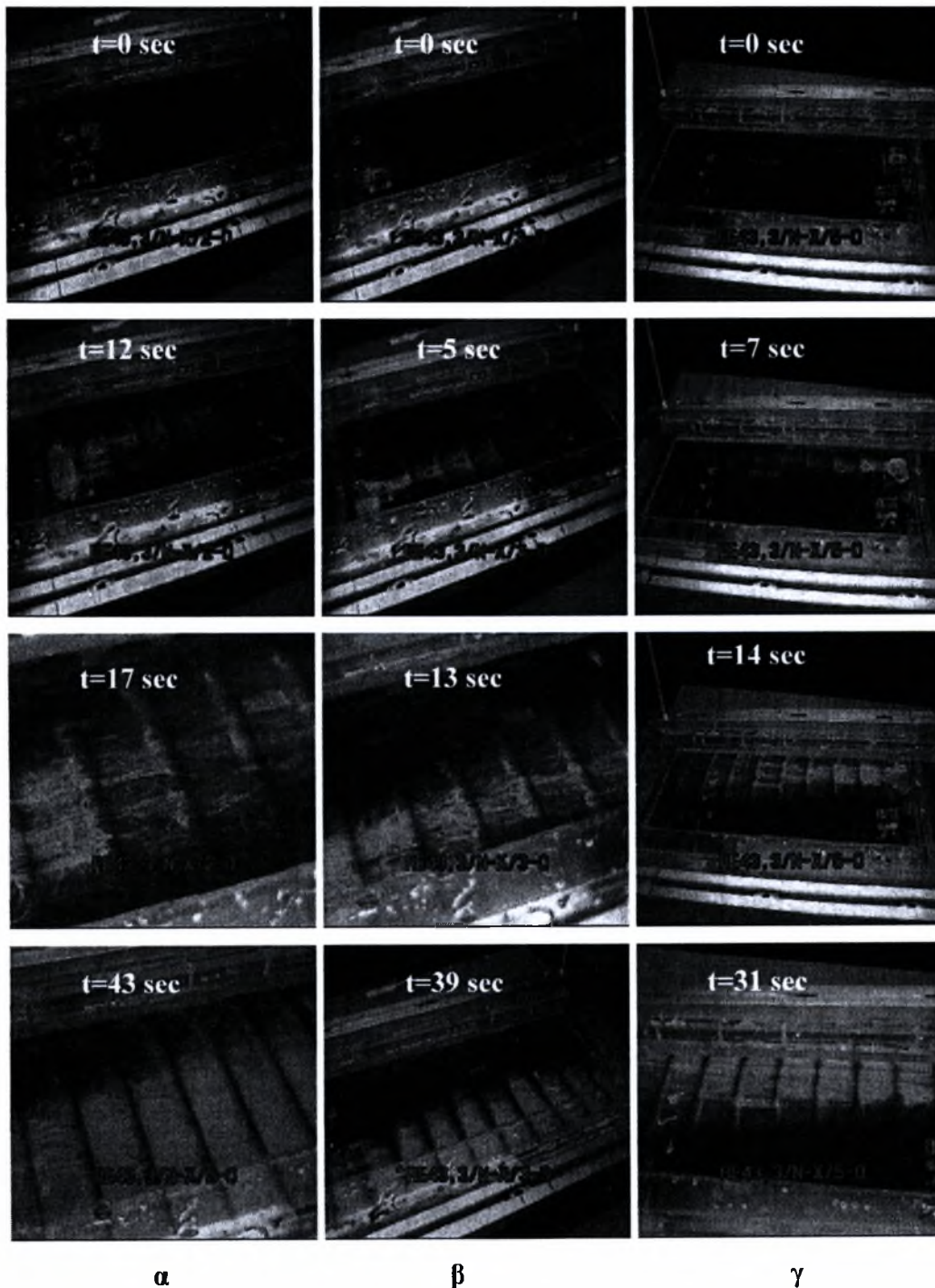
Στο συγκεκριμένο τοίχωμα, η διαφορά στη γωνία κλίσης έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση της συγκέντρωσης της ουσίας έγχυσης. Το γεγονός αυτό φαίνεται στο σχήμα 4.15 όπου σε μεγαλύτερη κλίση το ρευστό λειτουργίας αναμεμιγμένο με την ουσία έγχυσης, είναι λιγότερο διακριτό. Ο χρόνος ανάπτυξης του φαινομένου επηρεάζεται ελαφρά. Οι ζώνες ανακυκλοφορίας υπάρχουν με πιο εύκολη, την παρατήρησή τους στην μικρότερη κλίση. Η εγκάρσια διέζχυση δε διαφέρει σε αυτή την περίπτωση.



Σχήμα 4.15: Οπτικοποίηση της ροής για $Re=30$, ρευστό έγχυσης νερό-γλυκερίνη- χρωστική, με έγχυση από το ακροφύσιο 3 και ελάχιστη παροχή αντλίας α) $\varphi= 7,5^\circ$ β) $\varphi= 15^\circ$

4.2.4 Επίδραση του ακροφυσίου έγχυσης

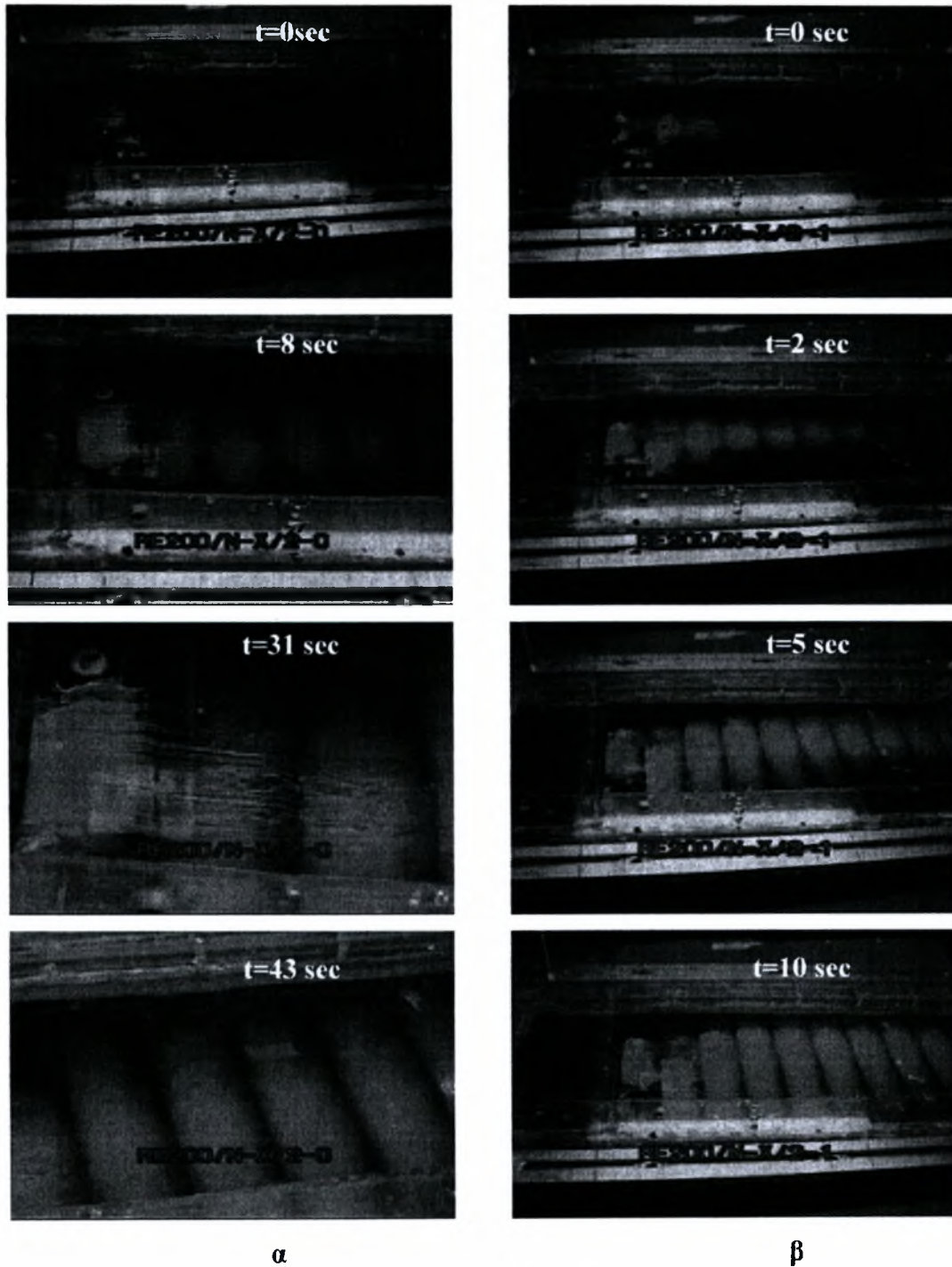
Το ακροφύσιο έγχυσης είναι αυτό το οποίο θα καθορίσει και τη διάχυση της ουσίας. Από το σχήμα 4.16 φαίνεται ότι για ίδιες συνθήκες η χώρο- χρονική ανάπτυξη είναι παραπλήσια. Είτε το ακροφύσιο έγχυσης έχει κατεύθυνση αντίθετη της ροής, είτε κατεύθυνση όμοια της ροής, είτε βρίσκεται σε πλάγια θέση η εγκάρσια διάχυση αναπτύσσεται με την πάροδο του χρόνου.



Σχήμα 4.16: Οπτικοποίηση της ροής για $Re=43,3$, ρευστό έγχυσης νερό- χρωστική, ελάχιστη παροχή αντλίας και γωνία κλίσης $3,4^\circ$ α) ακροφύσιο έγχυσης 2 β) ακροφύσιο έγχυσης 3 γ) ακροφύσιο έγχυσης 5

4.2.5 Επίδραση της παροχής έγχυσης

Στο σχήμα 4.17 αυτό που παρατηρούμε είναι η μεγάλη διαφορά στη χρονική εξέλιξη του φαινομένου. Και στις δύο περιπτώσεις η χρονική εξέλιξη είναι παρόμοια με έντονο το στοιχείο της μεγάλης συγκέντρωσης της χρωστικής στην περίπτωση της μέγιστης παροχής.

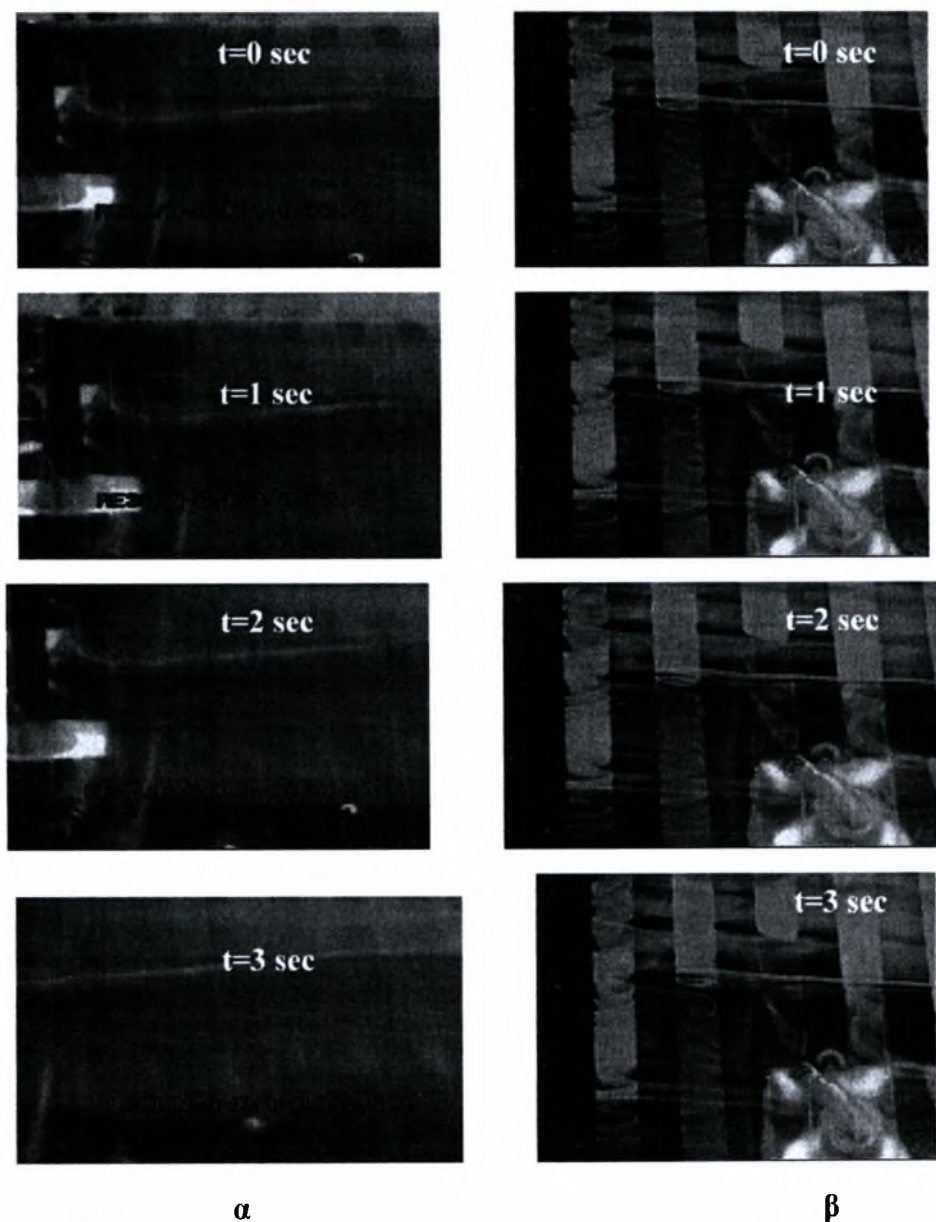


Σχήμα 4.17: Οπτικοποίηση της ροής για $Re=200$, ρευστό έγχυσης νερό- χρωστική, ακροφύσιο έγχυσης 2, γωνία κλίσης 3.4° α)) min παροχή β)) max παροχή

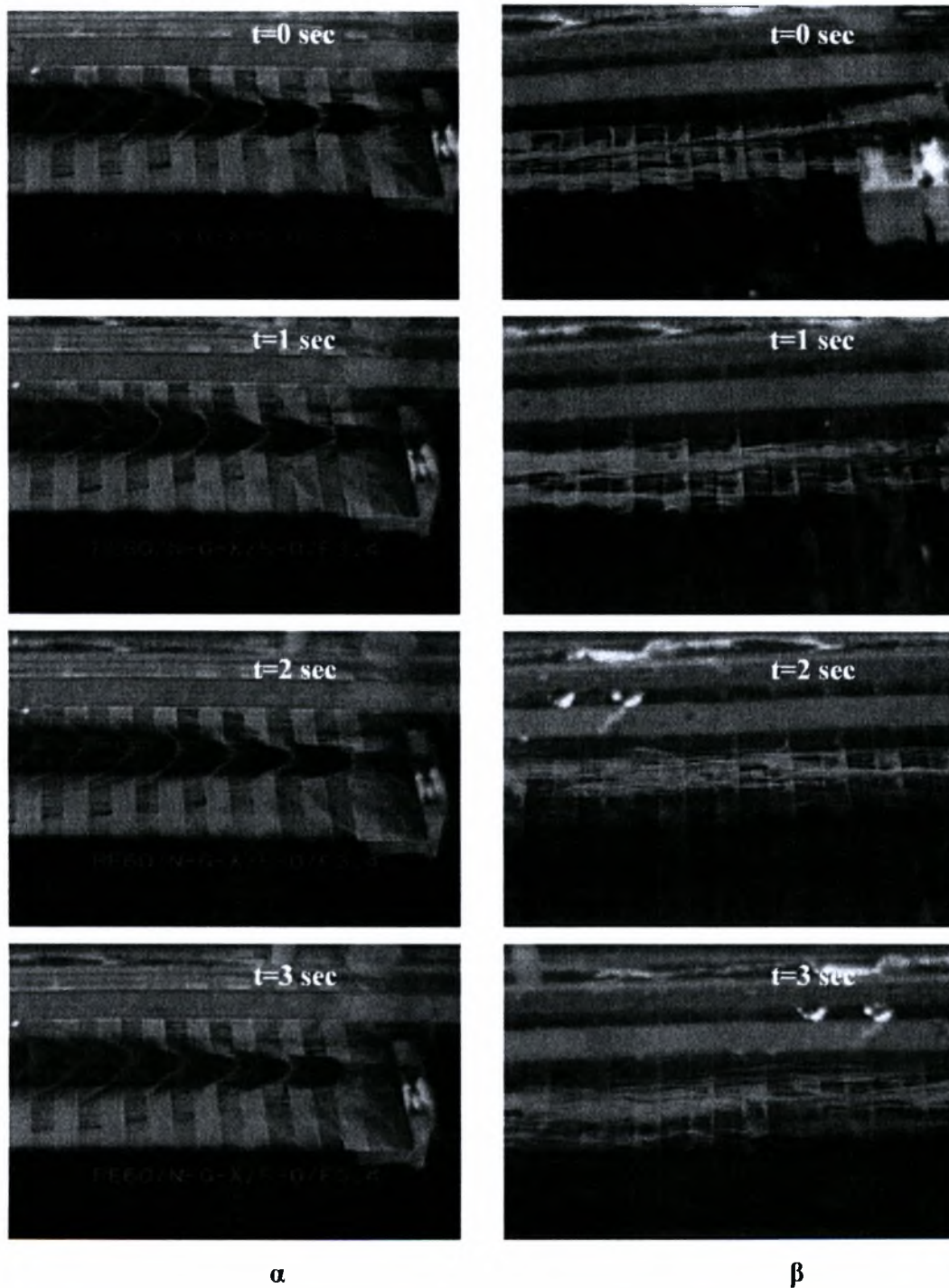
4.3 Πειραματικά αποτελέσματα για το τετραγωνικό τοίχωμα

4.3.1 Επίδραση αριθμού Reynolds

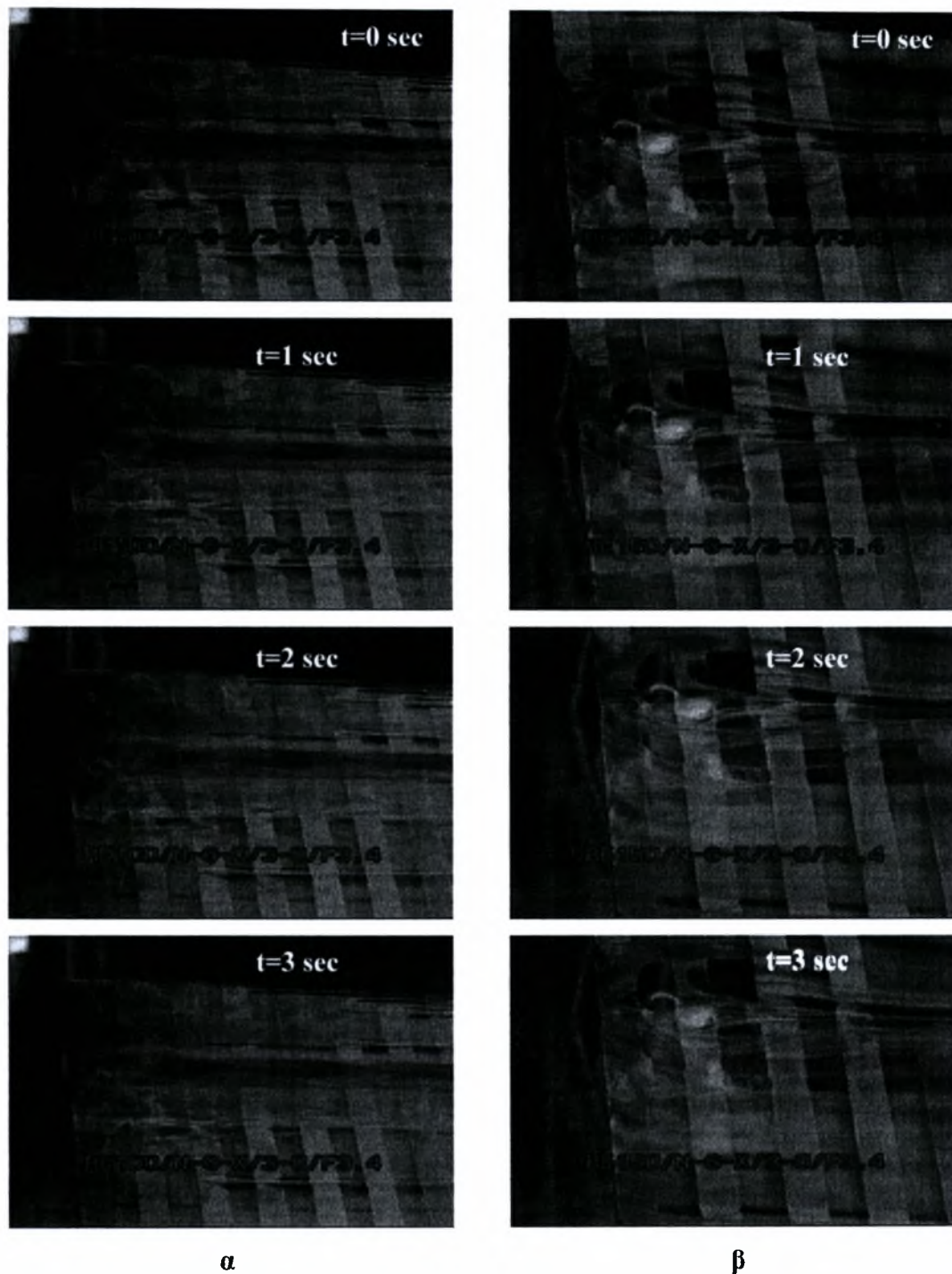
Και στο τετραγωνικό τοίχωμα, το πάχος του υμένα είναι εκείνο το οποίο θα καθορίσει το σχηματισμό των στροβιλισμών. Σε μικρούς αριθμούς Reynolds, ο σχηματισμός των δινών είναι δυσδιάκριτος (σχήματα 4.18, 4.19, 4.20). Εν αντιθέσει σε μεγαλύτερους, αρχίζει να γίνεται ευδιάκριτη η δημιουργία των ζωνών ανακυκλοφορίας. Οι στροβιλισμοί αυτοί που βρίσκονται μέσα στην κοιλότητα μπορούν εύκολα να κάνουν το άλμα και να περάσουν στην επόμενη, γιατί το βάθος του τοιχώματος είναι μικρό και οι ταχύτητες στον πυθμένα και στην ελεύθερη επιφάνεια τείνουν να έχουν λόγο 1.



Σχήμα 4.18: Οπτικοποίηση της ροής για ρευστό έγχυσης νερό-γλυκερίνη- χρωστική, με έγχυση από το ακροφύσιο 1, ελάχιστη παροχή αντλίας και κλίση 3,4° α) Re 30 β) Re 90



Σχήμα 4.19: Οπτικοποίηση της ροής για ρευστό έγχυσης νερό-γλυκερίνη- χρωστική, με έγχυση από το ακροφύσιο 5, ελάχιστη παροχή αντλίας και κλίση $3,4^\circ$ α) $Re\ 60$ β) $Re\ 300$

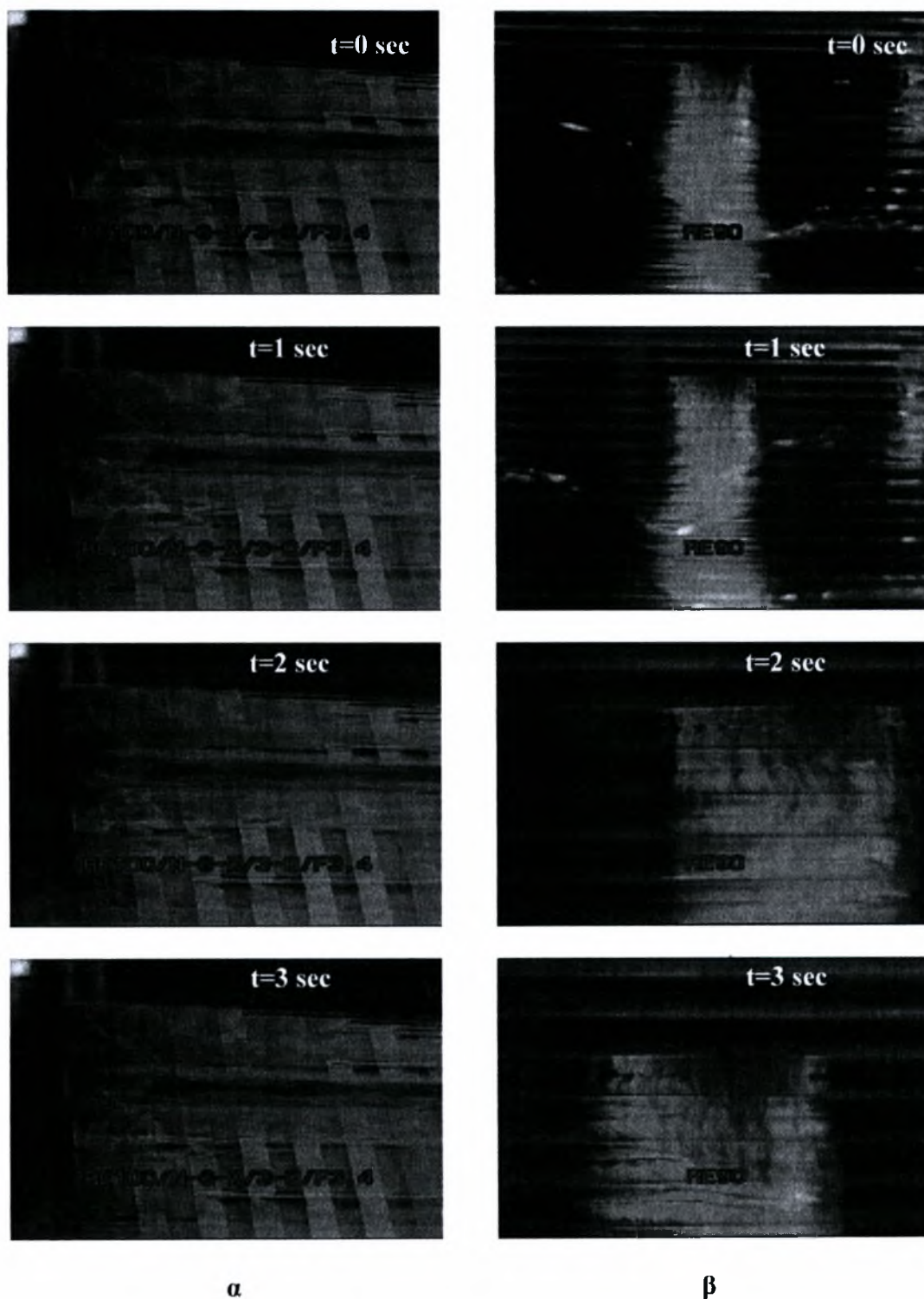


Σχήμα 4.20: Οπτικοποίηση της ροής για ρευστό έγχυσης νερό-γλυκερίνη- χρωστική, με έγχυση από το ακροφύσιο 3, ελάχιστη παροχή αντλίας και κλίση $3,4^\circ$ α) $Re\ 900$ β) $Re\ 150$

4.3.2 Επίδραση της κλίσης φ

Στο συγκεκριμένο τοίχωμα η κλίση φαίνεται να επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την εξέλιξη του φαινομένου. Σε μεγάλες κλίσεις, η εγκάρσια διάχυση μειώνεται σημαντικά και έχουμε τη δημιουργία ρυτιδώσεων στη ροή. Οι ζώνες ανακυκλοφορίας υπάρχουν και εδώ αλλά είναι δύσκολα

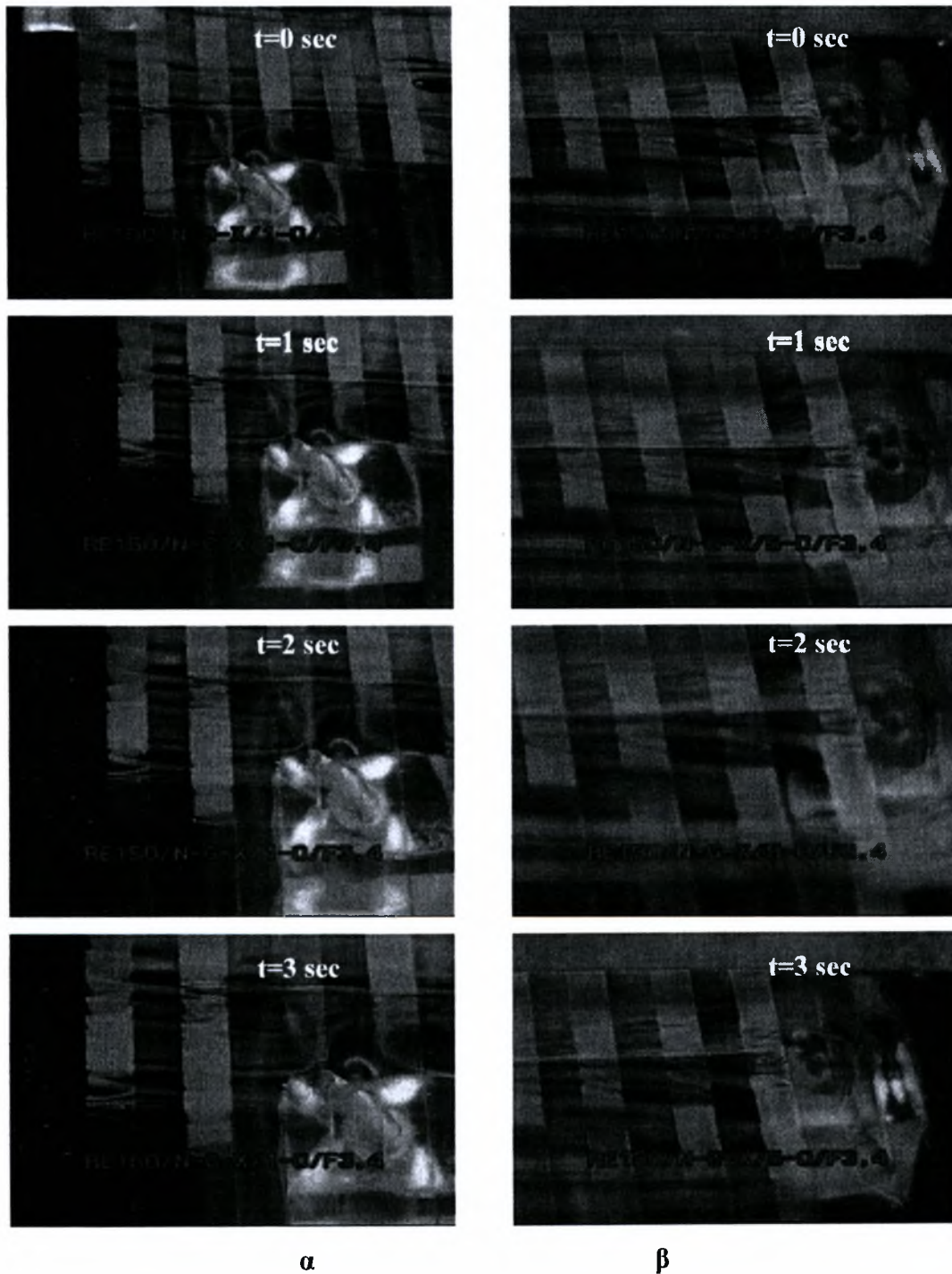
διακριτές(σχήμα 4.21). Επιπλέον έχουμε και τη δημιουργία των πεταλοειδών κυμάτων τα οποία είναι ταραχώδη και καθιστούν δύσκολη την οπτικοποίηση των ζωνών ανακυκλοφορίας.



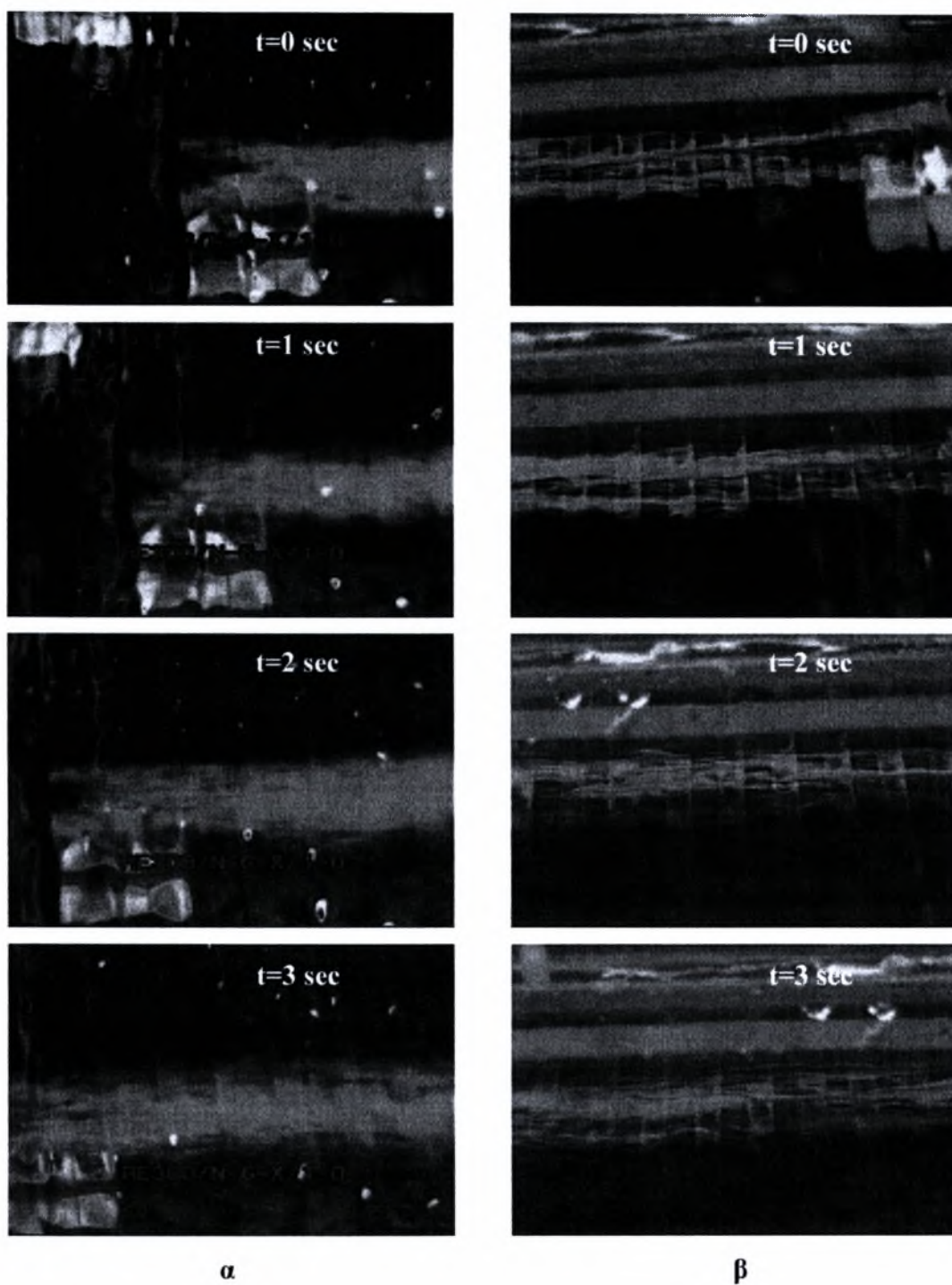
Σχήμα 4.21: Οπτικοποίηση της ροής για $Re=90$, ρευστό έγχυσης νερό-γλυκερίνη- χρωστική, με έγχυση από το ακροφύσιο 3 και ελάχιστη παροχή αντλίας α) $\phi= 3.4^\circ$ β) $\phi= 11^\circ$

4.3.3 Επίδραση του ακροφυσίου έγχυσης

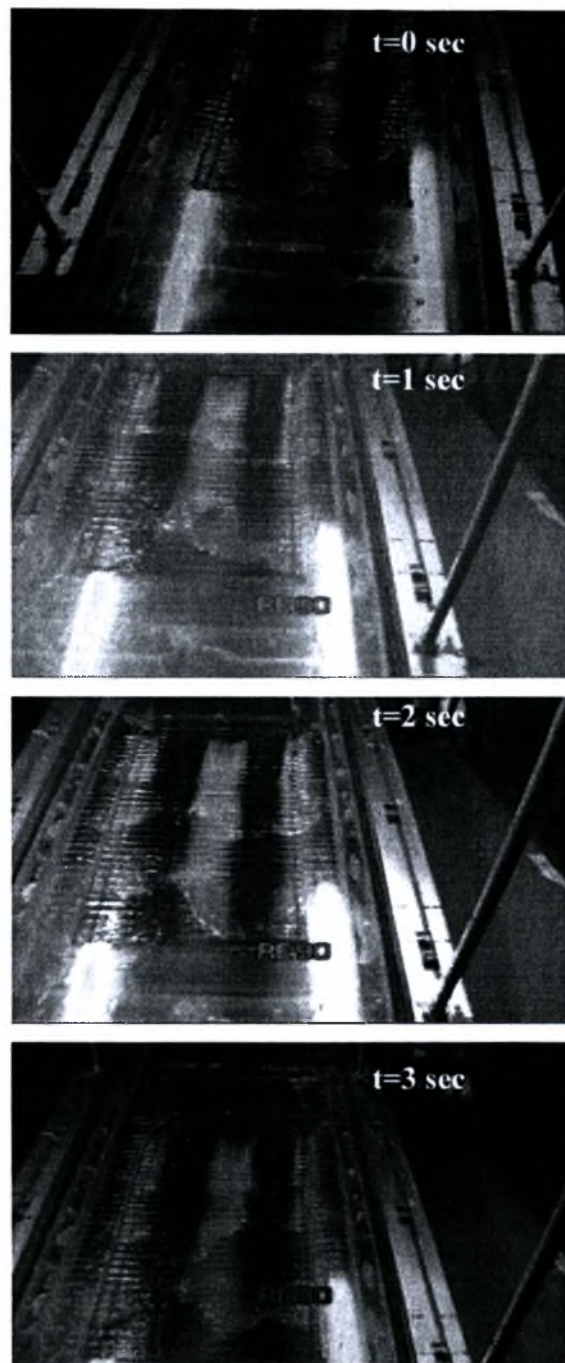
Τόσο στις μικρές όσο και στις μεγάλες γωνίες κλίσης, η κατεύθυνση του ακροφυσίου συμβάλλει στην ανάπτυξη της εγκάρσιας διάχυσης. Τα ακροφύσια με κατεύθυνση όμοια με αυτή της ροής και αυτά που βρίσκονται σε πλάγια θέση επιτρέπουν πιο εύκολα τον συμπαρασυρμό της εγχυνόμενης ουσίας. Το ακροφύσιο με κατεύθυνση αντίθετη, επιτρέπει τον εγκλωβισμό της ουσίας μέσα στην κοιλότητα (σχήματα 4.22, 4.23, 4.24, 4.25). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εγκάρσια διάχυση σε μεγαλύτερο βαθμό.



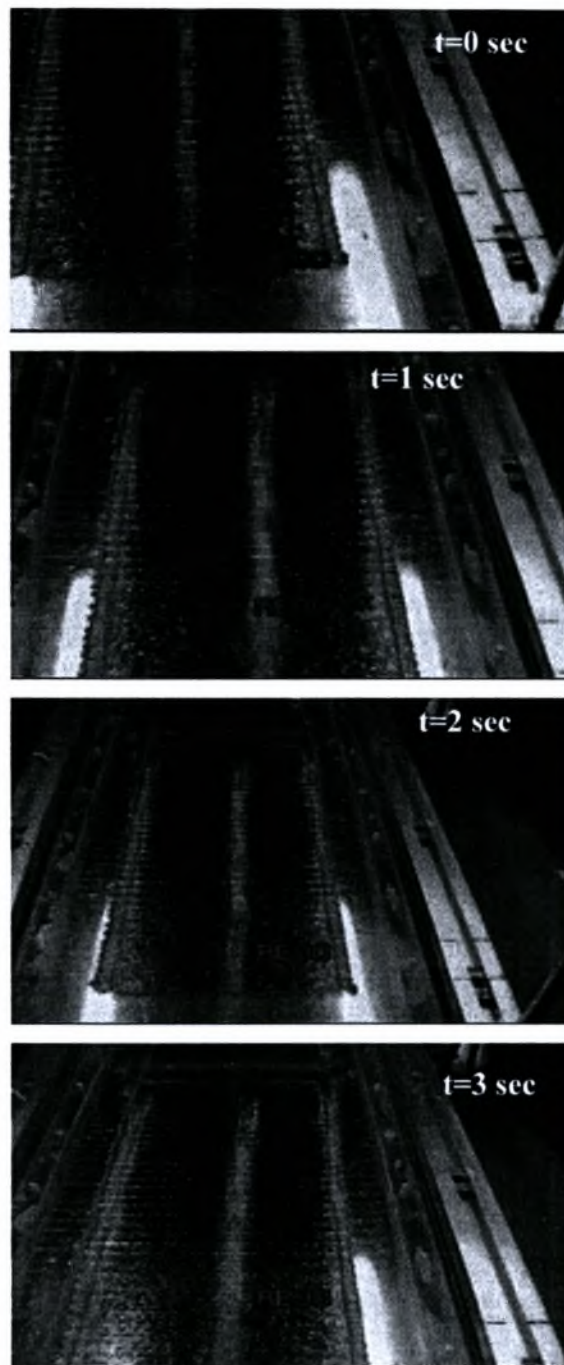
Σχήμα 4.22: Οπτικοποίηση της ροής για $Re=150$, ρευστό έγχυσης νερό-γλυκερίνη- χρωστική, ελάχιστη παροχή αντλίας και γωνία κλίσης $3,4^\circ$ α) ακροφύσιο έγχυσης 1 β) ακροφύσιο έγχυσης 5



Σχήμα 4.23: Οπτικοποίηση της ροής για $Re=300$, ρευστό έγχυσης νερό-γλυκερίνη- χρωστική, ελάχιστη παροχή αντλίας και γωνία κλίσης $3,4^\circ$ α) ακροφύσιο έγχυσης 3 β) ακροφύσιο έγχυσης 5



Σχήμα 4.24: Οπτικοποίηση της ροής για $Re=60$, ρευστό έγχυσης νερό-γλυκερίνη- χρωστική, ελάχιστη παροχή αντλίας και γωνία κλίσης 11° . ταυτόχρονη λειτουργία και των τριών ακροφυσίων



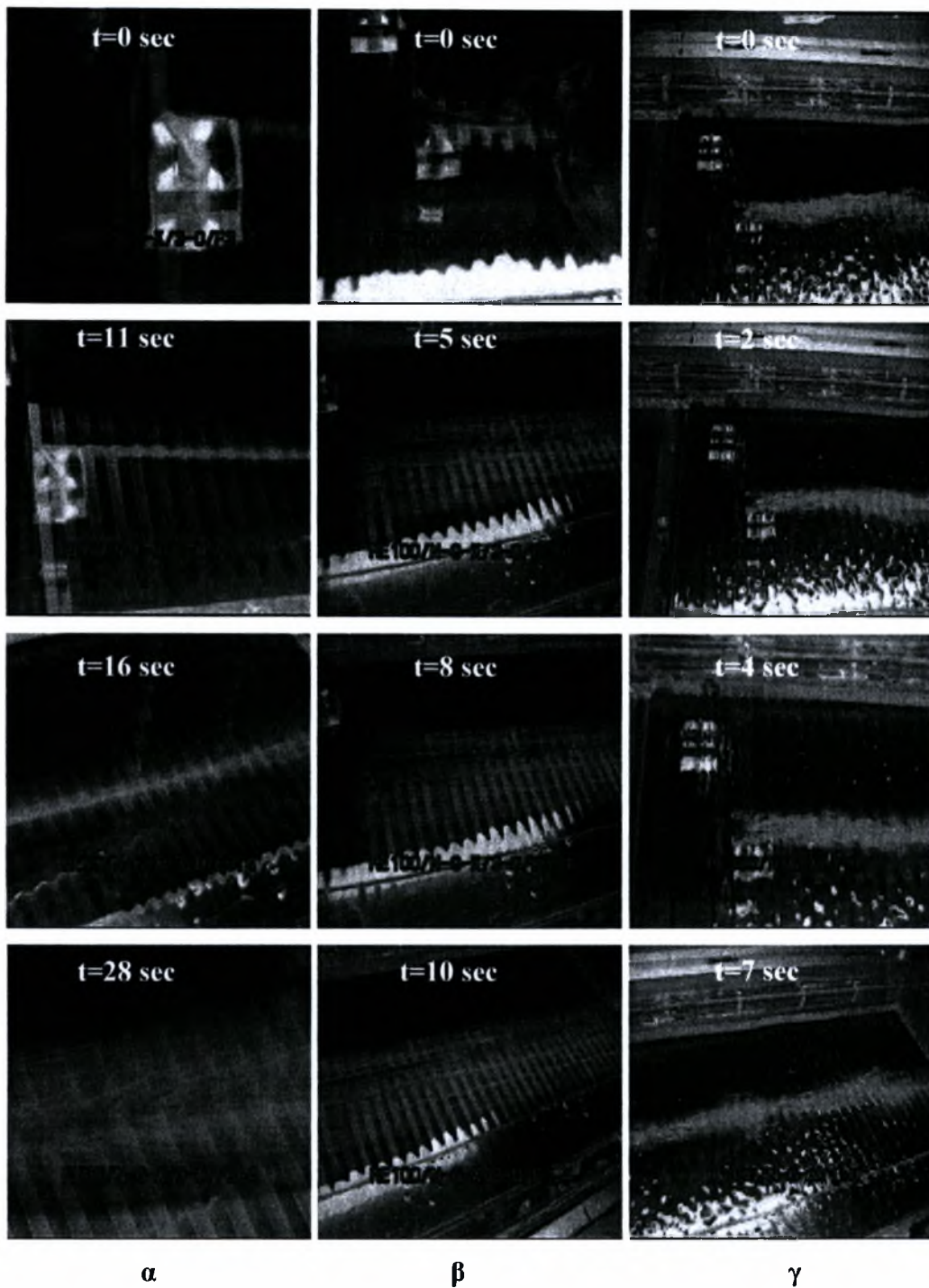
Σχήμα 4.25: Οπτικοποίηση της ροής για $Re=90$, ρευστό έγχυσης νερό-γλυκερίνη- χρωστική, ελάχιστη παροχή αντλίας και γωνία κλίσης 11° . ταυτόχρονη λειτουργία και των τριών ακροφυσίων

4.4 Διάχυση του ρευστού έγχυσης στον υγρό υμένα(τετραγωνικό τοίχωμα)

4.4.1 Επίδραση αριθμού Reynolds

Επειδή ο αριθμός Reynolds είναι αυτός που καθορίζει και την ταχύτητα του ρευστού, στο σχήμα 4.26 παρατηρείται ότι ποικίλει ο χρόνος ανάπτυξης του φαινομένου. Ως προς τη διάχυση, σε μικρούς αριθμούς Reynolds η διάχυση λαμβάνει χώρα στην κατεύθυνση του ακροφυσίου και μάλιστα κοντά στη διάμετρο του στομίου του. Αυξάνοντας τον αριθμό Reynolds η εγκάρσια

διάχυση είναι πιο εκτεταμένη. Πέρα όμως από κάποια τιμή του Re , αρχίζει η δημιουργία των πεταλοειδών κυμάτων, τα οποία συγκεντρώνουν και πάλι τη διάχυση κοντά στα ακροφύσια.

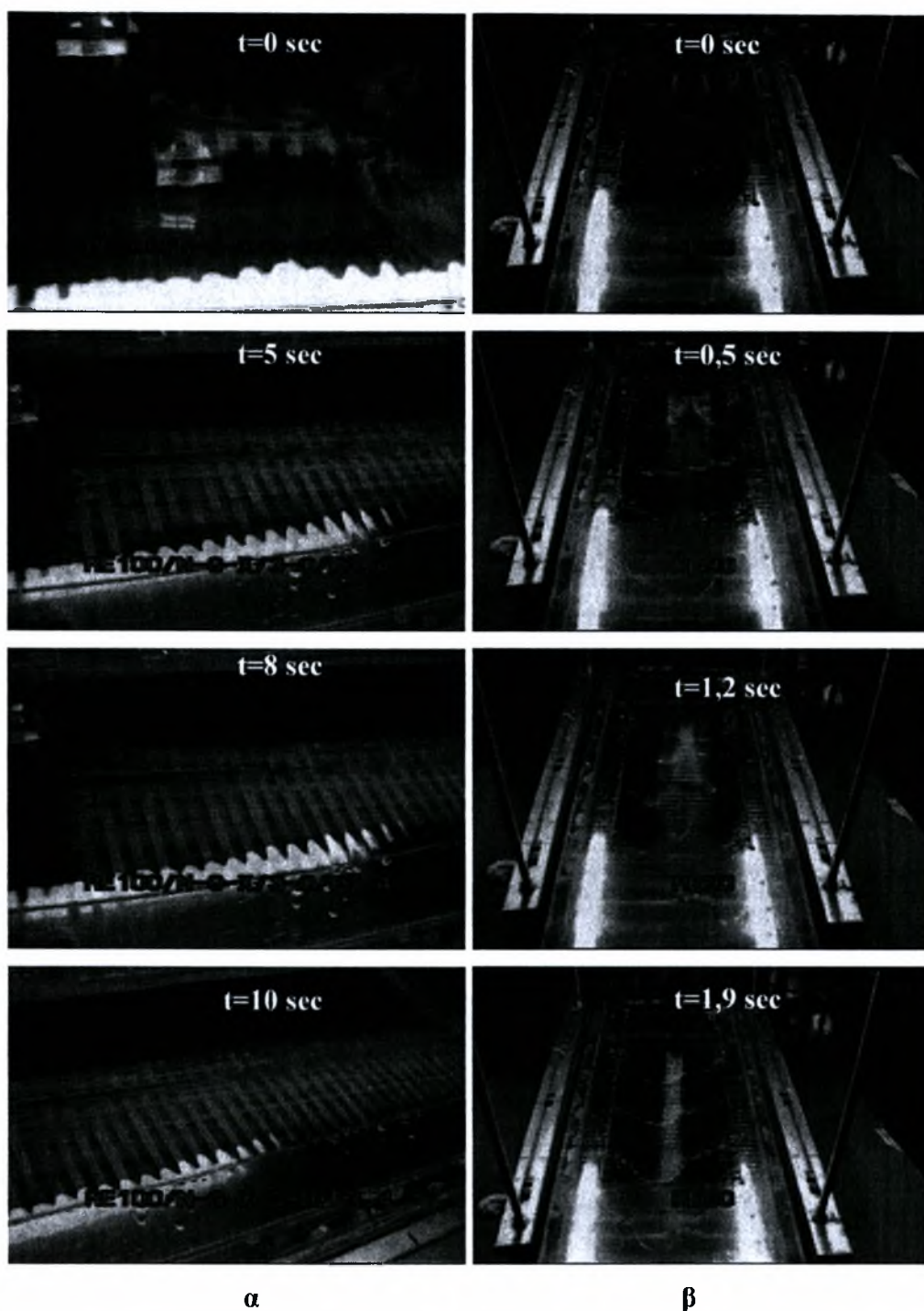


Σχήμα 4.26: Οπτικοποίηση της ροής για ρευστό έγχυσης νερό-γλυκερίνη- χρωστική, με έγχυση από το ακροφύσιο 3, ελάχιστη παροχή αντλίας και κλίση $3,4^\circ$ α) Re 60, β) Re 90, γ) Re 300

4.4.2 Επίδραση της κλίσης ϕ

Όπως παρατηρούμε στο σχήμα 4.27, η κλίση του τοιχώματος, είναι αυτή που συμβάλλει καταλυτικά (μέσω της δύναμης της βαρύτητας) στην ομαλή ή μη ομαλή ανάπτυξη του φαινομένου. Σε ίδιους αριθμούς Reynolds η κλίση είναι αυτή που θα καθορίσει το μέγεθος της εγκάρσιας

διάχυσης και πολύ περισσότερο την εμφάνιση πεταλοειδών κυμάτων. Και σε αυτή την περίπτωση ο χρόνος ανάπτυξης της πλήρους ροής διαφέρει μέγιστα.

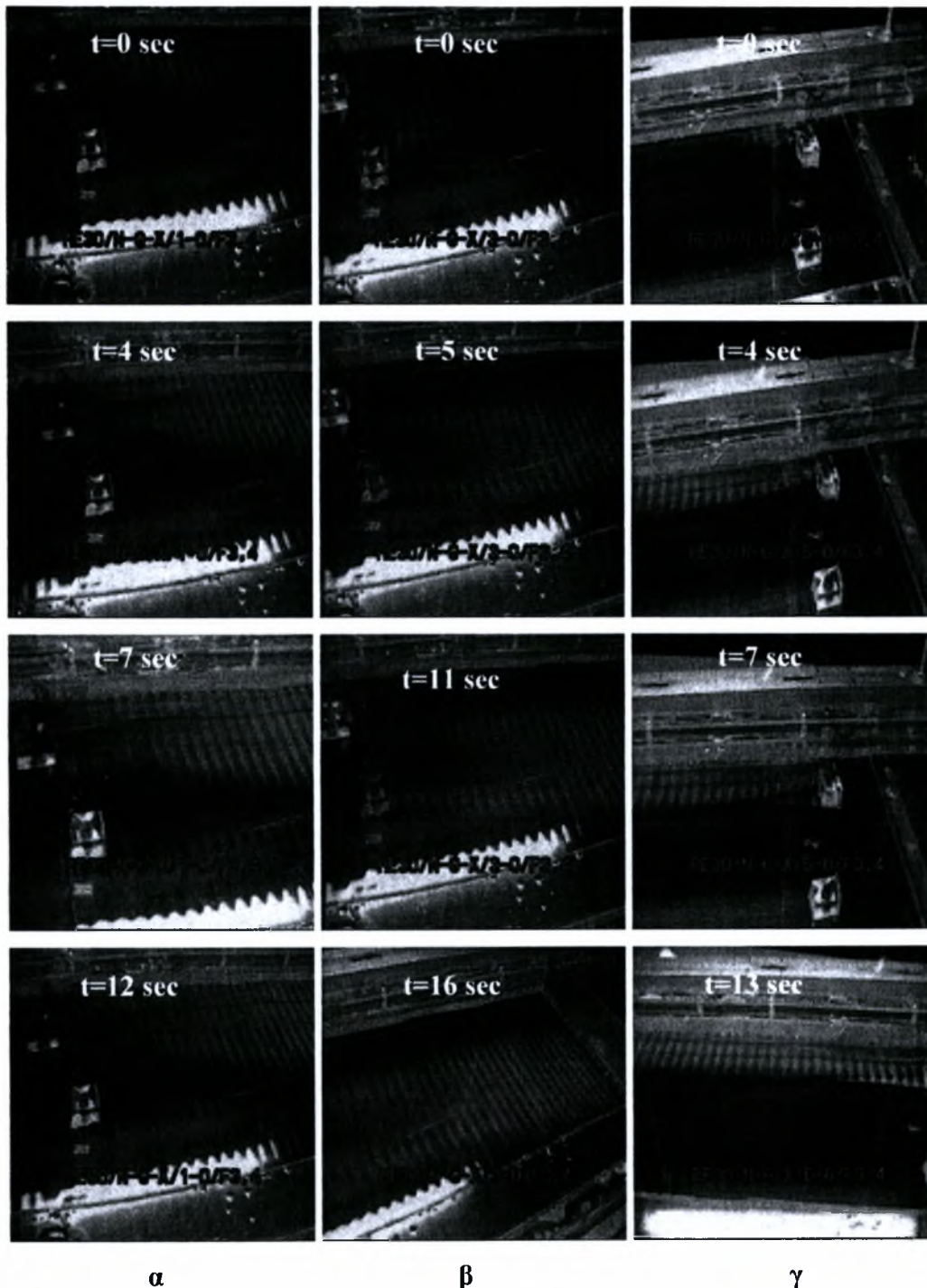


Σχήμα 4.27: Οπτικοποίηση της ροής για $Re=90$, ρευστό έγχυσης νερό-γλυκερίνη- χρωστική, με έγχυση από το ακροφύσιο 3 και ελάχιστη παροχή αντλίας α) $\varphi= 3.4^\circ$ β) $\varphi= 11^\circ$

4.4.3 Επίδραση του ακροφυσίου έγχυσης

Στο σχήμα 4.28 παρατηρούμε για κάθε ακροφύσιο και μία διαφορετική συμπεριφορά. Ο χρόνος ανάπτυξης μπορεί να είναι παρόμοιος αλλά η μορφή της εγκάρσιας διάχυσης διαφέρει. Το κάθετο ακροφύσιο 1, στην αρχή του καναλιού δεν επιτρέπει τη διάχυση ενώ προχωρώντας χωρικά

η ουσία καταλαμβάνει ομοιόμορφα όλο το πλάτος του καναλιού. Το ακροφύσιο με κατεύθυνση αντίθετη στη ροή (ακροφύσιο 3) λόγω του ότι επιτρέπει τον εγκλωβισμό της ουσίας στην κοιλότητα έγχυσης, δημιουργεί μία αρμονική διάχυση σε όλο το μήκος και πλάτος του τοιχώματος. Τέλος το ακροφύσιο που βρίσκεται σε πλάγια θέση (ακροφύσιο 5) δεν επιτρέπει ολική παρά μόνο μία τοπική εγκάρσια διάχυση σε όλο το μήκος του τοιχώματος.



Σχήμα 4.28: Οπτικοποίηση της ροής για $Re=30$, ρευστό έγχυσης νερό-γλυκερίνη- χρωστική, ελάχιστη παροχή αντλίας και γωνία κλίσης $3,4^\circ$ α) ακροφύσιο έγχυσης 1, β) ακροφύσιο έγχυσης 3, γ) ακροφύσιο έγχυσης 5

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Συμπεράσματα

5.1 Γενική κατανόηση του φαινομένου

Κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας έγινε κατανοητή η ροή υγρού υμένα πάνω σε περιοδικά διαμορφωμένα τοιχώματα και συγκεκριμένα σε ημιτονοειδές και τετραγωνικό τοίχωμα. Παρατηρήθηκαν και οπτικοποιήθηκαν οι ζώνες ανακυκλοφορίας που δημιουργούνται καθώς επίσης και η διάχυση του ρευστού έγχυσης σε διάφορες συνθήκες ροής.

Επιπλέον, δοκιμάστηκαν οι τεχνικές δεξιότητες και το θεωρητικό υπόβαθρο ώστε να στεφθεί με επιτυχία η κατασκευή και λειτουργία του συστήματος έγχυσης. Η χρήση των εργαλείων του εργαστηρίου για την επίτευξη της παραπάνω κατασκευής δεν ήταν μόνο θετική ως προς την αποκόμιση εμπειριών αλλά ταυτόχρονα και ευχάριστη.

5.2 Στοιχεία επίδρασης στη Ροή Υγρού Υμένα με σύστημα έγχυσης

Διαβάζοντας τη βιβλιογραφική ανασκόπηση και ολοκληρώνοντας την επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων, μπορούμε να συμπεράνουμε τους παράγοντες εκείνους που επηρεάζουν τη Ροή Υγρού Υμένα με σύστημα έγχυσης. Τα στοιχεία που παρατηρήθηκε ότι επιδρούν στη ροή, είναι το ρευστό έγχυσης, ο αριθμός Reynolds, η γωνία κλίσης του τοιχώματος, το ακροφύσιο έγχυσης και η παροχή της δοσομετρικής αντλίας. Κάθε στοιχείο από τα παραπάνω, με αλλαγή της τιμής του, έχει ως αποτέλεσμα την ομαλή ή μη ομαλή ροή του ρευστού λειτουργίας. Αυτές οι αλλαγές πρέπει πάντα να λαμβάνονται υπόψη, γιατί πέραν των αλλαγών στη μορφή της ροής μπορεί να αποτελέσουν και το έναυσμα για αλλαγές σε άλλα πεδία, όπως για παράδειγμα στο θερμοκρασιακό πεδίο.

5.2 Επίδραση στη Ροή

Με το σύστημα έγχυσης που προσαρμόστηκε στο κανάλι ροής, δόθηκε αρχικά η δυνατότητα επιλογής δύο διαλυμάτων έγχυσης. Χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά διαλύματα: διάλυμα νερού- χρωστικής και διάλυμα νερού- γλυκερίνης- χρωστικής. Η ουσία της γλυκερίνης ήταν αυτή που διαφοροποιούσε τη ροή. Η μεγάλη τιμή του ιξώδους της, υποχρέωνε το ρευστό έγχυσης να καθιζάνει στον πυθμένα του περιοδικά διαμορφωμένου τοιχώματος. Αυτό έχει ως

αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η εγκάρσια διάχυση της ουσίας στον υμένα. Επιπλέον το ιξώδες ήταν η βασική αιτία που δυσκόλευε το υδραυλικό άλμα μεταξύ των κοιλοτήτων του τοιχώματος.

Ο αριθμός Reynolds είναι αυτός που καθορίζει το πάχος του υμένα με αποτέλεσμα και την ύπαρξη ή μη των ζωνών ανακυκλοφορίας. Σε μικρούς αριθμούς Reynolds η ύπαρξη δινών είναι ανεπαίσθητη και πολύ δύσκολα μπορούσε να παρατηρηθεί και να οπτικοποιηθεί. Η εγκάρσια όμως διάχυση γινόταν με ευκολία. Το ακριβώς αντίθετο συνέβαινε σε υψηλότερους αριθμούς Reynolds. Το πάχος του υμένα μεγάλωνε και οι στροβιλισμοί ήταν εντονότατοι. Η εγκάρσια διάχυση δεν ήταν δυνατή λόγω συμπαρασυρμού της ουσίας έγχυσης. Η εξέλιξη του φαινομένου πραγματοποιούνταν σε μικρότερο χρονικό διάστημα, γεγονός αναμενόμενο αφού σε μεγάλους αριθμούς Reynolds η ταχύτητα του ρευστού λειτουργίας ήταν μεγαλύτερη.

Η κλίση του τοιχώματος ήταν αυτή που καθόριζε την επίδραση της βαρύτητας. Σε μικρούς αριθμούς Reynolds, μεγάλη τιμή της κλίσης (11° και άνω) υποχρέωνε στη δημιουργία δινών. Παρότι όμως το κανάλι ροής τέθηκε έως και 15° κλίση, δεν κατέστη δυνατό να παρατηρηθούν και δεύτερες ζώνες ανακυκλοφορίας μέσα στην ίδια κοιλότητα. Σε τέτοιες τιμές της κλίσης, δεν ήταν δυνατή η ευστάθεια του υμένα μιας και ο μικρότερος αριθμός Reynolds που χρησιμοποιήθηκε ($Re=30$) καθιστούσε τη ροή ασταθή. Σημείο αναφοράς ήταν η δημιουργία ρυτιδώσεων ως αρχή της αστάθειας και τα πεταλοειδή κύματα ως περιοχή πλήρους αστάθειας.

Η κατεύθυνση του ακροφυσίου έγχυσης καθόριζε τη διάχυση, τόσο τη διαμήκη όσο και την εγκάρσια. Ακροφύσια κάθετα στη ροή, με κατεύθυνση όμοια με αυτή της ροής και αυτά που βρίσκονταν σε πλάγια θέση επέτρεπαν τον ολικό συμπαρασυρμό του ρευστού έγχυσης κατά μήκος του καναλιού. Ακροφύσια με κατεύθυνση αντίθετη της ροής του ρευστού λειτουργίας, εγκλώβιζαν την εγχυνόμενη ουσία στην κοιλότητα έγχυσης με αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη εγκάρσια διάχυση.

Τέλος η παροχή της έγχυσης στη μέγιστη τιμή της μπορούμε να αναφέρουμε ότι «κατέστρεφε» το πείραμα. Υπήρχε μόνο διάχυση και σε καμία περίπτωση δεν ήταν δυνατή η παρατήρηση των ζωνών ανακυκλοφορίας. Για το λόγο αυτό η πλειοψηφία των πειραμάτων πραγματοποιήθηκε με τον ελάχιστη παροχή και μπόρεσαν να παρατηρηθούν τα προαναφερθέντα.

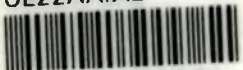
Κλείνοντας, θα σημειωθεί ότι η ροή υγρού υμένα πάνω από περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα, παρά τις πολυάριθμες εφαρμογές της δεν έχει μελετηθεί όσο η ροή στο επίπεδο τοίχωμα. Διεξοδικότερη μελέτη, θα δώσει λύσεις και πιθανότητα θα αποτρέψει αστοχίες και δυσλειτουργίες μελλοντικών και ήδη υπάρχουσων συσκευών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- **N. Malamataris, M. Vlachogiannis & V. Bontozoglou** 2002 *Solitary waves on inclined films: Flow structure and binary interactions*. Phys. Fluids, 14, 1082-1094.
- **Μ. Βλαχογιάννης** 2001 Διδακτορική Διατριβή, «Πειραματική μελέτη της ροής υγρού υμένα πάνω σε επίπεδο και σε κυματοειδές τοίχωμα»
- **Μ. Vlachogiannis & V. Bontozoglou** 2001 *Observations of solitary wave dynamics of film flows*. J. Fluid Mech., 435, 191-215
- **Μ. Vlachogiannis & V. Bontozoglou** 2002 Experiments on laminar film flow along a corrugated wall. J. Fluid Mech., 457, 133-156.
- **Μ. Βλαχογιάννης & Β. Μποντόζογλου**, Πειραματική μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς μοναχικών κυμάτων σε ροή υγρού υμένα. *3ο Πανελλήνιο Επιστημονικό Συνέδριο Χημικής Μηχανικής*, Αθήνα, Μάιος 2001
- **Μ. Βλαχογιάννης & Β. Μποντόζογλου**, Πειραματική μελέτη των αλληλεπιδράσεων σολιτονικών κυμάτων σε ιξώδη ροή υγρού υμένα. "*Ημερίδα: Ερευνητικές δραστηριότητες στα φαινόμενα ροής ρευστών στην Ελλάδα*, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Μάιος 2000
- **Wierschem A, Scholle M, Aksel N**, Vortices in film flow over strongly undulated bottom profiles at low Reynolds numbers PHYSICS OF FLUIDS 15 (2): 426-435 FEB 2003
- **Wierschem A, Lepski C, Aksel N**, Effect of Bottom Undulations on the Film Thickness in Gravity Driven Flow ACTA MECHANICA 179 (1-2): 41-66 2005
- **Wierschem A, Aksel N**, Influence of inertia on eddies created in films creeping over strongly undulated substrates PHYSICS OF FLUIDS 16 (12): 4566-4574 DEC 2004



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000085874