

*ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ*

*ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ*

*ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ*

Διπλωματική Εργασία

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥ ΥΓΡΟΥ  
ΥΜΕΝΟΣ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΑΝΑΒΑΘΜΟ**

υπό

**ΖΗΣΗ ΓΕΩΡΓΙΟΥ**

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας

2008



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

Αριθ. Εισ.: 6726/1  
Ημερ. Εισ.: 11-11-2008  
Δωρεά: Συγγραφέα  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ  
2008  
ΖΗΣ

© 2008 Γεώργιος Ζήσης

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).

**Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:**

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων) Δρ. Μποντόζογλου Βασίλειος  
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Ανδρίτσος Νικόλαος  
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Βαλουγεώργης Δημήτριος  
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## Ευχαριστίες

Φτάνοντας στο τέλος των σπουδών μου, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμώς όλους και όλες που μου συμπαραστάθηκαν συνεχώς και αδιαλείπτως. Οφείλω ένα ευχαριστώ στους υποψήφιους διδάκτορες Βλάση Λεοντίδη και Χριστίνα Τζωτζη για την προμήθεια εκπαιδευτικού υλικού και τη δημιουργία φιλικής ατμόσφαιρας στο εργαστήριο. Ευχαριστώ θερμώς τον Αθανάσιο Βέργο για την καθοριστική του βοήθεια στο κατασκευαστικό και υδραυλικό κομμάτι της εργασίας αυτής και στην εξοικείωσή μου με τα διάφορα εργαλεία. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στα μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής κκ Ανδρίτσο Νικόλαο, Βαλουγεώργη Δημήτριο και ιδιαιτέρως στον καθηγητή μου Μποντόζογλου Βασίλειο, για τον πολύτιμο χρόνο που μου αφιέρωσε παρά τα στενά περιθώρια, λόγω της καινούργιας του ιδιότητας στην πανεπιστημιακή μας κοινότητα.

Γεώργιος Ζήσης

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥ ΥΓΡΟΥ  
ΥΜΕΝΟΣ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΑΝΑΒΑΘΜΟ**



Γεώργιος Ζήσης

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, 2008

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Μποντόζογλου Βασίλειος, Καθηγητής φαινομένων  
μεταφοράς, συσκευών θερμικών διεργασιών

## Περίληψη

Η ροή υγρού υμένα είναι ένα φαινόμενο που απαντάται σε πολλές εφαρμογές. Τα κυριότερα πεδία εφαρμογής του είναι οι συσκευές εναλλαγής θερμότητας και μάζας, οι στήλες απορρόφησης, και οι καταλυτικοί αντιδραστήρες.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, αντικείμενο μελέτης μας είναι η ροή κατακόρυφου υγρού υμένα πάνω από αναβαθμό. Πιο συγκεκριμένα, σκοπός της εργασίας αυτής είναι η ανάδειξη της αλληλεπίδρασης της ροής κατακόρυφου υμένα με αναβαθμό εσοχής ή εξοχής στο τοίχωμα. Η μελέτη είναι πειραματική και επικεντρώθηκε στην οπτικοποίηση των διαφοροποιήσεων της ροής στην περιοχή του αναβαθμού. Σε κατακόρυφο κανάλι ροής, μήκους 1 m, και πλάτους 21 cm, τοποθετήθηκε ο αναβαθμός, σε απόσταση 20 cm από την κορυφή του καναλιού. Χρησιμοποιήθηκε αντλία, η οποία συνδέθηκε με τον αναστροφέα ρεύματος, για ρύθμιση της παροχής. Επίσης, πραγματοποιήθηκαν οι συνδέσεις τις αντλίας με τα λάστιχα και την κύρια δεξαμενή, απ'όπου τραβάει η αντλία το ρευστό του πειράματος. Το φαινόμενο παρατηρήθηκε σε διάφορες συνθήκες ροής και η οπτικοποίησή του έγινε με τη βοήθεια βιντεοκάμερας.

Στα κεφάλαια της εργασίας, παρατίθενται η βιβλιογραφική ανασκόπηση της ροής του υγρού υμένα (γενικά και με αναβαθμό), η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε και εικόνες από την οπτικοποίηση της ροής. Στο τέλος εκθέτονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την παρατήρηση και μελέτη του φαινομένου αυτού.

## Πίνακας περιεχομένων

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>1</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ</b>	
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	3
2.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ.....	3
2.3 ΡΟΗ ΜΕ ΑΝΑΒΑΘΜΟ (ΕΙΣΑΓΩΓΗ) .....	6
2.3.1. ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΕΡΕΥΝΩΝ.....	6
2.3.2 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΑΔΡΑΝΕΙΑΣ ΣΤΟΝ ΑΝΑΒΑΘΜΟ ΕΞΟΧΗΣ.....	7
2.3.3 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΑΔΡΑΝΕΙΑΣ ΣΤΟΝ ΑΝΑΒΑΘΜΟ ΕΞΟΧΗΣ.....	12
2.3.4 Η ΚΛΙΜΑΚΑ ΜΗΚΟΥΣ ΤΩΝ ΤΡΙΧΟΕΙΔΩΝ .....	15
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 :</b>	
3.1 ΣΤΗΣΙΜΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ .....	18
3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.....	32
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΟΠΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ.....</b>	<b>33</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 :</b>	
5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	68
5.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	69
5.3 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	71



## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 3.1. Απεικόνιση Καναλιού Ροής.....	19
Εικόνα 3.2. Απεικόνιση Καναλιού Ροής με την πρόσθεση του Αναβαθμού .....	20
Εικόνα 3.3. Απεικόνιση Δευτερευούσης Δεξαμενής και σωληνώσεων που επιτρέπουν την εισροή του υγρού.....	21
Εικόνα 3.4. Απεικόνιση Συστήματος Απορροής, Μεταλλικής Σήτας και Λάστιχου .....	22
Εικόνα 3.5. Απεικόνιση Αντλίας με εξωτερική συνδεσμολογία γранаζιών .....	23
Εικόνα 3.6. Απεικόνιση Γранаζωτής Αντλίας .....	24
Εικόνα 3.7. Απεικόνιση Συνδεσμολογίας του Αναστροφέα .....	26
Εικόνα 3.8. Απεικόνιση Συνδεσμολογίας των φάσεων και της γείωσης του Αναστροφέα με τον Ηλεκτροκινητήρα της Αντλίας.....	27
Εικόνα 3.9. Απεικόνιση Κεντρικής Δεξαμενής.....	28
Εικόνα 3.10. Απεικόνιση Σύνδεσης Αντλίας με την Κεντρική Δεξαμενή .....	29
Εικόνα 3.11. Απεικόνιση Σύνδεσης Αντλίας με τη Δευτερεύουσα Δεξαμενή .....	30

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1. Πειραματικά αποτελέσματα υπό σταθερές στροφές και μεταβαλλόμενη πίεση .....	24
Πίνακας 3.2. Μέγιστα όρια λειτουργίας της αντλίας .....	25
Πίνακας 3.3. Χαρακτηριστικά του Ηλεκτροκινητήρα .....	25
Πίνακας 5.1. Πίνακας Χαρακτηρισμού του Διαλύματος με βάση το δείκτη διάθλασης που μετρήθηκε από το Διαθλασίμετρο.....	71
Πίνακας 5.2. Πίνακας Προσδιορισμού Πυκνότητας του Διαλύματος.....	72
Πίνακας 5.2. Πίνακας Προσδιορισμού Ιξώδους του Διαλύματος .....	73
Πίνακας 5.3. Πίνακας Αποτελεσμάτων του Πειράματος.....	74

## Κατάλογος Γραφημάτων

Γράφημα 5.1. Διάγραμμα Συχνότητας Αντλίας - Παροχής.....	76
--	----

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ροές υγρού υμένα εντοπίζονται σε πολλές εφαρμογές, από γεωφυσικές ως βιολογικές, και είναι πρωτεύουσας σημασίας σε πολλές βιομηχανικές διαδικασίες. Απαντώνται σε συσκευές εναλλαγής θερμότητας (εξατμιστήρες, συμπυκνωτές), εναλλαγής μάζας (στήλες απορρόφησης με πληρωτικά υλικά), στήλες απορρόφησης, καταλυτικούς αντιδραστήρες. Έχουμε ροές υγρού υμένα σε επίπεδες και σε ανώμαλες επιφάνειες. Στην πρώτη περίπτωση εντατικοποιούνται οι συντελεστές μεταφοράς μάζας και θερμότητας οι οποίοι εξαρτώνται από τα ρευστοδυναμικά χαρακτηριστικά του υμένα, όπως το πάχος υμένα, το ύψος κυμάτων που εμφανίζονται, το είδος των κυμάτων, τις αστάθειες που λαμβάνουν χώρα. Στη δεύτερη περίπτωση, οι επιφάνειες είναι διαμορφωμένες είτε σκόπιμα είτε τυχαία. Χαρακτηριστικά είναι τα παραδείγματα με τραχείες επιφάνειες που χρησιμοποιούνται για την επίσπευση της διαδικασίας εναλλαγής μάζας και ενέργειας σε συσκευές διεργασιών. Επίσης συμβάλουν σε ποικίλες διαδικασίες επίστροφης και απόθεσης υμένα στην ηλεκτρονική βιομηχανία, όπως για παράδειγμα στις συσκευές ψηφιακής αποθήκευσης πληροφοριών. Στις σύγχρονες εφαρμογές, κυρίως η περιστροφική κίνηση ωθεί τον υμένα να έχει ροή και όχι η βαρύτητα. Για αυτό το λόγο είναι πολύ ενδιαφέρουσα η μελέτη ρέοντος υμένα, του οποίου η κατεύθυνση είναι ίδια με αυτή της δύναμης.

Στην παρούσα εργασία μας απασχόλησε η αλληλεπίδραση της ροής κατακόρυφου υγρού υμένα με αναβαθμό (σκαλοπάτι) εσοχής ή εξοχής στο τοίχωμα. Η εργασία είναι πειραματική και επικεντρώθηκε σε οπτική παρατήρηση (με βιντεοκάμερα) των διαφοροποιήσεων της ροής στην περιοχή του αναβαθμού. Οι παρατηρήσεις μας επιβεβαίωσαν θεωρητικές προβλέψεις για την επίδραση των τριχοειδών και των αδρανειακών δυνάμεων στη ροή. Επίσης έδειξαν, ότι, σε αριθμούς Reynolds μεγαλύτερους του 10, βασικό χαρακτηριστικό της ροής είναι η παγίδευση (entrainment) θυλάκων αέρα στην βάση του αναβαθμού.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μία θεωρητική ανάλυση για τη βασική ροή υγρού υμένα σε επίπεδο τοίχωμα καθώς επίσης και για τη ροή με σκαλοπάτι (step in/ step out), το οποίο είναι το αντικείμενο μελέτης μας.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθήσαμε για να επιτευχθεί το πείραμα. Παρατίθενται στοιχεία, αντικείμενα που χρησιμοποιήθηκαν για τη βελτίωση της ήδη υπάρχουσας πειραματικής διάταξης, φωτογραφίες της και σχέδια. Γίνεται ενδελεχής αναφορά για τις κατασκευαστικές ενέργειες στις οποίες προβήκαμε και ο τρόπος με τον οποίον έγινε η οπτικοποίηση της ροής.

Στο τέταρτο κεφάλαιο προβάλλονται τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Παρατίθενται εικόνες από την απαθανάτιση της ροής του υγρού υμένα στους αναβαθμούς εσοχής και εξοχής. Η συλλογή των φωτογραφιών έγινε με βασική παράμετρο της παροχής υγρού, η οποία σταδιακά αυξανόταν. Η παροχή καθορίζει τον αριθμό  $Re$  της ροής, ο οποίος αποτελεί τον κεντρικό αδιάστατο αριθμό του οποίου την επίδραση μελετούμε.

Έπειτα στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο γίνεται αναφορά των συμπερασμάτων στα οποία καταλήξαμε από την ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων, και της βιβλιογραφίας. Επίσης παρατίθεται το παράρτημα με τους πίνακες των αποτελεσμάτων του πειράματος (πίνακας 5.3), των φυσικών ιδιοτήτων

του ρευστού που μελετάμε (πίνακες 5.2) και το διάγραμμα μας (διάγραμμα 5.1) που απεικονίζει τη σχέση του αριθμού Reynolds με την παροχή του υγρού.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

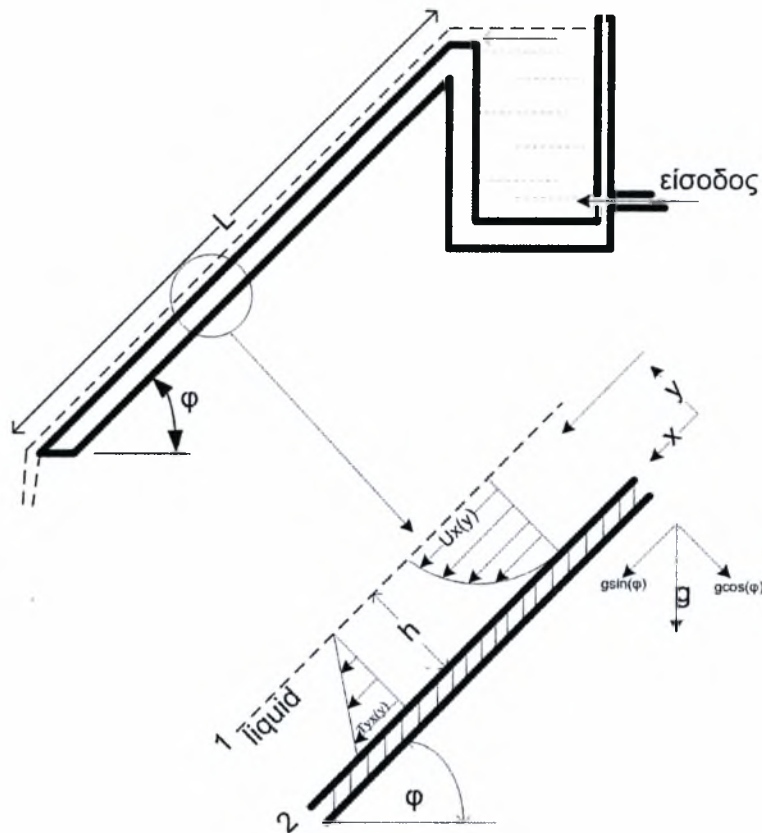
#### ΒΑΣΙΚΗ ΡΟΗ ΥΓΡΟΥ ΥΜΕΝΟΣ

##### 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο στόχος της βιβλιογραφικής ανασκόπησης είναι να βοηθήσει το μελετητή της διπλωματικής εργασίας να εξοικειωθεί τόσο με το θεωρητικό κομμάτι της όσο και με το πρακτικό. Στο κεφάλαιο αυτό αναγράφονται εν συντομία οι μαθηματικές σχέσεις και οι αδιαστατοποιημένες τους μορφές, οι οποίες προσομοιώνουν τη ροή υγρού υμένα σε κάθετη επιφάνεια. Η μελέτη αυτή έγινε στην ήδη υπάρχουσα κάθετη διάταξη (κανάλι) και στην ουσία είναι μία συνέχεια της διπλωματικής εργασίας του φοιτητή Τζανιδάκη Ευαγγέλου.

##### 2.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ

Τα κεκλιμένα επίπεδα ροής παρουσιάζουν δύο οριακές περιπτώσεις. Την περίπτωση όπου η κλίση είναι μηδενική (οριζόντιο τοίχωμα) και την περίπτωση όπου η κλίση λαμβάνει την τιμή των 90 μοιρών (κάθετο τοίχωμα). Η προσομοίωση του καθέτου τοιχώματος ροής επεξηγείται επαρκώς με εξισώσεις που έχουν αναπτυχθεί για τη μελέτη ροών σε κεκλιμένο επίπεδο θέτοντας ως γωνία στις μαθηματικές εκφράσεις αυτή των 90 μοιρών. Για να έχουμε ρεαλιστικά αποτελέσματα από το πείραμά μας πρέπει οι αποκλίσεις από την παραπάνω τιμή να είναι ελάχιστες. Είναι ανέφικτο επί της ουσίας η τοποθέτηση τοιχώματος ή καναλιού χωρίς ανοχές έστω και απειροελάχιστες. Έτσι στην περίπτωσή μας, το κάθετο τοίχωμα φέρει κλίση μεταξύ 89.2 και 89.7 μοιρών. Με βάση την παρακάτω σχηματική αναπαράσταση ροής σε κεκλιμένο επίπεδο (σχήμα 2.2.1) και των προφίλ της ταχύτητας ελευθέρως πτώσεως και διατμητικής τάσεως του ρευστού, αναπτύχθηκαν μαθηματικές εξισώσεις των οποίων τα αποτελέσματα αποτελούν χρηστικό εργαλείο στην εμβάθυνση και ευρύτερη κατανόηση των φαινομένων της ροής.



Σχήμα 2.2.1. Αναπαράσταση Ροής σε Κεκλιμένο επίπεδο

Η επίλυση της εξισώσεως ενέργειας στο παραπάνω πρόβλημα της ροής σε κεκλιμένο επίπεδο και η επιλογή ενός πολύ μικρού τμήματος στο τοίχωμα της πλάκας, όπως αναπαρίσταται και στο σχήμα 2.2.1, παρουσιάζει ενδιαφέροντα αποτελέσματα.

$$\begin{aligned}
 & \text{(ΕΙΣΡΟΗ)} - \text{(ΕΚΡΟΗ)} + \text{(ΠΑΡΑΓΩΓΗ)} + \left( \overbrace{\text{ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗ}}^{=0} \right) = 0 \Rightarrow \\
 & \left( \tau_{xy} \Big|_y - \tau_{xy} \Big|_{y+dy} \right) \cdot L \cdot W + \overbrace{\text{ΠΑΡΑΓΩΓΗ}}^{g_x \cdot \rho \cdot (W \cdot L \cdot dy)} + 0 = 0
 \end{aligned}$$

#### Εξίσωση 2.2.1. Ισοζύγιο Μάζας

Ορίζοντας συνοριακές συνθήκες στη διεπιφάνεια του υγρού και του περιβάλλοντος αέρα ( $y = h$ ,  $\tau_{xy} = 0$  άρα  $u_x = u_{\max}$ ) και στη διεπιφάνεια του υγρού και του τοιχώματος ( $y = 0$ ,  $\tau_{xy} = \max$  άρα  $u_x = 0$ ) προκύπτει η έκφραση της ταχύτητας κατά το μήκος του τοιχώματος.

Γεώργιος Ζήσης- "Πειραματική μελέτη ροής κατακόρυφου υγρού υμένα πάνω από αναβαθμό" .σχολή Μηχανολόγων Μηγ/κών Βιομηχανίας

$$U_x(y) = \frac{\rho \cdot g_x \cdot h^2}{\mu} \cdot \left[ \left( \frac{y}{h} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{y}{h} \right)^2 \right]$$

### Εξίσωση 2.2.2. Έκφραση Ταχύτητας Υμένοσ

Το μέγεθος το οποίο πρέπει να οριστεί με χρήση της εξισώσεως 2.2.2 είναι η τιμή της μέσης ταχύτητας του υμένοσ ροής διότι βάση αυτής, ορίζονται οι υπόλοιποι αδιάστατοι τιμάριθμοι (Re, Nu) οι οποίοι χαρακτηρίζουν μία ροή. Εν προκειμένω, με επίλυση της εξισώσεως 2.2.3 υπολογίζεται η μέση ταχύτητα ροής.

$$\langle U_x \rangle = \frac{\int_0^w \int_0^h U_x \cdot dy \cdot dz}{\int_0^w \int_0^h dy \cdot dz} = \frac{1}{h} \int_0^h U_x \cdot dy = \frac{\rho \cdot g_x \cdot h^2}{3\mu} = \frac{2}{3} U_{\max}$$

### Εξίσωση 2.2.3. Έκφραση Μέσης Ταχύτητας Υμένοσ

Επομένως ο αδιάστατος αριθμός Reynolds μπορεί να συσχετιστεί με την παραπάνω έκφραση της μέσης ταχύτητας ως εξής :

$$\mathbf{Re} = \frac{\rho \cdot \langle U_x \rangle \cdot h_N}{\mu} = \frac{q}{\nu}$$

### Εξίσωση 2.2.4. Αριθμός Reynolds

Όπου  $\rho$  η πυκνότητα του ρευστού,  $U_x$  η μέση τιμή της ταχύτητας,  $\mu$  το δυναμικό ιξώδες του ρευστού,  $h_N$  = το ύψος του υμένοσ κατά Nusselt,  $q$  η ογκομετρική παροχή ανά μονάδα πλάτους του καναλιού και  $\nu$  το κινηματικό ιξώδες του ρευστού ( $\nu = \mu/\rho$ ) ενώ το ύψος κύματος  $h_N$  δίνεται από τη σχέση 2.2.5 :

$$h_N = \sqrt[3]{\frac{3q\mu}{\rho g \sin \phi}} \quad \text{ή} \quad h_N = \sqrt{\frac{3\mu \cdot u_o}{\rho g \sin \phi}}$$

### Εξίσωση 2.2.5.

Μία επιπλέον αδιάστατη σχέση η οποία εισάγεται στη μελέτη ροής είναι αυτή του Kapitza

Γεώργιος Ζήσης-''Πειραματική μελέτη ροής κατακόρυφου υγρού υμένα πάνω από αναβαθμό'', σχολή Μηχανολόγων Μηγ/κών Βιομηχανίας

$$Ka = \gamma / (\rho \cdot v^{4/3} \cdot g^{1/3})$$

### Εξίσωση 2.2.6

Το μεγάλο πλεονέκτημα της παραπάνω εξίσωσης είναι ότι ως αριθμός χαρακτηρίζεται μόνο από τις φυσικές ιδιότητες του ρευστού και όχι από τις ογκομετρικές παροχές του. Το μειονέκτημα όμως το οποίο παρουσιάζει η σχέση Karitza, είναι η δυσκολία συσχέτισεως της ροής και της δομής των κυματομορφών, οι οποίες δημιουργούνται κατά την ελεύθερη κίνηση της.

## 2.3 ΡΟΗ ΜΕ ΑΝΑΒΑΘΜΟ (ΣΚΑΛΟΠΑΤΙ)

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Έχουν διεξαχθεί αρκετές μελέτες γύρω από το θέμα ροής υγρών υμένων σε κάθετο κανάλι στο έδαφος, πάνω από σκαλοπάτι. Οι έρευνες αυτές πραγματοποιήθηκαν κυρίως για αριθμούς Reynolds από  $10^{-3} - 10^2$ , και τριχοειδής αριθμούς Ca από  $10^{-2} - 10^1$ . Η κλίμακα μήκους των τριχοειδών φαινομένων της ελεύθερης επιφάνειας στο πάνω μέρος του step-in ή του step-out μειώνεται ομοιόμορφα με την αύξηση του Reynolds. Το ύψος των τριχοειδών μορφών στην αρχή αυξάνει με το Re, αλλά εν τέλει μειώνεται όταν οι δυνάμεις της αδράνειας ξεπερνούν τις τριχοειδείς δυνάμεις. Ταυτόχρονα, η δυναμική της ροής μετακινείται από το πάνω μέρος του σκαλοπατιού στο κάτω, και μετατρέπεται από τριχοειδή επιβράδυνση σε αδρανειακή αλλαγή κατεύθυνσης του κακρημνιζόμενου υγρού. Ο τελευταίος μηχανισμός περιλαμβάνει μία φουσαλίδα χαμηλής πίεσης, η οποία προέρχεται από την άκρη του σκαλοπατιού. Στο step-out, μία νέα ελεύθερη επιφάνεια εμφανίζεται με την σταδιακή αύξηση του Re, η οποία προκαλείται από την μεγάλη ποσότητα υγρού που ρέει στο σκαλοπάτι, στην οριζόντια κατεύθυνση, και συγκρατείται αρχικά από τις τριχοειδείς δυνάμεις και ακολούθως από τις δυνάμεις αδράνειας. Οι έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί επαληθεύουν τα παραπάνω φαινόμενα.

#### 2.3.1. ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΕΡΕΥΝΩΝ

Ένα ενδιαφέρον θέμα για μελέτη είναι η ανταπόκριση του ρέοντος υγρού υμένος σε τοπογραφικές αλλαγές, όπως το step-in ή το step-out. Οι πλειοψηφία των σχετικών ερευνών επικαλέστηκαν την προσέγγιση λίπανσης στα όρια της ροής Stokes (Stillwagon & Larson, το 1990, Pritchard, Scott & Tavener, το 1992, Kalliadasis, Bielarz & Homsy, το 2000, Aksel, το 2000, Kalliadasis & Homsy, το 2001, Decre & Baret, το 2003, Gaskell, Jimack, Sellier, Thompson & Wilson, το 2004). Σημαντικά αποτελέσματα είναι και η επιβεβαίωση της ακρίβειας της συγκεκριμένης προσέγγισης, ακόμα και έξω από τα όρια της επίσημης ισχύος της, και η ταυτοποίηση των ισχυρών τριχοειδών φαινομένων στο "ξεκίνημα" κάθε τοπογραφικής αλλαγής. Ειδικότερα, σχηματίζεται μία προεξοχή πριν το step-in και μία "γούβα" πριν το step-out. Επίσης, έγινε αριθμητική έρευνα, στα πλαίσια του



Stokes, από τον Pozrikidis, το 1988. Άλλη σχετική έρευνα πραγματοποιήθηκε από τους Mazouhi & Homsy, το 2001, η οποία μας παρέχει μία πλήρη ερμηνεία του δυναμικού ρόλου της τριχοειδούς προεξοχής που εμφανίζεται πριν το step-in.

Η σημασία των αδράνειας στο φαινόμενο της ροής υγρού υμένου πάνω από σκαλοπάτι έχει συζητηθεί επανειλημμένα (see for example Oron, Davis and Bankoff, το 1997). Όμως τα περισσότερα από τα διαθέσιμα αποτελέσματα για τοίχο ανωμάλου επιφανείας, αναφέρονται είτε σε μόνιμη καμπυλότητα (Kalliadasis & Chang, το 1994, Davis & Bankoff, το 2001 και Noakes, King & Riley, το 2006) είτε καμπυλότητα η οποία μεταβάλλεται με αργούς ρυθμούς (Ruschak & Weinstein, το 2003 και Roberts & Li το 2006). Οι Khayat, Kim & Delosquer το 2004 αναφέρθηκαν στα παροδικά φαινόμενα της αδράνειας σε αξονοσυμμετρική ροή υμένου πάνω από λείες επιφάνειες των step-ins και step-outs. Ο Gaskell, το 2004 υπολόγισε κάποιες μόνιμες ροές με πεπερασμένο αριθμό  $Re$ , κατά μήκος ορθογωνίων κοιλωμάτων, σε μία έρευνα η οποία ήταν κυρίως εστιασμένη στο 3-διάστατο χώρο στο πλαίσιο της θεωρίας λίπανσης.

Στην περίπτωση μας, μας ενδιαφέρει περισσότερο πώς επιδρά το φαινόμενο της αδράνειας κατά τη ροή του ρέοντος υμένου στο step-in και στο step-out, καθώς επίσης και η κλίμακα μήκους των τριχοειδών.

### 2.3.2. ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΑΔΡΑΝΕΙΑΣ ΣΤΟΝ ΑΝΑΒΑΘΜΟ ΕΞΟΧΗΣ (STEP-IN)

Τα φαινόμενα της αδράνειας και τα τριχοειδή, τα οποία δρουν παράλληλα, παρουσιάζονται στις εικόνες 2.3.1, όπου παρουσιάζονται τα προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας συναρτήσει του  $Re$  για το step-in με αδιάστατο βάθος  $\delta=1$  και τριχοειδή αριθμό  $Ca=0.01$  και  $0.075$  αντίστοιχα. Εύκολα παρατηρείται ότι το μήκος των τριχοειδών χαρακτηριστικών μειώνονται ομοιόμορφα με το  $Re$  και τον  $Ca$ . Επίσης, με την αύξηση του  $Re$  η ελεύθερη επιφάνεια γίνεται πιο κυματώδης και η προεξοχή σταδιακά μετατρέπεται σε μία σειρά από στάσιμα τριχοειδή κύματα. Η μείωση στο τριχοειδές μήκος με την αύξηση της αδράνειας, αυτό συνοδεύεται από ένα σταδιακό εκτόπισμα της προεξοχής προς την τοπογραφική ασυνέχεια.

Το ύψος της τριχοειδούς προεξοχής είναι αντιστρόφως ανάλογο με το  $Ca$ , για παράδειγμα ισχυρή τάση στην επιφάνεια συμβάλλει σε πιο έντονα χαρακτηριστικά. Όμως, η εξάρτηση από την αδράνεια είναι μη-μονοτονική. Με την αύξηση του  $Re$ , η τριχοειδής προεξοχή αρχικά μεγαλώνει σε ύψος, φτάνει ένα μέγιστο το οποίο είναι σημαντικά υψηλότερο, αλλά μετά μειώνεται και εν τέλει εξαφανίζεται εντελώς. Η εξέλιξη αυτή μετατίθεται χρονικά σε υψηλότερους  $Re$ , με το  $Ca$  να μειώνεται. Η εξαφάνιση αυτή των τριχοειδών χαρακτηριστικών απεικονίζεται στο 2.3.1.b, δεδομένου ότι δε συνετελέστη για κάποιους  $Re$ , κάτι το οποίο απεικονίζεται στο 2.3.1.a.

Η ποικιλία των χαρακτηριστικών της τριχοειδούς προεξοχής απεικονίζεται στις εικόνες 2.3. Η εξάρτηση της προεξοχής από το  $Re$  και το  $Ca$  απεικονίζεται στο 2.3.2.a, για  $\delta=1$ . Με τη μείωση του  $Ca$ , το μέγιστο ύψος γίνεται ισχυρότερο, συμβαίνει σε μεγαλύτερους  $Re$  και συνοδεύεται από ένα ευρύτερο υψίπεδο. Η εξαφάνιση της προεξοχής με την αύξηση της αδράνειας σημειώνεται σε αριθμό  $Re$  αντιστρόφως ανάλογο του  $Ca$ . Αυτή η τάση επιβεβαιώνεται από το 2.3.2.b, όπου τα σημεία είναι αριθμητικά δεδομένα των τιμών όπου η τριχοειδής διαμόρφωση εξαφανίζεται. Η εξαφάνιση της προεξοχής σε σταθερό αριθμό

Weber  $W_e = \frac{Re \cdot Ca}{3}$  [ ερμηνεύεται σαν αποτέλεσμα της κυριαρχίας της αδράνειας πάνω στις τριχοειδείς δυνάμεις.

Η επίδραση του αδιάστατου μήκους,  $\delta$ , παρουσιάζεται στο 2.3.2.c, όπου το ύψος της προεξοχής είναι σε σχέση με το  $\delta$ , και συναρτήσεως του  $Re$  (άξονας  $x$ ), για  $Ca=0.075$  και  $\delta=0.01, 0.5$ , και  $1.0$ . Αν μεγαλώσουμε το βάθος του σκαλοπατιού, αυτό επιδρά σε μεγαλύτερο βαθμό στην ελεύθερη επιφάνεια και εκτοπίζει και το μέγιστο και το σημείο εξαφάνισης. Σα συνέπεια του τελευταίου, ο αριθμός Weber ο οποίος αντιστοιχεί στην εξαφάνιση της προεξοχής (συγκεκριμένα θεωρείται ότι  $We = \frac{5}{3}$  για  $\delta=1$ ) δεν είναι σταθερός, αλλά ποικίλει ανάλογα με το αδιάστατο βάθος του σκαλοπατιού.

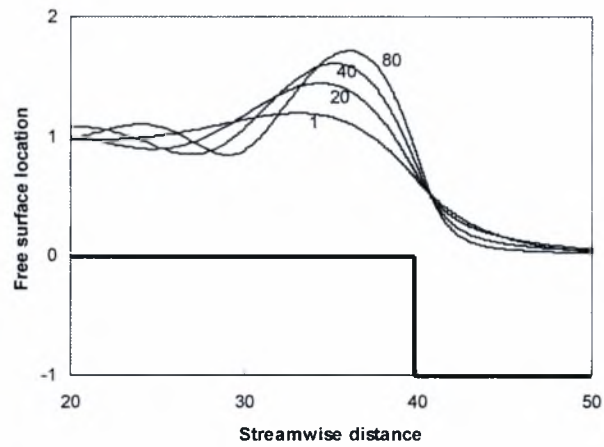
Τα χαρακτηριστικά της ελεύθερης επιφάνειας μπορεί να αλληλεπιδράσουν με την τοπική δομή της ροής, η οποία επιβάλλεται από τις τοπογραφικές αλλαγές. Πιο συγκεκριμένα, η ροή στο *step-in* υποβάλλεται σε αδρανειακό διαχωρισμό σε κάποιο πεπερασμένο  $Re$ , και η δίνη είναι εμφανέστατη, ιδιαιτέρως για  $\delta$  γύρω στο 1. Μία “αντιπροσωπευτική” εξέλιξη της δίνης με την αύξηση του  $Re$  απεικονίζεται στις εικόνες 2.3.3 για  $Ca = 0.075$  και  $\delta = 1$ . Παρατηρείται ότι η δίνη αρχικά μεγαλώνει, μετά παραμένει χονδρικά σταθερή σε μέγεθος για  $Re$  από 10 μέχρι 40, και τελικά συνεχίζει να μεγαλώνει μετά την εξαφάνιση της τριχοειδούς προεξοχής. Επίσης, με την αύξηση του  $Re$ , η ελεύθερη επιφάνεια πάνω από το *step-in* τείνει βαθμιαία να ευθυγραμμιστεί με τη διαχωριστική γραμμή της δίνης, και εν τέλει γίνεται παράλληλο σε αυτό, μετά την εξαφάνιση της προεξοχής.

Δύο πρόσθετες λεπτομέρειες της ροής, η οποίες σημειώνονται σε κάποια όρια στην παράμετρο του χώρου, απεικονίζονται στις εικόνες 2.3.4. Η 2.3.4.a μαρτυρά ότι σε πολύ μικρούς  $Re$ , ο διαχωρισμός σε ένα “βαθύ” σκαλοπάτι μπορεί να περιοριστεί στην άκρη του σκαλοπατιού. Η ροή προσκολλάται επιπλέον κατά μήκος του μετώπου του σκαλοπατιού και διαχωρίζεται πάλι στην περιοχή της γωνίας. Η εικόνα 2.3.4.b αναφέρεται στις συνθήκες οι οποίες οδηγούν σε μία μεγάλη προεξοχή ( $Re = 100$ ,  $Ca = 0.02$ ) και μας δείχνει ότι ο συνδυασμός του τριχοειδούς κυματισμού με την αυξημένη αδράνεια μπορεί να συμβάλλει σε επιπρόσθετο διαχωρισμό της περιοχής κάτω από την προεξοχή και πριν την άκρη του σκαλοπατιού.

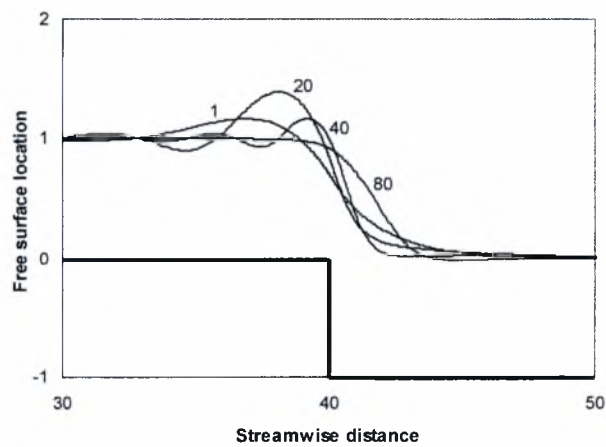
Επί της ουσίας, παρατηρείται ο σχηματισμός μίας τριχοειδούς παραμόρφωσης της ελεύθερης επιφάνειας ανάντη της ακμής του αναβαθμού εσοχής, η οποία με την αύξηση του  $Re$ , σταδιακά μειώνεται, μέχρι την πλήρης εξάλειψή της. Από κάποιο  $Re$  και μετά, παρατηρούνται ποσότητες αέρα, οι οποίες παγιδεύονται κατάντη της ακμής αναβαθμού εσοχής, και με την αύξηση του  $Re$  μετατρέπονται πρώτα σε εγκλείσματα αέρα και στη συνέχεια σε ένα σχετικά ομοιόμορφο στρώμα αέρα.

Σχήμα 2.3.1

a)

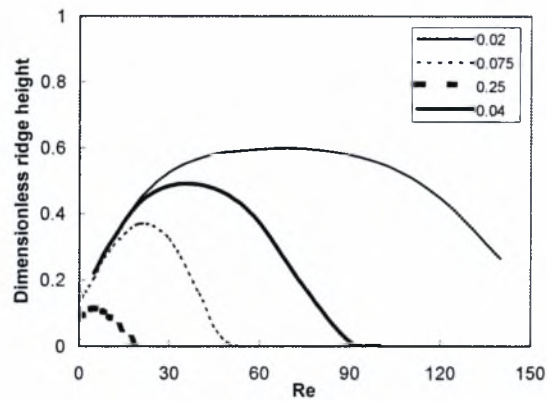


b)

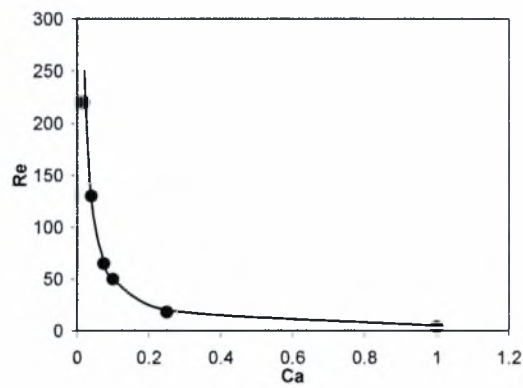


Σχήμα 2.3.2

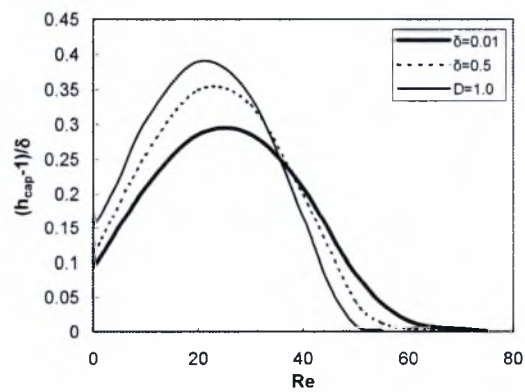
a)



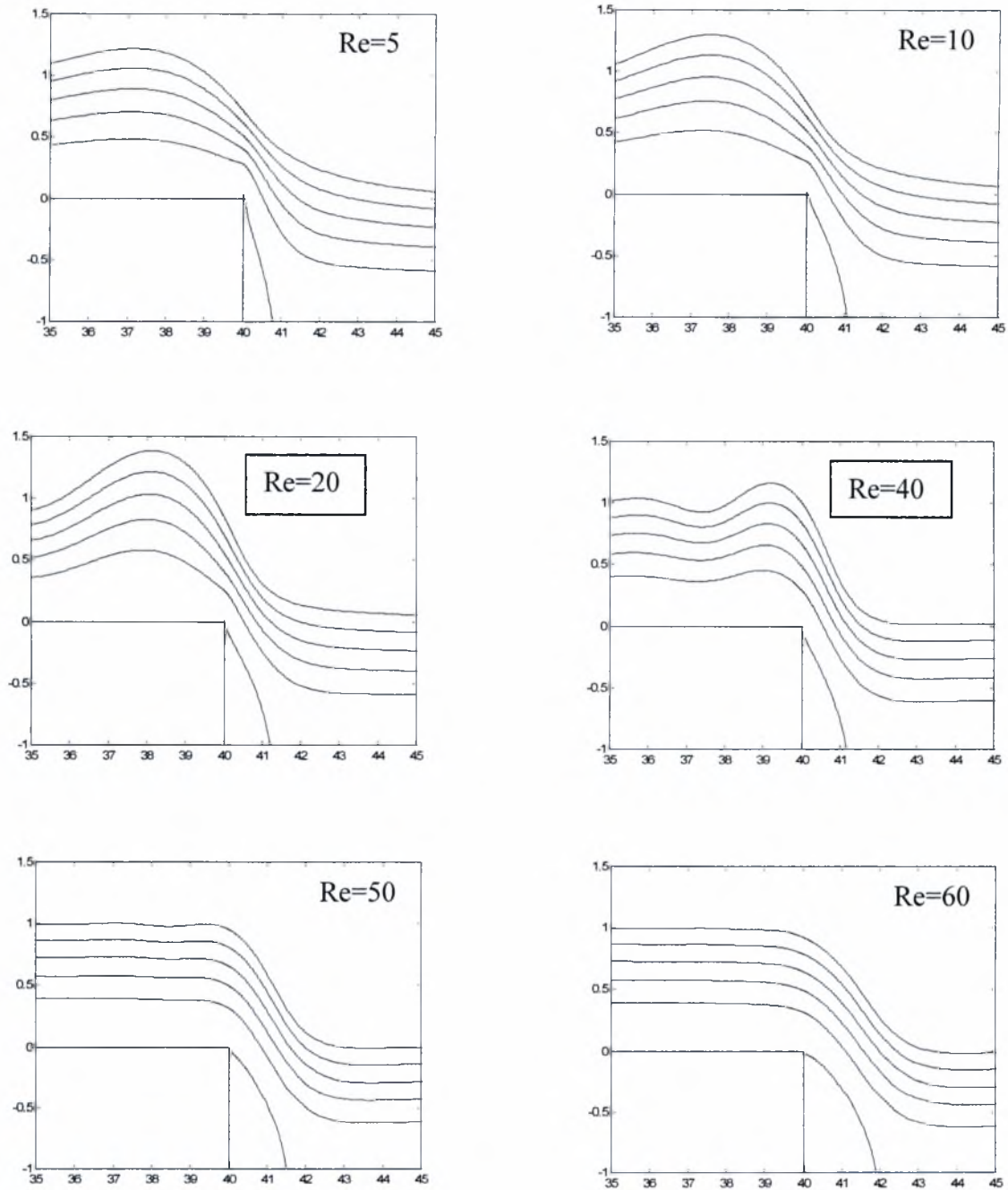
b)



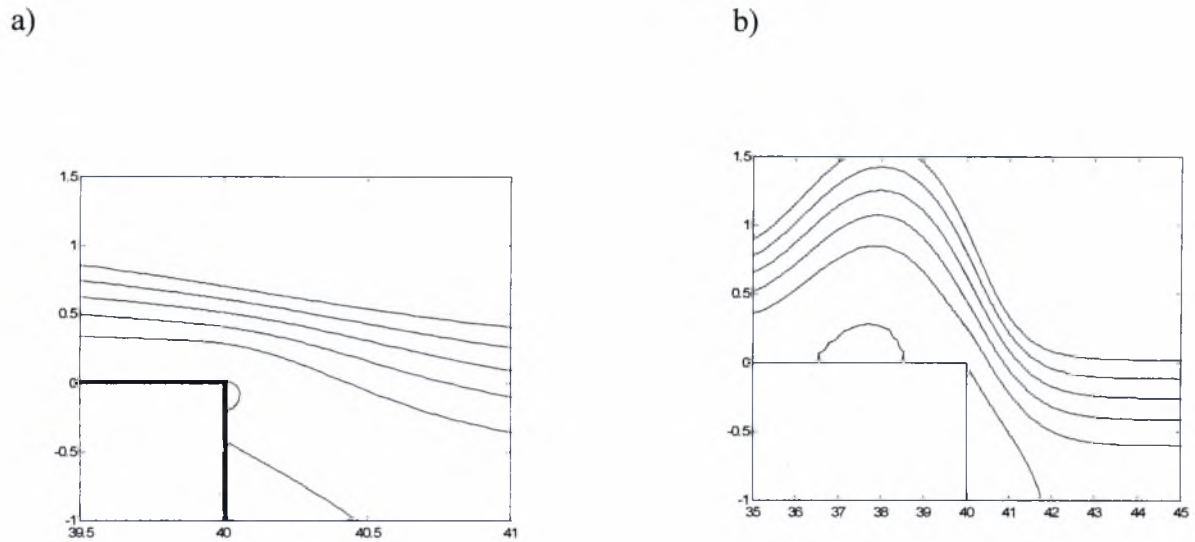
c)



Σχήμα 2.3.3



Σχήμα 2.3.4



### 2.3.3. ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΑΔΡΑΝΕΙΑΣ ΣΤΟΝ ΑΝΑΒΑΘΜΟ ΕΞΟΧΗΣ (STEP-OUT)

Τα φαινόμενα της αδράνειας και τα τριχοειδή, τα οποία δρουν παράλληλα στην ελεύθερη επιφάνεια, παρουσιάζονται στην εικόνα 2.3.5, η οποία απεικονίζει τα προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας, συναρτήσει του  $Re$  για step-out με αδιάστατο μήκος  $\delta=1.5$  και τριχοειδή αριθμό  $Ca=0.075$ . Παρατηρείται ότι – παρομοίως και στη συμπεριφορά του step-in – τα τριχοειδή χαρακτηριστικά στο πάνω μέρος του σκαλοπατιού κάνουν περισσότερη ταλάντωση και το μήκος τους μειώνεται ομοιόμορφα με το  $Re$ . Επίσης, με την αύξηση του  $Re$ , η γούβα αρχικά μεγαλώνει σε ύψος αλλά μετά μειώνεται και εν τέλει εξαφανίζεται.

Ένα νέο χαρακτηριστικό της ροής σε υψηλούς  $Re$  το οποίο είναι εμφανές στην 2.3.5, είναι η εμφάνιση μίας προεξοχής μετά το step-out, η οποία αποδεδειγμένα προκαλείται από υπερακόντιση του ρέοντος υμένος όπως αυτό εκτρέπεται από το σκαλοπάτι στην οριζόντια διεύθυνση. Αυτό ονομάζεται χαρακτηριστικό της αδρανειακής προεξοχής. Η παραμετρική διακύμανση των χαρακτηριστικών της αδρανειακής προεξοχής παρουσιάζεται λεπτομερώς στις εικόνες 2.3.6. Η εξάρτηση της προεξοχής από το  $Re$  απεικονίζεται στην 2.3.6.a για  $\delta=1$  και  $Ca=0.02, 0.04, 0.075$  και  $0.25$ . Δύο διαφορετικά είδη συμπεριφοράς παρατηρούνται με την αύξηση του  $Re$ : αρχικά το ύψος της προεξοχής ποικίλει και εξαρτάται σημαντικά από το  $Re$ , αλλά μετά οι καμπύλες για όλα τα  $Ca$  σχεδόν τείνουν να συμπέσουν στο ίδιο σημείο. Η τάση αυτή υποδεικνύει ότι επιφανειακή τάση, η οποία συγκρατεί την προεξοχή σε χαμηλούς  $Re$ , αντικαθίσταται από έναν αδρανειακό μηχανισμό σε υψηλούς  $Re$ . Συνεπώς, η ασύμπτωτη αναπαριστά το όριο των αμελητέων τριχοειδών δυνάμεων, όπως επιβεβαιώνεται παρατηρώντας ότι η καμπύλη για κάθε  $Ca$  που απεικονίζεται στο

σχήμα, συμπίπτει με την ασύμπτωτη σε  $Re$  αντιστρόφως ανάλογο με το  $Ca(We \propto 1.9)$

Σύμφωνα με τη σημασία των τριχοειδών δυνάμεων σε χαμηλούς / ενδιάμεσους  $Re$ , η αδρανειακή προεξοχή εμφανίζεται σε  $Re$  ο οποίος ποικίλει και μεταβάλλεται αντίστροφα με το  $Ca$ . Όμως, η μετάβαση δε συμβαίνει σε σταθερό  $We$ . Αντιπροσωπευτικά αριθμητικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στη 2.3.6.b για  $\delta=1.5$ , μαζί με μία απότομη καμπύλη η οποία αντιστοιχεί σε σταθερό  $We$ . Επίσης στο διάγραμμα απεικονίζεται η απόσταση από την κορυφή στην άκρη του σκαλοπατιού. Παρατηρείται ότι η αναδεικνυόμενη παραμόρφωση είναι μεγαλύτερη σε χαμηλό  $Ca$ , αλλά αποκτά μέγεθος της τάξης του πάχους του υμένου σε υψηλούς  $Ca$ .

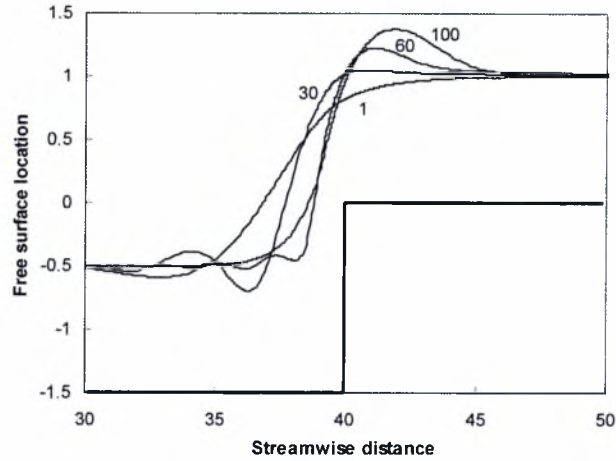
Το φαινόμενο του αδιάστατου μήκους  $\delta$ , στο μέγεθος της προεξοχής παρουσιάζεται στην 2.3.7, όπου η κλίμακα του ύψους της καταρτίζεται σε συνάρτηση με το  $Re$  για  $Ca=0.075$  και  $\delta=0.01, 0.1, 0.5, 1.0$  και  $1.5$ . Παρατηρούμε ότι για  $\delta \ll 1$ , τα δεδομένα “κατρακυλάνε” σε μία καμπύλη, με άλλα λόγια στο γραμμικό όριο η προεξοχή κλιμακώνεται με το βάθος του σκαλοπατιού. Αυξάνοντας το  $\delta$ , αυτό συμβάλει σε μία εντυπωσιακή ανάπτυξη της προεξοχής με το  $Re$ , και σε μία βαθμιαία μεταβολή της “εκδήλωσης” της σε χαμηλότερους  $Re$ . Για  $\delta$  γύρω στο  $1$ , η “εκδήλωση” της προεξοχής είναι μία ασύμπτωτη σε σταθερό  $Re$ , αλλά το ύψος της σε υψηλούς  $Re$  συνεχίζει να μεγαλώνει με το  $\delta$ . Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να γίνει κατανοητή με το να θεωρηθεί ότι το οριζόντιο μέρος του σκαλοπατιού λειτουργεί σαν μία εξέδρα εκτόξευσης για το υγρό στην  $y$  κατεύθυνση. Συνεπώς, όσο πιο βαθύ είναι το σκαλοπάτι τόσο πιο τέλεια η μετάβαση από τη  $x$ -ορμή στην  $y$ -ορμή.

Όσων αφορά το *step-in*, τα χαρακτηριστικά της ελεύθερης επιφάνειας κατά μήκος ενός *step-out* μπορεί να αλληλεπιδράσουν με την τοπική δομή της ροής η οποία επιβάλλεται από την απότομη τοπογραφική αλλαγή. Μία αντιπροσωπευτική εξέλιξη της δομής της ροής με την αυξανόμενη αδράνεια απεικονίζεται στις εικόνες 2.3.8 για  $Ca=0.075$  και  $\delta=1.5$ , και δηλώνει την ύπαρξη δύο διαχωρισμένων περιοχών. Η μία στον πόδα του σκαλοπατιού επηρεάζεται από το απότομο της αλλαγής της κατεύθυνσης ροής. Στην αρχή μεγαλώνει με το  $Re$ , μετά συρρικνώνεται ενώ τα τριχοειδή κύματα ωθούνται προς το σκαλοπάτι και εν τέλει μεγαλώνει ξανά αφού πρώτα τα κύματα εξαφανιστούν.

Σε υψηλούς  $Re$ , μία επιπρόσθετη διαχωριζόμενη περιοχή εμφανίζεται κάτω από την αδρανειακή προεξοχή, η οποία δημιουργείται στην άκρη του σκαλοπατιού, επιμηκύνεται στην κατεύθυνση της ροής και αυξάνει σταθερά με το  $Re$ . Επομένως, παρατηρείται ότι – ανάμοια με την κατάσταση στο *step-in* – ο διαχωρισμός στην άκρη του *step-out* επιτάσσει μία αξιόλογη διάσταση της αδράνειας. Η διαφορά μεταξύ των δύο περιοχών αιτιολογείται λόγω της βαρύτητας, η οποία στην προηγούμενη περίπτωση προωθεί την αποκόλληση του υμένου από το τοίχωμα, δεδομένου ότι στη δεύτερη περίπτωση βοηθάει τον υμένα να μείνει προσκολλημένος.

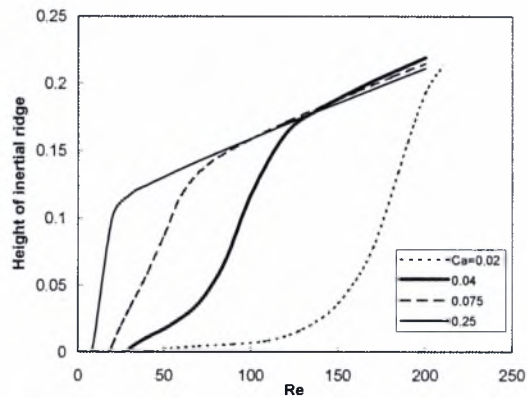
Επί της ουσίας, παρατηρείται μία αδρανειακή παραμόρφωση στην ελεύθερη επιφάνεια κατάντη της ακμής του αναβαθμού εξοχής, μετά από κάποιο  $Re$ , λόγω της κάθετης δύναμης η οποία κατακρημνίζει το ρευστό. Η αδρανειακή παραμόρφωση αρχικά παίρνει τη μορφή μαζών αέρα και φυσαλίδων αέρα, οι οποίες με την αύξηση του  $Re$ , αυξάνουν σε αριθμό και μέγεθος, και από κάποιο  $Re$  και μετά, αρχίζουν και προκαλούν μόνιμη αποκόλληση του υγρού υμένου από το κάθετο τοίχωμα.

Σχήμα 2.3.5

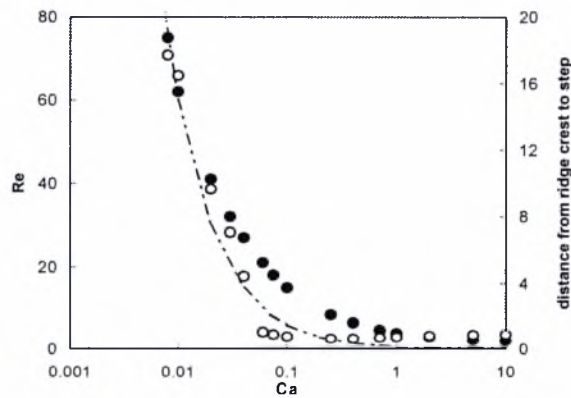


Σχήμα 2.3.6

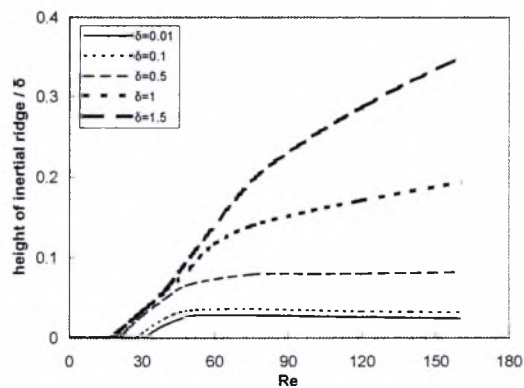
a)



b)

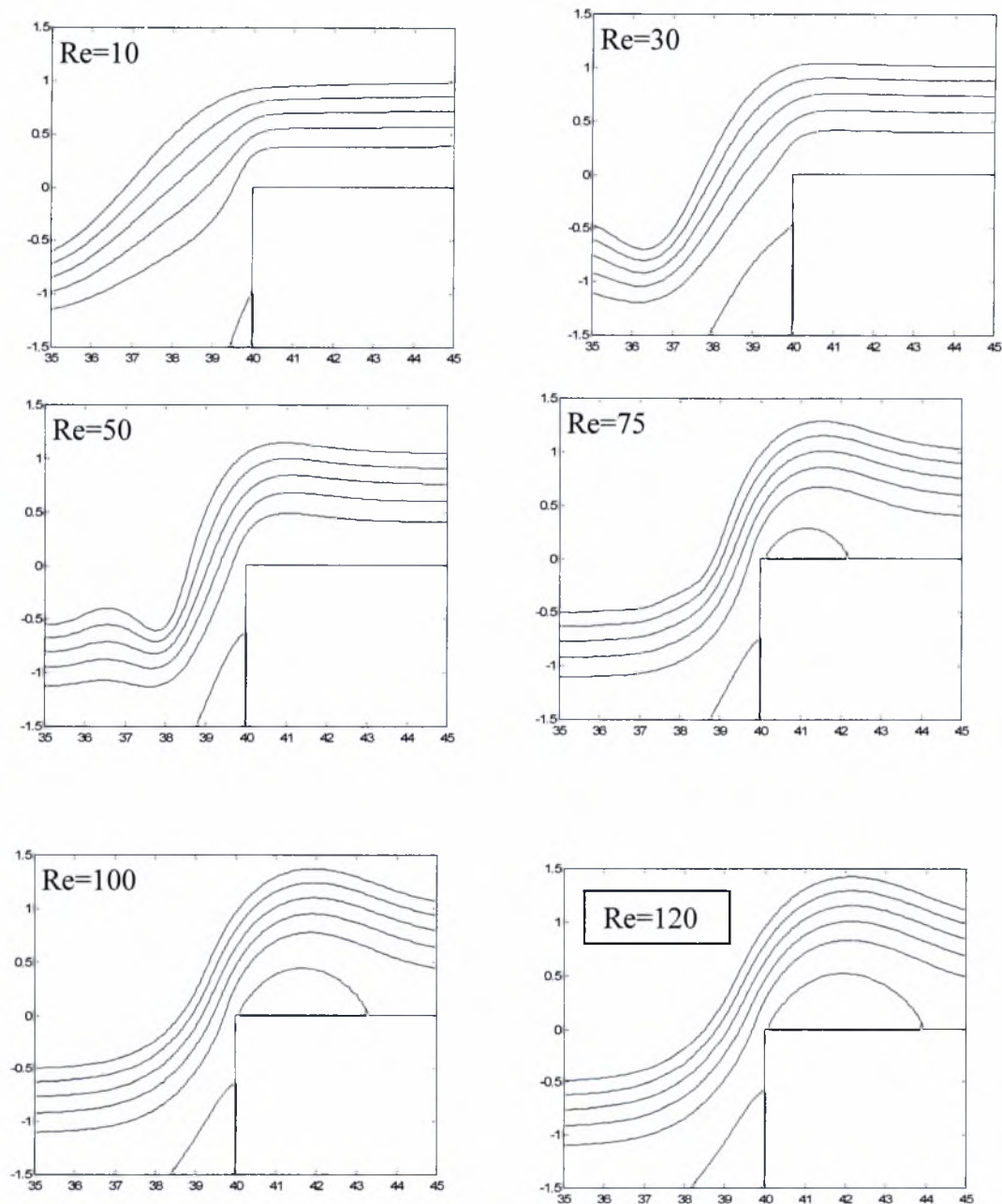


Σχήμα 2.3.7





Σχήμα 2.3.8



#### 2.3.4. Η ΚΛΙΜΑΚΑ ΜΗΚΟΥΣ ΤΩΝ ΤΡΙΧΟΕΙΔΩΝ

Η επιχειρηματολογία, που αφορούσε το μετρητικό κομμάτι που ετέθη από τον Kalliadasis το 2000 και τους Mazouhi & Homisy το 2001, μπορεί να επεκταθεί στην πεπερασμένη αδράνεια για να προβλέψει το μήκος κύματος των τριχοειδών χαρακτηριστικών. Ειδικότερα, από τους μικρούς στους ενδιάμεσους  $Re$ , η τριχοειδής πίεση στο step-in είναι ακόμα η κύρια δύναμη που οδηγεί το ρευστό οριζόντια (με άλλα λόγια, κανονικά στη διεύθυνση της βαρύτητας), αλλά πρέπει να είναι τώρα αρκετή να υπερνικήσει το συνδυαζόμενο φαινόμενο των δυνάμεων

βαρύτητας και της αδράνειας υμένος. Η ίδια δύναμη ισορροπίας εφαρμόζεται στο πάνω μέρος του step-out, όπου η τριχοειδής γούβα φαίνεται σαν μία αντίδραση στο βάρος του υμένος και στην αλλαγή της κατεύθυνσης ροής.

Δηλώνοντας την αδιάστατη κλίμακα μήκους των τριχοειδών χαρακτηριστικών σαν  $l=L/H$ , και παίρνοντας το ύψος τους να είναι όσο το δυνατόν περισσότερο συγκρίσιμο με το πάχος του υμένος, μπορούμε να γράψουμε την εκτίμηση για τη διατήρηση ορμής

$$\rho g + \frac{\rho \cdot U^2}{L} \approx \sigma \frac{H}{L^3} \Rightarrow l^3 + \left( \frac{\text{Re}}{3} \right) l^2 \approx \frac{1}{\text{Ca}} \quad (1)$$

Στην περίπτωση αυτή, η κλίση της πίεσης είναι κατά προσέγγιση :  $\partial p / \partial x \approx \sigma \partial^3 h / \partial x^3$ , σύμφωνα με τη συνεισφορά των τριχοειδών δυνάμεων της ελεύθερης επιφάνειας. Δύο όρια προσδιορίζονται στην παραπάνω εξίσωση. Παραλείποντας την αδράνεια, επαναφέρουμε την κλίμακα Stokes

(  $l = \frac{L}{H} \approx \text{Ca}^{-\frac{1}{3}}$   $l = \frac{L}{H} \approx \text{Ca}^{-\frac{1}{3}}$  ). Στο αντίθετο όριο της επικρατούσας αδράνειας πάνω

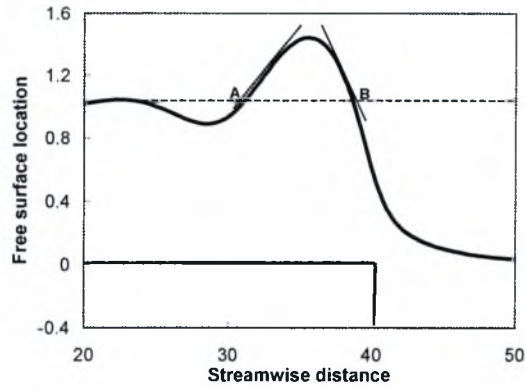
στην βαρύτητα, παίρνουμε το υψηλό όριο  $\text{Re} : l \approx \text{Re}^{-1/2} \text{Ca}^{-1/2}$  (2)

Ένα κριτήριο της μετάβασης από την κατάσταση τριχοειδούς-βαρύτητας στην κατάσταση τριχοειδούς-αδράνειας μας παρέχεται από την εξίσωση (3)

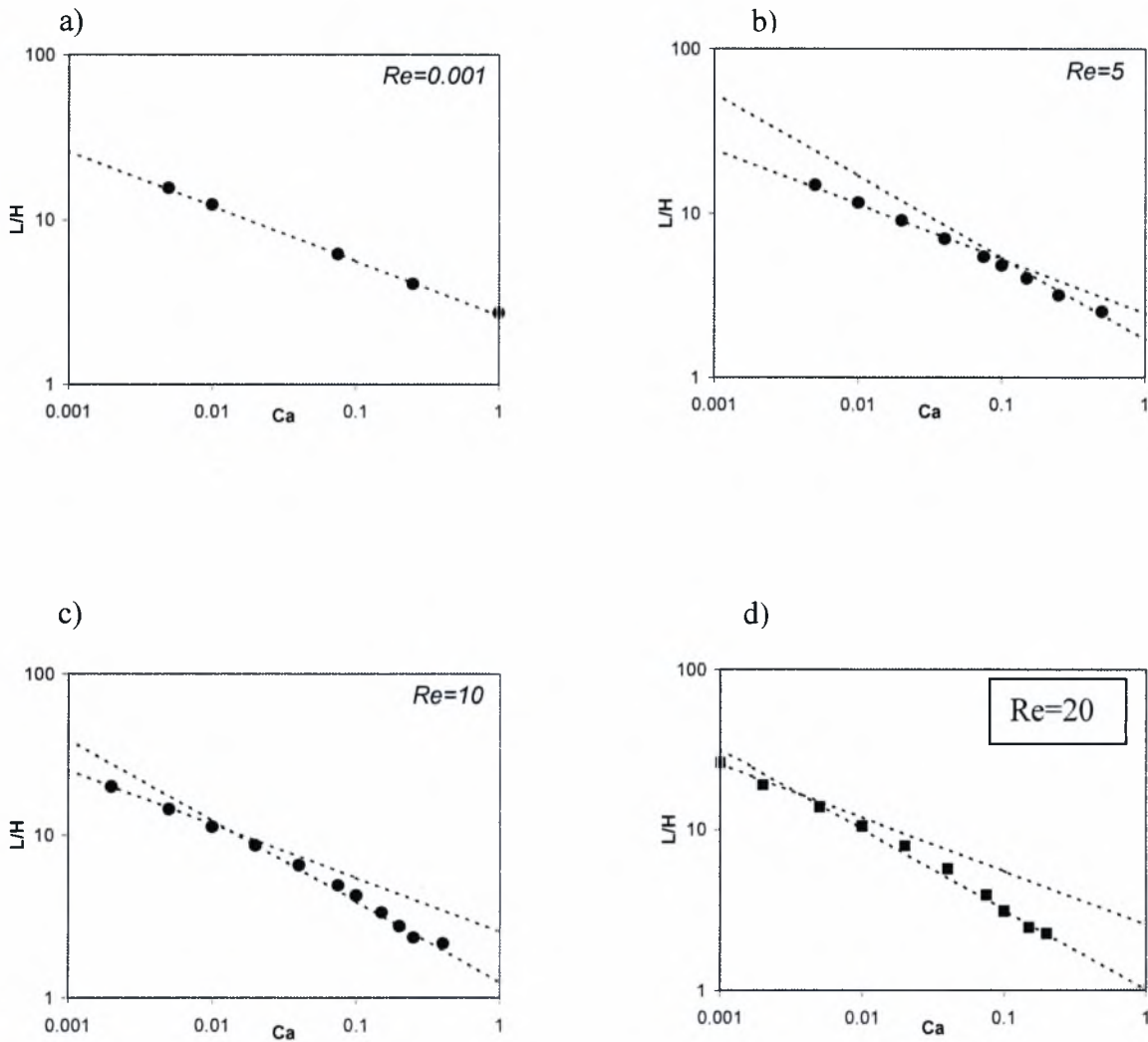
$$\text{Re}_c = \frac{3}{(2\text{Ca})^{1/3}} \quad (3)$$

Οι παραπάνω εκτιμήσεις εξετάζονται σε σύγκριση με τα υπολογιστικά αποτελέσματα, στο σχήμα 2.3.9. Οι τιμές του  $l$  που υπολογίστηκαν σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία καταστρώνονται στο σχήμα 2.3.10 συναρτήσει του  $\text{Ca}$  για τέσσερις διαφορετικούς  $\text{Re}$ . Τα σημεία ανταποκρίνονται στα αριθμητικά αποτελέσματα και οι γραμμές στις ασυμπτωτικές εκτιμήσεις  $l \approx \text{Ca}^{-1/3}$  και  $l \approx \text{Ca}^{-1/2}$ . Τα στοιχεία μαρτυρούν την ύπαρξη δύο διαφορετικών καταστάσεων και επαληθεύουν τα παραπάνω ασυμπτωτικά όρια.

Σχήμα 2.3.9



Σχήμα 2.3.10



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### 3.1. ΣΤΗΣΙΜΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Η πειραματική διαδικασία της παρούσης διπλωματικής εργασίας έλαβε χώρα στο εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών του τμήματος των Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Επί της ουσίας αποτελεί συνέχεια αυτής του φοιτητή Ευαγγέλου Τζανιδάκη. Η πειραματική μας διάταξη απαρτίζεται από :

- την πλάκα πολυβινυλοχλωριδίου (PVC), όπου πραγματοποιείται η ροή του υμένοσ και αποτελεί το κανάλι ροής
- τη γριναζωτή αντλία ,η οποία είχε χρησιμοποιηθεί στο προηγούμενο πείραμα απλής ροής υμένοσ σε κάθετο τοίχωμα
- τρία λάστιχα μήκους τριών μέτρων το καθένα και διατομής  $\frac{3}{4}$  της ίντσας, τα οποία μεταφέρουν το υγρό στην κορυφή του καναλιού και εν συνεχεία αυτό κατακρημνίζεται
- δύο ορθογώνιες πλάκες PVC , χρώματος μαύρου, οι οποίες έχουν διαστάσεις : (μήκος) x (πλάτος) x (πάχος) = 210 x 100 x 2 (mm), οι οποίες θα αποτελέσουν όπως θα δούμε παρακάτω το σκαλοπάτι
- τη “μεγάλη” δεξαμενή (σκάφη) από την οποία τραβάει το υγρό η αντλία και το “στέλνει” να κυλήσει στο κανάλι
- το χωνί στο οποίο κατακρημνίζεται το υγρό που ρέει στο κάθετο τοίχωμα, το οποίο είχε χρησιμοποιηθεί και στο προηγούμενο πείραμα
- μεταλλική σήτα, η οποία λειτουργεί σα φίλτρο για τυχόν ακαθαρσίες
- ένα λάστιχο που συνδέει το χωνί με τη δεξαμενή
- ένα λάστιχο διατομής 1 ίντσας που συνδέει τη “μεγάλη” δεξαμενή με την αντλία
- τις συνδέσεις της αντλίας με τα λάστιχα, δηλαδή το σύστημα διανομής του ρευστού
- τη “μικρή” δεξαμενή, η οποία πλημμυρίζει και βοηθά το ρευστό να ανέβει ομαλά στην κορυφή της πλάκας PVC και στη συνέχεια να κατακρημνιστεί

#### *Περιληπτική αναφορά στη διαδικασία κατασκευής της πειραματικής διατάξεως*

Κατ’ αρχάς, στήθηκαν τέσσερις κοιλιδοκοί, ύψους 6m και διατομής 100 x 100 (mm) σε ορθογωνικό σχήμα διαστάσεων 1160 x 460 mm. Στην εξωτερική πλευρά των δύο εξ αριστερών δοκών τοποθετήθηκε η πλάκα PVC, η οποία έχει μήκος 1000 mm, πλάτος 210 mm και πάχος 30 mm. Κόπηκε σε σέγα, η οποία είναι ένα κοπτικό εργαλείο το οποίο είναι ιδανικό για κοπή ξύλου ή πλαστικού. Αυτό συμβαίνει επειδή λειτουργεί σε χαμηλές ταχύτητες και με αυτόν τον τρόπο δεν αναπτύσσονται τόσο υψηλές θερμοκρασίες στη διεπιφάνεια εργαλείου – τεμαχίου, όπως π.χ. αν χρησιμοποιούσαμε τροχαστή συνέχεια, με τη βοήθεια της φρέζας απέκτησε την τελική της μορφή. Έπειτα, με τη βοήθεια σφικτήρων, σταθεροποιήθηκε η πλάκα, και εισήχθησαν μεταλλικές λάμες μεταξύ των κοιλιδοκών και της πλάκας, καθώς επίσης και μεταλλικές ροδέλες στην

εξωτερική πλευρά των δοκών. Ανοίχτηκαν οπές στο “πίσω” μέρος του καναλιού ροής, και με τη βοήθεια των βιδών και των μεταλλικών ροδελών στερεώθηκε η πλάκα και ευθυγραμμίστηκε, έτσι ώστε να αποκτήσει γωνία με το έδαφος ίση με περίπου  $90^\circ$ . Μετά, τοποθετήθηκαν ύαλοι στις άκρες του καναλιού ροής (εικόνα 3.1), έτσι ώστε να μην έχουμε διαρροές του πίπτοντος υγρού προς τα έξω. Ανοίχτηκαν οπές πλάγια της πλάκας και πραγματοποιήθηκε η σύνδεση μεταξύ πλάκας-ύαλων. Επίσης πραγματοποιήθηκε έγχυση σιλικόνης για επιπλέον διασφάλιση αποφυγής διαρροών.



εικόνα 3.1. Κανάλι ροής (πλάκα PVC)

Στη συνέχεια, προσθέσαμε τον αναβαθμό σε απόσταση 200 mm από την αρχή της πλάκας. Ο πιο αποτελεσματικός τρόπος ήταν να τον κολλήσουμε με κόλλα διπλής όψευς. Άρα η πρώτη κίνηση που κάναμε ήταν να κολλήσουμε πρώτα τα δύο κομμάτια μαύρου PVC, το ένα πάνω στο άλλο, τα οποία είχαν διαστάσεις : (μήκος x πλάτος x πάχος) =  $210 \times 100 \times 2$  mm. Το κόλλημα έγινε με κόλλα διπλής όψευς, η οποία τοποθετήθηκε περιμετρικά στο ένα από τα δύο κομμάτια, ώστε να κολλήσει με την άλλη. Έπειτα, αφότου κολλήθηκαν τα δύο αυτά κομμάτια μεταξύ τους, προσθέσαμε κόλλα και στο άλλο σκαλοπάτι, και στη συνέχεια το νέο αυτό “συσσωμάτωμα” τοποθετήθηκε πάνω στο κανάλι ροής. Η επόμενη ενέργεια στην οποία καταλήξαμε ήταν να χρησιμοποιήσουμε δύο σφικτήρες, πιάνοντας τα σκαλοπάτι με την πλάκα PVC, ώστε να κολλήσουν ομαλά και να στεγανοποιηθούν. Η στεγανοποίηση αποτελούσε έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες, ώστε να προχωρήσει το πείραμά μας, και με την ενέργεια αυτή μειώσαμε την πιθανότητα ύπαρξης κενών (“φούσκες”) στη διεπιφάνεια αναβαθμού – πλάκας PVC, κάτι το οποίο θα βοηθούσε να ξεκολλήσει το

σκαλοπάτι από το κανάλι ροής. Οι σφικτήρες παρέμειναν εκεί για τρεις μέρες, ώστε να έχουμε το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Το κανάλι ροής με την πρόσθεση του σκαλοπατιού παρουσιάζεται στην εικόνα 3.2 .



εικόνα 3.2. Κανάλι ροής με την πρόσθεση του αναβαθμού

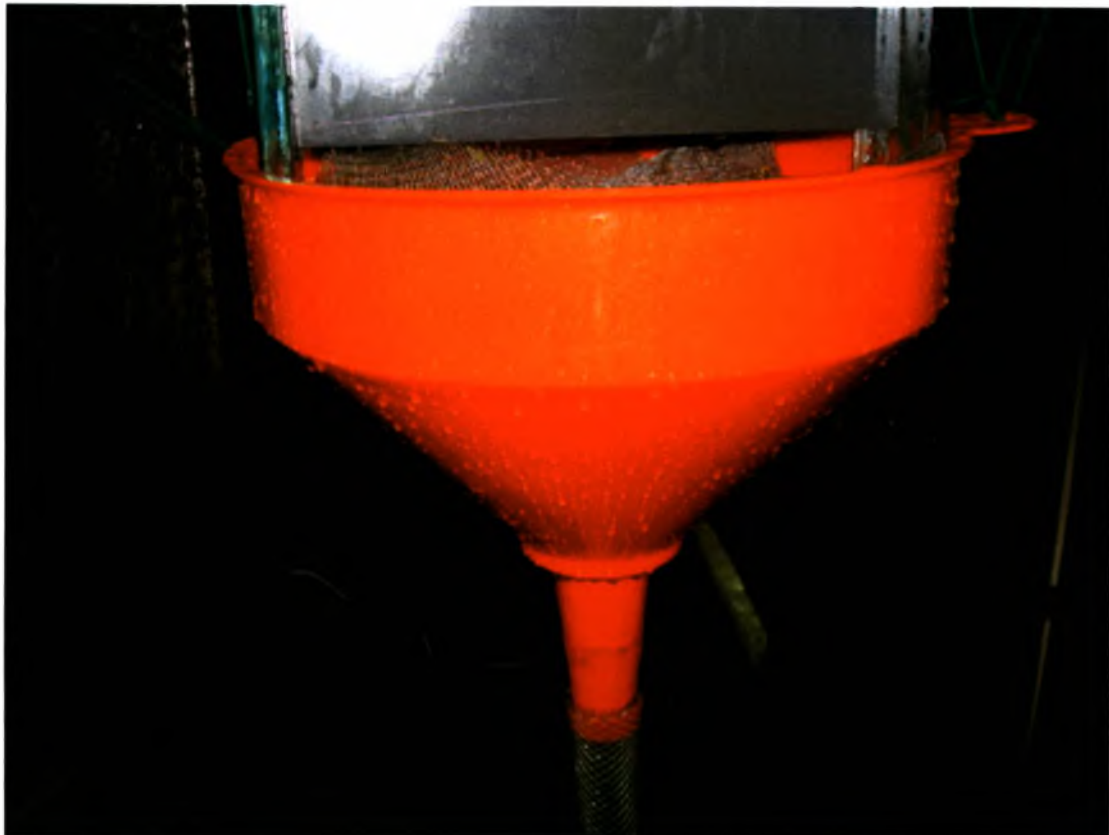
Ένα από τα πιο σημαντικά κομμάτια της όλης διαδικασίας είναι η κατασκευή της δεξαμενής υποδοχής του ρευστού από την κεντρική δεξαμενή, από που το υγρό προωθείται ομαλά στην κορυφή του καναλιού ροής καθ'όλο το πλάτος και πάχος (διατομή 210 x 30 mm ) της πλάκας, ώστε στη συνέχεια να κυλήσει κάθετα στην επιφάνειά της. Στο κατασκευαστικό κομμάτι, χρειάστηκαν 4 ράβδοι Plexiglas διαστάσεων 200 x 30 x 30 mm και μία πλάκα από το ίδιο υλικό διαστάσεων 250 x 200 x 0.5 mm. Οι δύο πρώτες ράβδοι κολλήθηκαν μεταξύ τους με σιλικόνη. Στη συνέχεια, το συσσωμάτωμα των δύο ράβδων κολλήθηκε στην οπίσθια πλευρά της πλάκας PVC και σε βάθος 180 mm από την κορυφή της. Οι υπόλοιπες δύο ράβδοι κολλήθηκαν πάλι με σιλικόνη κάθετα στις προηγούμενες δύο και παράλληλα στα προεξέχοντα τμήματα των ύαλων της οπίσθιας πλευράς. Άρα το πάχος της δεξαμενής αυξήθηκε κατά 10 mm και από 30 έγινε 40 mm. Η χωρητικότητα της συγκεκριμένης δεξαμενής είναι 180 x 40 x 200 mm<sup>3</sup> ή 1.45 lit περίπου. Το πίσω τμήμα της δεξαμενής, δηλαδή η πλάκα Plexiglas κολλήθηκε με σιλικόνη στις κάθετες ράβδους αφού προηγουμένως είχαν διανοιχτεί τρεις οπές από τις οποίες γίνεται η εισροή του ρευστού (εικόνα 3.3 ). Έπειτα, ανοίχτηκαν τρεις οπές στο πίσω μέρος της δεξαμενής, ώστε να μπουν τα λάστιχα από τα οποία θα διέρχεται το υγρό και θα πλημμυρίζει τη δεξαμενή. Τα λάστιχα έχουν μήκος 3 m το καθένα και διατομή  $\frac{3}{4}$  της ίντσας και συγκρατούνται με ανοξειδωτους σφικτήρες (20 – 28), και καταλήγουν στις συνδέσεις διαμοιρασμού της παροχής της αντλίας.



εικόνα 3.3. Δευτερεύουσα δεξαμενή και οι σωληνώσεις που επιτρέπουν την εισροή του υγρού (“μικρή” δεξαμενή)

Στο κάτω χείλος της πλάκας έχει τοποθετηθεί ένας οδηγός απορροής ο οποίος συλλέγει το ρευστό και το επανεισάγει στην κύρια δεξαμενή(εικόνα 3.4). Το σύστημά μας αποτελείται από ένα χωνί διαμέτρου φ 24 mm και από ένα λάστιχο, το οποίο οδηγεί το ρευστό στη δεξαμενή. Το χωνί δέθηκε με σχοινί στις κύριες δοκούς της κατασκευής. Μέσα στο χωνί έχουμε τοποθετήσει μία μεταλλική σήτα, η οποία έχει την ικανότητα να κατακρατά ακαθαρσίες, οι οποίες αν

περάσουν από την αντλία, μπορούν να την επηρεάσουν αρνητικά, ακόμα και να την καταστρέψουν.



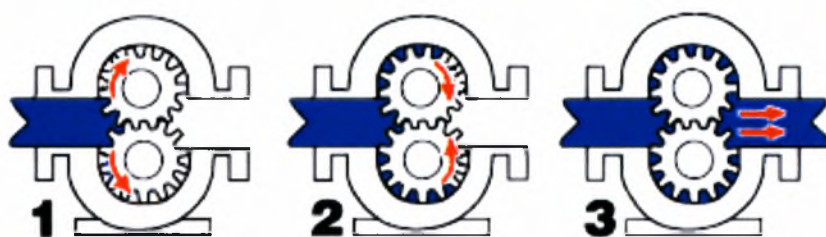
εικόνα 3.4. Σύστημα απορροής (χωνί), μεταλλικής σήτας, και το λάστιχο

Στο προηγούμενο πείραμα του φοιτητή Ευάγγελου Τζανιδάκη, είχε γίνει χρήση φυγοκεντρικής αντλίας. Αυτό προκάλεσε όμως υπερθέρμανση του ρέοντος υγρού (στην περίπτωση αυτή, γλυκερίνη), και αυτό όπως ήταν φυσικό αλλοίωσε τις φυσικές και χημικές ιδιότητες του. Σαν αποτέλεσμα αυτού, οδηγούμασταν σε λανθασμένα αποτελέσματα και μετρήσεις. Συγκεκριμένα, σε 30 min λειτουργίας της αντλίας, η θερμοκρασία της γλυκερίνης αυξήθηκε από τους 20 °C στους 27 °C. Επίσης ένα άλλο πρόβλημα που προέκυψε ήταν ότι δημιουργήθηκαν πολλές φυσαλίδες μέσα στο σύστημα (λάστιχα, αντλία, κανάλι, κλπ) και αυτό προκάλεσε ανομοιομορφία στον τρόπο υπερχειλίσης της μικρής δεξαμενής. Η ροή άλλοτε μετακινούνταν αριστερά, άλλοτε δεξιά, και έτσι η εξαέρωση του συστήματος αποτέλεσε την προσωρινή λύση. Όμως επειδή η αντλία δεν μπορούσε να ήταν τέλεια μονωμένη, δεν μπορούσε και να εξαερωθεί πλήρως. Ένα άλλο φαινόμενο που προκάλεσε πρόβλημα στο σύστημά μας ήταν η πίεση ατμών του υγρού, η οποία στην πορεία μετατρέποταν σε απώλεια μανομετρικού λόγω των ατμών, κάτι



το οποίο εμπόδιζε την κίνηση του ρευστού. Επί παραδείγματι, η πίεση ατμών αντιτίθετο στην κύρια δύναμη που οδηγούσε το υγρό από τη “μεγάλη” δεξαμενή στην αντλία, δηλαδή της πίεσης του ρευστού στην επιφάνεια της δεξαμενής. Η αύξηση της θερμοκρασίας με τη συνεχή χρήση της αντλίας δημιουργούσε περισσότερους ατμούς και αυτό συνεπάγεται μεγαλύτερες πτώσεις πίεσης στο τμήμα αναρρόφησης του ρευστού. Το πρόβλημα αυτό ονομάζεται σπηλαιώση και οδηγούσε σε εσφαλμένη λειτουργία την αντλία και γενικά σε πτώση της απόδοσής της. Ένας άλλος λόγος ο οποίος επηρέαζε την ομαλή λειτουργία της αντλίας ήταν το μεγάλο ιξώδες του ρευστού που διακινούνταν μέσω της αντλίας (όπως γλυκερίνη και silica oil). Το πρόβλημα αυτό οξυνόταν λόγω της δραματικής πτώσης στην απόδοση της αντλίας εξαιτίας των λόγων που προαναφέρθησαν. Αυτού του είδους οι αντλίες δε σχεδιάζονται για ιξώδη μεγαλύτερα των 4000 SSU ή 880 cSt.

Έτσι, εξαιτίας όλων αυτών των λόγων, η αλλαγή της αντλίας ήταν επιτακτική. Η νέα αντλία που αντικατέστησε την φυγοκεντρική, άνηκε στην κατηγορία των γραναζωτών αντλιών (εικόνα 3.5), και λειτουργούσε χάρη στο ηλεκτροκινητήρα τριφασικού ρεύματος ο οποίος παρείχε κίνηση στον κεντρικό άξονα και αυτός με τη σειρά του στα γρανάζια της αντλίας (εικόνα 3.6).



εικόνα 3.5. Αντλία με εξωτερική συνδεσμολογία γραναζιών

Οι γραναζωτές αντλίες έχουν πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα. Το σημαντικότερο θετικό στοιχείο που παρουσιάζουν είναι ότι μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλές ταχύτητες σε συνδυασμό με μικρές πιέσεις λειτουργίας. Το κυριότερο αρνητικό τους είναι ότι σε περίπτωση που εισχωρήσουν μέσα στην αντλία στερεά σωματίδια τότε υπάρχει τεράστιος κίνδυνος προξένησης βλάβης της. Π.χ. μπορεί να “φαγωθούν” τα γρανάζια της αντλίας και τότε η αντλία δεν μπορεί να λειτουργήσει.



εικόνα 3.6. Γραναζωτή αντλία

Το λευκό καλώδιο οδηγεί στον inverter (γίνεται πιο εκτενής αναφορά στη συνέχεια), μέσω του οποίου καθορίζονται οι στροφές λειτουργίας της αντλίας και συνεπώς η συνολική παροχή (μαζική ή ογκομετρική) στην πλάκα PVC. Η λειτουργία της αντλίας βασίζεται στη συνεργασία των δύο πανομοιότυπων γραναζιών, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.5, τα οποία περιστρέφονται με αντίθετες φορές. Το ένα εκ των δύο γραναζιών παίρνει κίνηση από τον άξονα, ενώ το άλλο λόγω της σύμπλεξης με το πρώτο. Κατά τη διάρκεια που τα γρανάζια κινούνται και “ξεκολλάνε” το ένα από το άλλο, δημιουργείται μεγάλος όγκος ελέγχου (μικρή πίεση) στην είσοδο της αντλίας. Το υγρό εισέρχεται στον όγκο αυτό και εγκλωβίζεται στις οδοντώσεις των γραναζιών. Έτσι έχοντας πλέον αποκτήσει την απαιτούμενη πίεση, μέσα από την κίνησή του στα γρανάζια και στο εσωτερικό περίβλημα της αντλίας, το ρευστό εξέρχεται για περαιτέρω χρήση.

Στην πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε αντλία της ιταλικής εταιρείας OMCP, τύπου V 52, παροχής  $Q$  4.5 m<sup>3</sup>/h, μαομετρικού ύψους  $H$  10 m, στροφών 1450 rpm και ισχύος  $P$  3 Hp. Το σώμα, τα καλύμματα, και οι θάλαμοι αποτελούνται από λεπτόκοκκο φαιό χυτοσίδηρο ενώ τα γρανάζια και ο άξονας από ειδικό ανθρακούχο χάλυβα. Η στεγανοποίηση του άξονα επιτυγχάνεται με ειδική αλειφατούχο σαλαμάστρα ή με μηχανικό στυπαιοθλίπτη. Η αντλία διαθέτει σύστημα θέρμανσης-ψύξης για τη διακίνηση είτε πολύ θερμών είτε πολύ ψυχρών υγρών και άρα επιπρόσθετο σύστημα ελέγχου θερμοκρασίας είναι περιττό. Σε συνθήκες λειτουργίας με υγρό ιξώδους 80 cSt, ειδικό βάρος 1, θερμοκρασία 20 °C και βαρομετρική πίεση 20 mbar λαμβάνονται τα εξής αποτελέσματα:

Πίνακας 3.1. Πειραματικά αποτελέσματα υπό σταθερές στροφές και μεταβαλλόμενη πίεση

RPM	1 BAR		5 BAR		10 BAR		15 BAR		20 BAR	
	Lit/h	Kw	Lit/h	Kw	Lit/h	Kw	Lit/h	Kw	Lit/h	Kw
1450	4500	0.52	4430	1.22	4260	2.32	4040	3.32	3680	4.02

Γεώργιος Ζήσης-΄΄Πειραματική μελέτη ροής κατακόρυφου υγρού υμένα πάνω από αναβαθμό΄΄, σολή Μηχανολόγων Μηχ/κών Βιομηχανίας

Πίνακας 3.2. Μέγιστα όρια λειτουργίας της αντλίας

<b>Πίεση</b>	<b>Έως 20 bar</b>
<b>RPM</b>	<b>Έως 1750</b>
<b>Ιξώδες</b>	<b>77-31000 cSt</b>
<b>Θερμοκρασία</b>	<b>-10 °C έως +170 °C</b>

Η αντλία σταθεροποιήθηκε στο έδαφος με τη βοήθεια μεταλλικών ούπα. Το επόμενο στάδιο ήταν η σύνδεση του ηλεκτροκινητήρα της αντλίας με τον inverter για τον έλεγχο των στροφών και επομένως της παροχής. Όμως προέκυψε κάποιο πρόβλημα, το οποίο είχε να κάνει με τον inverter, που δεν μπορούσε να δεχτεί τις ρυθμίσεις του προγραμματισμού με βάση την ισχύ του ηλεκτροκινητήρα, αλλά και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά, όπως το ρεύμα και η τάση λειτουργίας. Το μοτέρ είχε maximum ισχύ 2.2 KW ή 3 Hp και ήταν μεγαλύτερη από αυτή του αναστροφέα, που ήταν 1.5 Kw ή 2 Hp, και αυτό είχε ως αποτέλεσμα ο δεύτερος να μην μπορούσε να καλύψει το απαιτούμενο φάσμα ρυθμίσεων. Αξίζει να αναφερθεί ότι τελικά το σύστημα δούλεψε αυξομειώνοντας τη ρύθμιση ελαχίστης συχνότητας του αναστροφέα, αλλά η μέθοδος ήταν εσφαλμένη και εμπεριείχε κίνδυνο υπερφόρτωσης του συστήματος με επισφαλή αποτελέσματα. Ο ηλεκτροκινητήρας ο οποίος αντικατέστησε αυτόν των τριών ίππων είχε τα εξής χαρακτηριστικά :

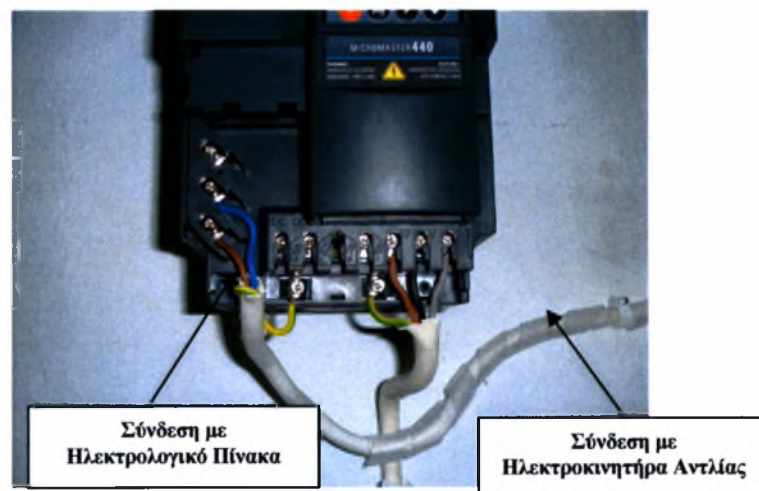
Πίνακας 3.3. Χαρακτηριστικά Ηλεκτροκινητήρα

Τύπος	Πόλοι	Ισχύς (Kw)	Ισχύς (Hp)	RPM	Αποδ. (%)	cosφ	Ρεύμα 400 V (A)	Ονομ. Ροπή (Nm)	Σχ.Ρεύμα Εκκίνησης (A)	Σχ.Ροπή Εκκίνησης (Nm)	Σχ.Ροπή Ανατροπής (Nm)	Βάρος (Kg)
K90S	4	1.1	1.5	1390	73	0.78	2.8	7.5	6	2	2.2	16

Ο καινούργιος κινητήρας κάλυπτε τις προδιαγραφές του αναστροφέα και μπορούσε πλέον να τοποθετηθεί στην αντλία. Το μεγάλο μοτέρ ήταν ακινητοποιημένο στη μεταλλική βάση με τέσσερις βίδες και ο άξονας του ήταν σε πλήρη ευθυγράμμιση με τον άξονα κινήσεως της αντλίας. Το νέο μοτέρ είναι μικρότερο σε διαστάσεις από το ήδη υπάρχον με αποτέλεσμα να χρειαστεί η διάνοιξη τεσσάρων οπών στη βάση με το μαγνητικό δράπανο. Η πλήρης ευθυγράμμιση όμως επετεύχθη τοποθετώντας τρεις μεταλλικές ροδέλες σε κάθε σημείο διάνοιξης οπής. Με αυτόν τον τρόπο η τοποθέτηση και η προσαρμογή του ηλεκτροκινητήρα στη μεταλλική βάση και τον άξονα περιστροφής της αντλίας έγινε με μηδενική υψομετρική διαφορά

και ελάχιστες ανοχές. Το σύστημα τέθηκε σε λειτουργία χαμηλών στροφών και είτε χαλαρώνοντας είτε συσφίγγοντας τις βίδες στήριξης διορθώθηκαν οι ανοχές του.

Όσον αφορά τον inverter, την τοποθέτηση του και τον προγραμματισμό του, προβήκαμε στις ακόλουθες ενέργειες. Κατ' αρχάς, ο αναστροφέας ρεύματος είναι μάρκας Siemens, και ανήκει στη σειρά 440. Ο πρωταρχικός σκοπός της συσκευής αυτής είναι να μετατρέπει το συνεχές ρεύμα το οποίο λαμβάνει σε εναλλασσόμενο, για την τροφοδότηση του ηλεκτροκινητήρα της αντλίας. Ο σκοπός μας ήταν να έχουμε όσο το δυνατόν καλύτερο συγχρονισμό μεταξύ του κινητήρα του αναστροφέα και τον ηλεκτροκινητήρα της αντλίας. Έτσι είχαμε τώρα πια το μοτέρ του αναστροφέα με ισχύ 1.5 Kw και αυτή του ηλεκτροκινητήρα ίση με 1.1 Kw, και πλέον δεν υπήρχε πρόβλημα υπερφόρτωσης του συστήματος. Πριν γίνει ο προγραμματισμός του inverter, έγιναν οι απαραίτητες συνδέσεις με τον ηλεκτρολογικό πίνακα και τον ηλεκτροκινητήρα της αντλίας. Στον πίνακα εισήχθη ασφάλεια ρεύματος 10 A μέσω της οποίας τροφοδοτείται ο αναστροφέας. Η τροφοδοσία επιτυγχάνεται με καλώδιο φάσης (καφέ), ουδέτερο (μπλε) για να ολοκληρωθεί το κύκλωμα γείωσης (κίτρινο) για προστασία του συστήματος από πιθανό βραχυκύκλωμα (εικόνα 3.7). Αντιστοίχως ο αναστροφέας τροφοδοτεί τον ηλεκτροκινητήρα με χρήση καλωδίου εναλλασσόμενου ρεύματος τριών τμημάτων για τις φάσεις και μία γείωση. Η φάση U (καφέ), η φάση V (μαύρο), η φάση W και η γείωση κίτρινο (εικόνα 3.7). Κατά αντιπαραβολή ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία σύνδεσης των καλωδίων του ελεύθερου άκρου με τις φάσεις και τη γείωση του ηλεκτροκινητήρα της αντλίας (εικόνα 3.8).



εικόνα 3.7. Συνδεσμολογία του αναστροφέα.



εικόνα 3.8. Συνδεσμολογία των φάσεων και της γείωσης του αναστροφέα με τον ηλεκτροκινητήρα της αντλίας.

Τέλος, η πρόσοψη των παραμέτρων ελέγχου του αναστροφέα (SDP: Status Display Panel τροποποιήθηκε με αλλαγή και εγκατάσταση του BOP (Basic Operation Panel) διότι προσδίδει μεγαλύτερη χρηστικότητα και εύρος λειτουργιών, όπως λόγου χάριν την αλλαγή στη φορά αναρρόφησης της αντλίας.

Από το προηγούμενο πείραμα του φοιτητή Ευάγγελου Τζανιδάκη, είχε τοποθετηθεί ένα ξύλινο τραπεζάκι μπροστά από το κανάλι ροής, πάνω στο οποίο είχε στερεωθεί η “μεγάλη” δεξαμενή. Στο πείραμά μας δε χρησιμοποιήθηκε η προηγούμενη δεξαμενή, αλλά καινούργια. Η απόφαση για καινούργια δεξαμενή πάρθηκε λόγω του ότι η καινούργια δεξαμενή έπρεπε να έχει αρκετά μεγαλύτερη χωρητικότητα. Έτσι αποφασίστηκε να τοποθετηθεί μία σκάφη.(εικόνα 3.9). Το τραπεζάκι χρησιμοποιήθηκε ώστε η δεξαμενή μας να είναι σε μεγαλύτερο ύψος από ότι η αντλία μας, κάτι το οποίο αποτελεί την κινητήρια δύναμη, η οποία κινεί το ρευστό από τη δεξαμενή προς την αντλία, μέσω του λαστίχου 1 ίντσας. Ανοίχτηκε τρύπα διαμέτρου 1 ίντσας στον πάτο της σκάφης με ποτηροτρύπανο, ώστε να δημιουργηθεί η τρύπα απορροής. Τοποθετήθηκε ειδικός μεταλλικός αντάπτορας στην τρύπα αυτή, αφού πρώτα είχε προστεθεί κάτω από αυτόν ένα πλαστικό έλαστρο, το οποίο απορροφά τους κραδασμούς και τις τάσεις που αναπτύσσονται στον πάτο της σκάφης. Έτσι θα αποφευχθεί τυχόν σπάσιμο του πλαστικού, στην τρύπα απορροής, κάτι το οποίο θα οδηγούσε σε ανεπιθύμητες διαρροές του ρευστού από το σύστημά μας. Στον αντάπτορα βιδώθηκε η μεταλλική γωνία διατομής 1 ίντσας, αφού πρώτα ανοίχτηκε μία αρκετά μεγάλη τρύπα (> 1”) στο ξύλινο τραπεζάκι με ποτηροτρύπανο, ώστε να χωρέσει η γωνία.

Έπειτα, η γωνία βιδώθηκε με το μαστό διατομής 1 ίντσας, ο οποίος συνδέεται με το λάστιχο που οδηγεί στην αντλία.



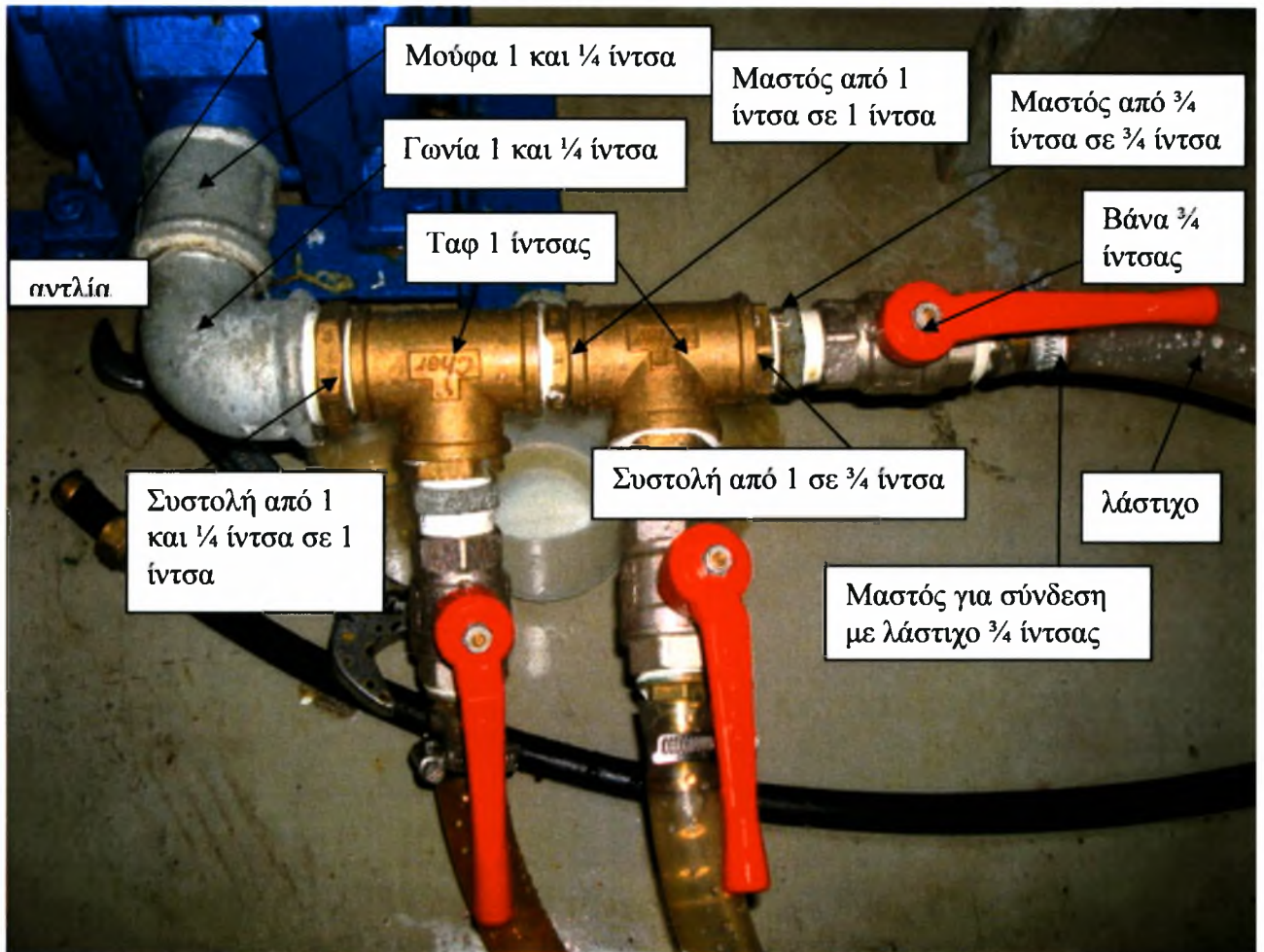
εικόνα 3.9. Κεντρική Δεξαμενή - Σκάφη ( “μεγάλη” δεξαμενή )

Τέλος, πραγματοποιήσαμε τις συνδέσεις της αντλίας με τα λάστιχα. Στην εικόνα 3.10 βλέπουμε πώς συνδέεται η αντλία με το λάστιχο, στο οποίο μεταφέρεται το ρευστό που τραβάει η αντλία. Στην εικόνα 3.11 παρουσιάζεται πώς συνδέεται η αντλία με τα τρία λάστιχα που οδηγούν το ρευστό στη μικρή δεξαμενή.



εικόνα 3.10. Σύνδεση αντλίας με τη “μεγάλη” δεξαμενή

Χρησιμοποιήθηκε συστολή, ώστε η διατομή μας να μετατραπεί από 1 και ¼ της ίντσας σε 1 ίντσα, γιατί το συγκεκριμένο λάστιχο που ήταν να βάλουμε ήταν διατομής 1 ίντσας. Ο μαστός κουμπώνει με το λάστιχο με τη βοήθεια σφικτήρα. Ο σφικτήρας πρέπει να είναι κατάλληλα σφιγμένος ώστε να μην έχει διαρροές το σύστημα μας στο σημείο αυτό.



εικόνα 3.11. Σύνδεση αντλίας με “μικρή” δεξαμενή

Για τον ίδιο λόγο και εδώ, χρησιμοποιήσαμε συστολή από 1 και  $\frac{1}{4}$  της ίντσας σε 1 ίντσα, ώστε να συνδέσουμε τα ταφ μεταξύ τους. Στην συνέχεια, οι τρεις συστολές από 1 ίντσα σε  $\frac{3}{4}$  της ίντσας χρησιμοποιήθηκαν ώστε να μπου οι τρεις βάνες και έπειτα τα τρία λάστιχα. Τα λάστιχα και σε αυτή την περίπτωση κούμπωσαν στους μαστούς με τη βοήθεια σφικτήρων, ώστε να μην υπάρξουν διαρροές.



Το υγρό που χρησιμοποιήσαμε στο πείραμά μας ήταν η γλυκερίνη. Συγκεκριμένα έγινε έγχυση περίπου 16.5 lit γλυκερίνης και 3.5 lit νερού στη μεγάλη δεξαμενή (σκάφη), ώστε το διάλυμα να κυκλοφορήσει με τη βοήθεια της αντλίας στο σύστημά μας. Στη συνέχεια κάναμε το χαρακτηρισμό του διαλείμματος. Χρησιμοποιήσαμε ειδικό μικροσκόπιο (διαθλασίμετρο), στο οποίο με κατάλληλες ρυθμίσεις μπορούμε να βρούμε την ακριβή σύσταση του μίγματος σε γλυκερίνη κατά βάρος (% w/w). Πήραμε δείγμα από το διάλυμα μας, το βάλουμε στην πλάκα του διαθλασίμετρου και βρήκαμε το δείκτη διάθλασης ( $n$ ) του διαλείμματος μας, ο οποίος ήταν ίσος με 1.436. Επομένως η σύσταση του ομογενούς μίγματος μας ήταν 75.3 % κατά βάρος, το οποίο σημαίνει ότι σε 100 gr διαλείμματος περιέχονται 75.3 gr γλυκερίνης, κάτι το οποίο το βρίσκουμε από ειδικό πίνακα στο παράρτημα, που αναφέρεται στη γλυκερίνη (πίνακας 5.1) και με τη βοήθεια αριθμητικής παρεμβολής. Η δοκιμή αυτή έγινε την πρώτη μέρα που ξεκινήσαμε το πείραμα. Την επόμενη μέρα, ξανακάναμε τη δοκιμή για να χαρακτηρίσουμε το μείγμα. Το αποτέλεσμα μας ήταν σχεδόν το ίδιο ( $n = 1.437$ ), επομένως 76 % w/w. Το ίδιο και τη μεθεπόμενη μέρα, άρα καταλήξαμε στο ότι η σύσταση του διαλείμματος μας παρέμενε σταθερή κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Από ειδικό πίνακα, καταγράψαμε την τιμή της πυκνότητας  $\rho$  της γλυκερίνης, του ιξώδους της (κινηματικό  $\nu$  και δυναμικό  $\mu$ ), σε σύσταση 76 % w/w και συγκεκριμένη θερμοκρασία μίγματος. Η θερμοκρασία του μίγματος, πριν βάλουμε σε λειτουργία την αντλία, την πρώτη μέρα που τη μετρήσαμε με τη βοήθεια θερμοστοιχείου, το οποίο το εμβαπτίσαμε μέσα στη μεγάλη δεξαμενή, ήταν 24 °C. Τη δεύτερη μέρα ήταν 24.4 °C και την τρίτη μέρα 24.1 °C. Έτσι επειδή δεν είχαμε αποκλίσεις από την πρώτη μέτρηση, με βάση τη θερμοκρασία των 24 βαθμών καταγράψαμε τις αντίστοιχες τιμές των παραπάνω μεγεθών. Έτσι, έχουμε  $\rho = 1195.24 \text{ kg / m}^3$ ,  $\mu = 0.033748 \text{ kg / m} \cdot \text{sec}$  και  $\nu (= \mu / \rho) = 2.82353 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{sec}$  (πίνακες 5.2 στο παράρτημα). Και στις 3 περιπτώσεις κάναμε αριθμητική παρεμβολή για να έχουμε καλύτερα αποτελέσματα. Επίσης κάτι το οποίο δε θα έπρεπε να παραλείψουμε, είναι ότι  $1 \text{ cP} = 0.001 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 1 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ .

### 3.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Πριν ξεκινήσει η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε έλεγχος ως προς την ορθή λειτουργία της αντλίας. Το σύστημα έπρεπε να μην εμφανίζει διαρροές, είτε στις συνδέσεις της αντλίας είτε της μεγάλης δεξαμενής είτε της μικρής δεξαμενής. Για αυτό το λόγο κάναμε δοκιμές “παίζοντας” με τις στροφές της αντλίας, άλλοτε ρυθμίζοντας την σε υψηλές και άλλοτε σε χαμηλές. Έτσι είχαμε μία σφαιρική άποψη για τη συμπεριφορά ολόκληρου του συστήματος. Κυρίως οι συνδέσεις ήταν πιο επιρρεπείς σε διαρροές, και για αυτό το λόγο καλύφθηκαν με μεγάλες ποσότητες Teflon, ώστε να υπάρξει πλήρης στεγανοποίηση (όπως αναφέρθηκε προηγουμένως στην περιγραφή της συσκευής).

Πήραμε μετρήσεις στο πείραμά μας για συχνότητες της αντλίας από 0.80 Hz μέχρι 14.60 Hz, με αύξηση κάθε φορά κατά 0.20 Hz. Σε κάθε συχνότητα αντιστοιχούσε και μία παροχή (μαζική και ογκομετρική). Η μέτρηση της παροχής δεν έγινε με χρήση μανομέτρου, αλλά με τη μέθοδο της “κανάτας”. Ακολουθήθηκε αυτός ο τρόπος, γιατί η χρήση μανομέτρων για μέτρηση παροχών σε ρευστά με μεγάλα ιξώδη (στην περίπτωση μας η γλυκερίνη) αποφεύγεται, διότι χρειάζονται πολύπλοκοι συντελεστές διορθώσεων για την ανάδειξη των σωστών αποτελεσμάτων. Χρησιμοποιήθηκε κανάτα η οποία σε κάθε συχνότητα που ρυθμίζαμε την αντλία, την γεμίζαμε μέχρι κάποιο σημείο, βάζοντάς την κάτω από το χωνί απορροής. Με την έναρξη του γεμίσματος της κανάτας, αρχίσαμε να μετράμε το χρόνο που θα έκανε να γεμίσει η κανάτα μέχρι το συγκεκριμένο σημείο, με τη βοήθεια χρονομέτρου. Όπως ήταν φυσικό επιδίωξή μας ήταν να χρησιμοποιήσουμε όσο το δυνατόν πιο γρήγορα το χρονόμετρό μας, να το ξεκινάμε και να το σταματάμε εγκαίρως, ώστε να είχαμε όσο το δυνατόν καλύτερες μετρήσεις. Οι μετρήσεις της παροχής που είχαμε ήταν σε gr/sec, έτσι τα μετατρέψαμε σε kg/sec. Έτσι είχαμε τις συγκεκριμένες μετρήσεις, οι οποίες φαίνονται στον πίνακα 5.3 του παραρτήματος. Επίσης κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της αντλίας, με τη βοήθεια θερμοστοιχείου μετρούσαμε τη θερμοκρασία του διαλείμματος. Η θερμοκρασία του κατά μέσο όρο ανέβαινε περίπου 0.5 – 1.5 °C σε διάστημα μεταξύ μίας και δύο ωρών, κάτι το οποίο δεν μπορούσε να επηρεάσει αρνητικά το πείραμά μας. Έτσι αποδεικνύεται και με αυτό τον τρόπο ότι η αντικατάσταση της φυγοκεντρικής αντλίας από την γραναζωτή ήταν επιβεβλημένη.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΟΠΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Έπειτα από όλη αυτή τη διαδικασία, ο επόμενος στόχος μας ήταν η οπτικοποίηση της ροής με χρήση βιντεοκάμερας, Για κάθε συχνότητα, η οποία αντιστοιχούσε σε κάποιο συγκεκριμένο αριθμό Reynolds, τραβούσαμε βίντεο διάρκειας περίπου 15 - 19 sec, ώστε να μελετήσουμε τα φαινόμενα και γενικά τις “αστάθειες” στο πάνω και στο κάτω μέρος του αναβαθμού. Έγινε επεξεργασία των βίντεο στον υπολογιστή, και από κάθε βίντεο τραβήξαμε 3-6 φωτογραφίες, ώστε να έχουμε ένα αρκετά μεγάλο δείγμα και στο τέλος να επιλέξουμε τις πιο κατάλληλες, που θα απεικονίζουν ευκρινέστερα τα φαινόμενα Αυτό επετεύχθη χάρη στη βοήθεια του προγράμματος Cyberlink Power DVD. Οι φωτογραφίες αυτές μπόρεσαν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με τον αριθμό Reynolds που πετυχαίναμε κάθε φορά, με βάση τη συχνότητα της αντλίας. Έτσι, με αυτόν τον τρόπο καταλήξαμε σε 3 κατηγορίες : α) για χαμηλούς Re, β) για μεσαίους Re, και γ) για μεγάλους Re.

α) Για χαμηλούς Re, όπου τα video που τραβήχτηκαν εστίασαν στον αναβαθμό εσοχής ( step-in ), και όχι σε ολόκληρο τον αναβαθμό. Αυτό συμβαίνει επειδή στους Reynolds, από 2.45743 – 23.73333 (  $f = 0.80 - 5.60$  Hz), σχηματίζεται μία ελεύθερη επιφάνεια (προεξοχή), και στην πορεία με την αύξηση του Re μετατρέπεται σε τριχοειδή κύματα, κάτι το οποίο είναι απαραίτητο να απαθανατιστεί. Ενώ αντίθετα στο πάνω μέρος δε συμβαίνει κάποιο αξιοπερίεργο φαινόμενο.

- για  $Re = 2.45743$  ( $f = 0.80$  Hz) και σε  $t = 15$  sec



Παρατηρούμε ότι σχηματίζεται μία τριχοειδής παραμόρφωση (προεξοχή) της ελεύθερης επιφάνειας ανάντη της ακμής του αναβαθμού εσοχής, η οποία είναι ανεπηρέαστη από το κύμα. Συνεισφέρει την πίεση για τη μετατόπιση του υγρού υμένος, ώστε να παραμείνει σε επαφή με το κάθετο τοίχωμα. Το ρευστό κυλάει ομαλά και ο κυματισμός έχει μία τάση προς αριστερά.

- για  $Re = 4.338881$  ( $f = 1.20$  Hz) και σε  $t = 18$  sec



Εδώ παρατηρούμε ότι τα κύματα είναι λίγο πιο έντονα, και για αυτό στο αριστερό μέρος τα κύματα σπάνε εν μέρει την προεξοχή.

►  $Re = 5.220768$  ( $f = 1.40$  Hz)



Εδώ παρατηρούμε ότι ο κυματισμός είναι πιο έντονος, και η προεξοχή “σπάει” σε πιο πολλά σημεία, σε σχέση με την προηγούμενη εικόνα, που είχαμε μικρότερη παροχή.

►  $Re = 7.000062$  ( $f = 1.80$  Hz)



Εδώ παρατηρούμε ότι στο μέσο του σκαλοπατιού είναι πιο έντονοι οι κυματισμοί σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις και ειδικότερα κάτω από το step-in. Επίσης, το σημαντικότερο είναι ότι η προεξοχή κάτω από το step-in διασπάται από τους πιο έντονους κυματισμούς σε δύο σημεία, αριστερά και δεξιά.

►  $Re = 7.859372$  (  $f = 2.00$  Hz )



Εδώ παρατηρούμε ότι και στην προηγούμενη φωτογραφία, μόνο που η προεξοχή πριν το step-in “σπάει” μόνο στο αριστερό μέρος του σκαλοπατιού.

►  $Re = 9.637255$  (  $f = 2.40$  Hz )



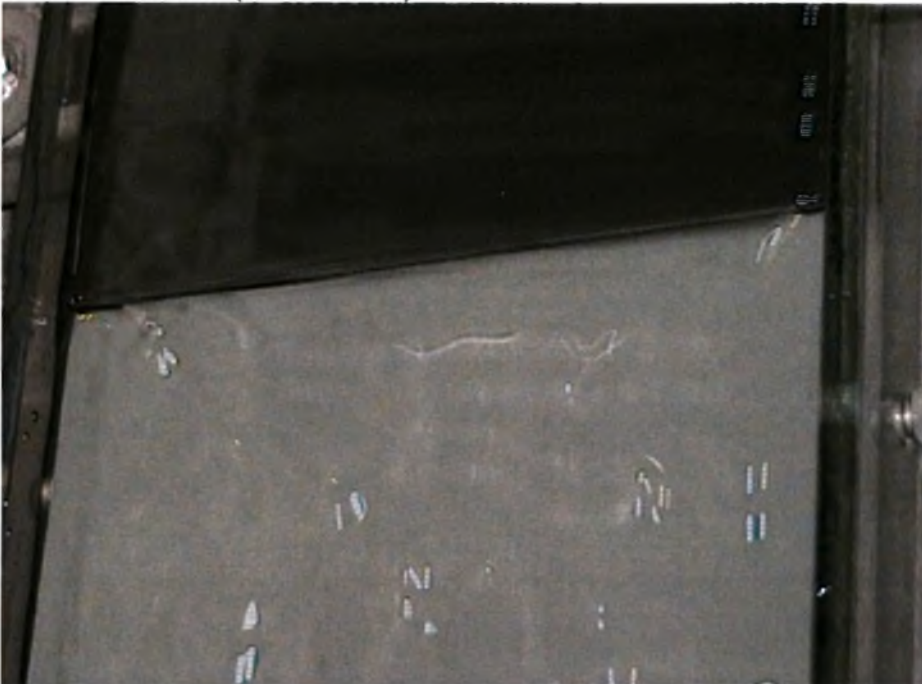
Εδώ παρατηρούμε ότι το χαρακτηριστικό μήκος της τριχοειδούς παραμόρφωσης έχει εμφανώς μειωθεί σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις. Στο αριστερό και κεντρικό μέρος του σκαλοπατιού μπορούμε να διακρίνουμε πιο έντονους κυματισμούς καθώς επίσης και το “σπάσιμο” της προεξοχής αριστερά και δεξιά του σκαλοπατιού.

►  $Re = 10.54736$  (  $f = 2.60$  Hz )



Εδώ παρατηρούμε ότι η προεξοχή μετά βίας διακρίνεται. Στο μόνο σημείο που μπορούμε να την εντοπίσουμε είναι στο αριστερό μέρος του σκαλοπατιού.

►  $Re = 12.25187$  (  $f = 3.00$  Hz )



Εδώ μπορούμε να παρατηρήσουμε εν μέρει την προεξοχή. Επίσης το κύμα στο κέντρο περίπου και κάτω του step-in έχει “ανοίξει” σε μεγαλύτερο βαθμό. Μία νέα ελεύθερη επιφάνεια πάει να εμφανιστεί.

►  $Re = 14.93281$  ( $f = 3.60$  Hz)



Παρατηρούμε ότι και στο προηγούμενο, μόνο που έχει “ανοίξει” και άλλο το κύμα και έχει εξαπλωθεί κατά μήκος του step-in. Επίσης, παρατηρούνται κυματισμοί στην ελεύθερη επιφάνεια πιο έντονα, κάτι το οποίο δεν γινόταν αντιληπτό σε προηγούμενες φωτογραφίες.

►  $Re = 17.38375$  ( $f = 4.20$  Hz)



Ίδιο με το προηγούμενο, με τη διαφορά ότι το κύμα κάτω από το step-in είναι πιο ομοιόμορφο και πιο συρρικνωμένο σε σχέση με τις προηγούμενες φωτογραφίες.



► Re = 18.76654 ( f = 4.40 Hz )



Στην εικόνα αυτή με δυσκολία διακρίνουμε την προεξοχή πριν το step-in, όπως και στις πιο πάνω εικόνες. Επίσης μπορούμε να παρατηρήσουμε το κύμα κάτω από το step-in που είναι ακόμα πιο συρρικνωμένο σε σχέση με την προηγούμενη εικόνα.

► Re = 18.96634 ( f = 4.60 Hz )



Στην εικόνα αυτή παρατηρούμε να συρρικνώνεται σε μεγαλύτερο βαθμό η ελεύθερη επιφάνεια. Το σημαντικότερο όμως είναι ότι έχουν κάνει πια την εμφάνισή τους ποσότητες αέρα ( φουσαλίδες ) που έχουν παγιδευτεί μεταξύ τοιχώματος και υμένου, στο κέντρο, αριστερά και δεξιά της φωτογραφίας. Οι

φουσαλίδες αυτές παραμένουν στο κάτω μέρος του step-in μέχρι κάποιους συγκεκριμένους Reynolds, όπως θα φανεί παρακάτω.

►  $Re = 20.03646$  ( $f = 4.80$  Hz)



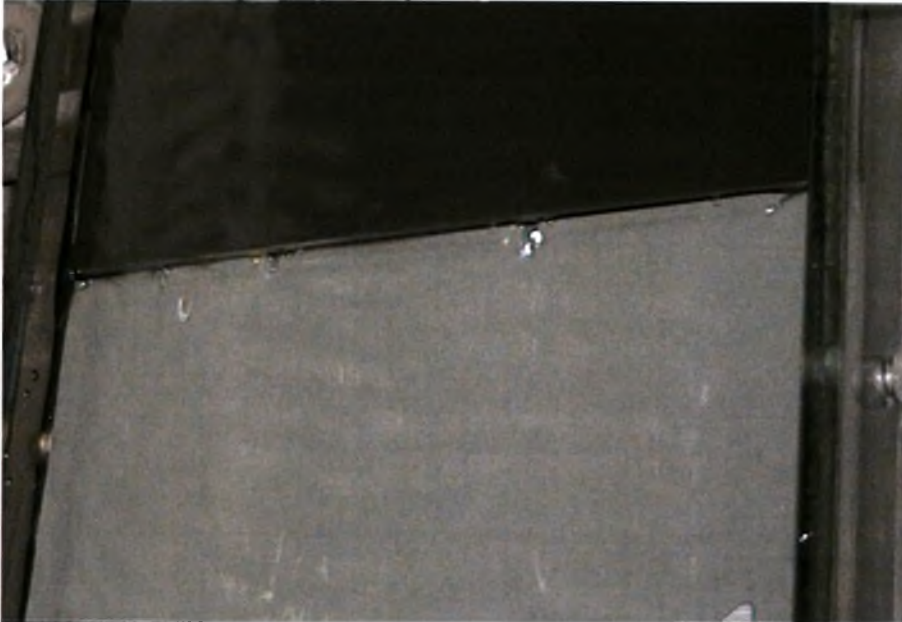
Στην εικόνα αυτή παρατηρούμε πάνω κάτω ότι και στην προηγούμενη, μόνο που το φαινόμενο των φουσαλίδων είναι πιο έντονο στα συγκεκριμένα σημεία. Επίσης, στο αριστερό μέρος και κάτω του step-in, ο κυματισμός είναι λίγο πιο έντονος σε σχέση με την προηγούμενη φωτογραφία.

►  $Re = 21.81434$  ( $f = 5.20$  Hz)



Παρομοίως και σε αυτή την εικόνα παρατηρούμε ότι και στην προηγούμενη, με τη μόνη διαφορά ότι οι φουσαλίδες που βρίσκονται στο κέντρο και κάτω από το step-in, έχουν μετακινηθεί προς αριστερά, αυξάνοντας την μεταξύ τους απόσταση.

►  $Re = 23.73333$  ( $f = 5.60$  Hz)



Εδώ παρατηρούμε ότι και στην προηγούμενη, μόνο που οι φυσαλίδες που βρίσκονται κεντρικά και προς τα δεξιά του step-in, έχουν αυξηθεί.

b) Για μεσαίους Reynolds, εστίασαμε και πάλι στον αναβαθμό εσοχής (step-in), καθώς στο πάνω μέρος του αναβαθμού δε συμβαίνει κάποιο φαινόμενο άξιο σχολιασμού. Δημιουργούνται νέες προεξοχές, και εγκλείσματα, για Reynolds από  $25.57612 - 45.71699$  ( $f = 6.00 - 10.80$  Hz).

►  $Re = 25.57612$  ( $f = 6.00$  Hz)



Στην εικόνα αυτή παρατηρούμε ότι ακριβώς στο κέντρο και κατάντη της ακμής του αναβαθμού εσοχής έχει δημιουργηθεί μία “τριγωνική” προεξοχή, και λειτουργεί σαν ελεύθερη επιφάνεια, η οποία “σπάει” το κύμα, χωρίς να

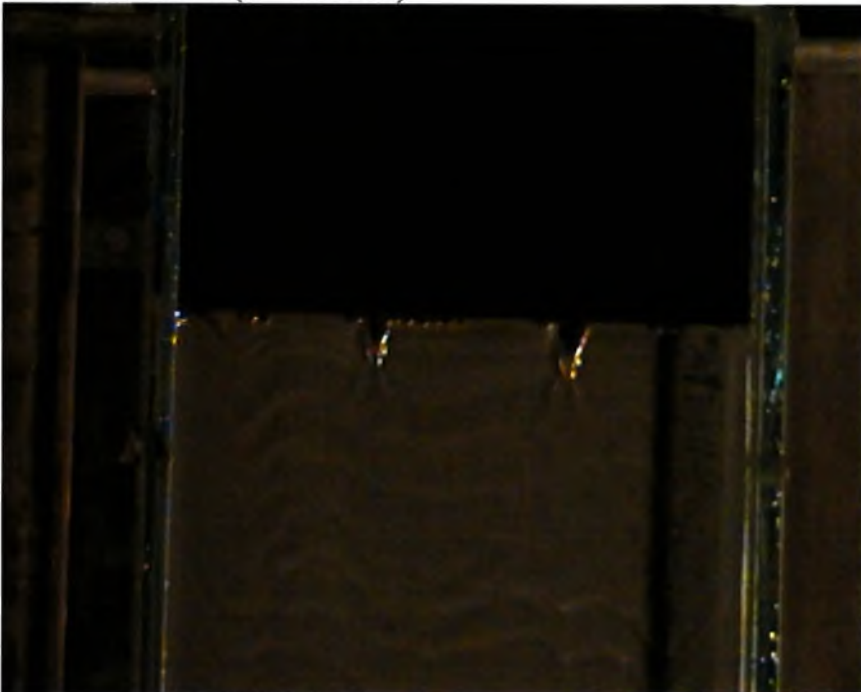
επηρεάζεται από αυτό. Επίσης διακρίνουμε ποσότητες αέρα παγιδευμένες (φουσαλίδες) αριστερά και δεξιά της προεξοχής αυτής.

►  $Re = 26.80935$  ( $f = 6.40$  Hz)



Εδώ παρατηρούμε ότι από την πτώση μίας μεγάλης μάζας κύματος διαλύεται η ελεύθερη επιφάνεια, και μετατρέπεται σε φουσαλίδες κάτω από το step-in.

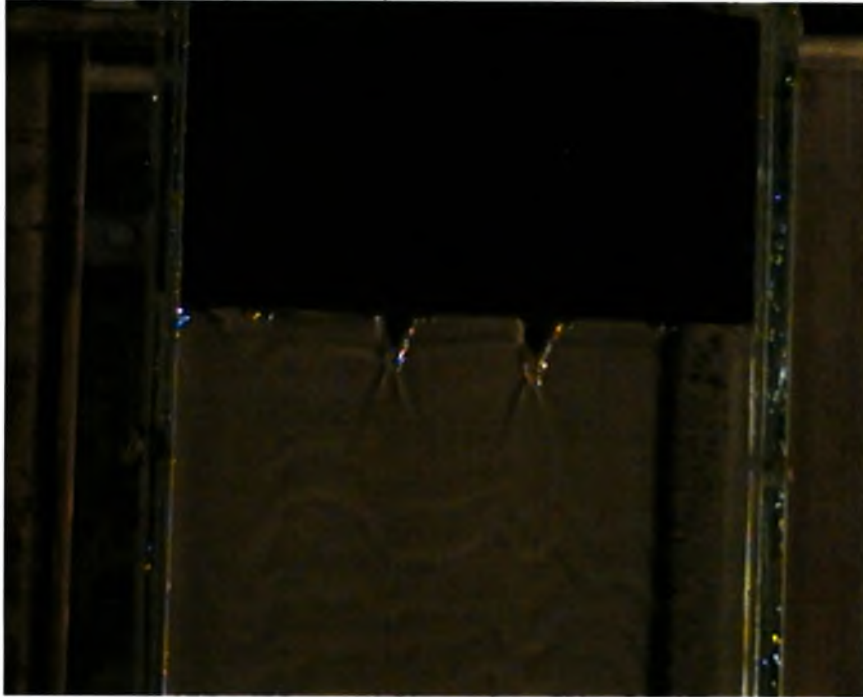
►  $Re = 28.03891$  ( $f = 6.60$  Hz)



Εδώ παρατηρούμε ότι σχηματίζονται δύο μεγάλα εγκλείσματα τριγωνικού σχήματος, εν αντιθέσει με προηγούμενες συχνότητες, όπου υπήρχε μία προεξοχή. Από την κορυφή των εγκλεισμάτων ξεκινούν κύματα Kelvin, τα οποία οφείλονται στη διαταραχή που εισάγουν τα εγκλείσματα στη ροή, και "κόβουν" τη ροή του υμένου. Επίσης μεταξύ των εγκλεισμάτων μπορούμε να διακρίνουμε φουσαλίδες, όπως επίσης στο αριστερό μέρος και στο δεξί μέρος της φωτογραφίας.

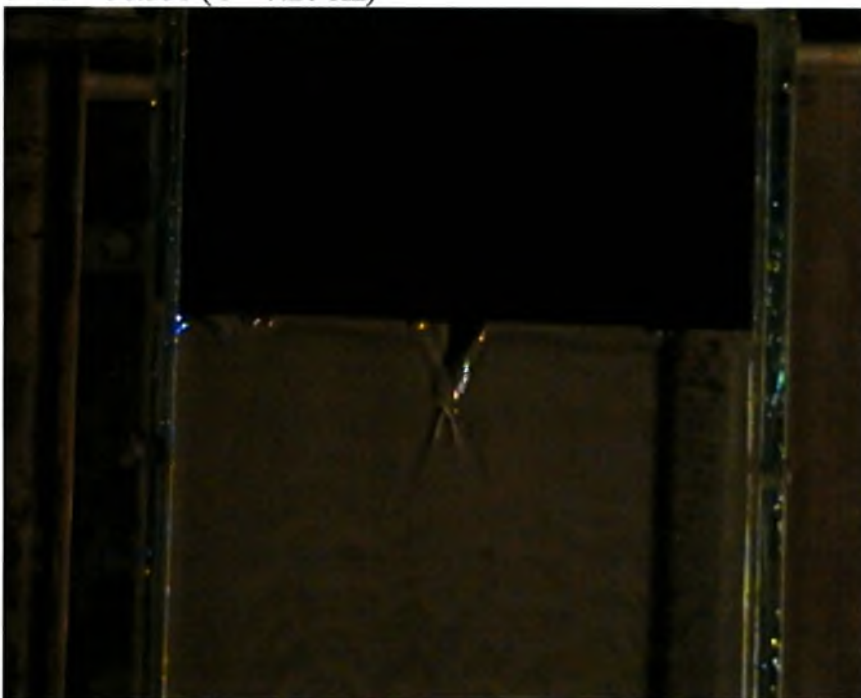
Γεώργιος Ζήσης-''Πειραματική μελέτη ροής κατακόρυφου υγρού υμένα πάνω από αναβαθμό''', σχολή Μηχανολόγων Μηχ/κών Βιομηχανίας

►  $Re = 30.0664$  ( $f = 7.00$  Hz)



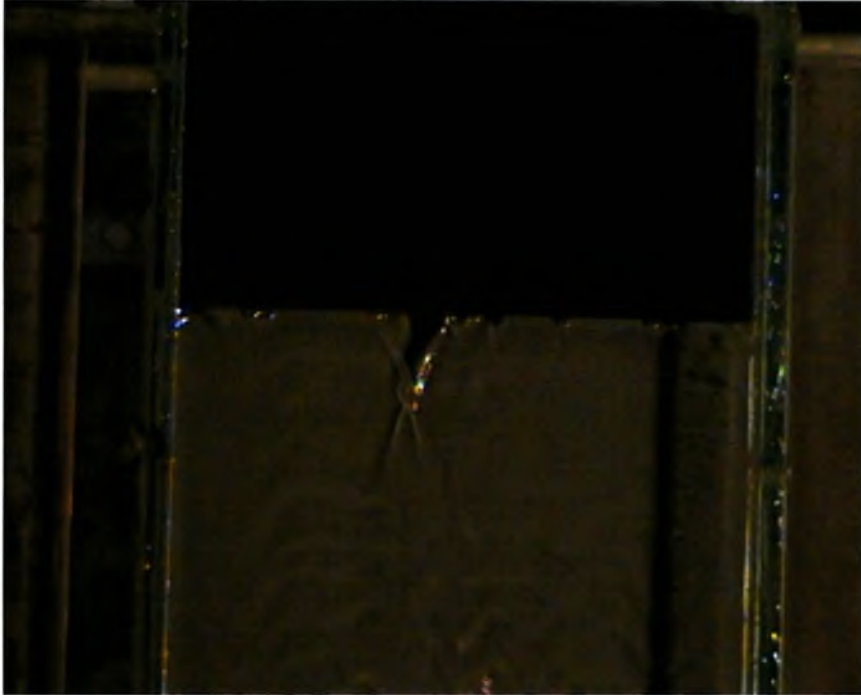
Παρατηρούμε ότι τα δύο αυτά εγκλείσματα έχουν αυξηθεί, έχουν μία τάση να συναντηθούν. Επίσης, τα κύματα Kelvin “κόβουν” πιο έντονα τη ροή. Έπειτα, οι φυσαλίδες που υπήρχαν ανάμεσά τους έχουν σχεδόν εξαλειφθεί, καθώς ενσωματώθηκαν στο αριστερό εγκλείσμα, το οποίο φαίνεται μεγαλύτερο σε μέγεθος.

►  $Re = 30.351$  ( $f = 7.20$  Hz)



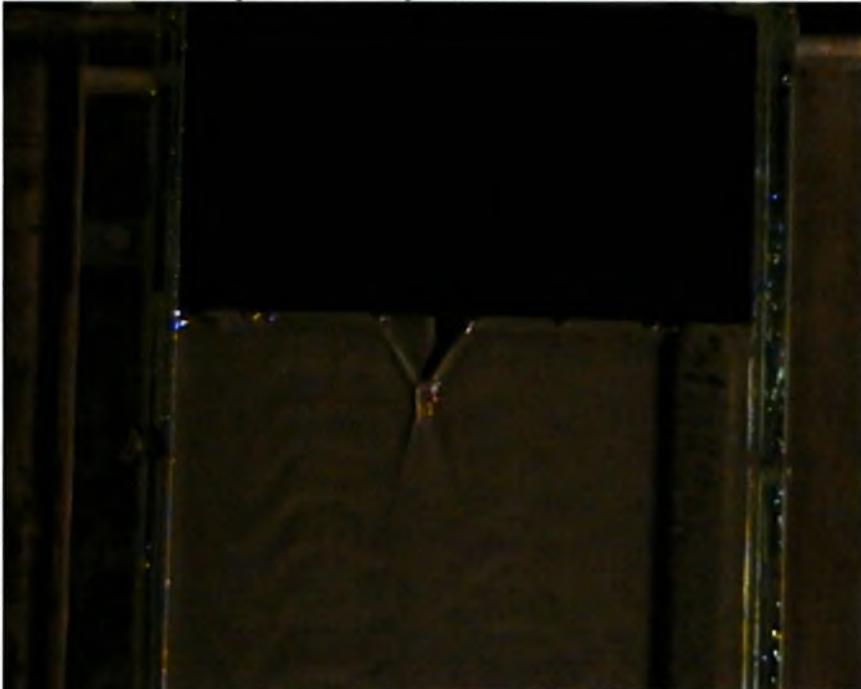
Εδώ ενώνονται τα δύο εγκλείσματα, και προκύπτει ένα νέο, το οποίο αποτελεί τη “συνισταμένη” τους. Οι φυσαλίδες αριστερά και δεξιά παραμένουν ως έχουν.

►  $Re = 32.12748$  ( $f = 7.60$  Hz)



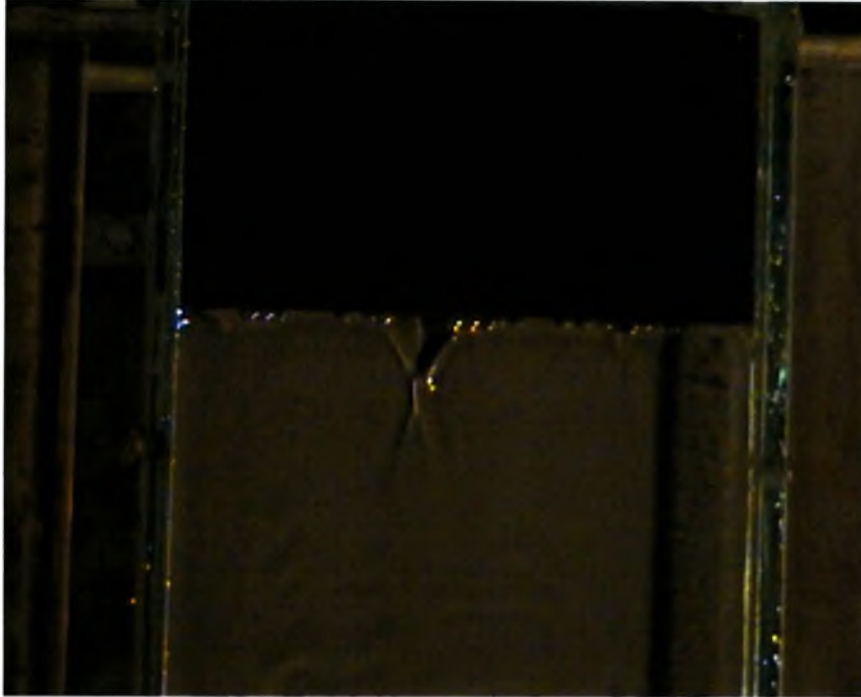
Στην εικόνα αυτή διακρίνουμε φυσαλίδες, οι οποίες “ακουμπάνε” το έγκλεισμα και άλλες που είναι αριστερά και δεξιά του. Τα κύματα Kelvin, λόγω του μεγέθους του εγκλείσματος, “σπάνε” σε μεγαλύτερο βαθμό τη ροή.

►  $Re = 32.90495$  ( $f = 7.80$  Hz)



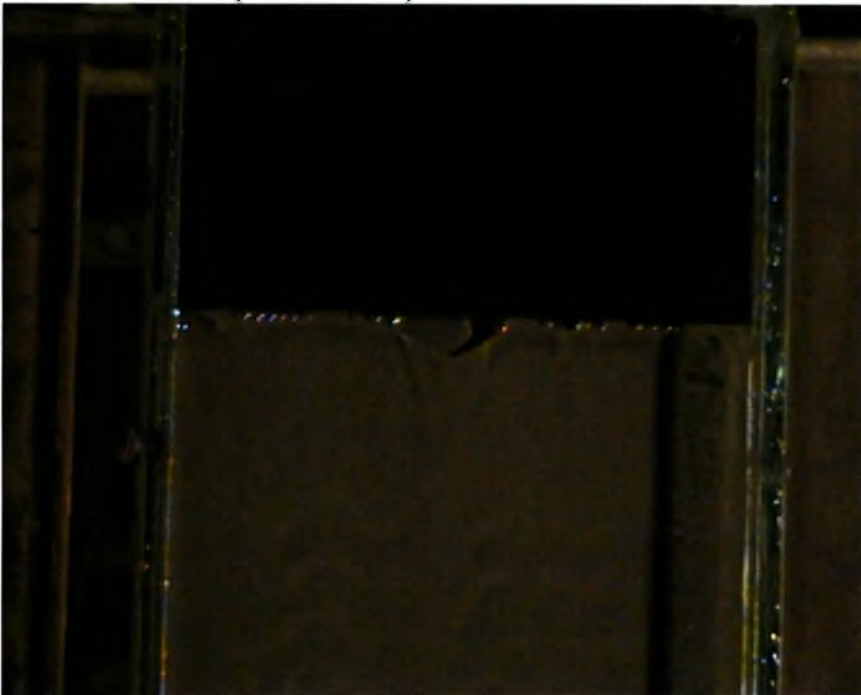
Εδώ το τριγωνικό μας έγκλεισμα μεταβάλλει το σχήμα του σε σχέση με την προηγούμενη φωτογραφία. Αν υποθέταμε ότι πιο πριν το τρίγωνο ήταν ισοσκελές, τώρα έχουμε ισόπλευρο τρίγωνο, λόγω του ότι οι φυσαλίδες που βρίσκονταν δίπλα στο έγκλεισμα ενώθηκαν με αυτό. Οι υπόλοιπες φυσαλίδες παραμένουν στα ίδια σημεία, όπως και στην προηγούμενη εικόνα.

►  $Re = 33.59635$  (  $f = 8.00$  Hz )



Εδώ παρατηρούμε ότι το κεντρικό έγκλεισμα έχει συρρικνωθεί, σε σχέση με αυτό της προηγούμενης εικόνας. Αριστερά και δεξιά του έχουν σχηματιστεί περισσότερες φυσαλίδες. Επίσης ίσα ίσα μπορούμε να διακρίνουμε στο δεξί μέρος της φωτογραφίας μία φυσαλίδα, η οποία είναι μεγαλύτερη από τις άλλες, και τα κύματα Kelvin που ξεκινούν από αυτήν, “κόβουν” τη ροή.

►  $Re = 36.87414$  (  $f = 8.80$  Hz )



Το έγκλεισμα έχει εξαπλωθεί περισσότερο κατάντη του step-in, λόγω του ότι οι διπλανές φυσαλίδες ενώθηκαν με αυτό. Αριστερά του παρατηρούμε περισσότερες

φουσαλίδες σε σχέση με την προηγούμενη εικόνα. Επίσης τα κύματα Kelvin είναι λιγότερο έντονα, και "κόβουν" σε μικρότερο βαθμό τη ροή.

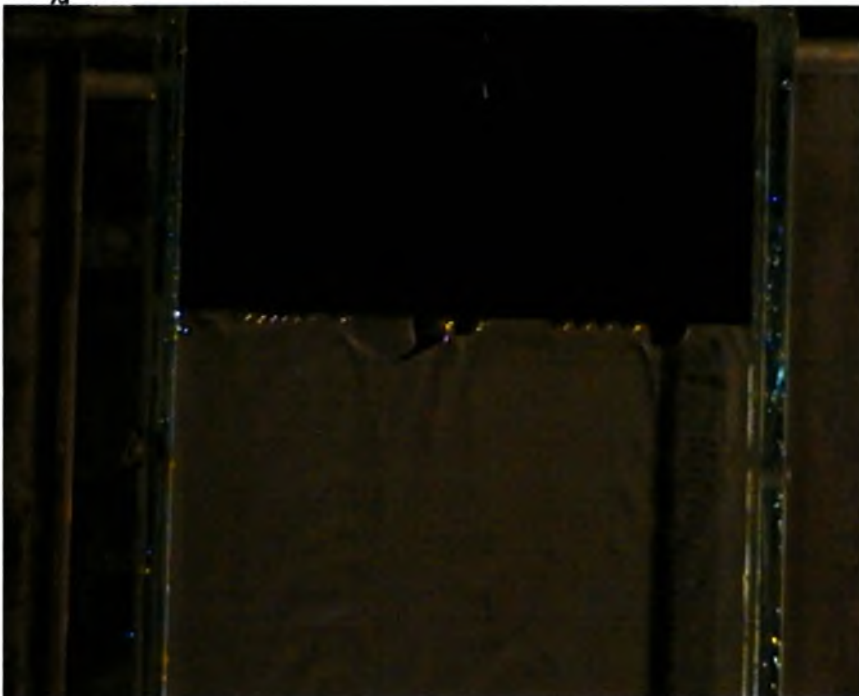
►  $Re = 38.14688$  ( $f = 9.00$  Hz)



Εδώ παρατηρούμε ότι μειώνεται ο αριθμός των φουσαλίδων στο δεξί μέρος της φωτογραφίας. Επίσης, το έγκλεισμα "σπάει" στο δεξί του μέρος και κάνει την εμφάνισή της μία φουσαλίδα, μεγαλύτερη σε μέγεθος σε σχέση με τις άλλες. Έτσι, τα κύματα Kelvin που ξεκινούν από αυτή "σπάνε" και αυτά με το μέρος τους τη ροή.

►  $Re = 38.78607$  ( $f = 9.20$  Hz)

σε χρόνο  $t = 1$  sec





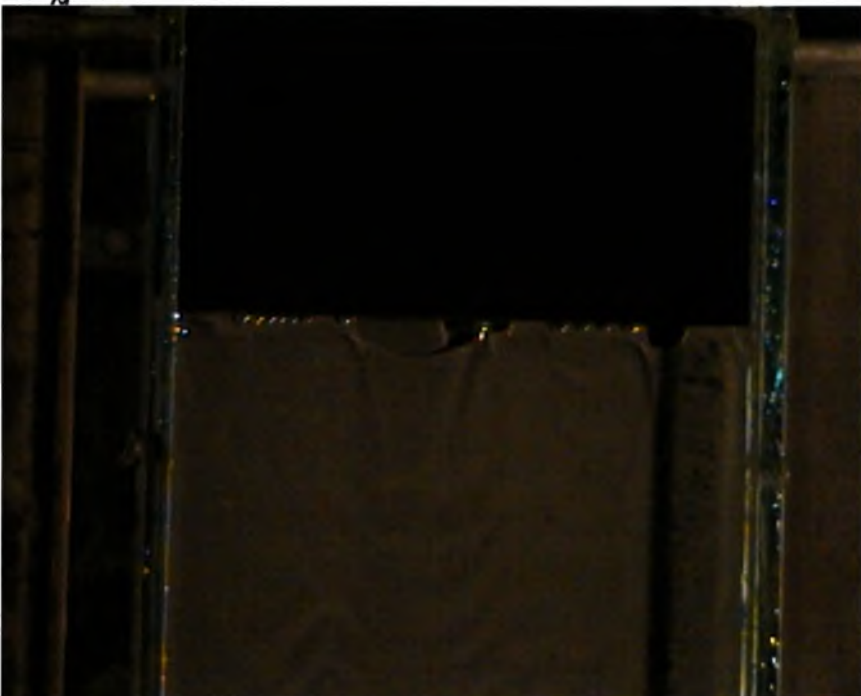
Εδώ παρατηρούμε έχει (ξανά)δημιουργηθεί μία φυσαλίδα μεγάλου μεγέθους στο δεξί μέρος της εικόνας. Τα κύματα Kelvin που ξεκινούν από αυτήν “κόβουν” τη ροή.

Σε χρόνο  $t = 2 \text{ sec}$



Εδώ παρατηρούμε τα ίδια φαινόμενα με την προηγούμενη εικόνα, με τη μόνη διαφορά ότι έχει προστεθεί άλλη μία φυσαλίδα, που ακουμπάει τη δεξιά φυσαλίδα του εγκλείσματος. Τα κύματα Kelvin που ξεκινούν από αυτή τη φυσαλίδα, με τη σειρά τους, “κόβουν” τη ροή, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις.

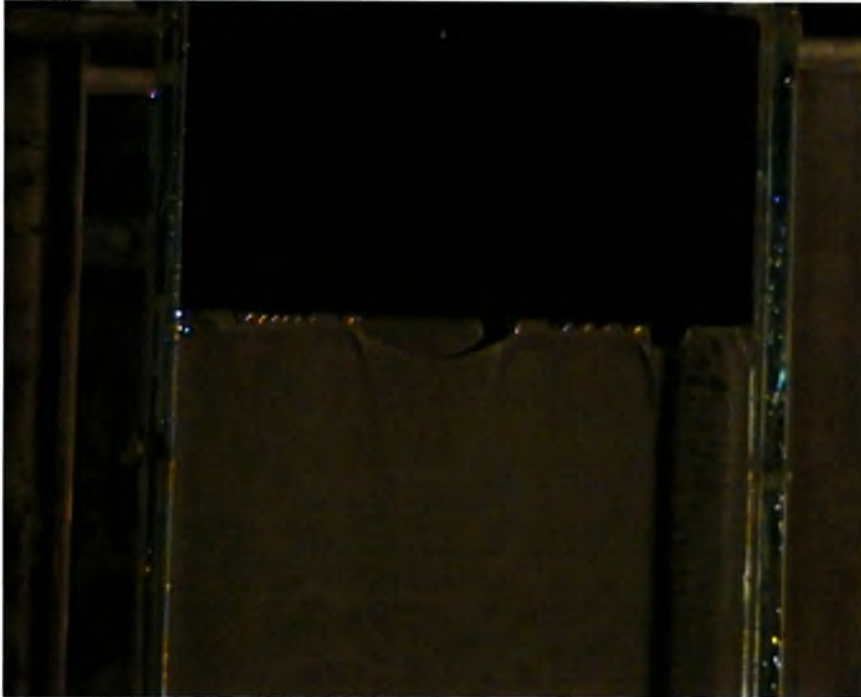
Σε χρόνο  $t = 3 \text{ sec}$



Στην εικόνα αυτή, απομακρύνεται η φυσαλίδα που προστέθηκε πιο πριν, και επανερχόμαστε στην κατάσταση  $t = 1 \text{ sec}$ .

Γεώργιος Ζήσης- 'Πειραματική μελέτη ροής κατακόρυφου υγρού υμένα πάνω από αναβαθμό'' ,σχολή Μηχανολόγων Μηχ/κών Βιομηχανίας

Σε χρόνο  $t = 10 \text{ sec}$



Εδώ η φυσαλίδα δεν υπάρχει, γιατί ενώθηκε με το έγκλεισμα, το οποίο εξαπλώθηκε προς τα δεξιά.

Σε χρόνο  $t = 12 \text{ sec}$



Το έγκλεισμα συρρικνώνεται και αποκτά "τριγωνικό" σχήμα. Αριστερά του παρουσιάζεται μία φυσαλίδα, ιδίου μεγέθους με αυτήν δεξιά της εικόνας. Τα

Γεώργιος Ζήσης-''Πειραματική μελέτη ροής κατακόρυφου υγρού υμένα πάνω από αναβαθμό'', σχολή Μηχανολόγων Μηχ/κών Βιομηχανίας

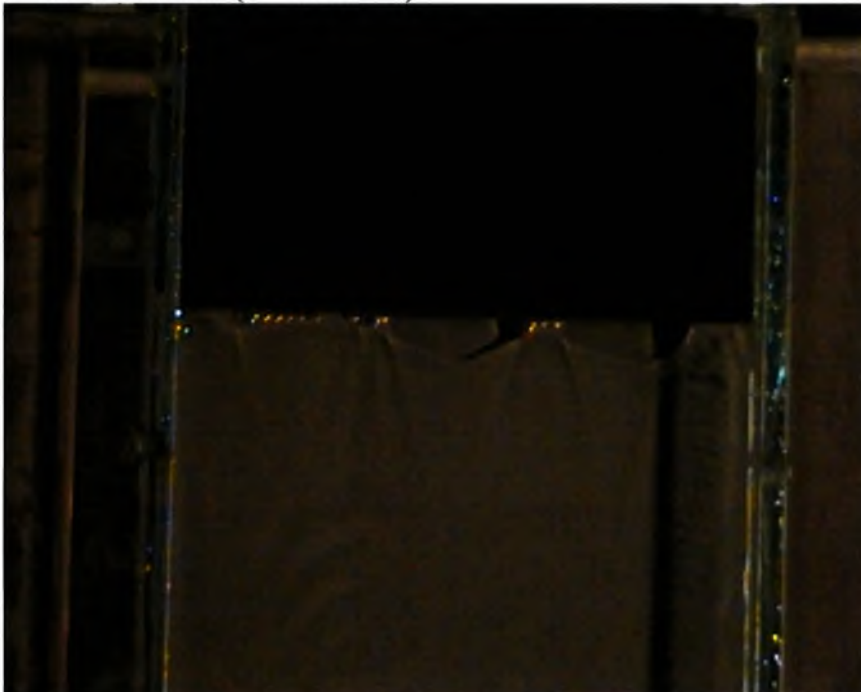
κύματα Kelvin που ξεκινούν από τη φουσαλίδα αυτή “κόβουν” και αυτά τη ροή. Οι φουσαλίδες, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, παραμένουν ως έχουν.

Σε χρόνο  $t = 14\text{sec}$



Στην εικόνα αυτή εξαφανίζεται η φουσαλίδα, αριστερά του εγκλείσματος, το οποίο εξαπλώνεται προς τα αριστερά. Η φουσαλίδα ενσωματώνεται στο εγκλείσμα. Στην εικόνα αυτή παρατηρούμε αλλαγή κατάστασης, για αυτό το λόγο παρατηρούνται κάποιοι κυματισμοί κάτω από τον αναβαθμό.

►  $Re = 39.40551$  ( $f = 9.40$  Hz)

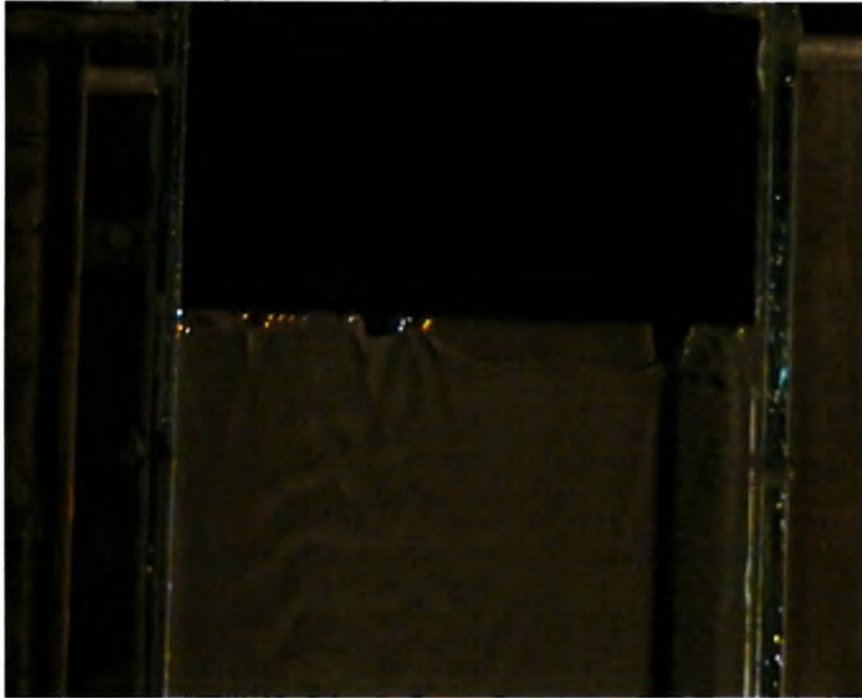


Πέρα από το κεντρικό εγκλείσμα κατόντη της ακμής του αναβαθμού εσοχής, έχει δημιουργηθεί άλλο ένα, δεξιά του, περίπου ίσο σε μέγεθος και ανάμεσά τους

Γεώργιος Ζήσης-''Πειραματική μελέτη ροής κατακόρυφου υγρού υμένα πάνω από αναβαθμό''', σχολή Μηχανολόγων Μηχ/κών Βιομηχανίας

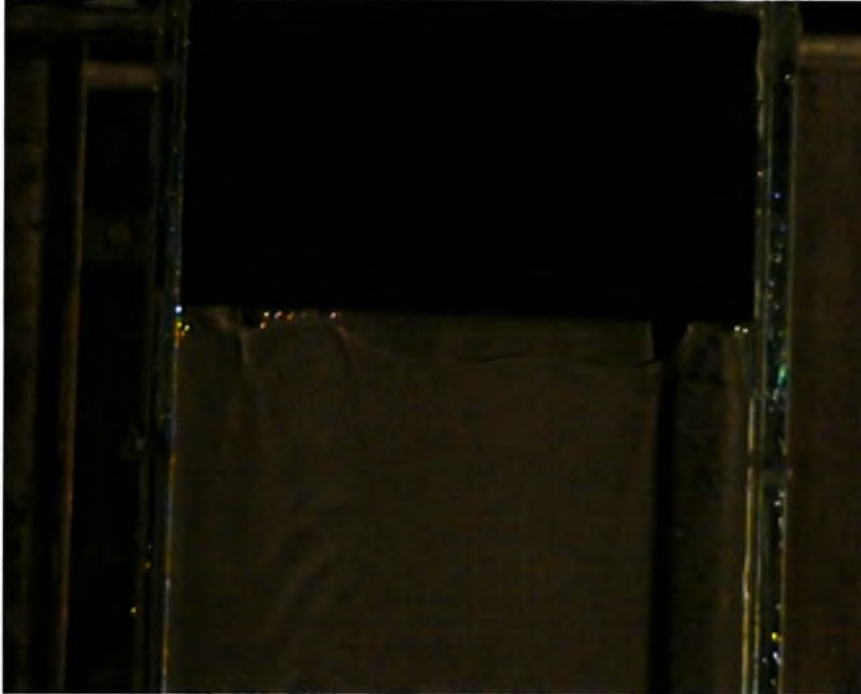
παρεμβάλλονται φυσαλίδες. Επίσης, η μεγαλύτερη σε μέγεθος φυσαλίδα, στο αριστερό μέρος της εικόνας, μεγάλωσε και τα κύματα Kelvin “σπάνε” σε μεγαλύτερο βαθμό τη ροή. Ακόμα, άλλη μία σχετικά μεγάλη σε μέγεθος φυσαλίδα έχει σχηματιστεί δίπλα και αριστερά του κεντρικού εγκλείσματος, της οποίας τα κύματα Kelvin, με το μέρος τους “κόβουν” τη ροή.

►  $Re = 40.4158$  ( $f = 9.60$  Hz)



Στην εικόνα αυτή, τα δύο εγκλείσματα ενώνονται, και προκύπτει η “συνισταμένη” τους, το οποίο είναι ένα σχετικά ομοιόμορφο στρώμα αέρα με μήκος στη διεύθυνση ροής, παρόμοιο με το ύψος του αναβαθμού. Επίσης, η φυσαλίδα, που ήταν αριστερά του κεντρικού εγκλείσματος, έχει μεγαλώσει σε μέγεθος, και τα κύματα Kelvin “κόβουν” τη ροή σε μεγαλύτερο βαθμό σε σχέση με πριν. Οι φυσαλίδες στο αριστερό σημείο της εικόνας μειώθηκαν σε σχέση με την προηγούμενη φωτογραφία.

►  $Re = 41.10282$  ( $f = 9.80$  Hz)



Εδώ η φυσαλίδα που είχε προηγουμένως δημιουργηθεί, εξαφανίζεται, και το ομοιόμορφο στρώμα αέρα εξαπλώνεται προς τα αριστερά. Η φυσαλίδα που είχε δημιουργηθεί ενσωματώθηκε στο στρώμα αέρα. Η μεγάλη φυσαλίδα αριστερά της εικόνας παραμένει ως έχει.

►  $Re = 42.14006$  ( $f = 10.00$  Hz)



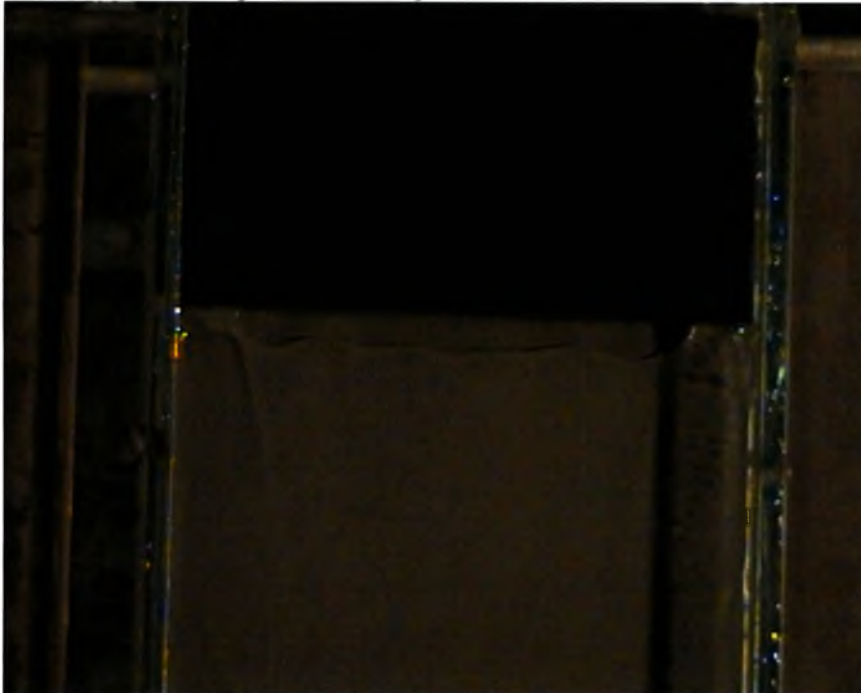
Εδώ οι φυσαλίδες είναι περισσότερες στο αριστερό μέρος της φωτογραφίας. Το ομοιόμορφο στρώμα αέρα και η μεγάλη φυσαλίδα παρεμβάλλονται στη ροή του ρευστού.

►  $Re = 44.7465$  ( $f = 10.60$  Hz)



Εδώ παρατηρούμε ότι το στρώμα αέρα έχει επεκταθεί και άλλο προς τα αριστερά, και αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι φυσαλίδες να εξαφανιστούν. Έτσι, οι φυσαλίδες ενσωματώθηκαν στο στρώμα, ενώ παρέμεινε η μεγάλη φυσαλίδα που είχε δημιουργηθεί στην παροχή των 9.40 Hz. Το στρώμα αέρα με τη φυσαλίδα “κόβουν” τη ροή του ρευστού στις άκρες τους (τέρμα αριστερά και δεξιά της εικόνας)

►  $Re = 45.71699$  ( $f = 10.80$  Hz)



Παρατηρούμε ότι η προηγούμενη φυσαλίδα ενσωματώθηκε στο στρώμα αέρα, και έτσι εξαφανίστηκε από την εικόνα. Το στρώμα μετακινήθηκε προς τα αριστερά, ενσωματώνοντας τη φυσαλίδα και “κόβει” τη ροή του ρευστού στην αριστερή

και δεξιά του άκρη. Επίσης, στη φωτογραφία μας διακρίνουμε ότι δεν υπάρχει κυματισμός κάτω από τον αναβαθμό.

c) Για τους υψηλούς Reynolds, από 46.81392 – 59.91339 (11.00 – 14.60 Hz) εστίασαμε στον αναβαθμό εξοχής ( step-out ), όπου παρατηρείται μία αδρανειακή παραμόρφωση κατάντη της ακμής του αναβαθμού. Στο κάτω μέρος του αναβαθμού, δεν υφίσταται κάποια αλλαγή, και εξακολουθεί να υπάρχει το στρώμα αέρα που δημιουργήθηκε και κατέληξε σε τελικό στάδιο, στην παροχή των 10.80 Hz.

► Re = 46.81392 ( f = 11.00 Hz )



Στην εικόνα αυτή παρατηρούμε μία αρκετά μεγάλη σε μέγεθος τριγωνική φυσαλίδα, η οποία έχει παγιδευτεί κατάντη της ακμής εξοχής και στο αριστερό μέρος του σκαλοπατιού. Επίσης μπορούμε να παρατηρήσουμε προς το κέντρο του σκαλοπατιού μία μικρή σε μέγεθος μάζα αέρα (παράλληλη στην ακμή της εξοχής). Η φυσαλίδα και η μάζα του αέρα προκαλούν κατάντη της ροής κύματα Kelvin.

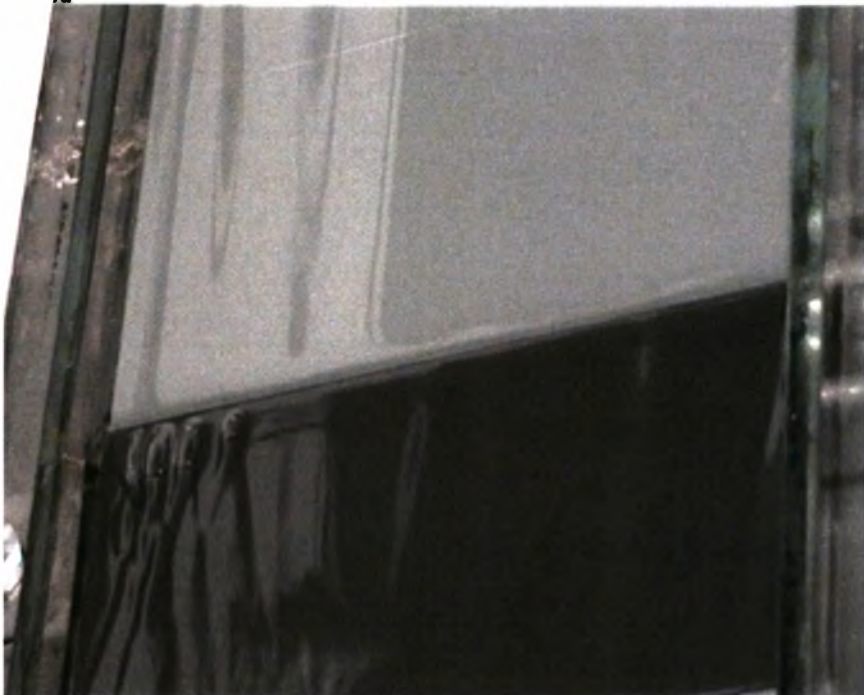
►  $Re = 55.31453$  (  $f = 13.00$  Hz )



Στην φωτογραφία αυτή παρατηρούμε ότι άλλη μία φυσαλίδα ιδίου μεγέθους προστέθηκε δίπλα από την ήδη υπάρχουσα και τα κύματα Kelvin που ξεκινούν από αυτές, "σπάνε" τη ροή. Επίσης, δεξιά των φυσαλίδων, διακρίνουμε τη μάζα αέρα, η οποία είναι εμφανώς συρρικνωμένη. Ακόμα, μπορούμε μετά βίας να διακρίνουμε κάποιες μικρές μάζες, δεξιά της κύριας, οι οποίες "κόβουν" και αυτές με το μέρος τους εν μέρει τη ροή.

►  $Re = 55.88945$  (  $f = 13.20$  Hz )

Σε χρόνο  $t = 3$  sec

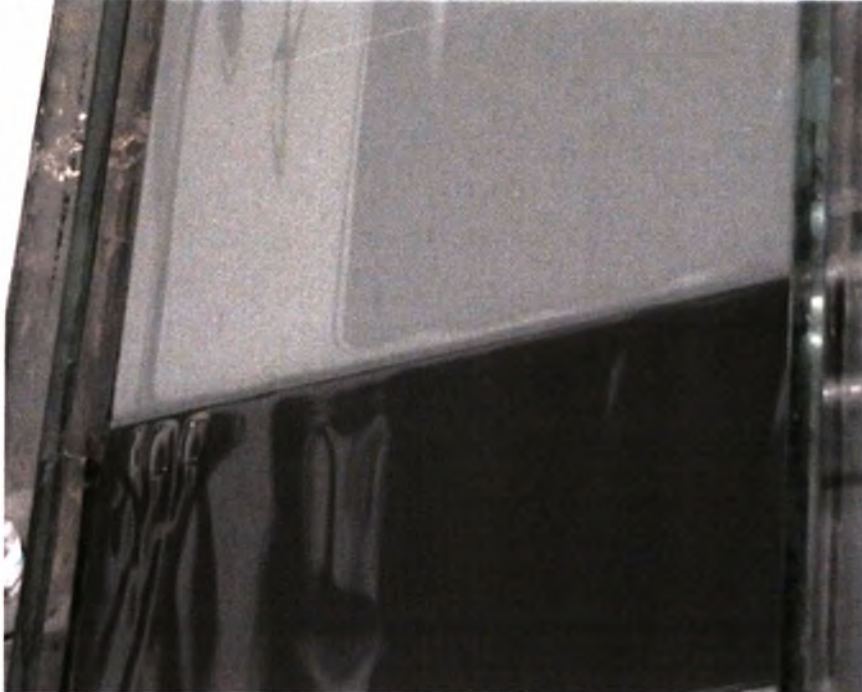


Εδώ παρατηρούμε ότι έχουν προστεθεί άλλες δύο τριγωνικές φυσαλίδες στο αριστερό μέρος της φωτογραφίας. Επίσης, διακρίνουμε κάποιες μάζες αέρα κοντά στις φυσαλίδες, οι οποίες λόγω της συρρίκνωσής τους δεν επηρεάζουν σε μεγάλο



βαθμό τη ροή. Η κύρια μάζα αέρα που είναι παράλληλη στο step-out, έχει εμφανώς συρρικνωθεί σε σχέση με προηγουμένως. Από τις φουσαλίδες ξεκινούν κύματα Kelvin, τα οποία "κόβουν" τη ροή.

Σε χρόνο  $t = 18 \text{ sec}$



Εδώ παρατηρούμε ότι οι φουσαλίδες έχουν γίνει τρεις. Εικάζουμε ότι η άλλη φουσαλίδα ενσωματώθηκε στην κεντρική μάζα αέρα, η οποία μετά βίας διακρίνεται.

•  $Re = 56.4643$  ( $f = 13.40 \text{ Hz}$ )

Σε χρόνο  $t = 3 \text{ sec}$

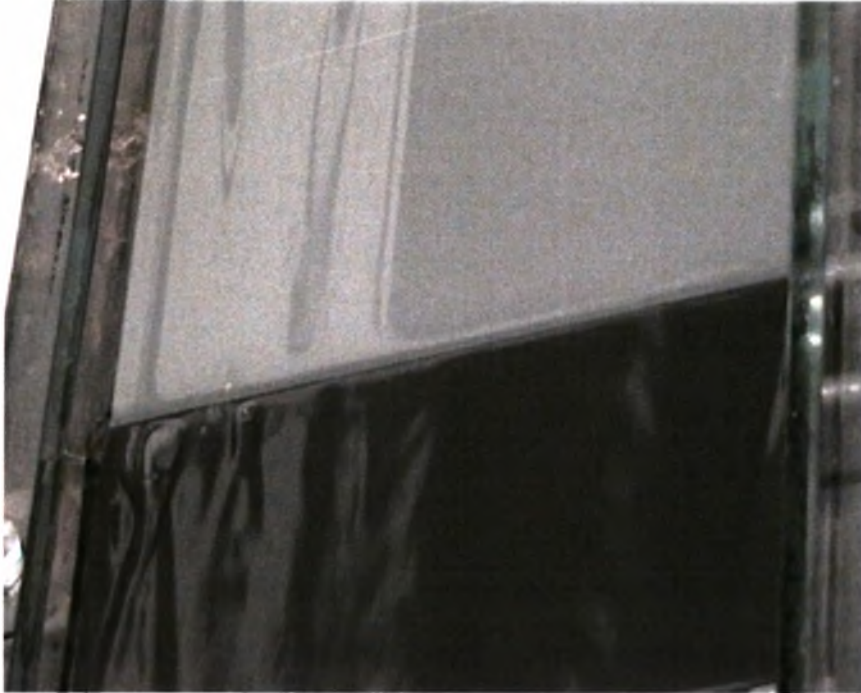


Εδώ παρατηρούμε την ύπαρξη μίας νέας φουσαλίδας, η οποία είναι σε μέγεθος αρκετά μεγαλύτερη από αυτές των προηγούμενων σχημάτων και έχει τριγωνικό

Γεώργιος Ζήσης-''Πειραματική μελέτη ροής κατακόρυφου υγρού υμένα πάνω από αναβαθμό'', σχολή Μηχανολόγων Μηχ/κών Βιομηχανίας

σχήμα. Οι δύο φυσαλίδες που προϋπήρχαν, συσσωματώθηκαν σε μία. Επίσης, αριστερά της διακρίνουμε τη φυσαλίδα που υπήρχε και στην προηγούμενη εικόνα. Η μάζα αέρα, στο κέντρο της εικόνας έχει εμφανώς συρρικνωθεί και δε φαίνεται τόσο έντονα όσο φαινόταν σε προηγούμενες φωτογραφίες.

Σε χρόνο  $t = 9 \text{ sec}$



Στη φωτογραφία αυτή παρατηρούμε την ύπαρξη άλλων δύο τριγωνικών φυσαλίδων, δεξιά των δύο που εμφανίστηκαν στο χρόνο  $t = 3 \text{ sec}$ . Έχουν διαφορετικό μέγεθος, αλλά και των δύο τα κύματα Kelvin “κόβουν” τη ροή. Επίσης, η κεντρική μάζα αέρα μετά βίας διακρίνεται, καθώς έχει συρρικνωθεί σε μεγαλύτερο βαθμό.

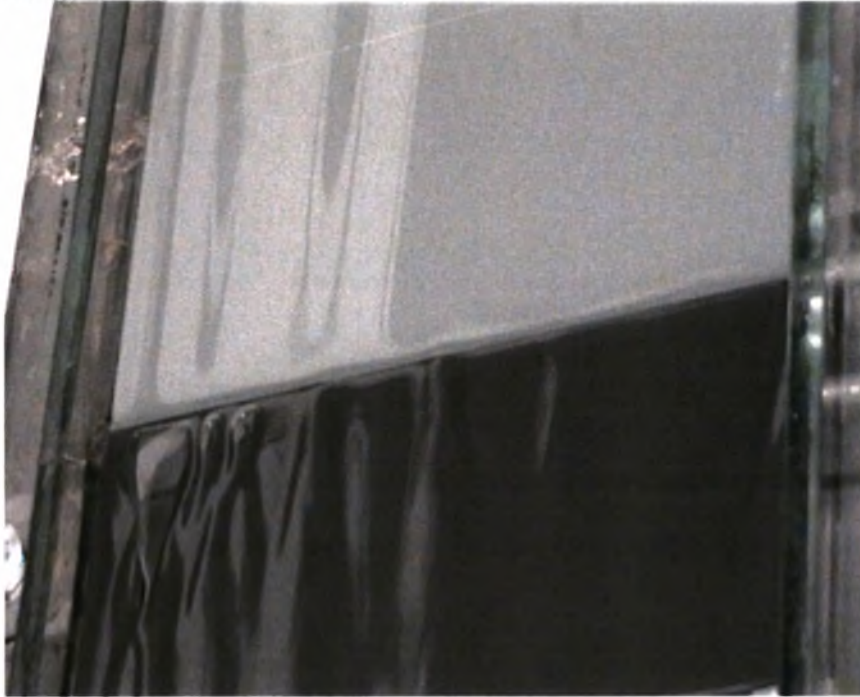
•  $Re = 57.03915$  ( $f = 13.60 \text{ Hz}$ )

Σε χρόνο  $t = 6 \text{ sec}$



Εδώ παρατηρούμε ότι οι φυσαλίδες που είχαν παρουσιαστεί στην παροχή 13.40 Hz, ενώθηκαν και σχηματίστηκε η “συνισταμένη” τους. Η “νέα” αυτή φυσαλίδα είναι αρκετά μεγάλη σε μέγεθος, σε σχέση με όλες τις άλλες φυσαλίδες που έχουμε παρατηρήσει και έχει τριγωνικό μέγεθος. Επίσης, οι φυσαλίδες που βρίσκονται δεξιά της μεγάλης, εμφανίζονται διογκωμένες, σε σχέση με προηγούμενες φωτογραφίες. Η μάζα αέρα, δεξιά των φυσαλίδων έχει (ξανα)εμφανιστεί και έχει μέγεθος περίπου όσο αυτής στην παροχή 13.00 Hz.

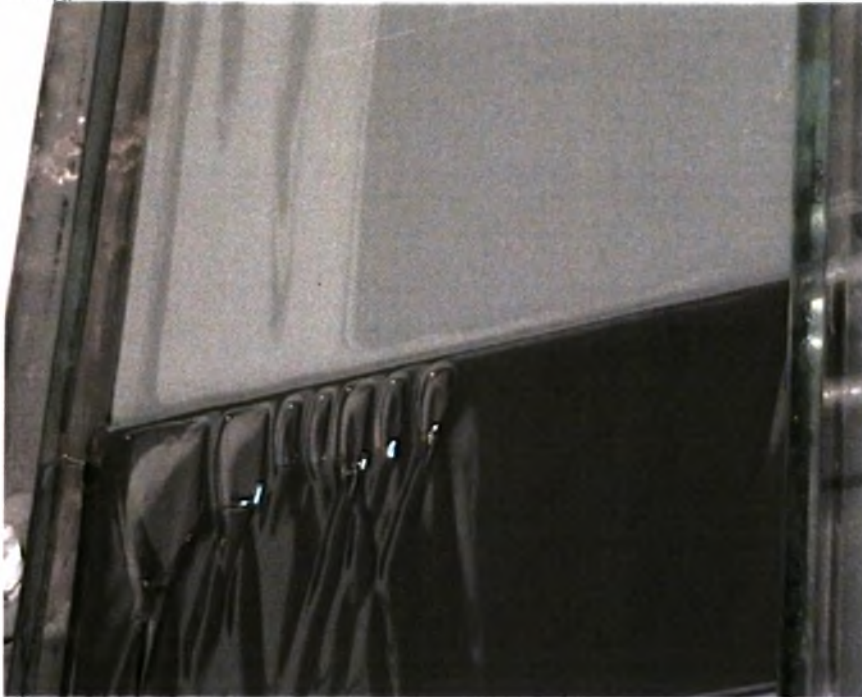
Σε χρόνο  $t = 12 \text{ sec}$



Εδώ παρατηρούμε ότι η αριστερή “τριγωνική” φυσαλίδα έχει μεγαλώσει ελάχιστα σε μέγεθος. Οι άλλες δύο τριγωνικές φυσαλίδες μένουν ως έχουν, μόνο που έχουν πλησιάσει πιο κοντά μεταξύ τους. Η κυριότερη διαφορά που έχει η εικόνα αυτή από την προηγούμενη είναι ότι έχουν εμφανιστεί μικρές μάζες αέρα (τρεις καινούργιες δεξιά των φυσαλίδων).

●  $Re = 57.614$  (  $f = 13.80$  Hz )

Σε χρόνο  $t = 6$  sec



Εδώ παρατηρούμε ότι η τέρμα αριστερά “τριγωνική” φυσαλίδα έχει μεγαλώσει και άλλο σε μέγεθος. Οι δίπλα δεξιά τριγωνικές φυσαλίδες που υπήρχαν στην προηγούμενη φωτογραφία εικάζουμε ότι ενώθηκαν και σχημάτισαν μία “νέα” τριγωνική φυσαλίδα, η οποία αποτελεί τη συνισταμένη τους. Έπειτα, στα σημεία που προηγουμένως υπήρχαν οι μάζες αέρα, παρατηρούμε αλλαγή κατάστασης, καθώς μετατράπηκαν σε τριγωνικές φυσαλίδες (πέντε φυσαλίδες), οι οποίες έχουν μέγεθος αρκετά μεγαλύτερο από άλλες που είχαμε διακρίνει σε προηγούμενες φωτογραφίες. Τα κύματα Kelvin που ξεκινούν από τις “νέες” φυσαλίδες “κόβουν” τη ροή.

Σε χρόνο  $t = 18 \text{ sec}$



Στην εικόνα αυτή παρατηρούμε ότι οι δύο φουσαλίδες που βρίσκονται τέρμα αριστερά της φωτογραφίας παραμένουν ως έχουν. Δεξιά τους παρατηρούμε τρεις φουσαλίδες, εν αντιθέσει με την προηγούμενη φωτογραφία που ήταν πέντε. Το μέγεθος των "νέων" φουσαλίδων είναι περίπου ίσο με αυτό των φουσαλίδων της προηγούμενης εικόνας. Δεν υπάρχουν μάζες αέρα, που εμφανίζονταν σε προηγούμενες εικόνες.

•  $Re = 58.18885$  ( $f = 14.00 \text{ Hz}$ )

Σε χρόνο  $t = 12 \text{ sec}$



Εδώ παρατηρούμε ότι η μεγάλη τριγωνική φουσαλίδα στα αριστερά μένει ως έχει. Οι δύο φουσαλίδες που βρίσκονταν δεξιά της μεγάλης φουσαλίδας έχουν

Γεώργιος Ζήσης-''Πειραματική μελέτη ροής κατακόρυφου υγρού υμένα πάνω από αναβαθμό''', σχολή Μηχανολόγων Μηχ/κών Βιομηχανίας

εξαφανιστεί, ενώ οι άλλες δύο που βρίσκονταν στο κέντρο του σκαλοπατιού έχουν παραμείνει στη θέση τους.

Σε χρόνο  $t = 15 \text{ sec}$



Εδώ παρατηρούμε ότι οι δύο κεντρικές φυσαλίδες από δύο τον αριθμό έγιναν τρεις, οι οποίες είναι μικρότερες σε μέγεθος. Ανάμεσά τους δημιουργήθηκαν άλλες δύο φυσαλίδες. Η μία που βρίσκεται πιο κεντρικά του σκαλοπατιού, έχει μεγαλύτερο μέγεθος από την άλλη που ακουμπάει στη μεγαλύτερη φυσαλίδα, στο αριστερό μέρος του σκαλοπατιού.

•  $Re = 58.76369$  (  $f = 14.20 \text{ Hz}$  )

Σε χρόνο  $t = 3 \text{ sec}$



Εδώ παρατηρούμε ότι η μεγάλη φυσαλίδα αριστερά έχει κάπως μικρύνει σε μέγεθος. Η δεύτερη φυσαλίδα από αριστερά της προηγούμενης εικόνας έχει μετακινηθεί προς τα δεξιά, αφού πρώτα αποκολλήθηκε από τη μεγάλη φυσαλίδα. Η άλλη φυσαλίδα παραμένει ως έχει.

Σε χρόνο  $t = 9 \text{ sec}$



Εδώ παρατηρούμε ότι η μεγάλη φυσαλίδα παραμένει ως έχει. Η φυσαλίδα τέρμα δεξιά της προηγούμενης εικόνας ( $t = 3 \text{ sec}$ ) έχει μικρύνει σε μέγεθος. Ανάμεσα των δύο αυτών φυσαλίδων, έχουν εμφανιστεί άλλες τρεις φυσαλίδες. Οι δύο από αυτές είναι πιο κοντά στην κεντρική φυσαλίδα και η άλλη "ακουμπάει" στη μεγάλη φυσαλίδα, αριστερά της εικόνας. Έπειτα, μπορούμε να διακρίνουμε στα δεξιά μας δύο μάζες αέρα, οι οποίες "σπάνε" εν μέρη τη ροή.

Σε χρόνο  $t = 15 \text{ sec}$



Εδώ παρατηρούμε ότι η μεγάλη φυσαλίδα παραμένει ως έχει. Έπειτα παρατηρούμε την ύπαρξη άλλων τριών φυσαλίδων, από τις οποίες, η μεσαία είναι η μεγαλύτερη σε μέγεθος.

Σε χρόνο  $t = 18 \text{ sec}$



Εδώ παρατηρούμε ότι έχει δημιουργηθεί άλλη μία φυσαλίδα, η οποία είναι μεγάλη σε μέγεθος, και βρίσκεται δεξιά της “μεγάλης τριγωνικής”. Έπειτα, διακρίνουμε δύο φυσαλίδες δεξιά τους, από τις οποίες η κεντρική υπήρχε από πριν, ενώ η άλλη δημιουργήθηκε αυτή τη χρονική στιγμή.

•  $Re = 59.33854$  ( $f = 14.40 \text{ Hz}$ )

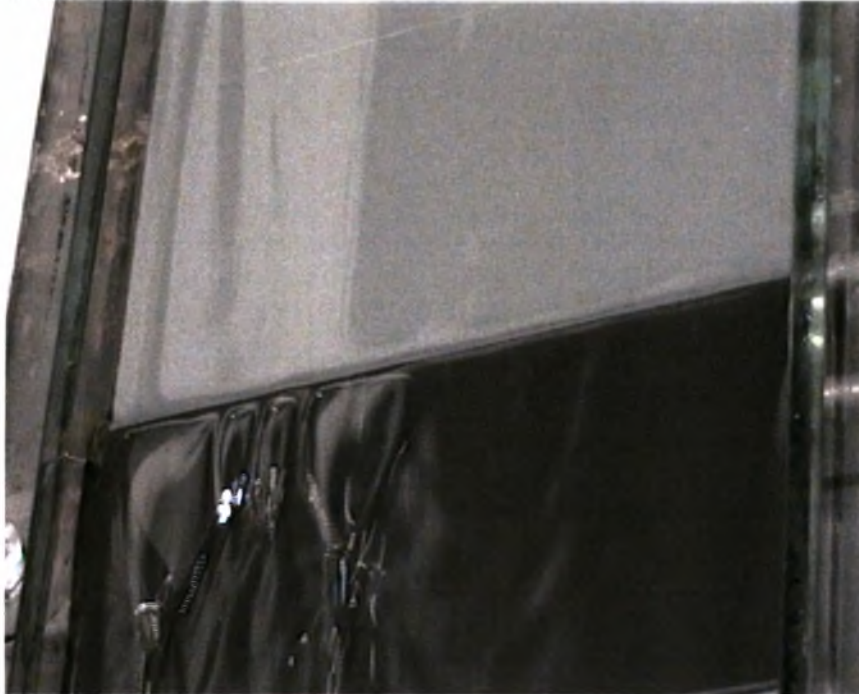
Σε χρόνο  $t = 3 \text{ sec}$





Στην εικόνα αυτή παρατηρούμε ότι πέρα από τη φυσαλίδα στο αριστερό μέρος του σκαλοπατιού, έχει δημιουργηθεί άλλη μία φυσαλίδα στο κέντρο του σκαλοπατιού, η οποία έχει το ίδιο μέγεθος περίπου με την πρώτη. Επίσης οι φυσαλίδες που βρίσκονται ανάμεσα από τις δύο μεγάλες έχουν “ανοίξει” σε μέγεθος, και βρισκόμαστε σε μεταβατικό στάδιο αλλαγών. Ακόμα στο δεξί μέρος της φωτογραφίας διακρίνουμε μία μικρή μάζα αέρα, η οποία “σπάει” τη ροή. Επί της ουσίας, στην εικόνα αυτή οι φυσαλίδες αρχίζουν να προκαλούν μόνιμη αποκόλληση του υμένου.

Σε χρόνο  $t = 6 \text{ sec}$



Εδώ υπάρχει μία “νέα” κατάσταση, η οποία είχε ξεκινήσει ήδη από τη χρονική στιγμή  $t = 3 \text{ sec}$ .

Σε χρόνο  $t = 18 \text{ sec}$



Εκτός από τις δύο μεγάλες φυσαλίδες αριστερά και δεξιά, έχουν δημιουργηθεί και άλλες τρεις φυσαλίδες, στα δεξιά της εικόνας. Όμως ανάμεσα από τις δύο αυτές “μεγάλες” φυσαλίδες, φαίνεται ότι πάνε να δημιουργηθούν τρεις νέες, οι οποίες σταδιακά αποκολλούν τον υμένα από το τοίχωμα.

•  $Re = 59.91339$  ( $f = 14.60 \text{ Hz}$ )

Σε χρόνο  $t = 3 \text{ sec}$



Στην εικόνα αυτή παρατηρούμε τις δύο μεγάλες φυσαλίδες, μία φυσαλίδα ανάμεσά τους και άλλες τρεις δεξιά της εικόνας. Οι κυματισμοί μετά το step-out είναι έντονοι, καθώς η παροχή μας είναι μεγάλη, λόγω της υψηλής συχνότητας της αντλίας μας. Με το πέρασμα του χρόνου, οι φυσαλίδες και οι μάζες αέρα μετατρέπονται σε κυματισμούς.

Γεώργιος Ζήσης-“Πειραματική μελέτη ροής κατακόρυφου υγρού υμένα πάνω από αναβαθμό”’, σχολή Μηχανολόγων Μηχ/κών Βιομηχανίας

Σε χρόνο  $t = 6 \text{ sec}$



Σε αυτή τη φωτογραφία, παρατηρούμε την αριστερή φυσαλίδα, η οποία είναι εμφανώς διογκωμένη. Η άλλη μεγάλη φυσαλίδα, δεξιά της προηγούμενης, έχει “σπάσει”, εξαιτίας του έντονου κυματισμού μετά το step-out. Επίσης διακρίνονται άλλες τρεις φυσαλίδες δεξιά των δύο “μεγάλων”, και μία μάζα αέρα, η οποία και αυτή “σπάει” τη ροή.

Σε χρόνο  $t = 9 \text{ sec}$



Στο αριστερό μέρος της εικόνας, παρατηρούμε κυματισμούς, οι οποίοι πέφτουν με δύναμη πάνω στο step-out, λόγω της υψηλής παροχής. Μετά βίας μπορούμε να διακρίνουμε τις μεγάλες φυσαλίδες, οι οποίες είχαν δημιουργηθεί σε μικρότερες παροχές. Επίσης, υπάρχουν άλλες τρεις φυσαλίδες δεξιά της εικόνας, των οποίων τα κύματα Kelvin “κόβουν” τη ροή.

Γεώργιος Ζήσης-΄΄Πειραματική μελέτη ροής κατακόρυφου υγρού υμένα πάνω από αναβαθμό΄΄.σχολή Μηχανολόγων Μηχ/κών Βιομηχανίας

Σε χρόνο  $t = 12 \text{ sec}$



Στην εικόνα αυτή έχουν εξαφανιστεί οι δύο “μεγάλες” φυσαλίδες και στη θέση τους κυριαρχούν οι κυματισμοί. Στα δεξιά της εικόνας μπορούμε να διακρίνουμε την ύπαρξη τεσσάρων φυσαλίδων.

Σε χρόνο  $t = 15 \text{ sec}$



Στη φωτογραφία αυτή παρατηρούμε ότι οι μεγάλες φυσαλίδες αριστερά έχουν τελείως εξαφανιστεί, και τη θέση τους έχουν πάρει οι κυματισμοί, εξαιτίας της υψηλής παροχής. Επίσης, οι φυσαλίδες που υπήρχαν δεξιά της εικόνας, έχουν μετατραπεί και αυτές με τη σειρά τους σε κυματισμούς.

Σε χρόνο  $t = 18 \text{ sec}$



Στην παροχή αυτή, και στο χρόνο αυτό, οι κυματισμοί είναι τόσο πολύ έντονοι, που αρκετό μέρος από το κατακρημνιζόμενο ρευστό δεν καταλήγει στη “μεγάλη” δεξαμενή, ώστε μετά να ξανακυκλοφορήσει στην αντλία, κλπ, αλλά στο έδαφος. Επί της ουσίας, έχουμε μόνιμη αποκόλληση του υγρού υμένοσ από το τοίχωμα. Αυτό σημαίνει ότι έχουμε διαρροές και έτσι το πείραμά μας και οι βιντεοσκοπήσή μας δεν μπορεί να συνεχιστεί.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### 5.1. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Εξετάστηκε πειραματικά η επίδραση αναβαθμών εσοχής (step-in) και εξοχής (step-out) στην κατακόρυφη ροή υγρού υμένα. Το υγρό που χρησιμοποιήθηκε ήταν υδατικό διάλυμα γλυκερίνης περιεκτικότητας 76% κ.β. ( $\rho=1195 \text{ kg/m}^3, \nu=28.24 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ), και οι αναβαθμοί είχαν ύψος 4 mm. Το εύρος αριθμών Reynolds που εξετάστηκε ήταν  $Re=2,5-60$ . Η μελέτη βασίστηκε αποκλειστικά σε οπτικές παρατηρήσεις, και επικεντρώθηκε στον αναβαθμό εσοχής για χαμηλούς και μέσους Re και στον αναβαθμό εξοχής για τους υψηλούς Re.

Σε χαμηλούς Re παρατηρήθηκε ο σχηματισμός μιας τριχοειδούς παραμόρφωσης της ελεύθερης επιφάνειας ανάντη της ακμής του αναβαθμού εσοχής. Η τριχοειδής παραμόρφωση προβλέπεται από τη θεωρία και συνεισφέρει την πίεση για να μετατοπιστεί ο υγρός υμένας ώστε να παραμείνει σε επαφή με το τοίχωμα. Με αύξηση του Re, το χαρακτηριστικό μήκος της τριχοειδούς παραμόρφωσης σταδιακά μειώθηκε, ενώ η παραμόρφωση εξαφανίστηκε εντελώς για  $Re>10$ .

Όταν  $Re>10$  οι αδρανειακές δυνάμεις επικρατούν των τριχοειδών. Κύριο χαρακτηριστικό της ροής με αναβαθμό εσοχής σε υψηλότερους Re είναι η παγίδευση μεταξύ τοιχώματος και υμένα (κατάντη της ακμής του αναβαθμού) ποσοτήτων αέρα. Οι πρώτες φυσαλίδες αέρα εμφανίζονται για  $Re>20$ , και φαίνεται ότι η παγίδευσή τους οφείλεται στην αλληλεπίδραση του αναβαθμού με οδεύουσες διαταραχές της ελεύθερης επιφάνειας. Οι φυσαλίδες σταδιακά συσσωματώνονται, και όταν  $Re>30$  παρατηρούνται μεγάλα εγκλείσματα τριγωνικού σχήματος. Από την κορυφή των εγκλεισμάτων ξεκινούν κύματα Kelvin, τα οποία οφείλονται στην διαταραχή που εισάγουν τα εγκλείσματα στη ροή, καθώς και στις υπερκρίσιμες συνθήκες (ταχύτητα υγρού μεγαλύτερη της ταχύτητας διάδοσης της διαταραχής). Για  $Re>40$ , τα εγκλείσματα αέρα σταδιακά συνενώνονται και σχηματίζουν ένα σχετικά ομοιόμορφο στρώμα αέρα με μήκος στην διεύθυνση ροής παρόμοιο με το ύψος του αναβαθμού.

Ο αναβαθμός εξοχής παρουσιάζει ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά μόνον σε υψηλούς Re. Για  $Re>40$  παρατηρείται εμφανώς μία αδρανειακή παραμόρφωση στην ελεύθερη επιφάνεια κατάντη της ακμής του αναβαθμού. Η παραμόρφωση αυτή έχει προβλεφθεί υπολογιστικά από τους Bontozoglou & Serifi (2008). Όταν  $Re>45$  αρχίζει σταδιακά να παρατηρείται παγίδευση φυσαλίδων αέρα κατάντη της ακμής της εξοχής. Οι μάζες αέρα έχουν και πάλι τριγωνικό σχήμα και προκαλούν κατάντη της ροής κύματα Kelvin. Σε υψηλότερους Re οι φυσαλίδες αέρα αυξάνονται σε αριθμό και σε μέγεθος, ενώ για  $Re>60$  αρχίζουν να προκαλούν μόνιμη αποκόλληση του υγρού υμένα από το τοίχωμα.

## 5.2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ▷ Leveling of thin films over uneven substrates during spin coating, Stillwagon & Larson, (1990)
- ▷ Numerical and asymptotic methods for certain viscous free-surface flows, Pritchard, Scott & Tavener, (1992)
- ▷ Steady free-surface thin film flow over two-dimensional topography, Kalliadasis, Bielarz & Homsy, (2000)
- ▷ Influence of the capillarity on a creeping flow down an inclined plane with an edge, Aksel, (2000)
- ▷ Stability of free-surface thin-film flows over topography, Kalliadasis & Homsy, (2001)
- ▷ Gravity-driven flows of viscous liquids over two-dimensional topographies, Decre & Baret, (2003)
- ▷ Gravity driven flow of continuous thin liquid films on non-porous substrates with topography, Gaskell, Jimack, Sellier, Thompson & Wilson, (2004)
- ▷ The flow of a liquid film along a periodic wall, Pozrikidis, (1988)
- ▷ Free surface Stokes flow over topography, Mazouhi & Homsy, (2001)
- ▷ Long-scale evolution of thin liquid films, Oron, Davis and Bankoff, (1997)
- ▷ Drop formation during coating of vertical fibres, Kalliadasis & Chang, (1994)
- ▷ Viscous beads on vertical fibre, Kliakhandler, Davis & Bankoff, (2001)
- ▷ On the development of rational approximations incorporating inertial effects in coating and rimming flows : a multiple-scales approach, Noakes, King & Riley, (2006)
- ▷ Laminar, gravitationally driven flow of a thin film on a curved wall, Ruschak & Weinstein, (2003)
- ▷ An accurate and comprehensive model of thin fluid flows with inertia on curved substrates, Roberts & Li (2006)
- ▷ Influence of inertia, topography and gravity on transient axisymmetric thin-film flow, Khayat, Kim & Delosquer, (2004)

▷ **Falling film flow along steep two-dimensional topography: The effect of inertia,**  
*V. Bontozoglou and K. Serifi*

▷ **Κατασκευή και δοκιμές κατακόρυφου καναλιού υγρού υμένα, Διπλωματική**  
*εργασία του φοιτητή Τζανιδάκη Ευάγγελου (2007 – 2008)*

▷ [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

▷ <http://www.dow.com/glycerine/resources/physicalprop.htm>



## 5.3. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

20 GLYCEROL, CH<sub>2</sub>OHCH<sub>2</sub>OH—(Continued)

A % by wt.	$\rho$ $D_4^{20}$	$D_{20}^{20}$	$C_s$ g/l	M g-mol/l	$C_w$ g/l	$(C_o - C_w)$ g/l	$(n - n_o)$ $\times 10^4$	n
5.00	1.0097	1.0115	50.5	0.548	959.2	39.0	58	1.3388
6.00	1.0120	1.0138	60.7	0.659	951.3	46.9	70	1.3400
7.00	1.0144	1.0162	71.0	0.771	943.4	54.9	82	1.3412
8.00	1.0167	1.0185	81.3	0.883	935.4	62.9	94	1.3424
9.00	1.0191	1.0209	91.7	0.996	927.4	70.9	106	1.3436
10.00	1.0215	1.0233	102.1	1.109	919.3	78.9	118	1.3448
12.00	1.0262	1.0281	123.1	1.337	903.1	95.1	142	1.3472
14.00	1.0311	1.0329	144.4	1.568	886.7	111.5	167	1.3496
16.00	1.0360	1.0378	165.8	1.800	870.2	128.0	191	1.3521
18.00	1.0409	1.0428	187.4	2.035	853.6	144.7	217	1.3547
20.00	1.0459	1.0478	209.2	2.272	836.8	161.5	242	1.3572
24.00	1.0561	1.0580	253.5	2.752	802.6	195.6	294	1.3624
28.00	1.0664	1.0683	298.6	3.243	767.8	230.4	347	1.3676
32.00	1.0770	1.0789	344.6	3.742	732.3	265.9	400	1.3730
36.00	1.0876	1.0896	391.5	4.252	696.1	302.2	455	1.3785
40.00	1.0984	1.1003	439.4	4.771	659.0	339.2	511	1.3841
44.00	1.1092	1.1112	488.1	5.300	621.2	377.1	567	1.3897
48.00	1.1200	1.1220	537.6	5.838	582.4	415.8	624	1.3954
52.00	1.1308	1.1328	588.0	6.385	542.8	455.4	681	1.4011
56.00	1.1419	1.1439	639.4	6.944	502.4	495.8	739	1.4069
60.00	1.1530	1.1551	691.8	7.513	461.2	537.0	799	1.4129
64.00	1.1643	1.1663	745.1	8.091	419.1	579.1	859	1.4189
68.00	1.1755	1.1775	799.3	8.680	376.1	622.1	919	1.4249
72.00	1.1866	1.1887	854.3	9.277	332.2	666.0	980	1.4310
76.00	1.1976	1.1997	910.2	9.883	287.4	710.8	1040	1.4370
80.00	1.2085	1.2106	966.8	10.498	241.7	756.5	1101	1.4431
84.00	1.2192	1.2214	1024.2	11.121	195.1	803.2	1162	1.4492
88.00	1.2299	1.2320	1082.3	11.752	147.6	850.7	1223	1.4553
92.00	1.2404	1.2426	1141.1	12.392	99.2	899.0	1284	1.4613
96.00	1.2508	1.2530	1200.7	13.039	50.0	948.2	1344	1.4674
100.00	1.2611	1.2633	1261.1	13.694	0.0	998.2	1405	1.4735

Πίνακας 5.1

## Density (80% to 71% Glycerine)

### Density of Glycerine - Water Solutions

Glycerine (%)	Density (g/cm <sup>3</sup> )				
	15°C	15.5°C	20°C	25°C	30°C
80	1.21160	1.21120	1.20850	1.20545	1.20240
79	1.20885	1.20845	1.20575	1.20275	1.19970
78	1.20610	1.20570	1.20305	1.20005	1.19705
77	1.20335	1.20300	1.20030	1.19735	1.19435
76	1.20060	1.20025	1.19760	1.19465	1.19170
75	1.19785	1.19750	1.19485	1.19195	1.18900
74	1.19510	1.19480	1.19215	1.18925	1.18635
73	1.19235	1.19205	1.18940	1.18650	1.18365
72	1.18965	1.18930	1.18670	1.18380	1.18100
71	1.18690	1.18655	1.18395	1.18110	1.17830

## Specific Gravity (80% to 72% Glycerine)

### Specific Gravity of Glycerine - Water Solutions

Glycerine (%)	Apparent Specific Gravity				True Specific Gravity			
	15/15°C	15.5/15.5°C	20/20°C	25/25°C	15/15°C	15.5/15.5°C	20/20°C	25/25°C
80	1.21290	1.21260	1.21090	1.20925	1.21265	1.21235	1.21065	1.20900
79	1.21015	1.20985	1.20815	1.20655				
78	1.20740	1.20710	1.20540	1.20380				
77	1.20465	1.20440	1.20270	1.20110				
76	1.20190	1.20165	1.19995	1.19840				
75	1.19915	1.19890	1.19720	1.19565	1.19890	1.19865	1.19700	1.19540
74	1.19640	1.19615	1.19450	1.19295				
73	1.19365	1.19340	1.19175	1.19025				
72	1.19090	1.19070	1.18900	1.18755				

## Viscosity of Aqueous Glycerine Solutions Viscosity of Aqueous Glycerine Solutions in Centipoises

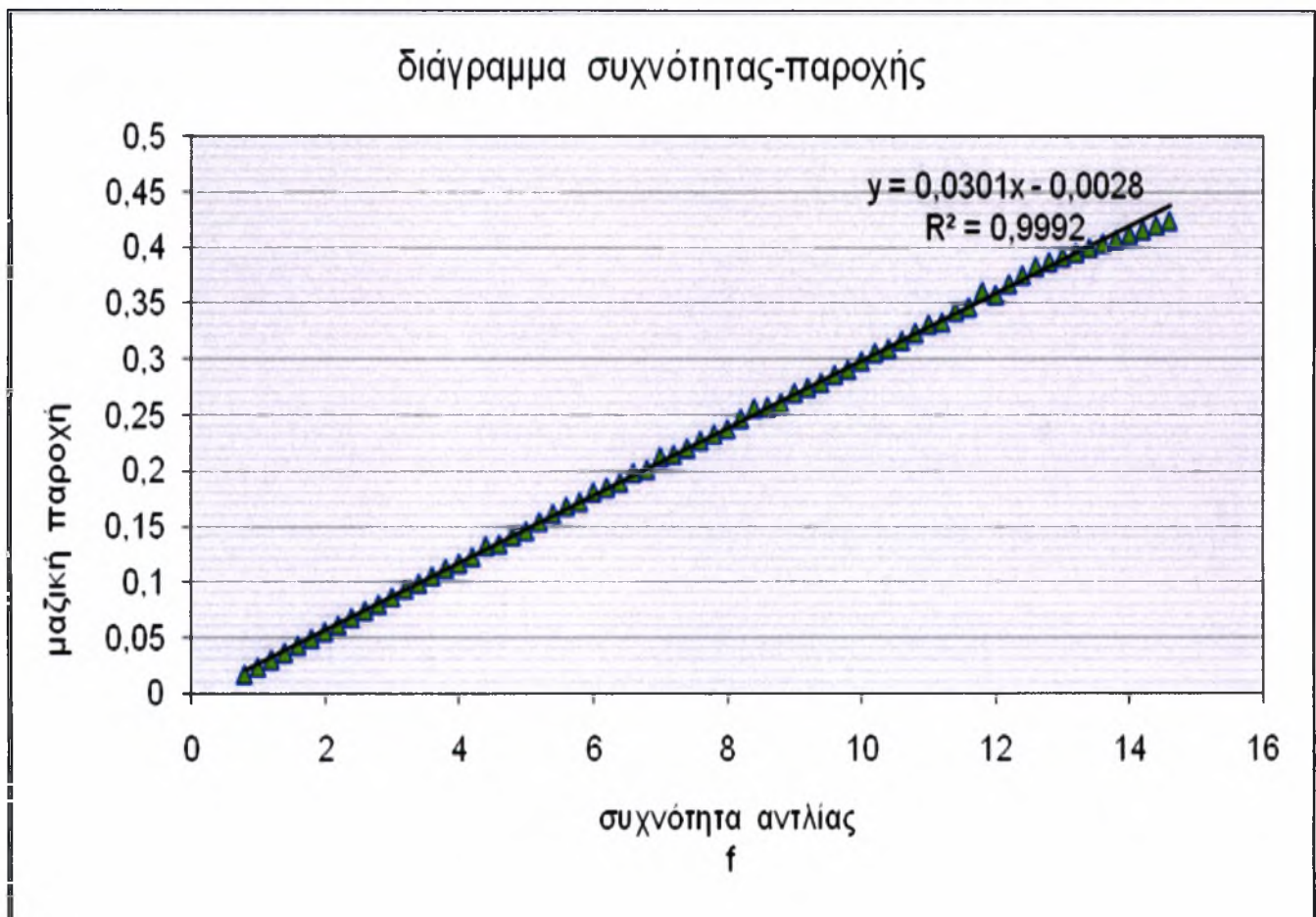
Glycerine percent weight	Viscosity of Aqueous Glycerine Solutions in Centipoises/mPa s										
	Temperature (°C)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0 <sup>(1)</sup>	1.792	1.308	1.005	0.8007	0.6560	0.5494	0.4688	0.4061	0.3565	0.3165	0.2838
10	2.44	1.74	1.31	1.03	0.826	0.680	0.575	0.500	–	–	–
20	3.44	2.41	1.76	1.35	1.07	0.879	0.731	0.635	–	–	–
30	5.14	3.49	2.50	1.87	1.46	1.16	0.956	0.816	0.690	–	–
40	8.25	5.37	3.72	2.72	2.07	1.62	1.30	1.09	0.918	0.763	0.668
50	14.6	9.01	6.00	4.21	3.10	2.37	1.86	1.53	1.25	1.05	0.910
60	29.9	17.4	10.8	7.19	5.08	3.76	2.85	2.29	1.84	1.52	1.28
65	45.7	25.3	15.2	9.85	6.80	4.89	3.66	2.91	2.28	1.86	1.55
67	55.5	29.9	17.7	11.3	7.73	5.50	4.09	3.23	2.50	2.03	1.68
70	76	38.8	22.5	14.1	9.40	6.61	4.86	3.78	2.90	2.34	1.93
75	132	65.2	35.5	21.2	13.6	9.25	6.61	5.01	3.80	3.00	2.43
80	255	116	60.1	33.9	20.8	13.6	9.42	6.94	5.13	4.03	3.18
85	540	223	109	58	33.5	21.2	14.2	10.0	7.28	5.52	4.24
90	1310	498	219	109	60.0	35.5	22.5	15.5	11.0	7.93	6.00
91	1590	592	259	127	68.1	39.8	25.1	17.1	11.9	8.62	6.40
92	1950	729	310	147	78.3	44.8	28.0	19.0	13.1	9.46	6.82
93	2400	860	367	172	89	51.5	31.6	21.2	14.4	10.3	7.54
94	2930	1040	437	202	105	58.4	35.4	23.6	15.8	11.2	8.19
95	3690	1270	523	237	121	67.0	39.9	26.4	17.5	12.4	9.08
96	4600	1580	624	281	142	77.8	45.4	29.7	19.6	13.6	10.1
97	5770	1950	765	340	166	88.9	51.9	33.6	21.9	15.1	10.9
98	7370	2460	939	409	196	104	59.8	38.5	24.8	17.0	12.2
99	9420	3090	1150	500	235	122	69.1	43.6	27.8	19.0	13.3
100	12070	3900	1410	612	284	142	81.3	50.6	31.9	21.3	14.8

### Πίνακες 5.2

	συχνότητα f (Hz)	μαζική παροχή (kg/sec)	πυκνότητα ρ (kg/m <sup>3</sup> )	δυναμικό ιώδες μ (kg/m <sup>2</sup> sec)	αριθμός Reynolds	ογκομετρική παροχή Q (m <sup>3</sup> /sec)	εύρος W (m)	κινηματικό ιώδες ν (m <sup>2</sup> /sec)
0,8	0,017416	1195,24	0,033748	2,45743	1,45711E-05	0,21	2,82353E-05	
1	0,024	1195,24	0,033748	3,386444	2,00796E-05	0,21	2,82353E-05	
1,2	0,03075	1195,24	0,033748	4,338881	2,57271E-05	0,21	2,82353E-05	
1,4	0,037	1195,24	0,033748	5,220768	3,09561E-05	0,21	2,82353E-05	
1,6	0,0434	1195,24	0,033748	6,12382	3,63107E-05	0,21	2,82353E-05	
1,8	0,04961	1195,24	0,033748	7,000062	4,15063E-05	0,21	2,82353E-05	
2	0,0557	1195,24	0,033748	7,859372	4,66015E-05	0,21	2,82353E-05	
2,2	0,0616	1195,24	0,033748	8,691873	5,15378E-05	0,21	2,82353E-05	
2,4	0,0683	1195,24	0,033748	9,637255	5,71433E-05	0,21	2,82353E-05	
2,6	0,07475	1195,24	0,033748	10,54736	6,25397E-05	0,21	2,82353E-05	
2,8	0,08016	1195,24	0,033748	11,31072	6,7066E-05	0,21	2,82353E-05	
3	0,08683	1195,24	0,033748	12,25187	7,26465E-05	0,21	2,82353E-05	
3,2	0,09383	1195,24	0,033748	13,23959	7,85031E-05	0,21	2,82353E-05	
3,4	0,09916	1195,24	0,033748	13,99166	8,29624E-05	0,21	2,82353E-05	
3,6	0,10583	1195,24	0,033748	14,93281	8,85429E-05	0,21	2,82353E-05	
3,8	0,11233	1195,24	0,033748	15,84997	9,39811E-05	0,21	2,82353E-05	
4	0,11733	1195,24	0,033748	16,55548	9,81644E-05	0,21	2,82353E-05	
4,2	0,1232	1195,24	0,033748	17,38375	0,000103076	0,21	2,82353E-05	
4,4	0,133	1195,24	0,033748	18,76654	0,000111275	0,21	2,82353E-05	
4,6	0,134416	1195,24	0,033748	18,96634	0,000112459	0,21	2,82353E-05	
4,8	0,142	1195,24	0,033748	20,03646	0,000118805	0,21	2,82353E-05	
5	0,1463	1195,24	0,033748	20,6432	0,000122402	0,21	2,82353E-05	
5,2	0,1546	1195,24	0,033748	21,81434	0,000129346	0,21	2,82353E-05	
5,4	0,16193	1195,24	0,033748	22,84862	0,000135479	0,21	2,82353E-05	
5,6	0,1682	1195,24	0,033748	23,73333	0,000140725	0,21	2,82353E-05	
5,8	0,17253	1195,24	0,033748	24,3443	0,000144348	0,21	2,82353E-05	
6	0,18126	1195,24	0,033748	25,57612	0,000151652	0,21	2,82353E-05	
6,2	0,185416	1195,24	0,033748	26,16254	0,000155129	0,21	2,82353E-05	
6,4	0,19	1195,24	0,033748	26,80935	0,000158964	0,21	2,82353E-05	
6,6	0,198714	1195,24	0,033748	28,03891	0,000166254	0,21	2,82353E-05	
6,8	0,2016	1195,24	0,033748	28,44613	0,000168669	0,21	2,82353E-05	
7	0,213083	1195,24	0,033748	30,0664	0,000178276	0,21	2,82353E-05	
7,2	0,2151	1195,24	0,033748	30,351	0,000179964	0,21	2,82353E-05	
7,4	0,22075	1195,24	0,033748	31,14823	0,000184691	0,21	2,82353E-05	
7,6	0,22769	1195,24	0,033748	32,12748	0,000190497	0,21	2,82353E-05	
7,8	0,2332	1195,24	0,033748	32,90495	0,000195107	0,21	2,82353E-05	
8	0,2381	1195,24	0,033748	33,59635	0,000199207	0,21	2,82353E-05	
8,2	0,24726	1195,24	0,033748	34,88884	0,000206871	0,21	2,82353E-05	
8,4	0,25658	1195,24	0,033748	36,20391	0,000214668	0,21	2,82353E-05	
8,6	0,25785	1195,24	0,033748	36,38311	0,000215731	0,21	2,82353E-05	

8,8	0,26133	1195,24	0,033748	36,87414	0,000218642	0,21	2,82353E-05
9	0,27035	1195,24	0,033748	38,14688	0,000226189	0,21	2,82353E-05
9,2	0,27488	1195,24	0,033748	38,78607	0,000229979	0,21	2,82353E-05
9,4	0,27927	1195,24	0,033748	39,40551	0,000233652	0,21	2,82353E-05
9,6	0,28643	1195,24	0,033748	40,4158	0,000239642	0,21	2,82353E-05
9,8	0,291299	1195,24	0,033748	41,10282	0,000243716	0,21	2,82353E-05
10	0,29865	1195,24	0,033748	42,14006	0,000249866	0,21	2,82353E-05
10,2	0,306266	1195,24	0,033748	43,21469	0,000256238	0,21	2,82353E-05
10,4	0,309895	1195,24	0,033748	43,72675	0,000259274	0,21	2,82353E-05
10,6	0,317122	1195,24	0,033748	44,7465	0,000265321	0,21	2,82353E-05
10,8	0,324	1195,24	0,033748	45,71699	0,000271075	0,21	2,82353E-05
11	0,331774	1195,24	0,033748	46,81392	0,000277579	0,21	2,82353E-05
11,2	0,333683	1195,24	0,033748	47,08328	0,000279177	0,21	2,82353E-05
11,4	0,343338	1195,24	0,033748	48,44562	0,000287254	0,21	2,82353E-05
11,6	0,347215	1195,24	0,033748	48,99267	0,000290498	0,21	2,82353E-05
11,8	0,360933	1195,24	0,033748	50,92831	0,000301975	0,21	2,82353E-05
12	0,358323	1195,24	0,033748	50,56003	0,000299792	0,21	2,82353E-05
12,2	0,367853	1195,24	0,033748	51,90473	0,000307765	0,21	2,82353E-05
12,4	0,375766	1195,24	0,033748	53,02127	0,000314385	0,21	2,82353E-05
12,6	0,383378	1195,24	0,033748	54,09534	0,000320754	0,21	2,82353E-05
12,8	0,387649	1195,24	0,033748	54,69799	0,000324327	0,21	2,82353E-05
13	0,392019	1195,24	0,033748	55,31453	0,000327983	0,21	2,82353E-05
13,2	0,396093	1195,24	0,033748	55,88945	0,000331392	0,21	2,82353E-05
13,4	0,400167	1195,24	0,033748	56,4643	0,000334801	0,21	2,82353E-05
13,6	0,404241	1195,24	0,033748	57,03915	0,000338209	0,21	2,82353E-05
13,8	0,408315	1195,24	0,033748	57,614	0,000341618	0,21	2,82353E-05
14	0,412389	1195,24	0,033748	58,18885	0,000345026	0,21	2,82353E-05
14,2	0,416463	1195,24	0,033748	58,76369	0,000348435	0,21	2,82353E-05
14,4	0,420537	1195,24	0,033748	59,33854	0,000351843	0,21	2,82353E-05
14,6	0,424611	1195,24	0,033748	59,91339	0,000355252	0,21	2,82353E-05

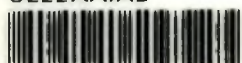
### Πίνακας 5.3



Διάγραμμα 5.1



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000091660