



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΧΡΟΝΙΚΑ  
ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΗΣ ΡΟΗΣ ΣΕ ΜΙΚΡΟΚΑΝΑΛΙ**

**Βαρβάρα Ελαιοτριβάρη**

**Επιβλέπων: Δ.Σ. Μαθιουλάκης  
Αναπληρωτής Καθηγητής**

**ΑΘΗΝΑ 2014**



## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διεξήχθησαν μετρήσεις ταχυτήτων χρονικά μεταβαλλόμενης ροής νερού σε μικροκανάλι τραπεζοειδούς διατομής βάθους 130 μm με τη μέθοδο micro P.I.V. Για το λόγο αυτό, η λειτουργία αντλίας τύπου σύριγγας, εμπορικού τύπου, ελέγχθηκε με τη βοήθεια μικροελεγκτή ώστε η παροχή της αντί σταθερή να είναι χρονικά μεταβαλλόμενη. Έγιναν μετρήσεις για παροχή περιόδου 16 sec μεταβαλλόμενης ημιτονοειδώς μεταξύ 20 και 40 μl/min. Εν φάσει μετρήσεις ελήφθησαν σε διάφορα βάθη για 16 φάσεις της περιόδου, στέλνοντας ένα σήμα σκανδαλισμού στο σύστημα micro PIV από τον μικροελεγκτή κάθε 1 sec. Λόγω του μικρού αριθμού Womersley ( $<1$ ), δεν υπήρχε διαφορά φάσης στην ταχύτητα του ρευστού μεταξύ της περιοχής κοντά στον τοίχο και το κέντρο του καναλιού. Ο λόγος της μέγιστης προς την μέση ταχύτητα ήταν περίπου 1.7 ενώ ο μέγιστος λόγος του πλάτους της ταχύτητας προς τη μέση ήταν 32%.

## Abstract

In the context of the present Diploma thesis, the velocity field in a 130 micron deep microchannel of a trapezoidal cross section was measured, employing a micro-PIV system for a time dependent flow rate. For this purpose, a commercial syringe type pump, supplying de-ionized water to the channel with a constant flow rate, was externally controlled by a microcontroller so that the flow rate varies sinusoidally in time with a non zero mean. Phase averaged velocity profiles were taken at various depths sending a trigger signal from the microcontroller to the PIV system with a frequency of 1 Hz. Measurements were done for a flow rate varying between 20 to 40 μl/min for a period of 16 sec.

Due to the small Womersley number ( $<1$ ), there was no phase difference of the fluid velocity between the region close to the wall and that at the center plane of the microchannel. The ratio of the maximum to the average mean velocity was approximately 1.7 and the maximum ratio of the velocity amplitude to the mean was 32%.

## Πρόλογος

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η χρονικά μεταβαλλόμενη ροή διάμεσου μικροκαναλιού. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η πειραματική διάταξη *micro P.I.V.*, μία μη επεμβατική μέθοδος υπολογισμού των προφίλ της ταχύτητας σε ροές μικροκλίμακας.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις βασικές αρχές της μηχανικής ρευστών και ιδιαίτερα στις μικροροές. Επίσης, παρουσιάζονται αναλυτικά η υπερ(υδροφοβητικότητα) και η υπέρ(υδροφιλικότητα).

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην ταλαντούμενη ροή σε μικροκανάλια και ιδιαίτερα στην περιοχή εισόδου του μικροκαναλιού. Ακόμη, παρουσιάζονται πειράματα υπολογισμού των ταχυτήτων σε μεταβαλλόμενη ροή.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η μέθοδος *micro P.I.V.* που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα της παρούσας εργασίας. Γίνονται αναφορές σε κάποιες πειραματικές μελέτες που χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος αυτή.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε, η διαδικασία προετοιμασίας για την έναρξη των μετρήσεων και τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά την εκτέλεση των πειραμάτων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων και γίνεται αναλυτική περιγραφή τους.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλλαν στην ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας. Συγκεκριμένα στον επιβλέποντα καθηγητή μου, Κ. Δημήτρη Μαθιουλάκη, αναπληρωτή καθηγητή Ε.Μ.Π., για την ανάθεση του θέματος, τις πληροφορίες που μου παρείχε για το συγκεκριμένο θέμα, την καθοδήγηση του και το χρόνο που μου προσέφερε για την ολοκλήρωση της.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Παναγιώτη Καπίρη, υποψήφιο διδάκτορα για την κατασκευή του *microcontroller* και για τη δημιουργία του προγράμματος σε γλώσσα C<sup>++</sup>. Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω το Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών Επιστημών ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ για την παροχή του μικροκαναλιού.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που ήταν δίπλα μου καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και με στήριζε συνεχώς.

<b>Περίληψη</b>	<b>1</b>
<b>Πρόλογος</b>	<b>2</b>
<b>1. Κεφάλαιο 1 :Βασικές αρχές μηχανικής ρευστών-Μικροροές</b>	<b>6</b>
<b>1.1) Βασικές αρχές μηχανικής ρευστών</b>	<b>6</b>
1.1.1) Έννοια ρευστού	6
1.1.2) Κατάσταση της ύλης	6
1.1.3) Υπόθεση συνέχειας	6
1.1.4) Δυνάμεις	7
1.1.5) Συνεκτικότητα- ιξώδες	8
1.1.6) Συμπιεστότητα	10
1.1.7) Εξισώσεις διατήρησης	10
1.1.8)Εξισώσεις Navier Stokes	12
<b>1.2) Μικροροές</b>	<b>13</b>
1.2.1) Εξισώσεις Navier Stokes για μικροροές	13
<b>1.3) Ολίσθηση ροής</b>	<b>13</b>
1.3.1) Φαινόμενο ολίσθησης- ερμηνεία	13
1.3.2) Ολίσθηση και μη ολίσθηση σε μικροροές	15
<b>1.4) Υπερ(υδροφοβητικότητα) και Υπερ(υδροφιλικότητα)</b>	<b>16</b>
1.4.1) Ανάλυση Υπερ(υδροφοβητικότητας),Υπερ(υδροφιλικότητας) και σχετιζόμενων εννοιών	16
1.4.2) Εφαρμογές Υπερ(υδροφοβητικότητας)	19
1.4.3) Εφαρμογές Υπερ(υδροφιλικότητας)	21
1.4.4) Πειραματικές μελέτες σε Υπερ(υδρόφοβα) και Υπερ(υδρόφιλα) κανάλια	22
<b>Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 1</b>	<b>24</b>
<b>2. Κεφάλαιο 2 :Ταλαντούμενη Ροή σε Μικροκανάλια</b>	<b>26</b>
<b>2.1) Θεωρητικό Υπόβαθρο</b>	<b>26</b>

<b>2.2) Μικρορευστά και ροή σε μικροκανάλια.....</b>	<b>27</b>
2.2.1) Χαρακτηριστικά της ροής σε μικροεξαρτήματα .....	27
<b>2.3) Ταλαντούμενη ροή στην περιοχή εισόδου ενός μικροκαναλιού.....</b>	<b>28</b>
2.3.1) Χαρακτηριστικά ταλαντούμενης ροής .....	29
<b>2.3.2) Μελέτες σχετικά με το μήκος εισόδου ταλαντούμενης ροής .....</b>	<b>32</b>
<b>2.4) Πειράματα υπολογισμού ταχυτήτων ταλαντούμενης ροής σε μικροκανάλια .....</b>	<b>33</b>
2.4.1) Μελέτη πλήρως αναπτυγμένης ροής .....	38
2.4.2) Πεδίο ροής εντός του θαλάμου.....	41
<b>Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 2 .....</b>	<b>43</b>
<b>3. Κεφάλαιο 3: Micro-particle image velocimetry (micro-P.I.V) .....</b>	<b>44</b>
<b>3.1) Particle image velocimetry (P.I.V.) .....</b>	<b>44</b>
<b>3.2) Περιγραφή της micro-P.I.V.....</b>	<b>45</b>
<b>3.3) Διαφορές μεθόδου micro-PIV σε σχέση με την PIV .....</b>	<b>47</b>
<b>3.4) Σωματίδια ανιχνευτές.....</b>	<b>48</b>
<b>3.5) Ανάλυση και ακρίβεια.....</b>	<b>49</b>
<b>3.6) Πειραματικές μελέτες με χρήση micro-P.I.V. ....</b>	<b>50</b>
<b>Βιβλιογραφία Κεφάλαιο 3 .....</b>	<b>57</b>
<b>4 Κεφάλαιο 4 : Πειραματική διαδικασία .....</b>	<b>61</b>
<b>4.1) Εξοπλισμός.....</b>	<b>61</b>
4.1.1) Σωματίδια.....	61
4.1.2) Μικροκανάλι.....	62
4.1.3) Μικροαντλία .....	63
4.1.4) Microcontroller .....	63
4.1.5) Μικροσκόπιο.....	64
4.1.6) Laser - Κάμερα .....	65
<b>4.2) Διαδικασία.....</b>	<b>66</b>
4.2.1) Προετοιμασία έναρξης.....	66
4.2.2) Λήψη εικόνων .....	67

4.2.3) Εισαγωγή τιμών παροχής στον μικροελεγκτή.....	74
4.2.4) Ομαδοποίηση εικόνων .....	76
4.2.5) Επεξεργασία των αρχείων.....	78
<b>4.3) Προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων .....</b>	<b>80</b>
4.3.1) Προσδιορισμός της θέσης της μικρής βάσης.....	80
4.3.2) Προσδιορισμός της παροχής από την οποία ξεκινούν οι μετρήσεις	80
<b>4.4) Υπολογισμοί των παραμέτρων της ροής .....</b>	<b>81</b>
<b>Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 4 .....</b>	<b>83</b>
<b>Κεφάλαιο 5 : Αποτελέσματα .....</b>	<b>84</b>
<b>5.1) Αποτελέσματα μετρήσεων ταχυτήτων σε συγκεκριμένο βάθος του μικροκαναλιού ελέγχοντας την αντλία τύπου σύριγγας μέσω μικροελεγκτή .....</b>	<b>84</b>
<b>5.2) Αποτελέσματα μετρήσεων ταχυτήτων για συνθήκες σταθερής περιόδου (T=16sec) και καθυστέρησης ενεργοποίησης της μικροαντλίας (2sec) για διάφορα βάθη πραγματοποίησης των μετρήσεων.....</b>	<b>95</b>
<b>Συμπεράσματα</b>	<b>113</b>

# 1. Κεφάλαιο 1 :Βασικές αρχές μηχανικής ρευστών-Μικροροές

## 1.1) Βασικές αρχές μηχανικής ρευστών

### 1.1.1) Έννοια ρευστού

Ρευστά ονομάζονται τα συνεχή σώματα, τα οποία χαρακτηρίζονται για την εύκολη μεταφορά των στοιχείων τους. Εν αντιθέσει με τα στερεά σώματα, τα οποία προκαλούν μικρή αντίσταση στην αλλαγή της μορφής τους.

### 1.1.2) Κατάσταση της ύλης

Η ύλη απαρτίζεται από άτομα και μόρια, που η μέση διάσταση τους είναι της τάξεως μεγέθους  $d \sim 10^{-10} \text{ m} = 1 \text{ \AA}$ . Η κατάσταση της ύλης καθορίζεται από την μακροσκοπική διατομή τους, η οποία επηρεάζεται από δύο παράγοντες. Καταρχάς αν τα μεμονωμένα μόρια ή άτομα είναι απομακρυσμένα μεταξύ τους, δηλαδή η πυκνότητα είναι μικρή τότε το ένα δεν επιδρά με το άλλο και υπάρχει ακανόνιστη κίνηση λόγω της θερμικής τους ενέργειας. Η κίνηση αυτή λέγεται κίνηση Brown. Κατά δεύτερον αν τα μόρια και τα άτομα είναι κοντά μεταξύ τους, δηλαδή η πυκνότητα είναι μεγάλη τότε αυτά αλληλεπιδρούν και ενεργούν σε αυτά μοριακές δυνάμεις. Οι δυνάμεις αυτές λέγονται Van der Waals.

### 1.1.3) Υπόθεση συνέχειας

Στα υγρά και στα αέρια που τα μόρια είναι διαταγμένα πολύ κοντά κάτι το οποίο το επιτρέπουν οι μικρής εμβέλειας απωστικές δυνάμεις, η μάζα του υλικού είναι συγκεντρωμένη στον πυρήνα των ατόμων που συνιστούν το μόριο. Επομένως υπάρχει ανομοιόμορφη κατανομή της μάζας του ρευστού στον όγκο του. Πολλές φορές όμως το ρευστό αντιμετωπίζεται ως διαιρετό και συνεχές μέσο και δεν λαμβάνεται υπόψη η μοριακή δομή του.

Η προσέγγιση αυτή καλείται ως υπόθεση συνέχειας. Η υπόθεση συνέχειας εισάγει την ιδέα των σωματιδίων ρευστού (fluid particles). Σε αντίθεση με ιδανικά σημειακά σωματίδια που συναντάμε στην κλασική μηχανική, τα σωματίδια αυτά έχουν πεπερασμένο μέγεθος. Ο προσδιορισμός του μεγέθους τους δεν είναι απλός, για αυτό θεωρούμε μια συγκεκριμένη ποσότητα όγκου, ο οποίος μεταβάλλεται από την ατομική στη μακροσκοπική κλίμακα. Παίρνοντας τοπικές μετρήσεις σε ατομικό επίπεδο των μεγεθών που χαρακτηρίζουν τη ροή (πυκνότητα, ταχύτητα, κτλ) παρατηρούμε μεγάλες διακυμάνσεις που οφείλονται στην ανομοιομορφία της μοριακής σύστασης του ρευστού. Αυξάνοντας την κλίμακα μέτρησης παρατηρούμε ότι οι μετρήσεις παρουσιάζουν όλο και μικρότερες διακυμάνσεις. Συμπερασματικά για να έχουμε σταθερές μετρήσεις με στατιστικές αποκλίσεις που είναι και το επιθυμητό ώστε να ισχύει η υπόθεση της συνέχειας ο εξεταζόμενος όγκος πρέπει να περιέχει επαρκή αριθμό μορίων. Μια ενδεικτική τιμή μεγέθους σωματιδίου

ρευστού για υγρό είναι  $\lambda^*=10\text{nm}$ . Ένα τέτοιο σωματίδιο περιέχει προσεγγιστικά 40000 μόρια με στατιστικές διακυμάνσεις της τάξης 0,5%. Στην περίπτωση των αερίων το σωματίδιο λαμβάνεται περίπου 10 φορές μεγαλύτερο από το αντίστοιχο για υγρό.

Αν το μέγεθος του σωματιδίου ληφθεί πολύ μεγάλο τότε σημειώνονται μεταβολές στις ιδιότητες του ρευστού, λόγω επίδρασης εξωτερικών δυνάμεων.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, για να ισχύει η υπόθεση της συνέχειας πρέπει τα σωματίδια του ρευστού να είναι μεγαλύτερου μεγέθους σε σχέση με τη μικροσκοπική κλίμακα (0,3 nm) προκειμένου να περιέχει επαρκή αριθμό μορίων και μικρότερου μεγέθους σε σχέση με τη μακροσκοπική κλίμακα (10 nm) ώστε να μην μεταβάλλουν τις ιδιότητες του ρευστού οι εξωτερικές δυνάμεις.

#### 1.1.4) Δυνάμεις

Υπάρχουν δύο ειδών δυνάμεις :

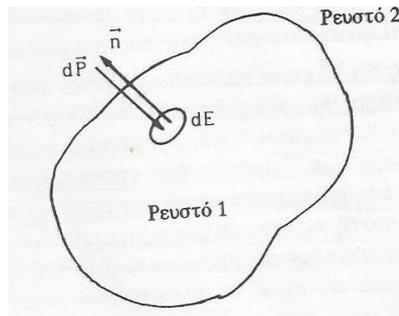
α) Επιφανειακές δυνάμεις που ασκούνται στην επιφάνεια του σώματος και είναι συνάρτηση του εμβαδού της επιφάνειας.

β) Ογκικές ή μαζικές δυνάμεις που ασκούνται στο στοιχείο του όγκου ή της μάζας και είναι συνάρτηση του όγκου του ή της μάζας του.

Κάθε στοιχείο του ρευστού είτε σε ηρεμία είτε σε κίνηση, βρίσκεται σε εντατική κατάσταση, η οποία δημιουργείται από τα γειτονικά του σημεία. Η εντατική κατάσταση διακρίνεται σε ορθή εντατική και σε διατμητική εντατική κατάσταση. Ένα συνεχές μέσο είναι σε ισορροπία όταν η συνισταμένη των δυνάμεων του είναι μηδέν. Όταν το ρευστό βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας τότε παρατηρούμε μόνο κάθετες επιφανειακές δυνάμεις  $d\vec{P}$  οι οποίες ασκούνται μεταξύ των στοιχείων του ρευστού. Η ορθή εντατική κατάσταση εκφράζεται από την κάθετη επιφανειακή δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας. Το ανοιγμένο αυτό μέγεθος ονομάζεται πίεση  $p$ .

$$d\vec{P} = -\vec{n}pdE$$

Στην παραπάνω σχέση  $dE$  είναι το στοιχείο της επιφάνειας του υλικού σώματος 1 που δρα η κάθετη δύναμη  $d\vec{P}$  και  $\vec{n}$  το κάθετο μοναδιαίο διάνυσμα, το οποίο έχει φορά πάντα από το υλικό σώμα προς τα έξω. Επειδή υπάρχει η διαπίστωση ότι η  $d\vec{P}$  είναι πάντα θετική προς το  $\vec{n}$  και η πίεση θα είναι πάντα θετική. Γνωρίζουμε πως η πίεση εξαρτάται μόνο από τη θέση του στοιχείου του ρευστού μέσα στο ρευστό.



Η διατμητική εντατική κατάσταση οφείλεται στο ότι δύο γειτονικά στοιχεία του ρευστού βρίσκονται σε σχετική κίνηση μεταξύ τους. Συνεπώς η διατμητική εντατική κατάσταση εμφανίζεται σε κινούμενα ρευστά και μηδενίζεται σε ακίνητα.

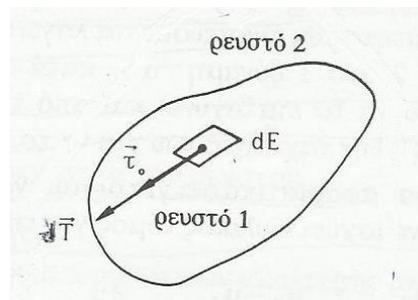
### 1.1.5) Συνεκτικότητα- ιξώδες

Για τη μελέτη της ροής των ρευστών η ιδιότητα τους ιξώδες είναι σημαντική και πρέπει να μελετηθεί αναλυτικά. Ιξώδες είναι η ιδιότητα των ρευστών να αντιστέκονται στην διάτμηση τους, δηλαδή στην κίνηση ενός στοιχείου ως προς το διπλανό του.

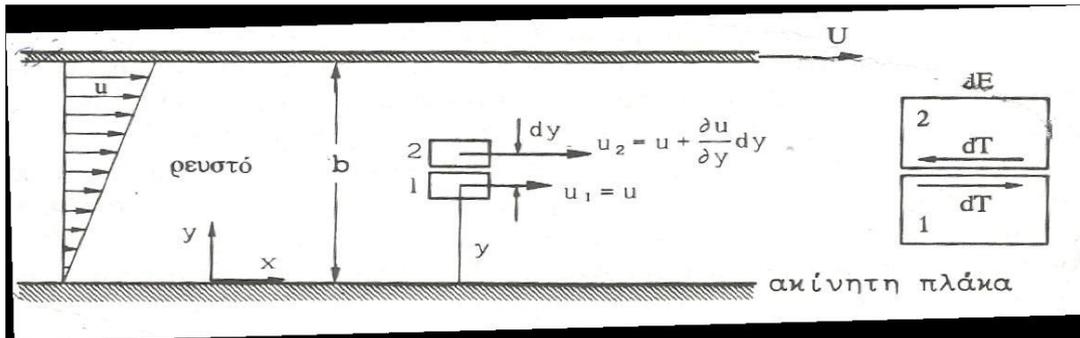
Υποθέτοντας ότι έχουμε δύο γειτονικά στοιχεία ρευστού, τα οποία βρίσκονται σε σχετική κίνηση, τότε αναπτύσσεται μεταξύ τους επαπτομενική δύναμη. Η δύναμη αυτή ονομάζεται διατμητική δύναμη  $d\vec{T}$ . Η διατμητική αυτή δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας λέγεται διατμητική τάση.

$$d\vec{T} = \tau dE \vec{\tau}_o$$

Στη σχέση αυτή  $\vec{\tau}_o$  είναι το μοναδιαίο διάνυσμα κατά κατεύθυνση παράλληλη στο στοιχείο επιφάνειας  $dE$



Η εμφάνιση της διατμητικής δύναμης και η έννοια της διατμητικής τάσης φαίνεται από το παράδειγμα της καθαρής διάτμησης, που είναι η παράλληλη ροή συνεκτικού ρευστού μεταξύ δύο παράλληλων πλακών, όπου η μία είναι ακίνητη και η άλλη κινείται με σταθερή ταχύτητα  $U$  και σε κατεύθυνση παράλληλη προς τις πλάκες.



Το ρευστό μεταξύ των δύο παράλληλων πλακών θα ρέει λόγω συνεκτικότητας κατά την κατεύθυνση της  $U$ . Ακόμη, αποδεικνύεται ότι δημιουργείται μια γραμμική κατανομή ταχυτήτων μεταξύ των δύο πλακών:  $u = Uy/b$ , όπου  $b$  είναι η απόσταση μεταξύ των δύο πλακών.

Όπως φαίνεται στο σχήμα το στοιχείο 2 έχει μεγαλύτερη ταχύτητα σε σχέση με αυτή του στοιχείου 1. Εξαιτίας της διαφοράς των ταχυτήτων και της συνεκτικότητας το ταχύτερο στοιχείο 2 ασκεί στο 1 δύναμη  $dT$  κατά την κατεύθυνση της  $u_1$  και το επιταχύνει, ενώ το 1 ασκεί στο 2 δύναμη  $-dT$  δηλαδή δύναμη ίδιου μέτρου και αντίθετης φοράς σε σχέση με πριν και το επιβραδύνει.

Ο Newton διατύπωσε τον παρακάτω εμπειρικό νόμο για την διατμητική δύναμη που ισχύει για ορισμένα ρευστά όπως νερό, αέρας κλπ.:

$$dT_1 = \mu \frac{u_2 - u_1}{dy} dE = \mu \frac{du}{dy} dE$$

Ο παραπάνω νόμος πρακτικά δείχνει ότι η διατμητική δύναμη είναι ανάλογη της κλίσης της ταχύτητας κατά την κάθετη στο στοιχείο κατεύθυνση. Ο συντελεστής αναλογίας  $\mu$  ονομάζεται συντελεστής δυναμικής συνεκτικότητας ή ιξώδες του ρευστού.

Η εφαπτομενική διατμητική τάση  $\tau^*$  ορίζεται:  $\tau^* = \frac{dT}{dE} = \mu \frac{\partial u}{\partial y}$

Ο παραπάνω υλικός νόμος λέγεται υλική εξίσωση κατά Newton και είναι πειραματικός νόμος τον οποίο υπακούει συγκεκριμένη κατηγορία ρευστών που ονομάζονται νευτώνεια. Τα νευτώνεια είναι μια μεγάλη κατηγορία ρευστών στην οποία συμπεριλαμβάνονται το νερό και ο αέρας. Υπάρχουν όμως και ρευστά, κυρίως πολυμερή και σύνθετης μοριακής δομής, που δεν είναι νευτώνεια (π.χ. χρώματα, αίμα, πλαστικά κτλ). Το ιξώδες  $\mu$  είναι συνάρτηση κυρίως της θερμοκρασίας στα ασυμπιεστά νευτώνεια ρευστά. Στα δε συμπιεστά πέραν της θερμοκρασίας εξαρτάται και από την πίεση. Τέλος, ορίζεται και ένα άλλο μέγεθος η

κινηματική συνεκτικότητα ως εξής:  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ , όπου  $\rho$  η πυκνότητα του ρευστού.

### 1.1.6) Συμπιεστότητα

Συμπιεστότητα είναι η ιδιότητα των ρευστών να μεταβάλλουν την πυκνότητα τους με μεταβολή της ορθής εντατικής τους κατάστασης (πίεση) είτε σε ηρεμία είτε σε κίνηση. Η αύξηση της πίεσης προκαλεί και αύξηση της πυκνότητας.

Όσον αφορά τα υγρά θεωρούνται πρακτικά ασυμπίεστα, δηλαδή η πυκνότητα τους δεν εξαρτάται από τη μεταβολή της πίεσης ( $\rho = \text{const}$ ). Αυτό συμβαίνει γιατί παρουσιάζουν μεγάλη πυκνότητα, κάτι που σημαίνει πως οι αποστάσεις μεταξύ των μορίων τους είναι μικρές. Άρα για τον παραπάνω λόγο, ακόμα και υπό μεγάλες πιέσεις η μεταβολή του όγκου τους είναι αμελητέα.

Σε αντίθεση με τα υγρά στα αέρια οι αποστάσεις μεταξύ των μορίων είναι μεγάλες σε σχέση με το μέγεθος τους. Άρα και η πυκνότητα τους είναι μικρή καθώς και οι δυνάμεις που συγκρατούν τα μόρια μεταξύ τους είναι αμελητέες. Επομένως αν ασκηθούν εξωτερικές δυνάμεις που θα αυξάνουν την πίεση θα έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση του όγκου τους άρα και την αύξηση της πυκνότητας τους.

Η συμπιεστότητα ενός ρευστού εκφράζεται ως το αντίστροφο του μέτρου ελαστικότητας που ορίζεται ως :

$$E = \frac{\Delta p}{\Delta \rho / \rho_0}$$
, όπου  $\Delta p$  είναι η μεταβολή της πίεσης και  $\Delta \rho / \rho_0$  η σχετική μεταβολή της πυκνότητας δεδομένης της μάζας ρευστού, με  $\rho_0$  αρχική πυκνότητα σε ηρεμία.

### 1.1.7) Εξισώσεις διατήρησης

A) Εξίσωση διατήρησης της μάζας

Η εξίσωση διατήρησης της μάζας είναι η έκφραση του πρώτου βασικού νόμου της κλασικής μηχανικής, σύμφωνα με τον οποίον η μάζα δεν καταστρέφεται και δεν δημιουργείται από το μηδέν.

Η πυκνότητα του ρευστού είναι :  $\rho = \frac{dm}{dv}$ , όπου  $dv$  στοιχείο του όγκου ρευστού και  $dm$  τη μάζα του ρευστού

Ως επιφάνεια ελέγχου  $E$  ορίζεται η νοητή, κλειστή και ακίνητη επιφάνεια που θεωρείται εντός πεδίου ροής και η οποία περιλαμβάνει κάποια περιοχή  $\tau$  του πεδίου ροής. Συμβολίζοντας με  $\vec{n}$  το κάθετο μοναδιαίο διάνυσμα που ορίζεται σε κάθε σημείο της επιφάνειας ελέγχου  $E$  με φορά από μέσα προς τα έξω και  $dE$  το στοιχείο επιφάνειας της επιφάνειας  $E$ .

Η συνολική μάζα του ρευστού που περικλείεται στην επιφάνεια  $E$  είναι :

$$m(t) = \int_{(\tau)} \rho dv$$

Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη ότι η μεταβολή της μάζας ανά μονάδα χρόνου είναι

$\frac{dm}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{(\tau)} \rho dv$ , η εισερχόμενη στο χώρο τ μάζα ανά μονάδα χρόνου είναι  $-\int_E \rho \vec{u} \vec{n} dE$

Ο ισολογισμός της μάζας γράφεται:  $\frac{d}{dt} \int_{(\tau)} \rho dv = -\int_E \rho \vec{u} \vec{n} dE + \sum_1^n \dot{m}_i$

Η παροχή μάζας μέσω μιας επιφάνειας είναι:  $\dot{m} = \int_E \rho \vec{u} \vec{n} dE$

Η παροχή όγκου μέσω μιας επιφάνειας είναι:  $\dot{V} = \int_E \vec{u} \vec{n} dE$

Θεωρώντας ότι δεν υπάρχουν σημειακές πηγές ή καταβόθρες μάζας προκύπτει η ολοκληρωματική διατύπωση της εξίσωσης διατήρησης της μάζας:

$$\frac{d}{dt} \int_{(\tau)} \rho dv + \int_E \rho \vec{u} \vec{n} dE = 0$$

Με βάση το θεώρημα Gauss μετατρέπεται το επιφανειακό ολοκλήρωμα σε ογκικό

$$\int_{(\tau)} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \int_{(\tau)} \text{div}(\rho \vec{u}) dV = 0$$

Ακόμη, εισάγεται η ολική χρονική παράγωγος στο ολοκλήρωμα ως μερική παράγωγος. Με βάση τα παραπάνω προκύπτει η διαφορική διατύπωση της εξίσωσης διατήρησης της μάζας:  $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0$

B) Εξίσωση διατήρησης της ορμής

Η εξίσωση διατήρησης της ορμής είναι η έκφραση του δεύτερου βασικού νόμου της κλασσικής μηχανικής σύμφωνα με τον οποίο η συνισταμένη των ασκούμενων δυνάμεων είναι ίση με την χρονική μεταβολή της ορμής. Θεωρείται πάλι επιφάνεια ελέγχου E που περικλείει χώρο τ του ρευστού. Συμβολίζοντας με dm τη μάζα του σωματιδίου του ρευστού, η ορμή του είναι ίση με  $dm \vec{u} = \rho dV \vec{u}$ . Άρα η συνολική ορμή της μάζας του ρευστού που περιλαμβάνεται στο χώρο τ του ρευστού είναι ίση με:

$$\vec{J}(t) = \int_{(\tau)} \rho \vec{u} dV$$

Η εξίσωση διατήρησης της ορμής ορίζεται ως εξής:  $\frac{d\vec{J}}{dt} + \vec{S} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i$ ,

όπου  $\frac{d\vec{J}}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{(\tau)} \rho \vec{u} dV$  είναι η μεταβολή της ορμής ανά μονάδα χρόνου,

$\vec{S} = \int_E \rho \vec{u} (\vec{u} \vec{n}) dE$  είναι η συνολικά εξερχόμενη ορμή ανά μονάδα χρόνου στο χώρο τ

και  $\sum \vec{F}$  η συνισταμένη των δυνάμεων.

Άρα η ολοκληρωματική διατύπωση της εξίσωσης διατήρησης της ορμής:

$$\frac{d}{dt} \int_{(\tau)} \rho \bar{u} dV + \int_E \rho \bar{u} (\bar{u} \bar{n}) dE = \sum_{i=1}^n \bar{F}_i$$

### 1.1.8) Εξισώσεις Navier Stokes

Ως ροή Poiseuille ορίζεται η ασυμπίεστη ροή νευτώνειου ρευστού διαμέσου ενός μακρού, ευθείου και άκαμπτου καναλιού που δημιουργείται μέσω της εφαρμογής διαφοράς πίεσης στην είσοδο και στην έξοδο του καναλιού. Υποθέτουμε ότι ρευστό είναι ασυμπίεστο ( $\rho = \text{const}$ ) τότε οι εξισώσεις απλοποιούνται χρησιμοποιώντας  $\text{div} \bar{u} = 0$ . Υποθέτουμε ότι και  $\mu = \text{const}$  τότε προκύπτουν οι εξισώσεις Navier Stokes για το ασυμπίεστο ρευστό σε καρτεσιανές συντεταγμένες :

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho g_x + \mu \Delta u - \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \rho g_y + \mu \Delta v - \frac{\partial p}{\partial y}$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \rho g_z + \mu \Delta w - \frac{\partial p}{\partial z}$$

Όπου  $\Delta$  είναι ο τελεστής Laplace :  $\Delta \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$

Γράφοντας τις παραπάνω σχέσεις σε διανυσματική μορφή

έχουμε:  $\rho \frac{D\bar{u}}{Dt} = \rho \bar{g} - \text{grad} p + \mu \Delta \bar{u}$

Εξίσωση συνέχειας :  $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$

Για να προσαρμοστεί η εξίσωση διατήρησης της ορμής για ασυμπίεστη ροή νευτώνειου ρευστού θεωρείται  $\rho = \text{const}$  (μόνιμη και ασυμπίεστη ροή). Ακόμη, αντικαθιστούμε στην

$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}) + \text{div} (\rho \bar{u} \bar{u} - \bar{\sigma}) = \bar{F}$  τις υλικές εξισώσεις των νευτώνειων ρευστών οι οποίες

είναι οι εξής:  $\bar{\sigma} = -p\bar{i} + \bar{\tau}$ ,  $\bar{\tau} = 2\mu \bar{D} + \mu' \text{tr} \bar{D} \bar{i}$ ,  $\text{tr} \bar{D} = \text{div} \bar{u}$

όπου  $\bar{D} = \frac{1}{2} [\text{din} \bar{u} + (\text{div} \bar{u})^T]$ , ο τανυστής ρυθμού παραμόρφωσης,  $\mu$  το ιξώδες,

$\mu'$  το ιξώδες όγκου και  $\text{tr} \bar{D}$  το ίχνος του τανυστή ρυθμού παραμόρφωσης  $\bar{D}$ .

Για τοπική θερμοδυναμική ισορροπία ισχύει :  $3\mu + 2\mu' = 0$ .

Με βάση τα παραπάνω η εξίσωση διατήρησης της ορμής γίνεται:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}) + \operatorname{div}(\rho \bar{u} \bar{u}) = -\operatorname{div} P + \mu \operatorname{div}^2 \bar{u} + \bar{F}$$

## 1.2) Μικροροές

### 1.2.1) Εξισώσεις Navier Stokes για μικροροές

Στη ροή διαμέσου μικροκαναλιών παρατηρούνται διαφοροποιήσεις στις φυσικές αρχές που τη διέπουν σε σχέση με την κλασική ροή Poiseuille. Στα μικροκανάλια όσο μικραίνουν οι διαστάσεις τους οι ογκικές δυνάμεις (αδράνεια, βαρύτητα κτλ) τείνουν να γίνουν ασήμαντες, ενώ οι επιφανειακές δυνάμεις (επιφανειακή τάση, ιξώδες) παίζουν τον κυρίαρχο ρόλο στη συμπεριφορά του συστήματος. Αυτό γίνεται κατανοητό χρησιμοποιώντας τους νόμους κλίμακας (scaling laws). Ένας τέτοιος νόμος εκφράζει τη μεταβολή ιδιοτήτων ενός φυσικού συστήματος με τη μεταβολή του μεγέθους του, όταν άλλες παράμετροι, παραμένουν σταθερές όπως είναι η θερμοκρασία, η πίεση κτλ. Ο νόμος κλίμακας για τις προαναφερθείσες δυνάμεις είναι ο εξής:

$$\frac{\text{επιφανειακές δυνάμεις}}{\text{ογκικές δυνάμεις}} \propto \frac{L^2}{L^3} = L^{-1}, \text{ όπου } L \text{ η χαρακτηριστική διάσταση του συστήματος.}$$

Είναι εύκολα κατανοητό πως στην περίπτωση των μικροκαναλιών  $L \rightarrow 0$ . Επιπροσθέτως, λόγω των μικρών ταχυτήτων που έχουν παρατηρηθεί στις ροές σε μικροκανάλια, οι αριθμοί Reynolds είναι μικροί και η ροή μπορεί να θεωρηθεί με αρκετά καλή προσέγγιση ασυμπίεστη.

Οι εξισώσεις Navier Stokes γίνονται :  $\operatorname{div} \bar{u} = 0, -\operatorname{div} P + \mu \operatorname{div}^2 \bar{u} + \bar{F} = 0$

## 1.3) Ολίσθηση ροής

### 1.3.1) Φαινόμενο ολίσθησης- ερμηνεία

Η μελέτη του φαινομένου της ολίσθησης έχει απασχολήσει τους επιστήμονες στο διάστημα του 18<sup>ου</sup> -20<sup>ου</sup> αιώνα. Η αντιμετώπιση του φαινομένου της ολίσθησης και η πρόταση λύσεων για τις συνοριακές συνθήκες συνοψίζονται στις ακόλουθες περιπτώσεις.

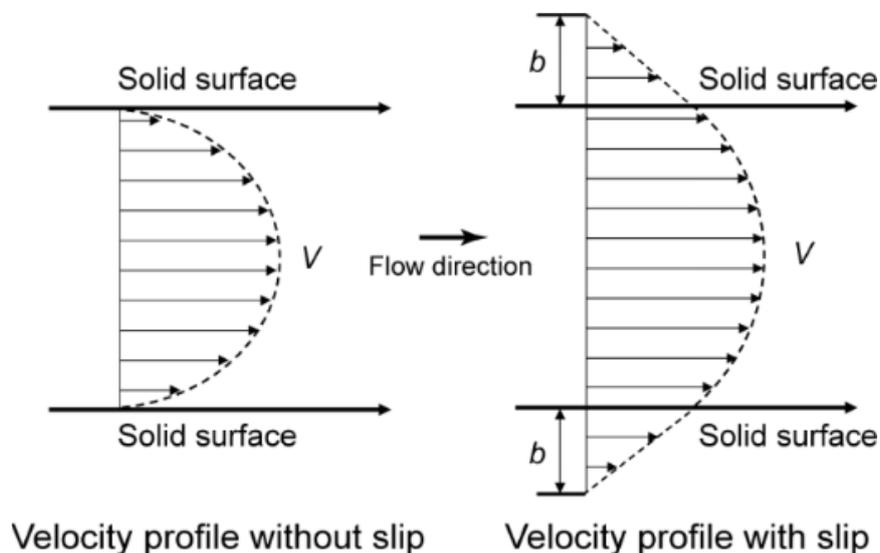
- Μη-ολίσθηση : η ταχύτητα του ρευστού στο τοίχωμα ταυτίζεται με την ταχύτητα του τοιχώματος και σταδιακά μεταβάλλεται με την απομάκρυνση του ρευστού από την επιφάνεια του τοιχώματος

- Οριακή συνθήκη του στάσιμου οριακού στρώματος :στην περίπτωση αυτή ένα λεπτό στρώμα υγρού επικολλάται πάνω στο τοίχωμα και η υπόλοιπη ποσότητα ρευστού ολισθαίνει πάνω σε αυτό
- Συνθήκη μερικής ολίσθησης :το ρευστό ολισθαίνει στο τοίχωμα με ταχύτητα ολίσθησης , η οποία συνδέεται με το μήκος ολίσθησης με την παρακάτω σχέση :

$u_{slip} = \beta \frac{\partial u_b}{\partial y}$ , όπου  $\beta$  η πλασματική απόσταση από το τοίχωμα που έχουμε ολίσθηση,  $u_b$  η ταχύτητα στο κέντρο της ροής και  $y$  η κάθετη προς το τοίχωμα κατεύθυνση.

Όσον αφορά το φαινόμενο της μη ολίσθησης αυτό ικανοποιείται όταν το ρευστό κολλάει στο στερεό τοίχωμα έχοντας την ταχύτητα του. Για να γίνει κατανοητό το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται ένα παράδειγμα. Υποθέτουμε ότι ένα μόριο ρευστού βρίσκεται κοντά σε ένα στερεό τοίχωμα, τότε οι δυνάμεις Van der Waals τείνουν να το κρατήσουν σε μια συγκεκριμένη περιοχή τις δυνάμεις αυτές προσπαθούν να τις αναιρέσουν οι τάσεις που δημιουργούνται.

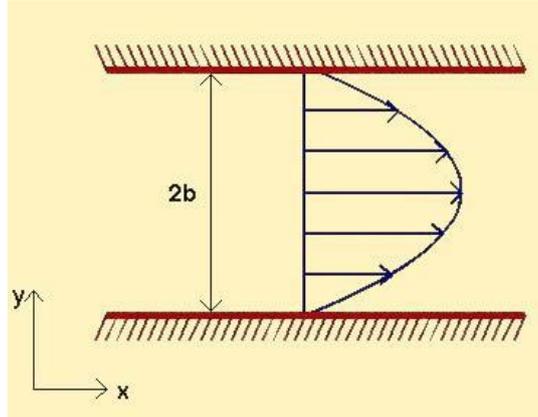
Για να επιτεύξουμε την απόσταση του μορίου από το τοίχωμα αρκεί οι δυνάμεις Van der Waals να γίνουν ίσες με τις δυνάμεις που δημιουργούνται για να το απομακρύνουν. Στην περίπτωση αυτή το μόριο υπόκειται σε μια κρίσιμη τιμή διάτμησης. Για να παρατηρηθεί ολίσθηση αρκεί τα μόρια να μην παραμένουν κολλημένα στο τοίχωμα και η τιμή της διάτμησης να είναι μεγαλύτερη της κρίσιμης.



**Εικόνα 1.1:**Απεικόνιση περιπτώσεων ολίσθησης –μη ολίσθησης

### 1.3.2) Ολίσθηση και μη ολίσθηση σε μικροροές

Θεωρούμε ότι έχουμε ένα κανάλι βάθους  $2b$ , μήκους  $L$  και πλάτους  $w$ . Υποθέτουμε ότι η ροή είναι παράλληλη στον άξονα των  $x$  όπως φαίνεται και στην Εικόνα (1.2). Στους άξονες  $y, z$  η ταχύτητα είναι μηδέν.



Εικόνα 1.2: Ροή σε κανάλι βάθους

Θεωρούμε την επίδραση των εξωτερικών δυνάμεων αμελητέα. Η ροή είναι ασυμπίεστη άρα οι σχέσεις που την εκφράζουν είναι :

$$\text{div} \vec{u} = 0 \quad \text{και} \quad -\text{div} P + \mu \text{div}^2 \vec{u} + \vec{F} = 0$$

Οι εξισώσεις της ορμής στους άξονες  $x, y$  είναι :

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad \text{και} \quad \frac{\partial p}{\partial y} = \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)$$

$\frac{\partial u}{\partial x} = 0$  και  $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0$ , προκύπτουν από την εξίσωση συνέχειας λαμβάνοντας υπόψη

ότι η ταχύτητα είναι συναρτήσει μόνο του άξονα των  $x$ . Άρα  $\frac{\partial p}{\partial y} = 0$

Η πίεση κατά μήκος του καναλιού είναι :  $\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{P_{in} - P_{out}}{L}$ , όπου  $P_{in}$  η πίεση στην είσοδο του καναλιού,  $P_{out}$  η πίεση στην έξοδο του καναλιού και  $L$  το μήκος του.

Επομένως  $\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{P_{in} - P_{out}}{\mu L}$  (1)

Στην περίπτωση της **μη ολίσθησης** ισχύει  $u(\pm b) = 0$ . Άρα ολοκληρώνοντας τη (1) δύο

φορές προκύπτει:  $u = \frac{P_{in} - P_{out}}{\mu L} \left( \frac{y^2 - b^2}{2} \right)$

Στην περίπτωση **ύπαρξης ολίσθησης** ισχύει  $u(\pm b) = \beta \frac{\partial u}{\partial y}$ . Ολοκληρώνοντας μια

φορά την (1) προκύπτει  $u(\pm b) = \beta \frac{P_{in} - P_{out}}{\mu L} b$ . Άρα ολοκληρώνοντας την (1) δύο

φορές προκύπτει :  $u = \frac{P_{in} - P_{out}}{\mu L} \left( \frac{y^2 - b^2}{2} \right) + \beta \frac{P_{in} - P_{out}}{\mu L} b$

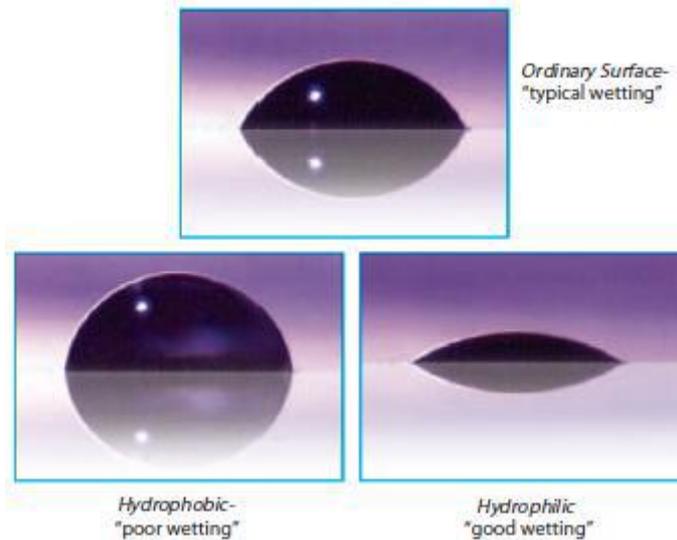
#### **1.4) Υπερ(υδροφοβητικότητα) και Υπερ(υδροφιλικότητα)**

##### **1.4.1) Ανάλυση Υπερ(υδροφοβητικότητας), Υπερ(υδροφιλικότητας) και**

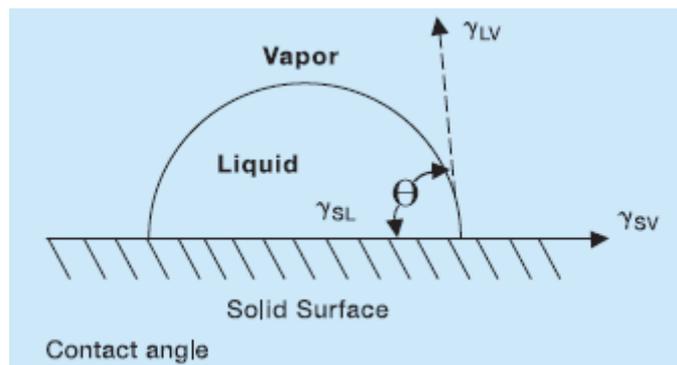
##### **σχετιζόμενων εννοιών**

Οι όροι υδροφοβικότητα και υδροφιλικότητα χρησιμοποιούνται συχνά για να προσδιορίσουν μια επιφάνεια. Πιο συγκεκριμένα, ο όρος υδροφοβικότητα εκφράζει την τάση μιας επιφάνειας να μην απορροφά νερό ή να μην διαβρέχεται από νερό. Αντίθετα ο όρος υδροφιλικότητα εκφράζει την τάση μιας επιφάνειας να επιδεικνύει "φιλική" συμπεριφορά προς νερό που ρέει πάνω σε αυτή. Μια επιφάνεια θεωρείται ότι διαβρέχεται από ένα υγρό όταν αυτό διασκορπίζεται ομοιόμορφα πάνω σε αυτή χωρίς το σχηματισμό σταγονιδίων. Στην περίπτωση που περιγράφεται παραπάνω αν το υγρό είναι νερό τότε η επιφάνεια θεωρείται υδρόφιλη. Με βάση τα παραπάνω, γίνεται σαφές ότι στην περίπτωση της υδρόφιλης επιφάνειας οι δυνάμεις που σχετίζονται με την αλληλεπίδραση του νερού με την επιφάνεια είναι μεγαλύτερες από τις συνεκτικές δυνάμεις που σχετίζονται με τον όγκο του νερού.

Αντίθετα, στις υδρόφοβες επιφάνειες σχηματίζονται σταγονίδια νερού. Άρα, στις υδρόφοβες επιφάνειες οι συνεκτικές δυνάμεις που σχετίζονται με τον όγκο του νερού είναι μεγαλύτερες από αυτές που σχετίζονται με την αλληλεπίδραση του νερού με την επιφάνεια. Ακολουθούν κάποιες εικόνες για να γίνουν κατανοητά όσα αναφέραμε παραπάνω.



Ένας απλός τρόπος για να προσδιοριστεί ο σχετικός βαθμός επίδρασης του υγρού σε μια στερεή επιφάνεια είναι ο καθορισμός της γωνίας επαφής  $\theta$  μεταξύ ενός σταγονιδίου υγρού με την στερεή επιφάνεια.



Παρακάτω φαίνονται ορισμένες ενδεικτικές τιμές της γωνίας επαφής του νερού σε διάφορες επιφάνειες :

	$\theta$		
heptadecafluorodecyltrimethoxysilane*	115°	diamond	87°
poly(tetrafluoroethylene)	108-112°	graphite	86°
poly(propylene)	108°	silicon (etched)	86-88°
octadecyldimethylchlorosilane*	110°	talc	50-55°
octadecyltrichlorosilane*	102-109°	chitosan	80-81°
tris(trimethylsiloxy)silylethyl-		steel	70-75°
dimethylchlorosilane	104°	gold, typical (see gold, clean)	66°
octyldimethylchlorosilane*	104°	intestinal mucosa	50-60°
dimethyldichlorosilane*	95-105°	kaolin	42-46°
butyldimethylchlorosilane*	100°	platinum	40°
trimethylchlorosilane*	90-100°	silicon nitride	28-30°
poly(ethylene)	88-103°	silver iodide	17°
poly(styrene)	94°	soda-lime glass	<15°
poly(chlorotrifluoroethylene)	90°	gold, clean	<10°
human skin	75-90°		

\*Note: Contact angles for silanes refer to smooth treated surfaces.

Αν η γωνία επαφής του νερού είναι μικρότερη από 30°, η επιφάνεια θεωρείται υδρόφιλη από τη στιγμή που οι δυνάμεις αλληλεπίδρασης του νερού με την επιφάνεια είναι σχεδόν ίσες με τις συνεκτικές δυνάμεις του όγκου του νερού και το

νερό δεν στραγγίζει εντελώς από την επιφάνεια. Αν η γωνία επαφής του νερού είναι μικρότερη από  $10^\circ$  τότε η επιφάνεια θεωρείται υπερυδροφιλή. Σ' αυτή την περίπτωση, η επιφάνεια δεν απορροφά νερό, δεν διαλύεται σε νερό ή δεν αντιδρά με νερό. Σε μια υδρόφοβη επιφάνεια το νερό σχηματίζει ευδιάκριτα σταγονίδια. Όσο αυξάνει η γωνία επαφής του νερού με την επιφάνεια τόσο αυξάνει και η υδροφοβικότητα της επιφάνειας. Μια επιφάνεια μπορεί να θεωρηθεί υδρόφοβη αν η γωνία επαφής του νερού είναι μεγαλύτερη από  $90^\circ$ . Η θεωρητικά μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει η γωνία επαφής του νερού με μια ομαλή επιφάνεια είναι  $120^\circ$ . Όμως, σε υδρόφοβες επιφάνειες που φέρουν τραχύτητα η γωνία επαφής του νερού με την επιφάνεια μπορεί να ξεπεράσει τις  $150^\circ$ . Σε αυτή την περίπτωση έχουμε να κάνουμε με υπερυδροφοβη επιφάνεια.

Ενώ η γωνία επαφής του νερού με την επιφάνεια είναι ένας καλός τρόπος αξιολόγησης της υδροφοβικότητας ή υδροφιλικότητας του υλικού από το οποίο συνίσταται μια επιφάνεια, δεν αποτελεί αξιόπιστο τρόπο προσδιορισμού της διαβροχής του υλικού από άλλα υγρά. Ως διαβρεκτικότητα (wettability) ορίζεται η ικανότητα ενός υγρού να έλκεται από μια επιφάνεια και να απλώνεται πάνω σε αυτή προς όλες τις κατευθύνσεις. Η κρίσιμη επιφανειακή τάση (critical surface tension) σχετίζεται με τη διαβρεκτικότητα και θεωρείται ένας καλύτερος τρόπος για να προσδιοριστεί η συμπεριφορά ενός στερεού σε σχέση με μια ποικιλία υγρών. Για υγρά με επιφανειακή τάση κάτω από την κρίσιμη επιφανειακή τάση ( $\gamma_c$ ) του υλικού από το οποίο συνίσταται η επιφάνεια, η γωνία επαφής τους με την επιφάνεια είναι  $0^\circ$ . Η κρίσιμη επιφανειακή τάση έχει μοναδική τιμή για κάθε στερεό υλικό και προσδιορίζεται υπολογίζοντας το συνημίτονο των γωνιών επαφής υγρών διαφόρων επιφανειακών τάσεων και ανάγοντας το σε ένα.

Η γωνία επαφής δίνεται από την εξίσωση του Young:  $\gamma_{SV} - \gamma_{SL} = \gamma_{LV} \cos \theta_e$ , όπου  $\theta_e$  η γωνία επαφής,  $\gamma_{SV}$  η επιφανειακή τάση μεταξύ στερεού και αερίου,  $\gamma_{SL}$  η επιφανειακή τάση μεταξύ στερεού και υγρού και  $\gamma_{LV}$  η επιφανειακή τάση μεταξύ υγρού και αερίου. Υδρόφιλη συμπεριφορά γενικά παρατηρείται σε επιφάνειες με κρίσιμη επιφανειακή τάση μεγαλύτερη από 45 dynes/cm. Όσο η κρίσιμη επιφανειακή τάση αυξάνει, η αναμενόμενη μείωση της γωνίας επαφής συνδυάζεται με καλύτερη προσροφητική ικανότητα του υλικού. Υδρόφοβη συμπεριφορά γενικά παρατηρείται σε επιφάνειες με κρίσιμη επιφανειακή τάση μικρότερη από 35 dynes/cm. Επιπροσθέτως, για κρίσιμες επιφανειακές τάσεις μικρότερες από 20 dynes/cm εκτός από υδρόφοβη συμπεριφορά παρατηρείται και ελαιόφοβη συμπεριφορά, δηλαδή οι επιφάνειες αντιστέκονται στη διαβροχή τους από έλαια υδρογονανθράκων.

Ακολουθεί πίνακας που παρουσιάζει κάποιες τιμές κρίσιμων επιφανειακών τάσεων για διάφορα υλικά:

	$\gamma_c$		
heptadecafluorodecyltrichlorosilane	12.0	cynoethyltrimethoxysilane	34
polytetrafluoroethylene	18.5	aminopropyltriethoxysilane	35
octadecyltrichlorosilane	20-24	polymethylmethacrylate	39
methyltrimethoxysilane	22.5	polyvinylchloride	39
nonafluorohexyltrimethoxysilane	23.0	phenyltrimethoxysilane	40.0
vinyltriethoxysilane	25	chloropropyltrimethoxysilane	40.5
paraffin wax	25.5	mercaptopropyltrimethoxysilane	41
ethyltrimethoxysilane	27.0	glycidoxypropyltrimethoxysilane	42.5
propyltrimethoxysilane	28.5	polyethyleneterephthalate	43
glass, soda-lime (wet)	30.0	poly(ethylene oxide)	43-45
poly(chlorotrifluoroethylene)	31.0	copper (dry)	44
poly(propylene)	31.0	aluminum (dry)	45
poly(propylene oxide)	32	iron (dry)	46
polyethylene	33.0	nylon 6/6	45-6
trifluoropropyltrimethoxysilane	33.5	glass, soda-lime (dry)	47
3-(2-aminoethyl)-aminopropyl-trimethoxysilane	33.5	silica, fused	78
poly(styrene)	34	titanium dioxide (anatase)	91
p-tolyltrimethoxysilane	34	ferric oxide	107
		tin oxide	111

Note: Critical surface tensions for silanes refer to smooth treated surfaces.

### 1.4.2) Εφαρμογές Υπερ(υδροφοβικότητας)

Στη σημερινή εποχή, τα υδρόφοβα υλικά χρησιμοποιούνται ευρέως. Παρακάτω δίνονται ορισμένα βασικά παραδείγματα εφαρμογών, στις οποίες χρησιμοποιούνται υλικά με υδρόφοβες και υπερυδρόφοβες ιδιότητες, και οι οποίες αποκτώνται με την κατάλληλη επιλογή της χημικής σύνθεσης και της υφής της ζητούμενης επιφάνειας. Η κατεργασία της επιφάνειας των δορυφορικών κεραιών με υπερυδρόφοβες επενδύσεις, που αναπτύχθηκαν στο NTT (Ιαπωνία) οδήγησε σε σημαντική μείωση της προσκόλλησης χιονιού στις μεταλλικές επιφάνειες των κεραιών, και κατά συνέπεια σε μείωση των περιστατικών κατάρρευσης των δορυφορικών επικοινωνιών λόγω αυτού του φαινομένου.

Μια αποτελεσματική συσκευή για το διαχωρισμό υδατικών φάσεων και φάσεων ελαίου κατασκευάστηκε με τη χρήση προσαρμοσμένων επενδύσεων που φέρουν τραχύτητα πάνω σε μικροκόσκινια (tailored textured coatings on microsieves). Η λειτουργία αυτών των κόσκινων βασίζεται στην επίτευξη διαφορετικών γωνιών επαφής του νερού και του ελαίου πάνω στην επιφάνεια του κόσκινου. Για παράδειγμα, η γωνία προώθησης (advancing contact angle) του νερού είναι μεγαλύτερη από  $156^\circ$  και η γωνία ολίσθησης (sliding angle) είναι περίπου  $4^\circ$ . Την ίδια στιγμή η επιφάνεια παραμένει ελαιόφιλη. Το γαλάκτωμα νερού λαδιού στο κόσκινο διαχωρίζεται γρήγορα, επειδή τα σταγονίδια του ελαίου περνούν διαμέσου των ανοιγμάτων του κόσκινου στην δεξαμενή που είναι τοποθετημένη από κάτω του.

Ίνες για ύφανση ρούχων με νανοδομημένη επιφάνεια (textile fibres with nanostructured surface) είναι κατάλληλες για την παραγωγή υδρόφοβου βαμβακερού ρουχισμού και αυτοκαθαριζόμενων (self-cleaning) γραβατών και πουκαμίσων.

Η χρήση υπερυδρόφοβων επενδύσεων στην ηλεκτρική μηχανική (electrical engineering) έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική. Για παράδειγμα, η επένδυση των αγωγών των γραμμών τροφοδοσίας (conductors of power lines) με υπερυδρόφοβες ταινίες (films) μειώνουν σημαντικά τον θόρυβο εξαιτίας των

εκκενώσεων τύπου κορόνα (corona discharges) που παράγονται από τις σταγόνες νερού στην επιφάνεια των αγωγών. Επίσης, έχουν αναπτυχθεί υδρόφοβες επενδύσεις με τραχύτητα για την επιφάνεια σιλικονούχων μονωτών (silicon insulators) για γραμμές τροφοδοσίας υψηλής τάσης.

Αυτές οι υδρόφοβες επιφάνειες μειώνουν σημαντικά την αλληλεπίδραση του υλικού του μονωτή με τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, και κατ' επέκταση μειώνονται και τα ρεύματα διαρροής (leakage currents) που ρέουν διαμέσου της επιφάνειας των μονωτών.

Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στη χρήση υδρόφοβων υλικών που φέρουν τραχύτητα ως υλικά που μεταβάλλουν τις ιδιότητές τους κάτω από την επίδραση εξωτερικών παραγόντων. Οι χημικές ιδιότητες και η διαβρεκτικότητα τέτοιων υλικών μπορούν να μεταβληθούν όταν είναι: υπό ακτινοβολία, εντός ηλεκτρικού πεδίου, υπό θερμική επεξεργασία (heat treatment) και υπό επεξεργασία με διαλύματα (treatment with solutions) (μεταβολή της τιμής του pH).

Αναστρέψιμες μεταβολές της διαβρεκτικότητας επιφανειών από υπερυδρόφοβες σε υπερυδρόφιλες κατά την έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία UV έχουν καταγραφεί για τα οξείδια του ψευδαργύρου, του τιτανίου, του κασσιτέρου και του βολφραμίου. Τα παραπάνω υλικά έχουν χρησιμοποιηθεί από ερευνητές στο τομέα της βιομηχανίας για την κατασκευή ενός είδους αυτοκαθαριζόμενου γυαλιού. Υπάρχουν δύο μηχανισμοί αυτοκαθαρισμού. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, η έκθεση σε ακτινοβολία UV προκαλεί φωτοκαταλυτική διάσπαση των οργανικών ενώσεων (photocatalytic decomposition of organic) και αύξηση της υδροφιλικότητας της επιφάνειας εξαιτίας της επιπρόσθετης προσρόφησης μορίων νερού που ενεργοποιήθηκε μέσω της ακτινοβολίας. Έτσι, οι κηλίδες ξεπλένονται από αυτές τις επιφάνειες είτε με τη βροχή είτε με κάποιο τεχνητό σύστημα ψεκασμού νερού. Η αποθήκευση της επιφάνειας στο σκοτάδι για κάποιο χρονικό διάστημα επαναφέρει την υπερυδρόφοβη κατάσταση και δουλεύει ο δεύτερος μηχανισμός. Αυτός ο μηχανισμός βασίζεται στην απορρόφηση των κηλίδων με ασθενή προσκόλληση στο γυαλί μέσω σταγονιδίων νερού που <<γλιστρούν>> κατά πλάτος της υπερυδρόφοβης επιφάνειας του γυαλιού. Στην παραπάνω περίπτωση, η γωνία επαφής μειώθηκε υπό την έκθεση σε ακτινοβολία UV από  $109^\circ$  σε  $10^\circ$  για ομαλή επιφάνεια ZnO και από  $163^\circ$  σε  $0^\circ$  για επιφάνεια ZnO που φέρει τραχύτητα.

Η φωτοαποκρίσιμη διαβροχή (photoswitchable wetting) έχει εφαρμοστεί στη μικρορευστομηχανική και στην οργανική σύνθεση. Πιο συγκεκριμένα, η μακροσκοπική κίνηση μικρών υγρών σταγόνων κατά πλάτος μιας φωτοευαίσθητης (photosensitive) επιφάνειας χρησιμοποιείται για την παροχή των συστατικών στη ζώνη αντίδρασης (reaction zone) και μπορεί να ελεγχθεί μέσω ακτινοβολίας (irradiation). Ένα μονό στρώμα (monolayer) από παράγωγα αζοβενζολίου (azobenzene derivatives) έκανε την επιφάνεια φωτοευαίσθητη. Η ακτινοβολία με UV της επιφάνειας ( $\lambda=360\text{nm}$ ) προκαλεί φωτοϊσομερίωση (photoisomerisation) μαζί με μια αύξηση της ποσότητας των cis-ισομερών, που προσδίδουν τις υδρόφιλες ιδιότητες στην επιφάνεια. Η ακτινοβολία με μπλε φως (irradiation with blue light) ( $\lambda=436\text{nm}$ ) προκαλεί cis-trans ισομερίωση και η επιφάνεια επανέρχεται στην υδρόφοβη κατάσταση. Αν μια σταγόνα μεγέθους λίγων χιλιοστών τοποθετηθεί σε μια τέτοια επιφάνεια και δημιουργηθεί ασύμμετρη φωταγωγή, η διαφορά

ενέργειας μεταξύ των διάφορων σημείων της επιφάνειας δείχνει σε πόσο μεγάλη περίμετρο μπορεί να κινηθεί η σταγόνα. Η κίνηση αυτή μπορεί να ελεγχθεί με μεγάλη ακρίβεια.

Επίσης, άλλη μια εφαρμογή της φωτοαποκρίσιμης διαβροχής παρουσιάζεται παρακάτω. Η επιφάνεια νανοπορώδων μεμβρανών από αλουμίνιο μετατρέπεται με ένα μίγμα υδρόφοβων μορίων και μορίων σπιροπυρανίου (spiroorgan). Μια μη φωτισμένη μεμβράνη περιέχει τη μη πολική μορφή του σπιροπυρανίου, που εξασφαλίζει τη μη διαβροχή της μεμβράνης από υδατικά διαλύματα. Με ακτινοβολία με UV, το σπιροπυράνιο μεταβαίνει στην πολική μορφή της μεροκυανίνης (merocyanine) και τα μόρια του νερού και τα διαλυμένα ιόντα (dissolved ions) μπορούν να περάσουν διαμέσου της μεμβράνης. Έτσι, η μεμβράνη λειτουργεί σαν μια φωτοευαίσθητη βαλβίδα, που εναλλάσσει τη μεταφορά νερού και ιόντων και μεταβάλλει την ιοντική αγωγιμότητα.

Ορισμένες ακόμη εφαρμογές των υδρόφοβων και υπερυδρόφοβων υλικών είναι επενδύσεις σε γυαλιά, ζελατίνες κρანών, παρμπρίζ οι οποίες εξασφαλίζουν καλή οπτική διαφάνεια καθώς και επενδύσεις θαλάσσιων οχημάτων (βάρκες, καράβια, τορπίλες, γιοτ κτλ) οι οποίες αφενός δίνουν τη δυνατότητα για ταχύτερη κίνηση των οχημάτων εξαιτίας μεγαλύτερης γωνίας επαφής με το νερό, αφετέρου προστατεύουν από την προσκόλληση θαλάσσιων οργανισμών στο βρεχόμενο μέρος των οχημάτων.

#### **1.4.3) Εφαρμογές Υπερ(υδροφιλικότητας)**

Οι υδροφιλικές ιδιότητες συγκεκριμένων ουσιών είναι ιδιαίτερα σημαντικές στην βιομηχανία, ειδικά στον τομέα της καθαριότητας συγκεκριμένων περιοχών. Για παράδειγμα, μια υδρόφιλη μεμβράνη δεν θα λερωθεί με λάδι, λιπαντικό (grease) ή άλλες υδρόφοβες ουσίες. Η μεμβράνη, εξαιτίας της υδροφιλικότητας της, έλκει το νερό και τα μόρια του νερού θα εκδιώξουν άλλα μόρια ώστε να αποκτήσουν πρόσβαση στην μεμβράνη. Όταν σχηματιστούν οι δεσμοί του υδρογόνου, είναι αρκετά σταθεροί και δύσκολο να σπάσουν. Αυτό κρατάει τους ρυπαντές μακριά από τη μεμβράνη, έτσι ώστε να παραμένει καθαρή και να λειτουργεί αποδοτικά για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

Οι υδρόφιλες επιφάνειες υγραίνονται εύκολα και διατηρούν την υγρότητα τους για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε σχέση με τις αντίστοιχες υδρόφοβες. Έτσι, οι υδρόφιλες επενδύσεις σε αγωγούς και σωλήνες ελαχιστοποιούν την ανάγκη για επιπλέον λιπαντικά μέσα. Το παραπάνω είναι εξαιρετικής σημασίας όταν ανακύψουν ζητήματα επιμόλυνσης (cross-contamination).

Υδρόφιλες επενδύσεις από καουτσούκ (rubber) μπορούν να αυξήσουν την αποτελεσματικότητα των πωμάτων (plugs) και των δακτυλίων στεγανοποίησης (o-rings) στην εμπόδιση της διαφυγής του νερού, που προκαλεί διαρροές. Το νερό έλκεται από την υδρόφιλη επένδυση και είναι μικρότερη η ποσότητα που θα διαρρεύσει από τα κενά. Από την άλλη πλευρά, τα υδρόφιλα υλικά είναι λιγότερο

χρήσιμα από τα υδρόφοβα στις υγρές περιοχές. Οι υδρόφοβες επενδύσεις απορροφούν τόσο νερό ώστε να συνδέουν τις ενώσεις (bind the compounds), το οποίο παραμένει σταθερό μετά την πρώτη χρήση. Οι υδρόφιλες επιφάνειες έχουν την τάση να έλκουν και να χάνουν νερό όσο οι συνθήκες μεταβάλλονται και έτσι να συστέλλονται και να διαστέλλονται. Αυτή η κίνηση μπορεί να είναι καταστροφική και η απορρόφηση νερού μπορεί να προσθέσει ρυπαντές στην επένδυση. Γενικά, οι υδρόφιλες επενδύσεις δεν αντέχουν τόσο πολύ όσο οι αντίστοιχες υδρόφοβες. Συμπερασματικά, οι υδρόφιλες επενδύσεις ενδείκνυται για εμπόδιση διαρροών αλλά όχι για κάλυψη μεγάλων διακένων.

Επιπλέον, οι υπερυδρόφιλες επιφάνειες είναι γνωστές για ιδιότητες τους όπως ο αυτοκαθαρισμός, η αντιθαμβωτικότητα (antifogging) και η επαύξηση της μεταφοράς θερμότητας με βρασμό (boiling heat transfer). Με βάση των παραπάνω ιδιοτήτων τους, οι υπερυδρόφιλες επιφάνειες τυχάνουν ευρείας εφαρμογής σε συσκευές νοικοκυριού.

Στη συνέχεια, θα αναφερθούμε στα υδρόφιλα πολυμερή ή hydrogels που χρησιμοποιούνται ευρέως σε βιοιατρικές και βιολογικές εφαρμογές. Τα hydrogels είναι υδροδιαστελλόμενα δίκτυα πολυμερών (water swollen polymer networks) φυσικής ή συνθετικής προέλευσης. Μεγαλύτερη αποδοχή τυχάνουν τα δικτυωτά (cross-linked), ομοιοπολικά συνδεδεμένα (covalently bonded), συνθετικά hydrogels. Τα hydrogels έχουν χρησιμοποιηθεί ως μέσο για την ακινητοποίηση (immobilization), την ενθυλάκωση (encapsulation) και την ελεγχόμενη απελευθέρωση (controlled release) πολλών φυσιολογικά ενεργών ουσιών (physiologically active substances) όπως αντιβιοτικά, αντιπηκτικά, αντικαρκινικά φάρμακα, αντισώματα, φάρμακα ανταγωνιστές (drug antagonists), ένζυμα, αντισυλληπτικά, και αντιβακτηριδιακά μέσα (antibacterial agents). Εξαιτίας του υδροδιαστελλόμενου δικτύου των hydrogels και του γεγονότος ότι τα μονομερή που τα αποτελούν είναι υδρόφιλα, βιολογικά ενεργές ουσίες μπορούν είτε να παγιδευτούν φυσικά (physically entrapped) είτε να συνδεθούν ομοιοπολικά με τα hydrogels. Και οι δύο μέθοδοι μπορούν να οδηγήσουν σε προσωρινή ή μόνιμη ακινητοποίηση.

Άλλες εφαρμογές των υδρόφιλων ουσιών είναι, επένδυση σε καθετήρες ώστε να μην χρειάζονται επιπλέον λίπανση, επένδυση σε φακούς επαφής ώστε να εφαρμόζουν καλύτερα και να καθαρίζονται πιο εύκολα, αδιαβροχοποίηση της εξωτερικής επιφάνειας διαφόρων υλικών και επιφανειακή επεξεργασία μαντιλακίων, πάνων και γαζών.

#### **1.4.4) Πειραματικές μελέτες σε Υπερ(υδρόφοβα) και Υπερ(υδρόφιλα) κανάλια**

Η ροή στην περιοχή ολίσθησης (slip flow) μελετήθηκε πρώτα από τον Schnell (1956), ο οποίος μέτρησε την παροχή του νερού σε γυάλινους τριχοειδείς αγωγούς (glass capillaries) και βρήκε αυξημένη παροχή σε τριχοειδείς αγωγούς με υδρόφοβη επένδυση.

Στη συνέχεια, αρκετοί ερευνητές ασχολήθηκαν με το φαινόμενο της ολίσθησης. Ο Choi (2003) ερεύνησε πειραματικά το φαινόμενο της ολίσθησης για ροή νερού σε υδρόφοβα και υδρόφιλα μικροκανάλια και ανακάλυψε ότι το μήκος ολίσθησης (slip length) μεταβάλλεται σχεδόν γραμμικά με το ρυθμό διάτμησης (flow shear rate). Ο Watanabe (1998,1999) διαπίστωσε ολίσθηση στο τοίχωμα ενός υδρόφοβου σωλήνα με σχετικά μεγάλης κλίμακας γεωμετρία (15X15 mm). Οι Borrat και Bocquet (1999)

κατέληξαν υπολογιστικά σε σημαντική ολίσθηση για ροή σε νανοπορώδη μέσα (nanoporous media). Οι Tretheway και Meinhart (2002) μέτρησαν τα προφίλ ταχύτητας απιονισμένου νερού που έρεε διαμέσου ενός τρισδιάστατου μικροκαναλιού με διατομή 30X300μm.

Ανακάλυψαν ότι όταν η επιφάνεια του μικροκαναλιού είναι υδρόφιλη η συμβατική συνοριακή συνθήκη μη ολίσθησης ισχύει. Ωστόσο, όταν η επιφάνεια του μικροκαναλιού είναι υδρόφοβη παρατήρησαν σημαντική ολίσθηση (περίπου 10% της ταχύτητας ελεύθερου ρεύματος). Το σφάλμα της ταχύτητας στην πειραματική μέτρηση ήταν περίπου 2% και το σφάλμα της απόστασης ολίσθησης περίπου  $\pm 0,45$  μm. Επίσης, η παρουσία νανοφυσαιδίων που παγιδεύονται στα κενά των εξογκωμάτων των υδρόφοβων επιφανειών που φέρουν τραχύτητα αναφέρθηκε από διάφορους συγγραφείς ως ένας παράγοντας που επηρεάζει την ολίσθηση της ροής ρευστού σε μικροκανάλια (Ishida 2000, Tyrrell 2001,2002). Σύμφωνα με τον Santiago (1998), ο οποίος παρουσίασε μια νέα προσέγγιση στην micro-PIV (micro-particle image velocimetry) που μπορεί να εφαρμοστεί στη μικρορευστομηχανική, απευθείας μέτρηση του πεδίου ταχύτητας έδειξε προφανή ροή ολίσθησης καθώς και απόσταση ολίσθησης.

Βιολογικές υπερυδρόφοβες επιφάνειες έχουν παρατηρηθεί σε διάφορα είδη φυτών (Neinhuis 1997). Για παράδειγμα η επιφάνεια ενός φύλλου λωτού καλύπτεται με πολυάριθμες προεξοχές μικροκλίμακας και νανοκλίμακας επιστρωμένες με μια υδρόφοβη ουσία. Η επιφάνεια εμποδίζει το νερό από το να απλωθεί πάνω στο φύλλο και το νερό κυλάει γύρω γύρω σε σταγονίδια. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό σαν το φαινόμενο του λωτού (lotus effect). Με βάση το φαινόμενο του λωτού έχουν δημιουργηθεί υπερυδρόφοβες επιφάνειες με γωνίες επαφής με το νερό μεγαλύτερες από 140° είτε με επιφάνειες με τραχύτητα που είναι καλυμμένες με μόρια χαμηλής επιφανειακής ενέργειας (low surface energy molecules), είτε με την εισαγωγή τραχύτητας σε υδρόφοβες επιφάνειες (Li 2007, Shiu 2004, Öner 2000, Nosonovsky 2005).

Την τελευταία δεκαετία έχουν μελετηθεί η ροή ολίσθησης και η μείωση της οπισθέλκουσας για υπερυδρόφοβες επιφάνειες. Ο Davies (2006) διερεύνησε τη στρωτή περιοδικά επαναλαμβανόμενη ροή σε ένα μικροκανάλι παραλλήλων πλακών (parallel-plate microchannel) με υπερυδρόφοβα τοιχώματα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι περιοχές ολίσθησης και μη ολίσθησης αποτυπώνονται στα προφίλ ταχύτητας, έχοντας ευδιάκριτες μεταβολές από την κλασική στρωτή ροή σε ένα μικροκανάλι παραλλήλων πλακών. Οι Choi και Kim (2006) κατασκεύασαν μια νανοδομημένη υπερυδρόφοβη επιφάνεια (nanostructured superhydrophobic surface) που ελαχιστοποιεί την περιοχή επαφής ρευστού τοιχώματος και έτσι το ρευστό ρέει κατά κύριο λόγο πάνω σε ένα στρώμα αέρα. Ο Byun (2008) διερεύνησε τη οριακή συνθήκη ολίσθησης για υδρόφιλο μικροκανάλι από γυαλί, για υδρόφοβο μικροκανάλι από PDMS και για υπερυδρόφοβο μικροκανάλι από PDMS με τη μέτρηση των προφίλ ταχυτήτων μέσω της μεθόδου micro-P.I.V. Για το υδρόφιλο μικροκανάλι από γυαλί κατέληξε πως η ταχύτητα κοντά στο τοίχωμα μειωνόταν ομοιόμορφα μέχρι το μηδέν, δηλαδή η γνωστή οριακή συνθήκη ολίσθησης ίσχυε με καλή ακρίβεια. Για το υδρόφοβο μικροκανάλι από PDMS το προφίλ της ταχύτητας στο τοίχωμα έδειξε ολίσθηση με απόσταση ολίσθησης περίπου 2 μm. Για το υπερυδρόφοβο μικροκανάλι από PDMS το προφίλ της ταχύτητας στο τοίχωμα έδειξε ολίσθηση με απόσταση ολίσθησης περίπου 5 μm.

## **Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 1**

- Σωκράτης Τσαγγάρης, 'Μηχανική των Ρευστών' (2005)
- Barrat J., Bocquet L., 'Large slip effect at a nonwetting fluid-solid interface', *Physical Review Letters*, Volume 82, No 23, 4671-4674 (1999)
- Boinovich L. B., Emelyanenko A. M., 'Hydrophilic materials and coatings: principles of design, properties and applications', *Russian Chemical Reviews*, 77 (7), 583-600 (2008)
- Brigo L., 'Water slippage over micro and nano structured surfaces', Phd thesis, *Universita Degli di Padova, Italy* (2008)
- Bruus H., 'Theoretical Microfluidics' (2008)
- Byun D., Kim J., Ko H. S., Park H. C., 'Direct measurement of slip flows in superhydrophobic microchannels with transverse grooves', *Physics of Fluids*, Volume 20, No 11 (2008)
- Chang-Hwan Choi, K. Johan A. Westin and Kenneth S. Breuer, 'Apparent slip flows in hydrophylic and hydrophobic microchannels', *Physics of Fluids*, Volume 15, No 10 (2003)
- Choi C. H., Johan A., Westin A., Breuer K. S., 'Apparent slip flow in hydrophilic and hydrophobic microchannels', *Physics of Fluids*, Volume 15, No 10, 2897-2902 (2003)
- Choi C. H., Kim C. J., 'Large slip of aqueous liquid flow over a nanoengineered superhydrophobic surface', *Physical Review Letters*, Volume 96, No 6 (2006)
- Churaev N. V., Sobolev V. D., Somov A. N., 'Slippage of liquids over hydrophobic solid surfaces', *Journal of Colloid and Interface Science*, Volume 97, No 2, 574-581 (1984)
- Davies J., Maynes D., Webb B. W., Woolford B., 'Laminar flow in a microchannel with superhydrophobic walls exhibiting transverse ribs', *Physics of Fluids*, Volume 18, No 8 (2006)
- Drelich J., Chibowski E., Meng D., Terpilowski K., 'Hydrophilic and superhydrophilic surfaces and materials', *Soft Matter*, Volume 7, Issue 21, 9804-9828 (2011)
- Fowkes F., 'Contact Angle, Wettability and Adhesion', *American Chemical Society* (1964)
- Gelest, 'Hydrophobicity, Hydrophilicity and Silane Surface Modification' ([www.gelest.com](http://www.gelest.com))

Hao P.-F., Wong C., Yao Z.-H., Zhu K.-Q., 'Laminar Drag Reduction in Hydrophobic Microchannels', *Chemical Engineering Technology*, Volume 32, No 6, 912-918 (2009)

Ishida N., Inoue T., Miyahara M., Higashitani K., 'Nano bubbles on a hydrophobic surface in water observed by tapping-mode atomic force microscopy', *Langmuir*, 16 (16), 6377-6380 (2000)

Karniadakis G. and Beskok A., 'Microflows' (2002)

Karniadakis G., Beskok A. and Aluru N., 'Microflows and Nanoflows: Fundamentals and Simulations' (2005)

Kirby, B.J., 'Micro- and Nanoscale Fluid Mechanics: Transport in Microfluidic Devices', Cambridge University Press (2010)

Kumakura M., Kaetsu I., 'Physical characterization and molecular structure of hydrophilic polymers obtained by radiation cast-polymerization of methoxypolyethyleneglycole methacrylate monomers for biomedical applications', *Journal of Materials Science*, 18, No 8, 2430-2436 (1983)

Li Y., Huang X. J., Heo S. H., Li C. C., Choi Y. K., Cai W. P., Cho S. O., 'Superhydrophobic bionic surfaces with hierarchical microsphere/SWCNT composite arrays', *Langmuir*, 23, 2169-2174 (2007)

Neinhuis C., Barthlott W., 'Characterization and distribution of water-repellent, self-cleaning plant surfaces', *Annals of Botany*, Volume 79, No 6, 667-677 (1997)

Nosonovsky M., Bhushan B., 'Roughness optimization for biomimetic superhydrophobic surfaces', *Microsystem Technologies*, Volume 11, No 7, 535-549 (2005)

Öner D., McCarthy T. J., 'Ultrahydrophobic surfaces: Effects of topography length scales on wettability', *Langmuir*, 16 (20), 7777-7782 (2000)

Patel P., Choi C. K., Meng D., 'Superhydrophilic Surfaces for Antifogging and Antifouling Microfluidic Devices', *Journal of Laboratory Automation*, Volume 15, No 2, 114-119 (2010)

Santiago G., Wereley S. T., Meinhart C. D., Beebe D. J., Adrian R. J., 'A particle image velocimetry system for microfluidics', *Experiments in Fluids*, Volume 25, No 4, 316-319 (1998)

Schnell E., 'Slippage of Water over Nonwetable Surfaces', *Journal of Applied Physics*, Volume 27, No 10, 1149-1152 (1956)

Shiu J. Y., Kuo C. W., Chen P., Mou C. Y., 'Fabrication of tunable superhydrophobic surfaces by nanosphere lithography', *Chemistry of Materials*, Volume 16, No 4, 561-564 (2004)

## 2. Κεφάλαιο 2 :Ταλαντούμενη Ροή σε Μικροκανάλια

### 2.1) Θεωρητικό Υπόβαθρο

Η ροή ενός ρευστού στην περιοχή εισόδου ενός σωλήνα είναι ένα από τα προβλήματα υδροδυναμικής που έχουν μελετηθεί ιδιαίτερα (Wagner (1975)). Η απόσταση από την είσοδο του σωλήνα ως το σημείο όπου η ροή γίνεται πλήρως ανεπτυγμένη, ονομάζεται υδροδυναμικό μήκος εισόδου ( $L_e$ ) και ορίζει την περιοχή εισόδου ενός καναλιού. Η πρόβλεψη του μήκους εισόδου είναι η βασικότερη περιοχή μελέτης των προβλημάτων ροής εισόδου (Boger 1982), και έχει καταβληθεί σημαντική ερευνητική προσπάθεια για τον αναλυτικό υπολογισμό του. Παρόλα αυτά, λόγω των μη γραμμικών όρων αδράνειας των εξισώσεων κίνησης, το πρόβλημα ροής εισόδου, ακόμα και για στρωτή ροή, δεν οδηγεί σε ακριβή λύση.

Η ευρεία διαθεσιμότητα Η/Υ τις τελευταίες δεκαετίες, επέτρεψε την ανάπτυξη και εφαρμογή προηγμένων υπολογιστικών τεχνικών, ικανών να λύσουν τις πλήρεις εξισώσεις κίνησης μέσω μεθόδων πεπερασμένων διαφορών ή πεπερασμένων στοιχείων (Wagner 1975). Οι περιπτώσεις που έλαβαν την περισσότερη προσοχή είναι η ροή ανάμεσα σε παράλληλες πλάκες και η ροή σε σωλήνα κυκλικής διατομής, καθώς αυτές οι γεωμετρίες είναι κατάλληλες για μαθηματικούς χειρισμούς, αλλά και διότι οι σωλήνες κυκλικής διατομής είναι οι συνήθως χρησιμοποιούμενοι στην πράξη.

Η περιοχή εισόδου είναι σημαντική για πολλές μηχανολογικές εφαρμογές, καθώς μπορούν να προβλεφθούν με ακρίβεια η πτώση πίεσης και οι ρυθμοί μεταφοράς θερμότητας σε οποιαδήποτε συσκευή, η οποία λειτουργεί με αναρρόφηση ρευστού. Στη ροή μεταξύ παράλληλων πλακών και στη ροή σε σωλήνα κυκλικής διατομής, το πρόβλημα ροής εισόδου θεωρείται ότι έχει επιλυθεί (Boger 1987). Όμως, η ανάδυση νέων πεδίων έρευνας, όπως τα μικρορευστά, έχει ανανεώσει το ενδιαφέρον για τα προβλήματα ροής εισόδου, λόγω των διαφορετικών συνθηκών ροής για τις συγκεκριμένες συσκευές.

Τις τελευταίες δύο δεκαετίες έχει γνωρίσει άνθηση μια νέα περιοχή έρευνας και εφαρμογών, γνωστή ως «τομέας μικρορευστών». Ως τομέας μικρορευστών θεωρείται η επιστήμη των συστημάτων που χρησιμοποιούν μικρές ποσότητες (10-9 ως 10-18 λίτρα) ρευστού, για χρήση σε κανάλια με διαστάσεις από 10 ως μερικές εκατοντάδες μικρόμετρα. (Whitesides 2006) Ένας από τους στόχους των μικρορευστών είναι η δημιουργία των λεγόμενων «lab-on-a-chip» εφαρμογών, στις οποίες ένα πλήθος βιολογικών και χημικών διεργασιών ενσωματώνεται σε ένα απλό microchip (Beebe et al. 2002).

Η μείωση της κλίμακας μήκους των συστημάτων ρευστών επιφέρει και αλλαγές στη θεμελιώδη φυσική της ροής (Squires & Quake 2005). Παρόλο που τα φαινόμενα αδράνειας κυριαρχούν και είναι υπεύθυνα για το φαινόμενο της τύρβης που

εμφανίζεται στις περισσότερες μηχανολογικές εφαρμογές, τα φαινόμενα συνεκτικότητας ελέγχουν τις ροές στη μικροκλίμακα. Όσο μικραίνουν οι διαστάσεις του καναλιού οι ογκικές δυνάμεις (αδράνεια, βαρύτητα κτλ) τείνουν να γίνουν ασήμαντες, ενώ οι επιφανειακές δυνάμεις (επιφανειακή τάση, ιξώδες) παίζουν τον κυρίαρχο ρόλο στη συμπεριφορά του συστήματος. Λόγω των μικρών ταχυτήτων που έχουν παρατηρηθεί στις ροές σε μικροκανάλια, οι αριθμοί Reynolds είναι μικροί και η ροή μπορεί να θεωρηθεί με αρκετά καλή προσέγγιση ασυμπίεστη. Η ροή είναι ελεύθερη από τυχαίες διακυμάνσεις της τύρβης, πράγμα το οποίο είναι γνωστό ως στρωτή ροή και εμφανίζεται σχεδόν αποκλειστικά στα μικροκανάλια.

Ένας άλλος τύπος ροής, πολύ διαδεδομένος σε μικροκανάλια, είναι η ταλαντούμενη ροή, δηλαδή η ροή η οποία περιέχει μια αρμονική συνιστώσα. Λόγω της απουσίας τύρβης στα μικροκανάλια, οι ταλαντώσεις της ροής έχουν χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές, όπως η ανάμιξη δύο ρευμάτων, η αύξηση της μεταφοράς θερμότητας, καθώς και ο διαχωρισμός σωματιδίων.

## **2.2) Μικρορρευστά και ροή σε μικροκανάλια**

Οι συσκευές που λειτουργούν με μικρορρευστά διαφέρουν σε πολυπλοκότητα και μπορούν να περιέχουν διάφορες συνιστώσες. Περιλαμβάνουν αντλίες, βαλβίδες, αισθητήρες ροής, αναμίχτες, όπου όλοι είναι προσαρμοσμένοι για να λειτουργούν στη μικροκλίμακα. Όμως, το κοινό στοιχείο σε όλες τις συσκευές μικρορρευστών είναι τα κανάλια, τα οποία μεταφέρουν τα ρευστά.

Η μείωση μεγέθους ενός καναλιού έχει σημαντική επίδραση στη ροή. Η μείωση στις διαστάσεις συνοδεύεται από μια αύξηση στο λόγο επιφάνειας προς όγκο εντός των καναλιών. Διάφορα φαινόμενα εντός του καναλιού που εξαρτώνται από την επιφάνεια ευνοούνται από τη μείωση στο μέγεθος και γίνονται εξαιρετικά σημαντικά στις μικροροές.

### **2.2.1) Χαρακτηριστικά της ροής σε μικροεξαρτήματα**

Η μείωση στο φυσικό μέγεθος φαίνεται να επιφέρει και την κατάρρευση ενός πλήθους υποθέσεων, οριακών συνθηκών και συσχετίσεων που χρησιμοποιούνται στη μοντελοποίηση ρευστών στο μακρόκοσμο. Η βασικότερη συνθήκη που χρησιμοποιείται στην κλασική μοντελοποίηση είναι η υπόθεση του συνεχούς μέσου (Fox et al. 1985). Η παραδοχή του συνεχούς μέσου επιτρέπει τη θεώρηση ότι οι ιδιότητες του μέσου μεταβάλλονται συνεχώς στο χώρο. Παρόλο που οι ιδιότητες αυτές είναι κατά βάση μοριακές, μετράται το συνολικό τους αποτέλεσμα στο μακρόκοσμο, όπως είναι η θερμοκρασία, η πίεση, η πυκνότητα και το ιξώδες (Massey & Ward-Smith 1998). Για τα αέρια, η εξιδανίκευση επιβεβαιώνεται όταν η μέση απόσταση που διανύεται από τα μόρια μεταξύ των συγκρούσεων, η μέση ελεύθερη διαδρομή  $\lambda$ , είναι πολύ μικρότερη από το χαρακτηριστικό μέγεθος της ροής.

Ο λόγος των δύο μηκών είναι ο αριθμός Knudsen

$$K_n = \frac{\lambda}{D}$$

και η υπόθεση του συνεχούς μέσου ισχύει για  $Kn < 0,001$  (Gad-el Hak 1999). Η απόσταση των μορίων είναι πολύ μικρότερη στα υγρά από ότι στα αέρια, και η υπόθεση του συνεχούς μέσου μπορεί να εφαρμοσθεί για τις περισσότερες ροές υγρών μέσα σε μικροκανάλια.

Η εφαρμοσιμότητα της συνθήκης μη ολίσθησης σε ένα στερεό όριο για τη ροή υγρού έχει υπάρξει αντικείμενο μελέτης για ένα πλήθος ερευνών και έχει προκύψει ότι υπάρχει ολίσθηση στις ροές υγρών (Lauga & Stone 2003). Στην περίπτωση αυτή η ολίσθηση είναι ένα περίπλοκο θέμα και εξαρτάται από διάφορες φυσικές ιδιότητες, όπως η διαβρεξιμότητα της επιφάνειας, η τραχύτητα, ο ρυθμός διάτμησης του υγρού και η πολικότητα (Cao et al. 2009). Στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές τα μήκη ολίσθησης είναι μικρά και η συνθήκη μη ολίσθησης είναι μια εξαιρετική προσέγγιση για ροές με κλίμακα μήκους πάνω από 10 nm (Stone et al. 2004).

Υπό τις παραπάνω θεωρήσεις, για ροή σε μικροκανάλια με διαστάσεις της τάξης των 100 μm, εφαρμόζονται η παραδοχή της συνέχειας και η συνθήκη μη ολίσθησης και η ροή διέπεται από τις εξισώσεις Navier-Stokes. Οι ιδιότητες της ροής υπό τέτοιες συνθήκες είναι γνωστές μέσω της διαστατικής ανάλυσης και η ροή σε μικροκανάλια διέπεται από φαινόμενα συνεκτικότητας, ενώ η αδράνεια έχει μικρή επίδραση.

Η βασική αδιάστατη παράμετρος που περιγράφει την συνεκτική ροή είναι ο αριθμός Reynolds :

$$Re = \frac{\bar{u}D}{\nu}$$

όπου  $\bar{u}$  η μέση ταχύτητα,  $D$  είναι το χαρακτηριστικό μήκος και  $\nu$  είναι η κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού. Για ροές σε μικροκανάλια ο αριθμός Reynolds είναι χαμηλός, της τάξης του 10 και η ροή διέπεται από συνεκτικά φαινόμενα με αμελητέα επίδραση της αδράνειας. Η ροή είναι γνωστή ως στρωτή ροή. Αυτό είναι αρκετά διαφορετικό από τη ροή σε μεγάλους σωλήνες, όπου τα φαινόμενα αδράνειας είναι σημαντικά και τα φαινόμενα τύρβης είναι συνήθη.

### 2.3) Ταλαντούμενη ροή στην περιοχή εισόδου ενός μικροκαναλιού

Η έκφραση ταλαντούμενη ροή μπορεί να περιγράψει οποιαδήποτε ροή, όπου η αρμονική συνιστώσα αποτελεί σημαντικό τμήμα της ροής. Ταλαντούμενη ροή αυτού του τύπου εμφανίζεται σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές, κυρίως σε μικροεξαρτήματα.

Οι ταλαντούμενες ροές χωρίζονται συνήθως σε δύο κατηγορίες: εκείνες στις οποίες ο ρυθμός ταλάντωσης της ροής ακολουθεί ημιτονοειδή μεταβολή με το χρόνο γύρω από μια μηδενική μέση τιμή και εκείνες στις οποίες υπάρχει ημιτονοειδής μεταβολή, αλλά γύρω από μια μέση τιμή διάφορη του μηδενός. Κατά συνέπεια, ο όρος, ταλαντούμενη ροή χρησιμοποιείται με δύο τρόπους: για να περιγράψει οποιαδήποτε ροή με μια αρμονική συνιστώσα και επίσης για να αναφερθεί στην ειδική κατηγορία ροών με μηδενική μέση τιμή.

### 2.3.1) Χαρακτηριστικά ταλαντούμενης ροής

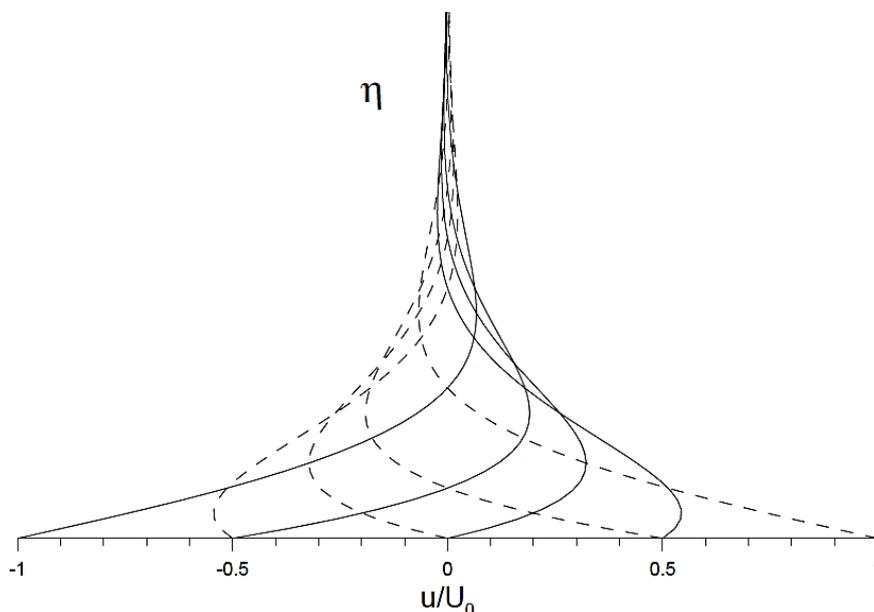
Ένα παραστατικό πρόβλημα ταλαντούμενης ροής είναι εκείνο του ρευστού πάνω από επίπεδη πλάκα απείρου μήκους, η οποία υφίσταται αρμονικές ταλαντώσεις  $U_o \cos(\omega t)$ , παράλληλα προς τον εαυτό της. Το πρόβλημα αυτό μελετήθηκε αρχικά από τον Stokes και η λύση που δόθηκε είναι η ακόλουθη, η οποία έχει τη μορφή αρμονικής κίνησης με απόσβεση.

$$u(y,t) = U_o e^{-\eta} \cos(\omega t - \eta)$$

όπου  $U_o$  είναι το πλάτος ταχύτητας της πλάκας,  $\omega$  είναι η γωνιακή συχνότητα και το  $\eta$  δίνεται από τη σχέση:

$$\eta = y \sqrt{\frac{\omega}{2\nu}}$$

η οποία απεικονίζεται γραφικά στην Εικόνα.



**Εικόνα 2.1:** Ροή πάνω από ταλαντούμενη επίπεδη πλάκα σε διάφορες χρονικές στιγμές

Εξετάζοντας τη ροή (White 1991), η απόσταση από την πλάκα όπου το  $u$  ταλαντώνεται με μέγιστη τιμή  $0,01U_0$ , δίνει  $e^{-\eta} = 0,01$  ή  $\eta = 4,6$ . Με τον τρόπο αυτό προκύπτει το πάχος του ταλαντούμενου οριακού στρώματος, το οποίο δίνεται από τη σχέση:

$$\delta_{os} \approx 6,5 \sqrt{\frac{\nu}{\omega}}$$

Φαίνεται ότι αυτό το πάχος του ταλαντούμενου οριακού στρώματος μειώνεται με μείωση της κινηματικής συνεκτικότητας και με αύξηση της συχνότητας.

Όταν ένας αγωγός ταλαντώνεται, εισάγεται μια πρόσθετη κλίμακα μήκους σε σύγκριση με την ταλαντούμενη πλάκα, δηλαδή η ακτίνα του αγωγού,  $r$ , ή το μισό του εύρους,  $\alpha$ , για τετραγωνικούς αγωγούς. Ο λόγος της ακτίνας του αγωγού προς το πάχος του ταλαντούμενου οριακού στρώματος,  $\delta_{os}$  ορίζεται ως

$$\alpha = r \sqrt{\frac{\omega}{\nu}}$$

η οποία είναι η αδιάστατη παράμετρος που χαρακτηρίζει την ταλαντούμενη ροή σε αγωγούς. Η παράμετρος  $\alpha$  είναι γνωστή ως αριθμός Stokes.

Η πρώτη αναλυτική λύση που δόθηκε για την στρωτή ταλαντούμενη ροή σε κυκλικό κανάλι σε πλήρως ανεπτυγμένες συνθήκες είναι η εξής:

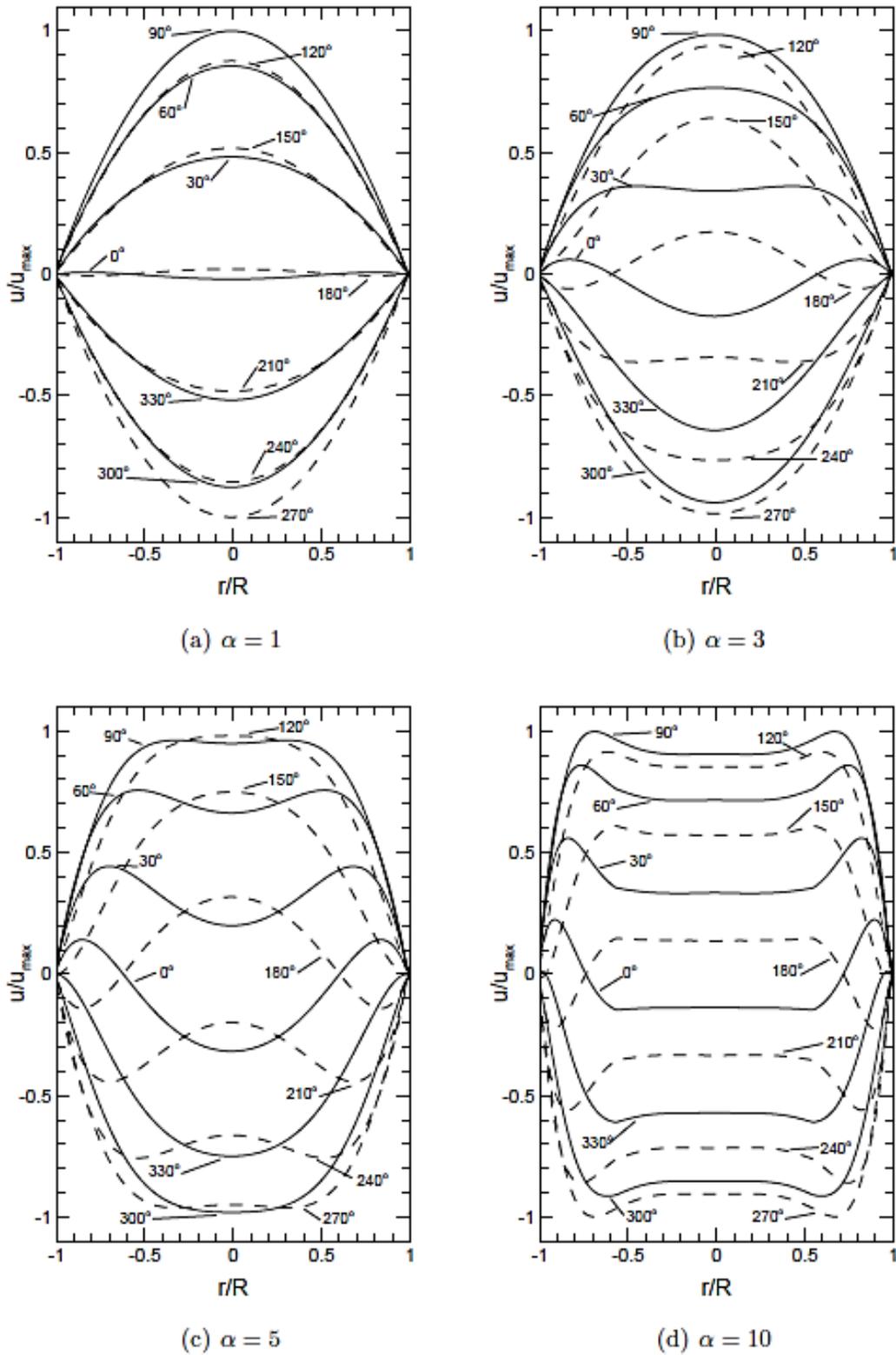
$$\bar{u} = \bar{u}_{os} \sin(\omega t)$$

ή ισοδύναμα :

$$\bar{u} = \bar{u}_{os} \sin(\theta)$$

όπου  $\bar{u}_{os}$  είναι η μέση ταχύτητα της διατομής και  $\theta$  είναι η γωνία φάσης.

Αργότερα, το πρόβλημα αυτό επιλύθηκε ξανά από τους Womersley και Uchida. Στην Εικόνα παρουσιάζεται η λύση των Womersley για τέσσερις διαφορετικές τιμές του  $\alpha$ . Για μικρές τιμές του  $\alpha$ , η κατανομή της στιγμιαίας ταχύτητας είναι σχεδόν ίδια με την μόνιμη ροή Hagen-Poiseuille και για το λόγο αυτό αναφέρεται ως ημι-μόνιμη ροή Hagen-Poiseuille.



**Εικόνα 2.2 :** Προφίλ ταχύτητας για πλήρως ανεπτυγμένη ταλαντούμενη ροή σε κυκλικό αγωγό, για διάφορες τιμές του αριθμού Stokes,  $\alpha$

Σε μεγάλους  $\alpha$  η λύση έχει τυπική μορφή οριακού στρώματος και η ροή έχει ένα ταλαντούμενο οριακό στρώμα με ένα μη συνεκτικό πυρήνα. Η μέγιστη τιμή ταχύτητας δεν εμφανίζεται στον άξονα του αγωγού, αλλά κοντύτερα στο τοίχωμα, ένα φαινόμενο που παρατηρήθηκε πρώτη φορά στα πειράματα του Richardson.

Η πλήρως ανεπτυγμένη στρωτή ταλαντούμενη ροή σε τετραγωνικό αγωγό επιλύθηκε πρώτη φορά από τον Drake και λίγο αργότερα από τους Fan & Chao. Υπό πλήρως ανεπτυγμένες συνθήκες, η προκύπτουσα εξισώσεις ροής είναι γραμμικές και κατά συνέπεια μπορεί να πραγματοποιηθεί υπέρθεση των λύσεων.

### 2.3.2) Μελέτες σχετικά με το μήκος εισόδου ταλαντούμενης ροής

Έχει πραγματοποιηθεί αρκετή έρευνα πάνω στη μόνιμη ροή στην περιοχή εισόδου ενός καναλιού. Παρόλα αυτά, δεν υπάρχουν καθολικές συσχετίσεις για να προβλέψουν με ακρίβεια το μήκος εισόδου σε τετραγωνικούς αγωγούς. Επιπλέον, ανεξάρτητα από την τετραγωνική διατομή, οι συνήθεις συσχετίσεις δεν είναι ακριβείς σε μικρούς αριθμούς Reynolds,  $Re < 50$ , καθώς προϋποθέτουν ομοιόμορφο προφίλ εισόδου, πράγμα το οποίο δεν είναι ρεαλιστική συνθήκη για τις ροές αυτές. Μόνο η σχετικά άγνωστη συσχέτιση που προτάθηκε από τον Boger (1982) για ροή σε κυκλικό αγωγό, λαμβάνει υπόψη της το φαινόμενο αυτό. Το μοντέλο του ροϊκού σωλήνα αποτελεί ένα πολύ καλύτερο μοντέλο πρόβλεψης ή περαιτέρω υπολογιστικής εργασίας σε χαμηλούς αριθμούς  $Re$ .

Πρόσφατα έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές μελέτες για τη ροή εισόδου στη μικροκλίμακα. Στις περισσότερες όμως από αυτές δεν έχουν χρησιμοποιηθεί αυστηρά κριτήρια για τον προσδιορισμό του μήκους εισόδου, με εξαίρεση τη μελέτη των Lee et al. (2008). Δυστυχώς πολύ συχνά η φυσική γεωμετρία της περιοχής εισόδου δεν χαρακτηρίζεται. Έτσι είναι πολύ δύσκολο να υπάρχει μεγάλη εμπιστοσύνη στα αποτελέσματα.

Όσον αφορά την περιοχή εισόδου σε κανάλι ταλαντούμενης ροής, έχουν πραγματοποιηθεί ελάχιστες μελέτες. Οι Gerrard & Hughes πρότειναν ότι στην ταλαντούμενη ροή το υδροδυναμικό μήκος εισόδου είναι μικρότερο σε σχέση με την μόνιμη ροή, καθώς τα φαινόμενα καθυστέρησης της ροής πάνω στο τοίχωμα χρειάζεται να υπερνικηθούν μόνο στο πάχος του οριακού στρώματος της ταλαντούμενης ροής, σε σύγκριση με ολόκληρο το σωλήνα, όπως απαιτείται στη μόνιμη ροή. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι υπάρχει μείωση στο μήκος εισόδου σε σύγκριση με τη μόνιμη ροή, για μεγάλους αριθμούς Stokes,  $\alpha > 3$ . Για χαμηλούς αριθμούς  $\alpha$ , η συνεκτικότητα επηρεάζει ολόκληρη τη διατομή του αγωγού και το μήκος εισόδου γίνεται τόσο μεγάλο όσο και στη μόνιμη ροή. Οι Iguchi et al. (1992) όρισαν την περιοχή εισόδου στην ταλαντούμενη ροή ως τη μέγιστη απόσταση που μπορεί να διανύσει ένα σωματίδιο ρευστού από την είσοδο, έως ότου αναστραφεί η κατεύθυνσή του.

Για  $\alpha < 6$ , το μήκος εισόδου μεταβάλλεται σημαντικά με το χρόνο στη διάρκεια ενός κύκλου ταλάντωσης. Έχει επίσης προταθεί ότι για μικρούς αριθμούς Stokes, το

μέγιστο μήκος εισόδου μπορεί να προσδιοριστεί από τις σχέσεις για το μήκος εισόδου μόνιμης ροής, αν χρησιμοποιηθεί αριθμός Reynolds βάσει της μέγιστης ροής. (He & Ku 1994).

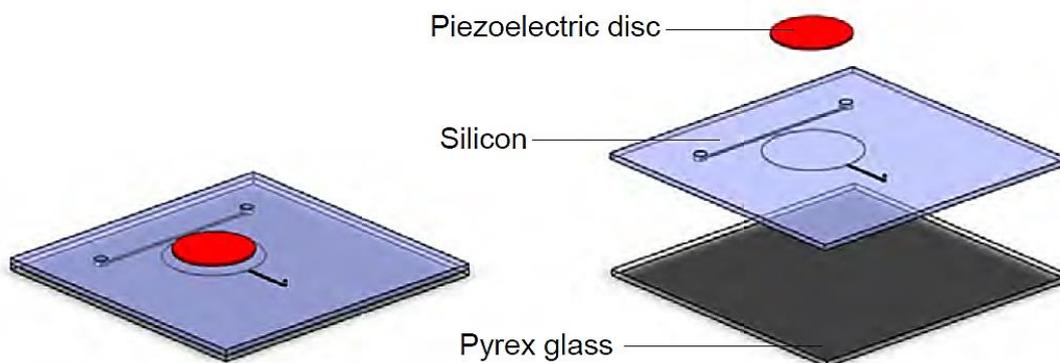
#### 2.4) Πειράματα υπολογισμού ταχυτήτων ταλαντούμενης ροής σε μικροκανάλια

Στη συγκεκριμένη ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των Sinclair et al (2012) για ταλαντούμενη ροή στην περιοχή εισόδου ενός καναλιού. Τα χαρακτηριστικά της ταλαντούμενης ροής περιγράφονται από τρεις αριθμούς Stokes,  $\alpha=1,10, 1,90, 2,45$ .

##### Πειραματικός εξοπλισμός

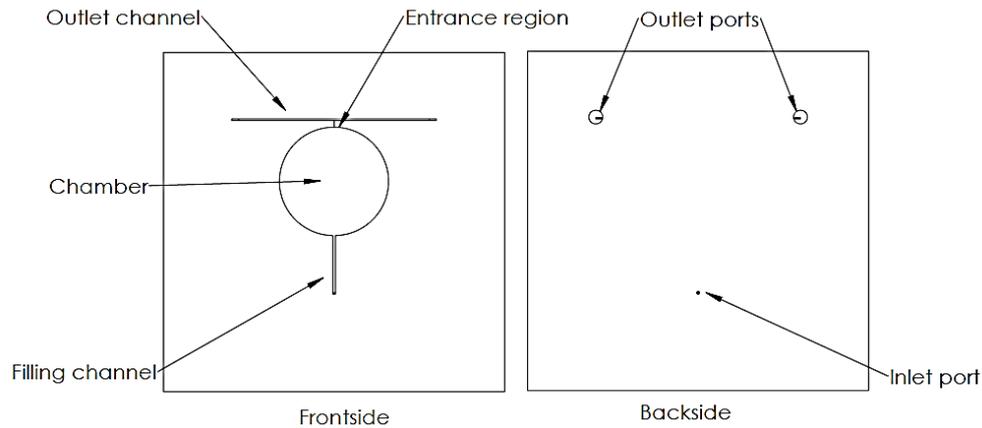
Η συσκευή μικρορευστών των Sinclair et al (2012) αποτελείται από ένα μεγάλο κυκλικό θάλαμο, ο οποίος είναι συνδεδεμένος σε μια σειρά μικροκαναλιών, ενσωματωμένα σε μια ενιαία διάταξη ή «τσιπ». Η βασική γεωμετρία του τσιπ υιοθετήθηκε από το σχεδιασμό του διαφράγματος στις μικροαντλίες. Η αρμονική μεταβολή του όγκου χρησιμοποιήθηκε για να μεταφέρει μια ταλαντούμενη κίνηση στο ρευστό μέσα στην συσκευή. Κάθε συσκευή αποτελείται από τρία διαφορετικά στρώματα: ένα στρώμα πυριτίου, ένα στρώμα πυρίμαχου γυαλιού και ένα πιεζοηλεκτρικό δίσκο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.3.

Ο κυκλικός πιεζοηλεκτρικός δίσκος είναι συνδεδεμένος στην πίσω πλευρά του στρώματος πυριτίου, κεντραρισμένος πάνω από τον κυκλικό θάλαμο. Ο πιεζοηλεκτρικός δίσκος χρησιμοποιείται για να εκτρέψει την επιφάνεια σιλικόνης, η οποία ονομάζεται και διάφραγμα, από το θάλαμο, όταν εφαρμοσθεί τάση. Το στρώμα πυριτίου περιέχει επίσης ένα πλήθος καναλιών, ενώ ολόκληρη η επιφάνεια είναι τοποθετημένη σε στρώμα πυρίμαχου γυαλιού, ώστε να υπάρχει οπτική πρόσβαση στη συσκευή.



Εικόνα 2.3: Συσκευή μικρορευστού

Η προκύπτουσα ροή σχηματίζεται μεταξύ του στρώματος πυριτίου και του στρώματος πυρίμαχου γυαλιού, και τα όριά της παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.4.



**Εικόνα 2.4:** Επίπεδο μοτίβο χαραγμένο στο στρώμα πυριτίου

Η διάταξη αυτή σχεδιάστηκε με σκοπό τη μελέτη των πεδίων ταχύτητας που παράγονται από την ταλαντούμενη ροή σε διάφορες γεωμετρικές διαμορφώσεις που συναντώνται συνήθως σε μικροσυσκευές. Το κυρίως τμήμα της μελέτης, αφιερώνεται στη μελέτη της περιοχής εισόδου, στην περίπτωση κατά την οποία η ροή φεύγει από τον κυκλικό θάλαμο και εισέρχεται στο πολύ μικρότερο κανάλι, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.4.

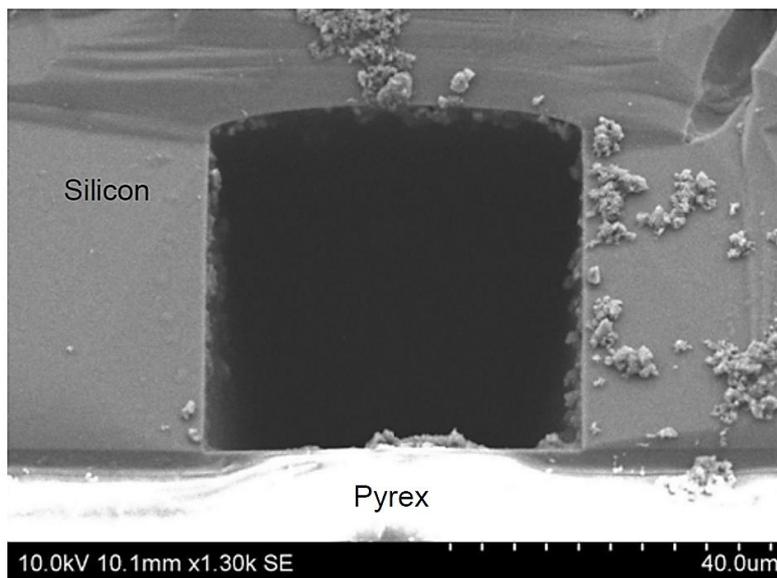
Ο κυκλικός θάλαμος έχει διάμετρο 8mm και είναι συνδεδεμένος με δύο κανάλια, ένα κανάλι «γεμίματος» εύρους 200μm, τοποθετημένο κάτω από το τμήμα, και επάνω με το κεντρικό κανάλι, το οποίο έχει εύρος 50 μm. Το κανάλι «γεμίματος», όπως προκύπτει και από την ονομασία του, είναι το σημείο, όπου η μόνιμη ροή ρευστού εισέρχεται στη συσκευή. Η μόνιμη ροή θα συνεχιζόταν από το κανάλι «γεμίματος» μέχρι το θάλαμο και μετά στην «περιοχή εισόδου» του κυρίως καναλιού. Στο άκρο του κυρίως καναλιού, διασταυρώνεται με ένα τρίτο κανάλι, υπό γωνία, ώστε να σχηματιστεί ένας κόμβος σχήματος T. Το τρίτο κανάλι έχει εύρος 100 μm, και ονομάζεται κανάλι εξόδου. Στον κόμβο σχήματος T, η ροή διαχωρίζεται και εξέρχεται από τη συσκευή, από οποιοδήποτε άκρο του καναλιού εξόδου.

Στη συσκευή έχουν σχεδιαστεί επίσης τρία ανοίγματα ή θύρες, και φαίνονται στην Εικόνα 2.4, από την πάνω πλευρά του στρώματος σιλικόνης. Τοποθετημένη 4mm πάνω από το θάλαμο, μια μικρή θύρα εισόδου διαμέτρου 200 μm, συνδέεται με το κανάλι «γεμίματος». Το μήκος του καναλιού «γεμίματος» είναι έτσι σχεδιασμένο, ώστε να παρέχει επαρκή χώρο από το θάλαμο, όπου μπορεί να τοποθετηθεί βαλβίδα στην πίσω πλευρά του στρώματος πυριτίου. Οι άλλες δύο θύρες, είναι τοποθετημένες στα δύο άκρα του καναλιού εξόδου, σε απόσταση 15mm, ώστε να υπάρχει επαρκής χώρος για την τοποθέτηση συνδέσεων στα δύο άκρα. Το μοτίβο του θαλάμου και των καναλιών έχει χαραχθεί στο στρώμα σιλικόνης σε βάθος περίπου 50 μm, ενώ το ονομαστικό πάχος του στρώματος είναι 400 μm.

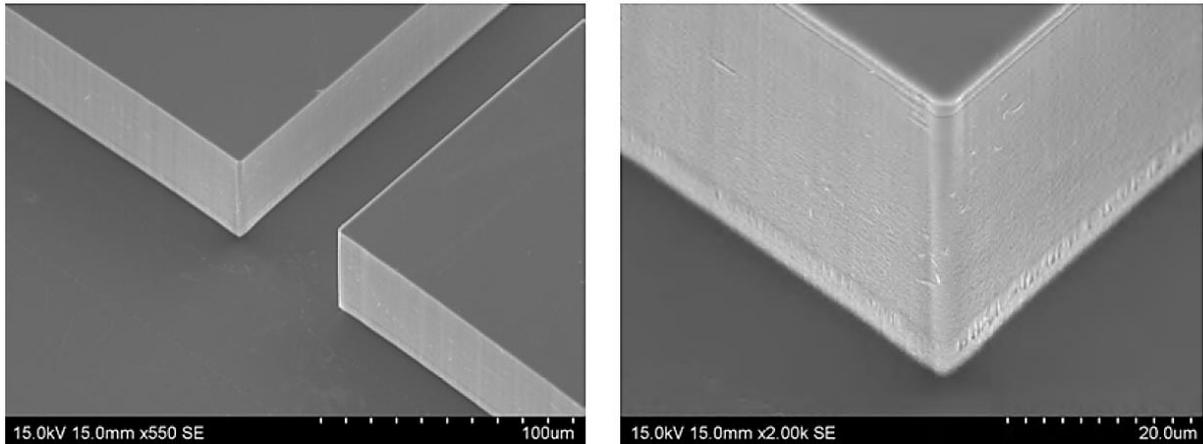


**Εικόνα 2.5:** Απεικόνιση της συνολικής διαμόρφωσης που κατασκευάστηκε

Η περιοχή εισόδου είναι εκεί όπου η ροή εισέρχεται στο κυρίως κανάλι, από τον πολύ μεγαλύτερο κυκλικό θάλαμο. Το κανάλι είναι τετραγωνικής διατομής, ονομαστικών διαστάσεων 50  $\mu\text{m}$  επί 50  $\mu\text{m}$  και μήκους 500  $\mu\text{m}$  από το θάλαμο ως τη διασταύρωση σχήματος T. Το μήκος αυτό, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, είναι επαρκές για τη διαμόρφωση της ροής, σε ροές με χαμηλούς αριθμούς Re.



**Εικόνα 2.6:** Απεικόνιση της διατομής του κύριου καναλιού σε μικροσκόπιο ηλεκτρονικής σάρωσης



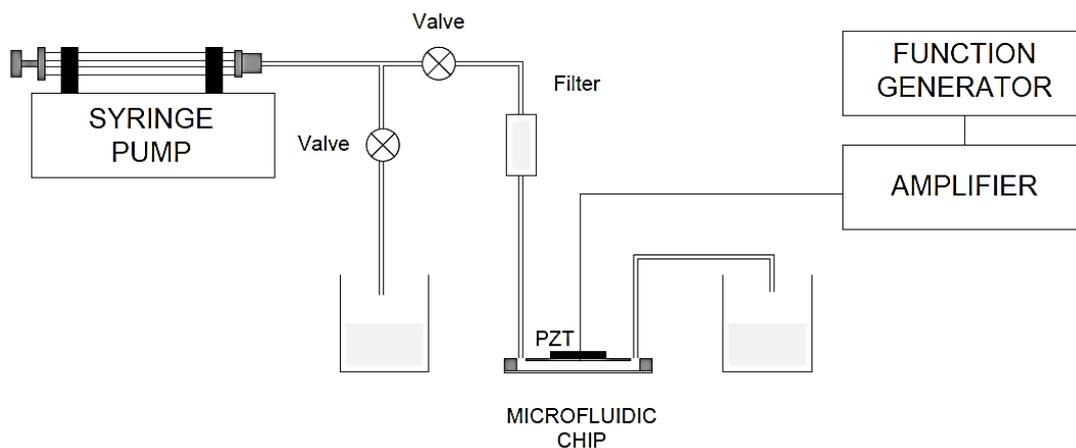
(a)

(b)

**Εικόνα 2.7:** Απεικόνιση σε μικροσκόπιο ηλεκτρονικής σάρωσης (a) της περιοχής εισόδου και (b) της γωνίας του τοιχώματος του καναλιού εισόδου

### Συνολική Διάταξη

Η συνολική εργαστηριακή διάταξη παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.8. Η μόνιμη ροή παράγεται από την αντλία τύπου σύριγγας. Ένα πορώδες φίλτρο εγκαθίσταται αμέσως μετά την αντλία, με σκοπό την αποφυγή της απόφραξης του μικροκαναλιού. Το φίλτρο όμως επιτρέπει την διέλευση φθοριζόντων σωματιδίων για τις μετρήσεις με τη μέθοδο PIV.



**Εικόνα 2.8:** Σχηματικό διάγραμμα της συνολικής εργαστηριακής διάταξης

Η ταλαντούμενη ροή παράγεται μέσω μιας αρμονικής μεταβολής του όγκου του θαλάμου λόγω της απόκλισης από το διάφραγμα. Ένα ημιτονοειδές σήμα παράγεται από μια γεννήτρια συναρτήσεων και ενισχύεται σε ένα γραμμικό ενισχυτή, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με τον πιεζοηλεκτρικό δίσκο. Η γεννήτρια σήματος και ο ενισχυτής επιτρέπουν την συστηματική μεταβολή τόσο της συχνότητας, όσο και του πλάτους της επενέργειας. Το όριο συχνότητας του ενισχυτή είναι 1,5kHz, το οποίο οδηγεί σε άνω όριο του αριθμού Stokes 2,45 για τις δεδομένες συνθήκες γεωμετρίας. Η εφαρμοζόμενη τάση μετατρέπεται σε μηχανική κίνηση, η οποία μεταφέρεται στο ρευστό εντός του καναλιού. Η επιθυμητή ροή εντός του καναλιού έχει τη μορφή:

$$\bar{u} = \bar{u}_{os} \sin(\theta)$$

όπου  $\bar{u}$  είναι η μέση ταχύτητα της διατομής και  $\theta$  είναι η γωνία φάσης της μέσης ροής, η οποία ισούται με  $\omega t$ , όπου  $\omega$  είναι η γωνιακή συχνότητα ταλάντωσης. Η χρονικά μέση ταχύτητα σε όλο τον κύκλο ταλάντωσης ισούται με μηδέν και έτσι ως αντιπροσωπευτική ταχύτητα μπορεί να ληφθεί το πλάτος της μέσης ταχύτητας,  $\bar{u}_{os}$ . Ο αριθμός Reynolds μπορεί τότε να ορισθεί ως:

$$Re_{os} = \frac{\bar{u}_{os} 2a}{\nu}$$

όπου  $a$  είναι το μισό του εύρους του καναλιού και  $\nu$  είναι η κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού.

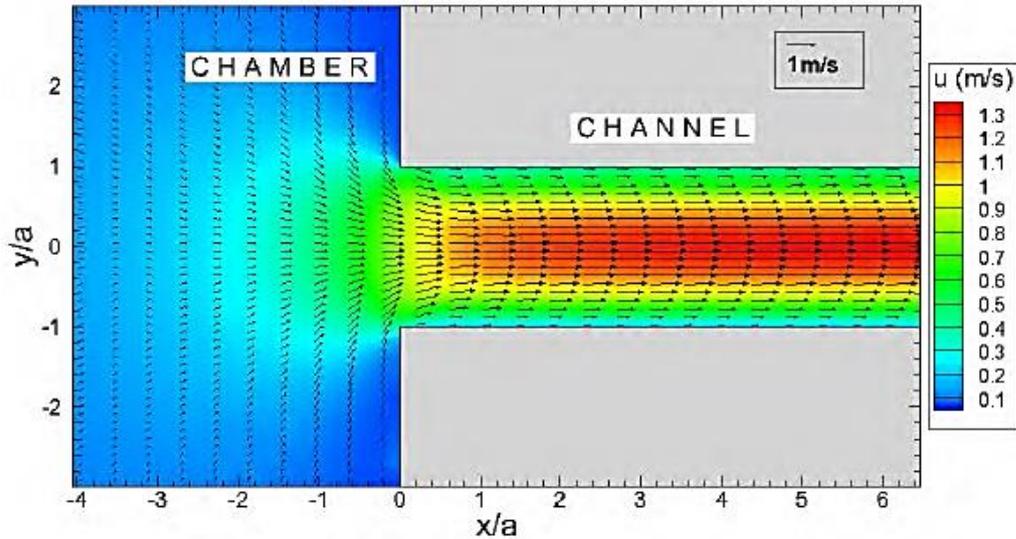
Η άλλη αδιάστατη παράμετρος που χαρακτηρίζει την ταλαντούμενη ροή σε αγωγό είναι ο αριθμός Stokes:

$$\alpha = a \sqrt{\frac{\omega}{\nu}}$$

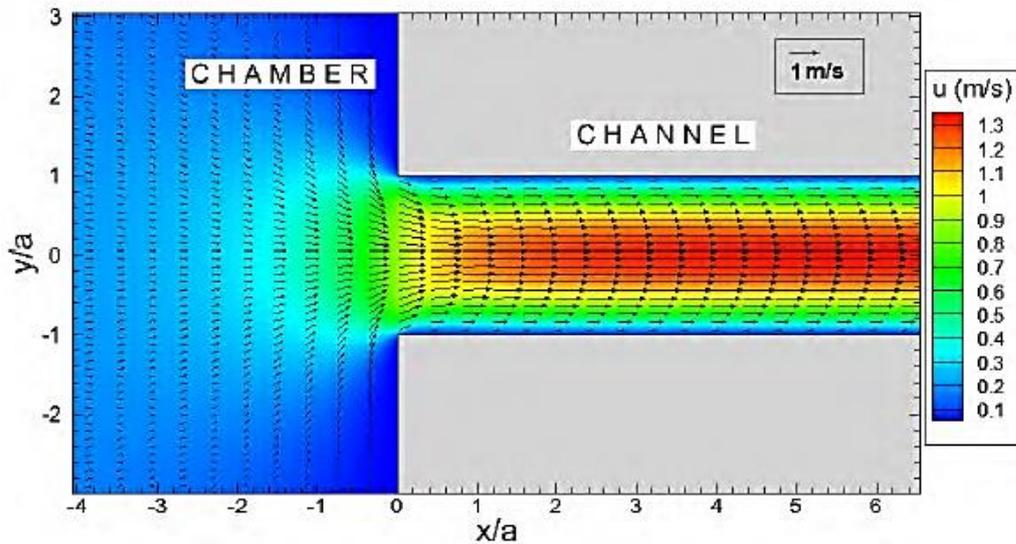
Οι μετρήσεις μέσω της τεχνικής P.I.V. πραγματοποιήθηκαν σε 10 γωνίες φάσεις, ίσα κατανεμημένες στον κύκλο του σήματος τάσης.

### Πεδία ταχυτήτων εισόδου

Το πεδίο ροής στο θάλαμο, καθώς πλησιάζει την είσοδο του καναλιού, φαίνεται στην Εικόνα 2.9. Η ροή από το θάλαμο επιταχύνεται καθώς πλησιάζει την περιοχή εισόδου του καναλιού, αφού οι διαστάσεις του καναλιού ως προς το θάλαμο είναι πολύ μικρές ( $\alpha \ll R$ ). Στην Εικόνα 2.9 (a) το πεδίο διανυσμάτων έχει προκύψει από τις μετρήσεις PIV, ενώ στην Εικόνα 2.9 (b) παρουσιάζεται η αριθμητική λύση, όπου και τα δύο διαγράμματα αναφέρονται σε  $Re=33$ . Το πειραματικό μοντέλο παρουσιάζει υψηλή συμμετρία ως προς την κεντρική γραμμή, επιβεβαιώνοντας με τον τρόπο αυτό, τη συνθήκη συμμετρίας που θεωρήθηκε στο αριθμητικό μοντέλο.



(a)



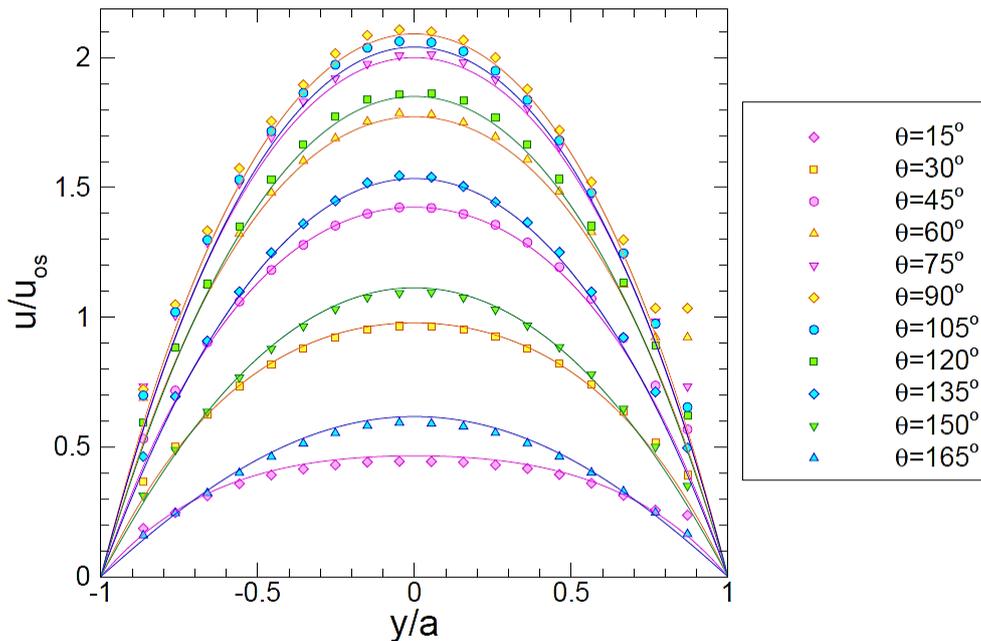
(b)

**Εικόνα 2.9:** Πεδίο διανυσμάτων ροής για  $Re=33$ . (a) μέσω της τεχνικής PIV (b) γραμμές ροής αριθμητικού μοντέλου

#### 2.4.1) Μελέτη πλήρως αναπτυγμένης ροής

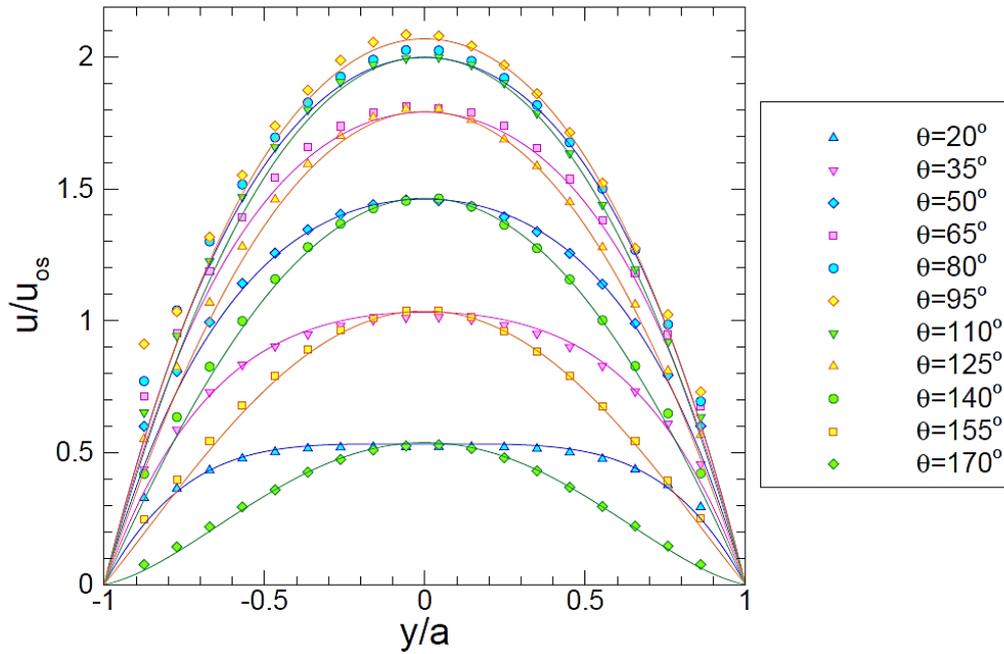
Σε μεγάλη απόσταση από τα άκρα του καναλιού η στρωτή ταλαντούμενη ροή γίνεται πλήρως ανεπτυγμένη, και η κατανομή ταχύτητας είναι αμετάβλητη κατά την κατεύθυνση του ρεύματος για ολόκληρο τον κύκλο ταλάντωσης. Στην περιοχή αυτή, η κατανομή ταχύτητας είναι συνάρτηση μόνο του αριθμού Stokes,  $\alpha$ . Για τις ταλαντούμενες ροές, οι εξισώσεις κίνησης σε κανάλια τετραγωνικής διατομής επιλύθηκαν πρώτη φορά από τον Drake. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν ελέγχονται αρχικά με την αναλυτική λύση του Drake.

Μελετήθηκαν τρεις συχνότητες  $f=300, 900$  και  $1500$  Hz, οι οποίες αντιστοιχούν σε αριθμούς Stokes  $1,10, 1,90$  και  $2,45$ , αντίστοιχα. Οι μετρήσεις έγιναν σε διαστήματα των  $15^\circ$ , ίσα κατανομημένα στο διάστημα  $0^\circ$  ως  $180^\circ$ , διάστημα κατά το οποίο η ροή κατευθύνεται από το θάλαμο προς το κανάλι. Τα μετρούμενα προφίλ ταχύτητας για τους τρεις αριθμούς Stokes, παρουσιάζονται στα ακόλουθα διαγράμματα (Εικόνα 2.10- Εικόνα 2.12 ). Οι πειραματικές τιμές μετρώνται σε απόσταση περίπου  $200 \mu\text{m}$  από την είσοδο. Τα σύμβολα αντιστοιχούν στην πειραματικά μετρούμενη ταχύτητα και οι γραμμές είναι η αναλυτική λύση του Drake.



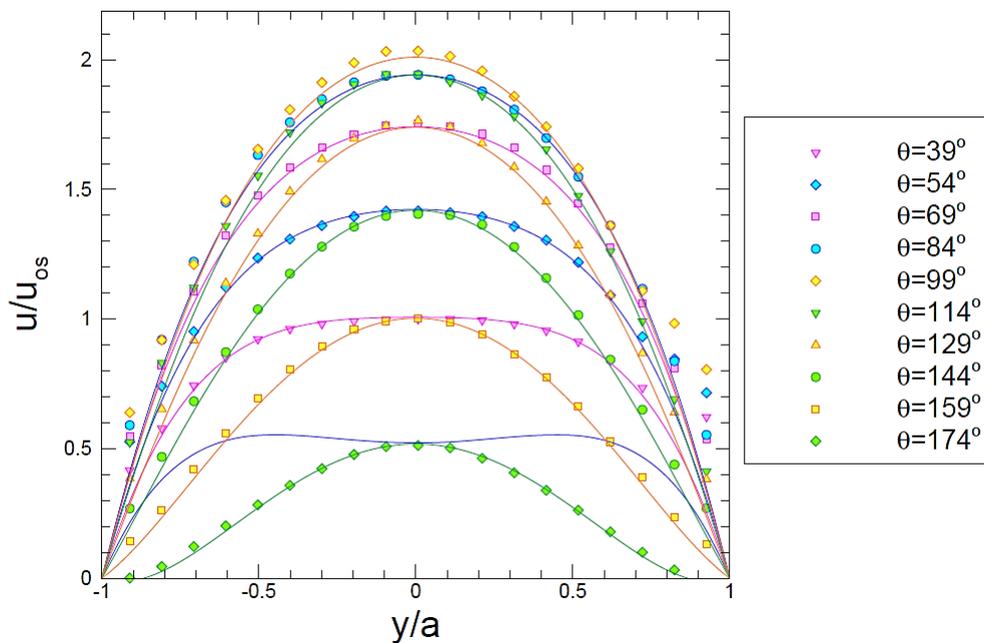
**Εικόνα 2.10:** Προφίλ ταχύτητας ως προς τη γωνία φάσης  $\theta$ , για  $\alpha=1,10$ .

Για  $\alpha=1,10$ , σε όλο τον κύκλο ταλάντωσης, τα προφίλ παραμένουν πολύ κοντά στο προφίλ της μόνιμης ροής, όπως αναμένεται για χαμηλό αριθμό  $\alpha$ , και η ροή θεωρείται ημι-μόνιμη. Παρατηρείται καλή συμφωνία μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και της αναλυτικής λύσης σε όλες τις φάσεις.



**Εικόνα 2.11:** Προφίλ ταχύτητας ως προς τη γωνία φάσης  $\theta$ , για  $\alpha=1,90$

Για  $\alpha=1,90$ , όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.9, το χρονικό μοτίβο εφαρμόστηκε με επιτυχία και οι φάσεις είναι συμμετρικές ως προς την κορυφή της κεντρικής γραμμής ταχύτητας. Όπως και με την περίπτωση  $\alpha=1,10$ , υπάρχει καλή συμφωνία μεταξύ των πειραματικών προφίλ και της αναλυτικής λύσης σε όλες τις φάσεις. Η αύξηση του αριθμού Stokes οδήγησε στην απόκλιση των προφίλ ταχύτητας από το σχήμα της σταθερής ροής.



**Εικόνα 2.12:** Προφίλ ταχύτητας ως προς τη γωνία φάσης  $\theta$ , για  $\alpha=2,45$

Τα προφίλ ταχύτητας για πολύ μεγάλους αριθμούς Stokes  $\alpha=2,45$  παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.10. Οι φάσεις είναι συμμετρικές ως προς τις ταχύτητες της κεντρικής

γραμμής. Η πρώτη πειραματική φάση μετρήθηκε για  $\theta=39^\circ$ , καθώς σε προηγούμενες φάσεις υπάρχουν μέγιστες ταχύτητες, οι οποίες δεν εμφανίζονται στον άξονα. Αυτό φαίνεται από την αναλυτική λύση που σχεδιάζεται για  $\theta=24^\circ$ , η οποία στο σχήμα είναι η γραμμή χωρίς σύμβολα, η οποία εμφανίζει βύθισμα στο κέντρο. Τα προφίλ στην περιοχή  $\theta=39^\circ - 54^\circ$  είναι πολύ πλατιά σε μέγεθος ενώ στη περιοχή  $\theta=144^\circ - 174^\circ$  πιο στενά.

Τα ίδια αποτελέσματα προκύπτουν και στο υπόλοιπο μισό του κύκλου ταλάντωσης, δηλαδή για  $\theta=180^\circ - 360^\circ$ , αλλά με αντίθετη κατεύθυνση.

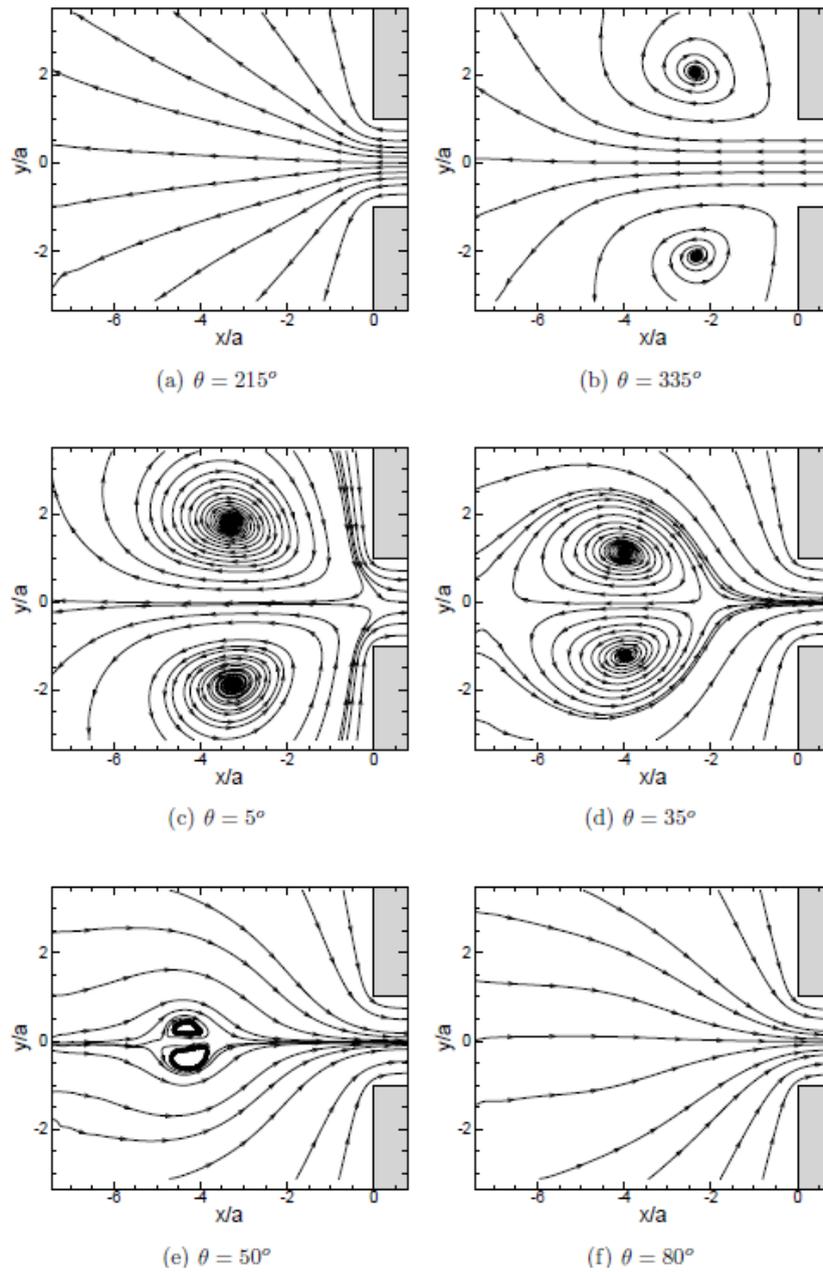
#### 2.4.2) Πεδίο ροής εντός του θαλάμου

Όταν το διάφραγμα ταλαντώνεται με μια απλή αρμονική κίνηση, το πεδίο ροής στο θάλαμο κοντά στην είσοδο του καναλιού ταλαντώνεται επίσης, και έτσι η ροή μεταβάλλεται από την περίπτωση όπου κατευθύνεται προς το κανάλι ως την περίπτωση που το ρευστό απομακρύνεται από το θάλαμο. Καθώς η δομή μεταβάλλεται μεταξύ αυτών των καταστάσεων, πολύπλοκες δομές ρευστών εμφανίζονται, αναπτύσσονται, διαδίδονται και τελικά εξαφανίζονται. Για όλες τις περιπτώσεις ταλάντωσης που μελετήθηκαν, η ροή στο θάλαμο ακολουθούσε το ίδιο μοτίβο και έτσι θα παρουσιαστεί μόνο μία αντιπροσωπευτική περίπτωση.

Οι στιγμιαίες γραμμές ροής στο πεδίο ροής του θαλάμου αποτυπώνονται στο μέσο επίπεδο σε διάφορες γωνίες φάσεις για  $\alpha=1,90$  και  $Re=30$ , ξεκινώντας με τη ροή για  $\theta=215^\circ$ , δηλαδή λίγο μετά αφότου το ρευστό ξεκινά να ρέει μέσα στο θάλαμο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.13 (a). Καθώς η μέση ταχύτητα έξω από το κανάλι αυξάνεται, η ροή διαχωρίζεται στην επιφάνεια των δύο τοιχωμάτων του θαλάμου έξω από κανάλι. Σε  $\theta=335^\circ$ , όπως στην Εικόνα 2.13 (b), όπου σχηματίζονται δύο στρόβιλοι, ένας σε κάθε πλευρά του καναλιού, με μία δέσμη ρευστού μεταξύ τους. Λίγο πιο μετά, σε  $\theta=5^\circ$ , η κατεύθυνση της ροής μεταβάλλεται, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.13 (c), το ρευστό φεύγει από το θάλαμο και εισέρχεται ξανά προς το κανάλι. Στην ενδιάμεση περίοδο, οι στρόβιλοι, συνεχίζουν να περιστρέφονται κατά την ίδια κατεύθυνση, μεγαλώνουν και απομακρύνονται από την είσοδο του καναλιού, αλλά δεν μετακινούνται πολύ στην κάθετη κατά τη ροή κατεύθυνση. Όμως, πλέον, για να εισέλθει το ρευστό στο κανάλι, πρέπει να κινηθεί γύρω από τους στρόβιλους.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.13 (d), οι στρόβιλοι συνεχίζουν να απομακρύνονται από το κανάλι, παρόλο που το ρευστό εισέρχεται στο κανάλι. Αργότερα ( $\theta=50^\circ$ ), λόγω της δράσης της συνεκτικότητας, η δύναμη των στροβίλων μειώνεται, μέχρις ότου συρρικνωθούν και δημιουργηθεί μια νησίδα, η οποία περιβάλλεται από το κύριο ρευστό (Εικόνα 2.13 (e)). Εντός της νησίδας αυτής, τα μέτρα ταχύτητας είναι μικρά και μεταβάλλονται ισχυρά με την κατεύθυνση. Τέλος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.13 (f), η κύρια ροή έχει πλήρως τυλίξει τη νησίδα, και δε μπορεί πλέον να ανιχνευθεί.

Η ροή στη συνέχεια εισέρχεται ομαλά στο κανάλι, με παρόμοιο τρόπο όπως και στην μόνιμη ροή, και παραμένει σε αυτή τη διαδρομή, έως ότου, η κατεύθυνση της ροής αντιστρέφεται και ο κύκλος που περιγράφηκε, επαναλαμβάνεται.



**Εικόνα 2.13:** Γραμμές ροής στο θάλαμο σε διάφορες γωνίες φάσης  $\theta$  για  $\alpha=1,90$

## **Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 2**

Alexander Sinclair, *Steady and Oscillatory Flow in the Entrance Region of Microchannels*, School of Mechanical and Manufacturing Engineering, University of New South Wales, 2012.

Beebe, D., Mensing, G. & Walker, G. (2002). Physics and applications of microfluidics in biology. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 4, 261-286.

Boger, D. (1982). Circular entry flows of inelastic and viscoelastic fluids. *Advances in Transport Processes*, 2, 43-104. 1, 2, 22, 23, 44

Boger, D. (1987). Viscoelastic flows through contractions. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 19, 157-182.

Cao, B., Sun, J., Chen, M. & Guo, Z. (2009). Molecular momentum transport at fluid-solid interfaces in mems/nems: a review. *International Journal of Molecular Sciences*, 10, 4638-4706.

Fox, R., McDonald, A. & Pritchard, P. (1985). *Introduction to fluid mechanics*, vol. 7. John Wiley & Sons New York. 9

He, X. & Ku, D. (1994). Unsteady entrance flow development in a straight tube. *Journal of Biomechanical Engineering*, 116, 355. 35, 42, 43, 44, 124, 136, 142

Iguchi, M., Park, G., Akao, F. & Yamamoto, F. (1992). A study on velocity profiles of developing laminar oscillatory flows in a square duct. *JSME*

*International Journal*, 35, 158-164. 37

Lee, S., Jang, J. & Wereley, S. (2008). Effects of planar inlet plenums on the hydrodynamically developing flows in rectangular microchannels of complementary aspect ratios. *Microfluidics and Nanofluidics*, 5, 1-12. xiii, 5, 13, 25, 26, 44, 72, 93, 98, 100, 107, 108, 109

Massey, B. & Ward-Smith, J. (1998). *Mechanics of fluids*, vol. 1. Taylor & Francis. 9

Squires, T. & Quake, S. (2005). Microfluidics: Fluid physics at the nanoliter scale. *Reviews of Modern Physics*, 77, 977.

White, F. (1991). *Viscous fluid flow*. McGraw-Hill New York. xv, xvii, 10, 31, 81, 87, 128, 129, 130, 131, 132, 133

Whitesides, G. (2006). The origins and the future of microfluidics. *Nature*, 442, 368-373. 3, 12

### **3. Κεφάλαιο 3: Micro-particle image velocimetry (micro-P.I.V)**

#### **3.1) Particle image velocimetry (P.I.V.)**

Η τεχνική P.I.V.(Particle Image Velocimetry) είναι μια οπτική, μη επεμβατική τεχνική για τη μέτρηση του πεδίου της ταχύτητας ροών σε μακροσκοπική κλίμακα, με την οποία επιτυγχάνεται υψηλή διακριτική ανάλυση (spatial resolution). Μία πειραματική διάταξη P.I.V. περιλαμβάνει αρκετά υποσυστήματα. Στην πλειοψηφία των εφαρμογών προστίθεται στην ροή σωματίδια, τα οποία δρουν ως “ιχνηλάτες” ταχύτητας. Τα σωματίδια αυτά πρέπει να φωτιστούν σε ένα επίπεδο της ροής, τουλάχιστον δύο φορές, με την παρεμβολή ενός μικρού χρονικού διαστήματος. Το φως το οποίο σκεδάζεται από τα σωματίδια καταγράφεται για κάθε χρονική στιγμή, είτε σε ένα ζευγάρι εικόνων. Η μετακίνηση των σωματιδίων που συντελείται στο χρονικό διάστημα που παρεμβάλλεται μεταξύ των δύο φωτισμών, καθορίζεται από την αξιολόγηση των καταγραμμένων εικόνων.

Μια τυπική πειραματική διάταξη P.I.V. που χρησιμοποιείτε για την καταγραφή των ταχυτήτων σε αεροσήραγγα, φαίνεται στην εικόνα 3.1 (Raffel 1998). Τα σωματίδια εισάγονται στη ροή. Ένα επίπεδο ροής φωτίζεται δύο φορές μέσω μίας λεπτής δέσμης laser, με το χρονικό διάστημα παρεμβολής μεταξύ των παλμών να εξαρτάται από τη μέση ταχύτητα της ροής. Δηλαδή, για ροές υψηλών ταχυτήτων, απαιτείται μικρό χρονικό διάστημα, ενώ για ροές χαμηλών ταχυτήτων, απαιτείται μεγάλο χρονικό διάστημα. Υποθέτουμε ότι η ταχύτητα των σωματιδίων συμπίπτει με την ταχύτητα της ροής κάθε χρονική στιγμή που εξετάζουμε. Το φως το οποίο σκεδάζεται από τα σωματίδια καταγράφεται στην πλειοψηφία των περιπτώσεων σε μία ή δύο ξεχωριστές εικόνες μέσω CCD κάμερας, ενώ η επεξεργασία των εικόνων για την εξαγωγή των διανυσμάτων γίνεται μέσω συγκεκριμένου λογισμικού. Οι δύο βασικές μέθοδοι για την εξαγωγή των πεδίων ταχύτητας των σωματιδίων από τις εικόνες των σωματιδίων είναι οι Pattern Matching Velocimetry (P.M.V.) και Particle Tracking Velocimetry (P.T.V.).

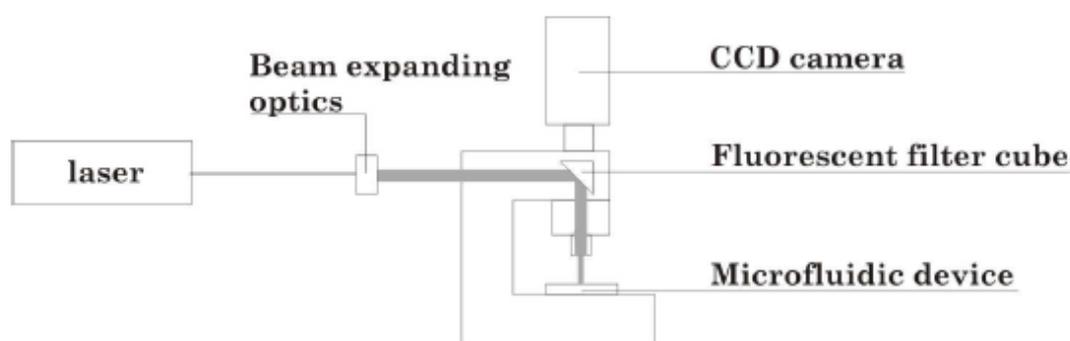
Στην P.T.V. το πεδίο ταχυτήτων υπολογίζεται με την ανίχνευση ανεξάρτητων σωματιδίων. Σε αντίθεση με την P.M.V., που απαιτεί περίπου είκοσι σωματίδια για κάθε περιοχή επεξεργασίας για την παραγωγή ενός διανύσματος ταχύτητας, με τη χρήση της P.T.V. κάτω από τις ίδιες συνθήκες μπορούν να προκύψουν έως είκοσι ανεξάρτητα διανύσματα ταχύτητας. Η ανάλυση αυξάνεται επειδή κάθε ανεξάρτητο σωματίδιο ανιχνεύεται, και όχι η συνολική διάταξη (Keane and Adrian (1992)). Ωστόσο, για τον αξιόπιστο συνδυασμό σε ζεύγη η P.T.V. απαιτεί περισσότερες από την αλληλουχία δύο εικόνων της P.M.V. και προκύπτουν συχνά δυσκολίες όσον αφορά την αντιστοίχιση σωματιδίων που είναι πολύ κοντά μεταξύ τους. Ιδανικά, το laser θα παλλόταν αρκετές φορές σε γρήγορη αλληλουχία, ωστόσο, αυτό δεν είναι δυνατό με τα κοινά Nd:YAG laser διπλής συχνότητας που απαιτούν χρονική υστέρηση μεταξύ των παλμών. Στην πραγματικότητα, τα εμπορικά διαθέσιμα laser

P.I.V. δυο παλμών (two-pulse P.I.V. laser systems) περιέχουν δύο ξεχωριστά laser που μοιράζονται την ίδια οπτική έξοδο.

Επίσης έχουν αναπτυχθεί οι μέθοδοι ανάλυσης που συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα της P.M.V. και της P.T.V. Η λογική αυτών των μεθόδων βασίζεται στη χρήση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης της P.M.V. για την καθοδήγηση του αλγορίθμου ζευγαρώματος των σωματιδίων της P.T.V. Αυτή η αποκαλούμενη super resolution P.I.V. (Keane (1995)) αυξάνει σημαντικά την ανάλυση των μεθόδων P.I.V.. Άλλες καινοτομίες που έχουν υιοθετηθεί είναι το φιλτράρισμα των δεδομένων (data filtering) (Etoh and Takehara (1995)) και αναδρομικές (recursive) τεχνικές (Hart (1998)). Ακόμη, ένας νέος αλγόριθμος υπερ-ανάλυσης (super-resolution algorithm) αναπτύχθηκε από τον Takehara (2000). Αυτή η μέθοδος επιτυγχάνει υψηλότερη χωρική (spatial) ανάλυση σε σχέση με την κλασική συσχέτιση της P.I.V. και απαιτεί μόνο δύο εικόνες.

### 3.2) Περιγραφή της micro-P.I.V.

Παρουσιάζεται μια σχηματική απεικόνιση ενός συστήματος micro-P.I.V. :



Ένα τυπικό σύστημα micro-P.I.V. συνιστάται σε μια CCD κάμερα, ένα μικροσκόπιο (όρθιο ή ανεστραμμένο) το οποίο διαθέτει φθορίζοντα φίλτρα (fluorescent filters), μια εξωτερική πηγή φωτός και κατάλληλα οπτικά μέσα όπως οπτικές ίνες, ενισχυτές δέσμης (beam expanders), κτλ. Στο ρευστό που ρέει εντός της μικρορευστομηχανικής συσκευής διασπείρονται φθορίζοντα σωματίδια ανιχνευτές (tracer particles) που φωτίζονται από μια πηγή φωτός και απεικονίζονται μέσω του αντικειμενικού συστήματος (αντικειμενικός φακός ή κάτοπτρο) του μικροσκοπίου στην διάταξη CCD της κάμερας.

Ο φωτισμός συνήθως επιτυγχάνεται από ένα Nd:YAG laser διπλού παλμού και διπλής συχνότητας (double-pulsed, frequency doubled Nd:YAG laser) που εκπέμπει σε  $\lambda_{laser}=532 \text{ nm}$ . Η ακτίνα του laser διανέμεται στο μικροσκόπιο απευθείας ή μέσω μιας οπτικής ίνας. Η οπτική ίνα επιτρέπει την ευκολότερη ευθυγράμμιση του φωτός και όπως τονίζεται και από τον Devasenathipathy (2002) μειώνει το μήκος συνοχής (coherence length) του laser φωτισμού, γεγονός που βοηθά στην ελαχιστοποίηση της παρουσίας στιγμάτων στις εικόνες των σωματιδίων.

Το φθορίζον φίλτρο σχήματος κύβου (fluorescent filter cube) αποτελείται από ένα διχρωματικό κάτοπτρο (dichromatic mirror) και από ένα φίλτρο εκπομπής (emission filter). Καθώς το φως του laser είναι μονοχρωματικό, δεν απαιτείται φίλτρο διέγερσης (excitation filter). Το διχρωματικό κάτοπτρο επιλέγεται έτσι ώστε να λειτουργεί ως υπηπερατό φίλτρο (high-pass filter) για το φως του laser, αντανακλώντας μήκη κύματος κάτω από ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος  $\lambda_{pass}$  και μεταδίδοντας υψηλότερα μήκη κύματος. Το φίλτρο εκπομπής λειτουργεί ως υπηπερατό φίλτρο, εμποδίζοντας την είσοδο του ανακλώμενου φωτός του laser στο CCD chip, ενώ μεταδίδει το φθορίζον σήμα λemit από τα σωματίδια ανιχνευτές. Κατάλληλα φίλτρα και διχρωματικά κάτοπτρα με  $\lambda_{emit} < \lambda_{pass} < \lambda_{laser}$  είναι διαθέσιμα από διάφορους κατασκευαστές μικροσκοπίων. Δεδομένου ότι τα οπτικά μέρη συνήθως σχεδιάζονται για μήκη κύματος που ταιριάζουν στο φάσμα εκπομπής των συμβατικών συνεχών πηγών φωτισμού όπως λάμπες Hg-arc, τα κάτοπτρα και τα φίλτρα των κατασκευαστών οπτικών μέσων για laser είναι καταλληλότερα. Συγκεκριμένα, η προσεκτική επιλογή των οπτικών φίλτρων μπορεί να δώσει τη δυνατότητα για πολυχρωματική micro-P.I.V., όπου π.χ. δύο ή περισσότερες υγρές φάσεις, στις οποίες έχουν διασκορπιστεί σωματίδια με διαφορετικές ιδιότητες φθορισμού, μπορούν να ανιχνευτούν συγχρόνως και ανεξάρτητα.

Μια ποικιλία αντικειμενικών συστημάτων (objectives) με διάφορα επίπεδα μεγέθυνσης και οπτικής ποιότητας χρησιμοποιούνται στη micro-P.I.V., ανάλογα με το μέγεθος του εξεταζόμενου πεδίου ροής και των συνθηκών φωτισμού. Το αριθμητικό άνοιγμα (NA) ενός αντικειμενικού συστήματος ορίζεται ως:

$$NA = n \cdot \sin\theta$$

όπου  $n$  είναι ο δείκτης διάθλασης του εργαζόμενου μέσου του αντικειμενικού συστήματος και  $\theta$  η μισή γωνία του κώνου συλλογής φωτός (half-angle of the light collecting cone). Το αριθμητικό άνοιγμα δείχνει την ικανότητα συγκέντρωσης φωτός ενός αντικειμενικού συστήματος. Σε ένα σύστημα επί-φθορισμού (epi-fluorescent system), η φωτεινότητα της εικόνας  $B$  είναι ανάλογη με τον λόγο του αριθμητικού ανοίγματος στην τετάρτη και του παράγοντα μεγέθυνσης  $M$  (magnification factor) στο τετράγωνο:

$$B \propto \frac{NA^4}{M^2}$$

Η παραπάνω εξίσωση δείχνει ότι για ένα δοθέν επίπεδο μεγέθυνσης, ένα αντικειμενικό σύστημα με υψηλό αριθμητικό άνοιγμα παράγει σημαντικά φωτεινότερες εικόνες από ένα αντικειμενικό σύστημα χαμηλού αριθμητικού ανοίγματος. Καθώς το φθορίζον σήμα από τα μικρά σωματίδια <<ανιχνευτές>> στη micro-P.I.V. είναι ασθενές, αντικειμενικά συστήματα υψηλού αριθμητικού ανοίγματος είναι γενικά επιθυμητά λόγω της μεγάλης ικανότητας τους συγκέντρωσης φωτός. Ακόμη, το υψηλό αριθμητικό άνοιγμα αυξάνει την ανάλυση του συστήματος.

Στην συνέχεια περιγράφονται τα βήματα της πειραματικής διαδικασίας:

1) Η δέσμη του laser ενισχύεται μέσω οπτικών φακών, πριν την είσοδό της στο μικροσκόπιο.

2) Παράλληλα ο συγχρονιστής (synchronizer) που αποτελεί μια ηλεκτρονική συσκευή δίνει εντολή στην κάμερα για λήψη φωτογραφίας ταυτόχρονα με τον φωτισμό του ρευστού.

3) Η δέσμη εισέρχεται στο μικροσκόπιο και ανακλάται κατά  $90^\circ$  προς τον φακό της διάταξης με τη βοήθεια ενός διχρωματικού καθρέφτη (dichromatic mirror), που δρα σαν φίλτρο δηλ.

i) Ανακλά μήκη κύματος μικρότερα μίας συγκεκριμένης τιμής, όπως το μήκος κύματος του laser, ενώ

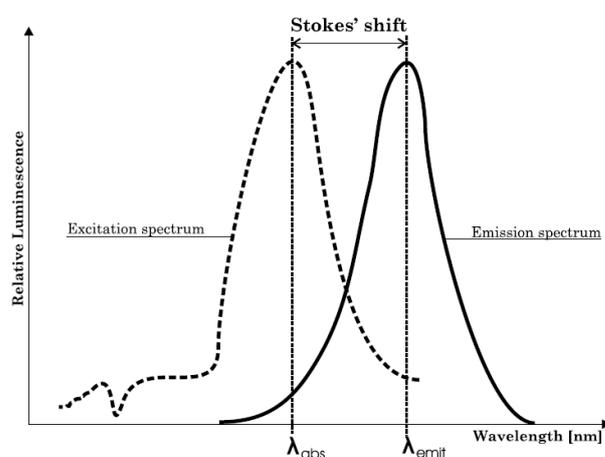
ii) επιτρέπει τη διέλευση μηκών κύματος μεγαλύτερων εκείνου του laser και συγκεκριμένα του μήκους κύματος εκπομπής των σωματιδίων

4) Τελικά το φως μεταδίδεται μέσω του αντικειμενικού φακού του μικροσκοπίου στην περιοχή ενδιαφέροντος του υπό εξέταση μικροκαναλιού και διεγείρει τα φωσφορίζοντα σωματίδια.

5) Το εκπεμπόμενο φως από τα φωσφορίζοντα - επενδυμένα με χρωστική ουσία - σωματίδια καθώς και από τις επιφάνειες του μικροκαναλιού, συγκεντρώνονται από τον αντικειμενικό φακό και μεταφέρονται πάλι στον διχρωματικό καθρέφτη.

6) Ο διχρωματικός καθρέφτης επιτρέπει την μετάδοση του σήματος που προέρχεται μόνο από τα σωματίδια, που εκπέμπουν σε μεγαλύτερο μήκος κύματος (560nm) από το αντίστοιχο του laser, (532nm) φιλτράροντας το δεύτερο που σε αυτήν την περίπτωση αποτελεί θόρυβο.

7) Τέλος, το σήμα καταγράφεται μέσω CMOS κάμερας και ψηφιοποιητή εικόνας (frame grabber) σε ηλεκτρονικό υπολογιστή όπου γίνεται η επεξεργασία του.



**Εικόνα 3.1:** Διαφορά μήκους κύματος μεταξύ διεγέρσης (αριστερή καμπύλη) και εκπομπής (δεξιά καμπύλη) της φωσφορίζουσας ουσίας.

### 3.3) Διαφορές μεθόδου micro-PIV σε σχέση με την PIV

Σύμφωνα με τους Wereley (2002) υπάρχουν τρεις βασικές διαφορές μεταξύ της micro-P.I.V. και της μακροσκοπικής P.I.V.:

- Στην micro-P.I.V. απαιτείται η χρήση σωματιδίων διαμέτρου μικρότερης  $2\mu\text{m}$ , έτσι οι ανακλάσεις του φωτός δεν είναι επαρκείς λόγω του μικρού μεγέθους των σωματιδίων. Αντί αυτών, χρησιμοποιούνται φωσφορίζοντα μικροσφαιρίδια.

- Λόγω των μικρών διαστάσεων των σωματιδίων η κίνηση Brown του σωματιδίου γίνεται σημαντική (π.χ. ανεξάρτητες αλληλεπιδράσεις σωματιδίου-ρευστού και σωματιδίου-σωματιδίου γίνονται σημαντικές και εμποδίζουν το σωματίδιο να ακολουθήσει τη ροή με πιστότητα. Το παραπάνω φαινόμενο αντιμετωπίζεται υπολογίζοντας το χωρικό και/ή χρονικό μέσο όρο των μετρήσεων.
- Η ροή φωτίζεται ως όγκος χρησιμοποιώντας μια διάταξη επιφωτισμού (epi-illumination configuration), όπου το φως για την απεικόνιση και το φως για τη διέγερση (excitation light) μοιράζονται ένα κοινό φακό μικροσκοπίου. Στην πιο συνήθη διάταξη, χρησιμοποιούνται φακοί μικροσκοπίου μεγάλου αριθμητικού ανοίγματος, που έχουν μικρό βάθος εστίασης, για την απόκτηση μιας ικανοποιητικά επίπεδης εικόνας. Επιπλέον εφαρμόζεται ψηφιακό φίλτράρισμα εικόνας σε μια προσπάθεια για την εξάλειψη της επίδρασης των σωματιδίων εκτός επίπεδου (out-of-plane particles).

### 3.4) Σωματίδια ανιχνευτές

Υπάρχει μεγάλη ποικιλία από φθορίζοντα σωματίδια πολυστυρενίου με σχετική βαρύτητα 1,05 g/cm<sup>3</sup> τα οποία είναι διαθέσιμα από διάφορους κατασκευαστές. Σωματίδια με διάμετρο κάποια δεκάδες νανόμετρα έως μερικά μικρόμετρα και με ιδιότητες φθορισμού που καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος μηκών κύματος διέγερσης και εκπομπής είναι διαθέσιμα στην αγορά.

Τα σωματίδια πρέπει να πληρούν δύο βασικές προϋποθέσεις. Πρώτον πρέπει να ακολουθούν πιστά τη ροή και να έχουν πυκνότητα που να ταιριάζει με αυτή του εξεταζόμενου ρευστού, μπορούν να εκπληρωθούν σχετικά εύκολα για τις υγρές ροές. Δεύτερον, τα σωματίδια πρέπει να είναι αρκετά μεγάλα ώστε να μειώνεται η επίδραση της κίνησης του Brown και να παρέχουν επαρκώς ισχυρό φθορίζον σήμα. Για αέριες ροές σε μικροκλίμακα οι προϋποθέσεις για να είναι κατάλληλα τα σωματίδια ανιχνευτές δεν έχουν εκπληρωθεί ακόμη. Όταν τα σωματίδια ανιχνευτές γίνουν επαρκώς μικρά, η αλληλεπίδραση ρευστού-σωματιδίων αυξάνει την τυχαία κίνηση των σωματιδίων, εμποδίζοντας τα σωματίδια να ακολουθήσουν τη ροή πιστά.

Η επίδραση της κίνησης Brown στις μετρήσεις μέσω micro-PIV εξετάστηκε από τον Santiago (1998). Συμβολίζοντας με  $D$  το συντελεστή διάχυσης Stokes-Einstein ενός σωματιδίου που βρίσκεται σε ρευστό, το οποίο κινείται με ταχύτητα  $u$ , το σχετικό σφάλμα  $\varepsilon_B$  στη μετρηθείσα μετατόπιση του σωματιδίου (particle displacement) για ένα χρονικό διάστημα  $\Delta t$  μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση:

$$\varepsilon_B = \frac{1}{u} \sqrt{\frac{2D}{\Delta t}}$$

Από την παραπάνω σχέση καταλαβαίνουμε ότι η επίδραση της κίνησης του Brown μικραίνει όσο αυξάνει η ταχύτητα της ροής. Επιπροσθέτως, δεδομένου ότι ο συντελεστής διάχυσης  $D$  είναι ανάλογος με τη θερμοκρασία του ρευστού και αντιστρόφως ανάλογος με τη διάμετρο του σωματιδίου, το σφάλμα αυξάνει με την αύξηση της θερμοκρασίας και με τη μείωση της διαμέτρου των σωματιδίων. Επίσης, το σφάλμα εξαιτίας της κίνησης του Brown φαίνεται να μειώνεται αυξάνοντας το

χρονικό διάστημα  $\Delta t$ . Ωστόσο, το τελευταίο περιορίζεται από ζητήματα χωρικής ανάλυσης όπως το μέγεθος του παραθύρου επεξεργασίας (interrogation window).

Το σφάλμα που προκύπτει από την κίνηση του Brown είναι τυχαίο στη φύση και μπορεί να μειωθεί σημαντικά λαμβάνοντας το μέσο όρο ενός αριθμού σωματιδίων. Στη micro-PIV, κάθε παράθυρο επεξεργασίας συνήθως περιέχει μια αμελητέα ποσότητα σωματιδίων και αποτελεί συνήθως πρακτική η εφαρμογή της μεθόδου ensemble averaging για αρκετά σύνολα σωματιδίων, ώστε να επιτευχθεί ικανοποιητική συσχέτιση, οδηγώντας σε σημαντική μείωση του συνολικού σφάλματος. Θεωρώντας κάθε σωματίδιο στατιστικά ανεξάρτητο και ότι κάθε εφαρμογή της ensemble averaging γίνεται σε στατιστικά ανεξάρτητα χρονικά διαστήματα, η αβεβαιότητα (uncertainty) εξαιτίας της κίνησης του Brown του πεδίου ταχύτητας που προέκυψε μέσω της ensemble averaging μπορεί να υπολογιστεί κατά προσέγγιση από την σχέση  $\frac{\epsilon_B}{N^{1/2}}$ , όπου N ο συνολικός αριθμός των σωματιδίων από τα οποία προέκυψε ο μέσος όρος.

### 3.5) Ανάλυση και ακρίβεια

#### Βάθος πεδίου

Η ανάλυση κάθε οπτικού συστήματος περιορίζεται από το φαινόμενο της διάθλασης. Στη micro-P.I.V. αυτός ο περιορισμός επιβάλλεται από τη διάμετρο  $d_s$  του κεντρικού δακτυλίου (δακτύλιος Airy) του μοτίβου της διάθλασης, που σχηματίζεται από τα φθορίζοντα σωματίδια. Όταν απεικονίζονται κυκλικά, αυτόφωτα αντικείμενα η διάμετρος της συνάρτησης διασποράς σημείου (point-spread function-PSF) δίνεται από τη σχέση:

$$d_s = 2,44M \frac{\lambda}{2NA}$$

όπου M είναι η μεγέθυνση,  $\lambda$  το μήκος κύματος και NA το αριθμητικό άνοιγμα του αντικειμενικού συστήματος.

Η παραπάνω εξίσωση δείχνει ότι μεγάλες τιμές αριθμητικού ανοίγματος οδηγούν σε μικρές διαμέτρους  $d_s$ , γεγονός που αυξάνει την ανάλυση του οπτικού συστήματος. Η διάμετρος της εικόνας που καταγράφεται από την ακτίνα CCD είναι η συνέλιξη (convolution) της περιοριζόμενης από τη διάθλαση και της γεωμετρικής εικόνας και μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά ως εξής:

$$d_e = (M^2 \cdot d_p^2 + d_s^2)^{1/2}$$

όπου  $d_e$  είναι η διάμετρος της καταγεγραμμένης εικόνας και  $d_p$  η διάμετρος του σωματιδίου.

Εξαιτίας του τρόπου φωτισμού της ροής στην micro-P.I.V. το πάχος του επιπέδου μέτρησης του συστήματος καθορίζεται αποκλειστικά από τα οπτικά χαρακτηριστικά της οπτικής απεικόνισης (imaging optics). Το εστιακό βάθος του αντικειμενικού συστήματος του μικροσκοπίου δεν αποτελεί ακριβή προσέγγιση του πάχους του επιπέδου μέτρησης, καθώς τα σωματίδια που γειτνιάζουν με το εστιακό επίπεδο

επίσης συνεισφέρουν στο ανώτατο της συσχέτισης (correlation peak). Το βάθος μέτρησης ενός συστήματος micro-P.I.V. ορίστηκε από τον Meinhart (2000) ως το διπλάσιο της απόστασης από το επίπεδο του αντικειμένου (object plane) και ενός σημείου, τέτοιου ώστε το απεικονιζόμενο σωματίδιο να είναι ικανοποιητικά μη εστιασμένο, έτσι ώστε να μην επηρεάζει σημαντικά τη μέτρηση της ταχύτητας. Η ένταση της εικόνας του σωματιδίου (particle image intensity) όταν συμβαίνει αυτό, ρυθμίζεται στο 10% της μέγιστης έντασης ενός εστιασμένου σωματιδίου, οδηγώντας στην παρακάτω έκφραση:

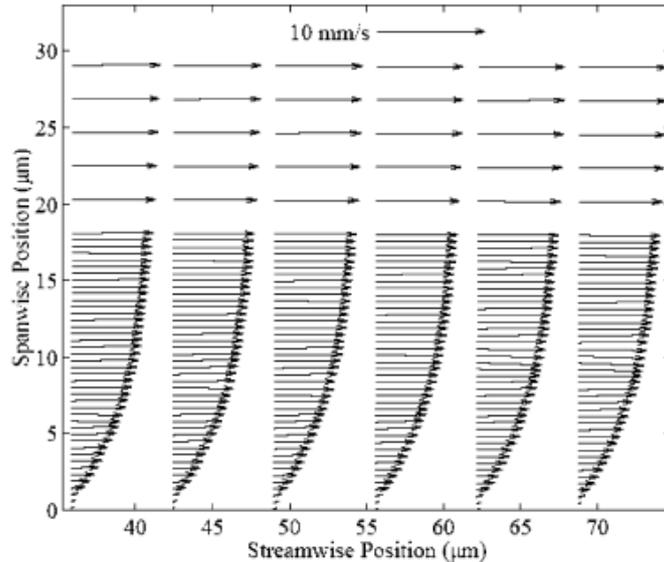
$$\delta_{zm} = \frac{3n\lambda_0}{N \cdot A^2} + \frac{2,16 \cdot d_p}{\tan\theta} + d_p$$

όπου  $\delta_{zm}$  είναι το βάθος μέτρησης,  $n$  ο δείκτης αντανάκλασης (refractive index) του εικονιζόμενου μέσου,  $\lambda_0$  το μήκος κύματος του εικονιζόμενου φωτός στο κενό και  $\theta$  η γωνία συλλογής φωτός (light collecting angle) του αντικειμενικού συστήματος.

### 3.6) Πειραματικές μελέτες με χρήση micro-P.I.V.

Η πρώτη εφαρμογή της P.I.V. σε μικροκλίμακα παρουσιάστηκε από τον Santiago (1998). Σε αυτή τη μελέτη μελετήθηκε η ροή Hale-Shaw λόγω πίεσης (pressure-driven Hale-Shaw flow) σε τετράγωνο κανάλι διάστασης 120  $\mu\text{m}$  που έφερε κυλινδρικό εξόγκωμα στο κέντρο με τη χρήση σωματιδίων πολυστυρενίου διάστασης 300 nm. Παρατηρήθηκε ότι η επίδραση της κίνησης Brown των σωματιδίων ήταν σημαντική. Ωστόσο, με τη χρήση της μεθόδου ensemble averaging για διάφορες εικόνες παρατηρήθηκε σημαντική βελτίωση του προκύπτοντος πεδίου ταχύτητας. Αντί για τη χρήση ενός παλλόμενου laser για το φωτισμό της ροής όπως εφαρμόζοταν στην κλασική PIV, χρησιμοποιήθηκε μια λυχνία τόξου υδραργύρου (mercury arc lamp). Επαρκώς καθαρές εικόνες λήφθηκαν μέσω μιας πολύ ευαίσθητης κάμερας CCD (intensified CCD camera). Αυτό το σύστημα PIV περιοριζόταν σε σχετικά μικρές ταχύτητες εξαιτίας των απαιτούμενων χρόνων έκθεσης (~2 ms) και της χρονικής υστέρησης μεταξύ των λήψεων των εικόνων (~60 ms). Επισημάνθηκε ότι το χαμηλό επίπεδο φωτός που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την τεχνική, την κάνει κατάλληλη για την μελέτη ροών με φωτοευαίσθητα βιολογικά μόρια. Η συγκεκριμένη μελέτη του Santiago αποτέλεσε τη βάση για αρκετές μεταγενέστερες μελέτες σχετικά με την απεικόνιση των μικροροών.

Ο Meinhart (1999) παρουσίασε μια εναλλακτική προσέγγιση με τη χρήση ενός 5 ns παλλόμενου Nd:YAG laser και μιας ψυχόμενης, εξαιρετικά ευαίσθητης και υψηλής ανάλυσης κάμερας CCD. Το παλλόμενο laser χρησιμοποιήθηκε για το φωτισμό της εξεταζόμενης περιοχής σε ένα ορθογώνιο κανάλι διαστάσεων 30x300  $\mu\text{m}^2$ . Παρουσιάστηκαν μετρήσεις της ταχύτητας, που είχαν επεξεργαστεί με τη μέθοδο ensemble averaging, για ροή λόγω πίεσης (pressure-driven flow) με τη χρήση σωματιδίων ανιχνευτών διαστάσεων 200 nm. Επίσης, αναλύθηκαν περαιτέρω τα δεδομένα του πεδίου ταχύτητας κοντά στο τοίχωμα του καναλιού και παρατηρήθηκαν ταχύτητες έως 10 mm/s. Ακολουθεί και σχετική εικόνα της ροής στην περιοχή κοντά στο τοίχωμα:



Ο Κουτσιαρής (1999) παρουσίασε μετρήσεις ροής λόγω πίεσης μέσω micro-P.I.V. σε γυάλινο τριχοειδές (capillary) διάστασης 200  $\mu\text{m}$ , χρησιμοποιώντας σχετικά μεγάλα σωματίδια (10 $\mu\text{m}$ ).

Ο φωτισμός του όγκου της ροής στη μέθοδο micro-PIV μπορεί να οδηγήσει σε υψηλά επίπεδα θορύβου από μη εστιασμένα σωματίδια αν η συγκέντρωση των σωματιδίων είναι μεγάλη. Ωστόσο, αν η συγκέντρωση των σωματιδίων είναι χαμηλή, οι κλασσικές τεχνικές συσχέτισης που χρησιμοποιούνται στη μακροσκοπική PIV μπορεί να είναι αναξιόπιστες. Ο Meinhart (2000b) παρουσίασε ένα βελτιωμένο αλγόριθμο PIV για τις περιπτώσεις που η ισχύς του σήματος είναι χαμηλή. Ο βελτιωμένος αλγόριθμος επιβεβαιώθηκε με την εφαρμογή για ροή λόγω πίεσης σε ορθογωνικό κανάλι 30x300  $\mu\text{m}^2$ . Επιπροσθέτως, ο Meinhart (2000a) κατέληξε σε μια θεωρητική έκφραση για το βάθος εστίασης των συστημάτων micro-PIV, η οποία καταδεικνύει ότι το βάθος εστίασης είναι μια περίπλοκη συνάρτηση διαφόρων παραμέτρων, με πιο σημαντική τη συγκέντρωση των σωματιδίων. Οι Olsen και Adrian (2000a, 2000b) συνεισέφεραν σημαντικά στην διερεύνηση της επίδρασης των εκτός εστίασης σωματιδίων στην ορατότητα των σωματιδίων (particle visibility) και στην κίνηση Brown και τη συσχέτιση των σωματιδίων στη micro-PIV. Δύο βασικές πειραματικές παράμετροι, το βάθος συσχέτισης (correlation depth) και η ορατότητα των σωματιδίων (particle visibility), παρουσιάστηκαν σε αυτές τις μελέτες.

Ο Onryn (2000) ανέπτυξε ένα μοντέλο για τον προσδιορισμό της τρισδιάστατης θέσης ενός σφαιρικού μη φθορίζοντος σωματιδίου, που βασίζεται στη σκέδαση προς τα εμπρός (forward scattering). Ο Cummings (2000) ανέπτυξε μια μεθοδολογία επεξεργασίας του σήματος (signal processing methodology) προσαρμοσμένη για σταθερές ροές σε μικροκατασκευές χρησιμοποιώντας μια θεμελιωδώς διαφορετική προσέγγιση. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποίησε ένα μεγάλο βάθος εστίασης, τέτοιο ώστε όλα τα σωματίδια στο μικροσύστημα να είναι εστιασμένα, υπολόγισε τις συναρτήσεις πιθανότητας πυκνότητας της μετατόπισης του σωματιδίου (particle-displacement probability density functions), επεξεργάστηκε με τη μέθοδο ensemble averaging πολλά ζεύγη εικόνων (50 έως >1000) και τελικά φίλτραρε τις συναρτήσεις πιθανότητας πυκνότητας για να προκύψουν δεδομένα ταχύτητας σε τρεις διαστάσεις. Η παραπάνω μέθοδος είχε τη δυνατότητα να συνάγει επίπεδα πεδία ροής λόγω πίεσης και ηλεκτροκινητικά πεδία ροής που περιελάμβαναν εμπόδια και φουσαλίδες. Επίσης,

ο Cummings (2000) ήταν ο πρώτος που εφάρμοσε την τεχνική micro-PIV για να μελετήσει μια ηλεκτροκινητική ροή.

Μια από τις πρώτες πρακτικές μελέτες με τη μέθοδο micro-PIV ήταν αυτή των Meinhart και Zhang (2000) που μελέτησαν την πολύπλοκη μορφή της ροής λόγω πίεσης σε μια μικροκατασκευασμένη κεφαλή εκτυπωτή inkjet (microfabricated inkjet printhead). Από τη στιγμή που η ροή ήταν περιοδική για κάθε κύκλο έγχυσης (injection circle), επεξεργάστηκαν τις στιγμιαίες μετρήσεις με τη μέθοδο phase averaging για να προσδιορίσουν τη μορφή του συνολικού πεδίου ροής. Οι ταχύτητες στο ακροφύσιο της κεφαλής του εκτυπωτή (printhead nozzle) μετρήθηκαν έως 8 m/s. Οι Wereley και Meinhart (2001) ανέπτυξαν μια βελτιωμένη, δεύτερης τάξης και ακριβή τεχνική PIV και την εφάρμοσαν για ροή λόγω πίεσης γύρω από ένα ερυθρό αιμοσφαίριο. Η νέα τεχνική περιελάμβανε επεξεργασία με τους αλγόριθμους της προσαρμοσμένης κεντρικής διαφοράς (adaptive central difference algorithms), που φάνηκαν να έχουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους παραδοσιακούς αλγόριθμους προσαρμοσμένης εμπρός διαφοράς, ειδικά όσον αφορά την ανάλυση κοντά στα όρια της ροής (τοιχώματα).

Οι Gui και Wereley (2002) εφάρμοσαν μια τεχνική συνεχούς εναλλαγής παραθύρων (continuous window-shift technique), ειδικά για τις περιπτώσεις εικόνων μεγάλων σωματιδίων, μικρών παραθύρων επεξεργασίας και εικόνων πολύ μικρών σωματιδίων. Όταν εφαρμόστηκε σε εικόνες μετακίνησης σωματιδίων για ροή σε μικροκανάλια, η τεχνική έδειξε να μειώνει σημαντικά τα φαινόμενα peak-locking σε σύγκριση με τις τεχνικές διακριτών εναλλαγών παραθύρων (discrete window-shift) και τις τεχνικές ανίχνευσης που βασίζονται στον ταχύ μετασχηματισμό Fourier (fast Fourier transform based tracking techniques).

Ο Wereley (2002) παρείχε μια άριστη ανάλυση των προηγμένων τεχνικών απεικόνισης και επεξεργασίας για υψηλής χωρικής ανάλυσης micro-PIV. Ο Hohreiter (2002) εισήγαγε ένα αλγόριθμο micro-PIV που πέρα από μετρήσεις ταχύτητας λάμβανε και θερμικές μετρήσεις, βασιζόμενος στη θερμοκρασιακή εξάρτηση της κίνησης Brown των σωματιδίων. Προσδιορίστηκαν θερμοκρασιακές μεταβολές έως 25°C με πειραματική ακρίβεια (experimental accuracy)  $\pm 3^\circ\text{C}$ .

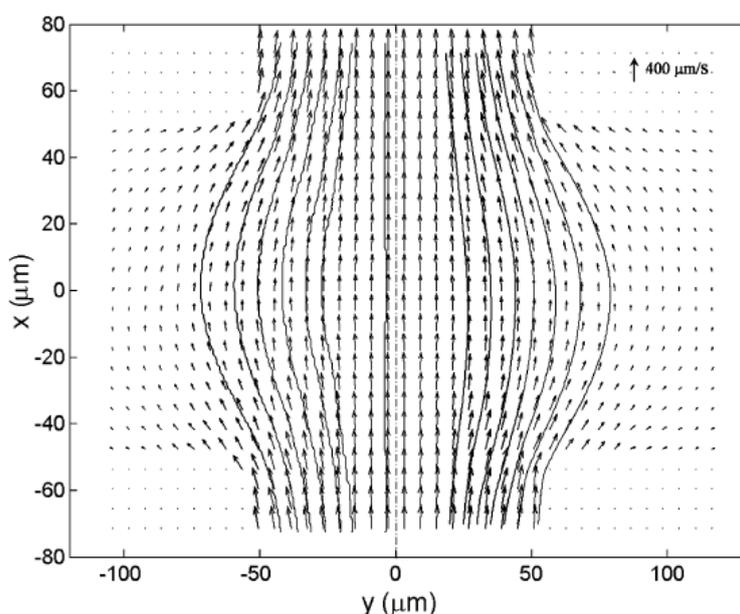
Ο Klank (2002) έλαβε μετρήσεις με micro-PIV σε ένα θάλαμο διαστολής (expansion chamber) σχεδιασμένο για διαχωρισμό κυττάρων (cell sorting). Ο θάλαμος διαστολής ήταν αρκετά μεγάλος ώστε να διευκολύνει τη λήψη στερεοσκοπικών μετρήσεων τέτοιες ώστε να επιλυθεί ένα τρισδιάστατο πεδίο ροής.

Ο Stone (2002) εφάρμοσε την micro-PIV για τη μέτρηση της γεωμετρίας των εσωτερικών μικροκατασκευών σε ένα ορθογώνιο κανάλι 30x300  $\mu\text{m}^2$ . Χρησιμοποιώντας κανάλια της ίδιας γεωμετρίας σε μια ξεχωριστή μελέτη, οι Trettheway και Meinhart (2002) παρατήρησαν προφανή ταχύτητα ολίσθησης ακριβώς πάνω από τα τοιχώματα του καναλιού που ήταν επικαλυμμένα με ένα παχύ υδρόφοβο (octadecyltrichlorosilane) στρώμα (2,3 nm). Όταν η επιφάνεια ήταν μη επικαλυμμένη (υδρόφιλο γυαλί), ίσχυε η συνθήκη μη ολίσθησης.

Ένα μειονέκτημα της χρήσης φθορίζοντων μικροσφαιριδίων πολυστυρενίου για micro-PIV, είναι ότι τυπικά φθορίζουν επιφανειακά ή σχετικά αδύναμα μέσω του

όγκου τους εξαιτίας των φαινομένων απόσβεσης (quenching effects) (Singh (2001)). Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι η υδροφοβικότητα του πολυστυρενίου μπορεί να οδηγήσει σε συσσωματώματα σωματιδίων, μη ειδική προσρόφηση των υδροφιλικών διαλυμάτων στις επιφάνειες των σωματιδίων και προσκόλληση των σωματιδίων στα τοιχώματα του μικροκαναλιού. Ο Singh (2001) χρησιμοποίησε φθορίζοντα λιποσώματα ως εναλλακτικούς ανιχνευτές της ροής (flow markers) για micro-PIV. Τα λιποσώματα χαρακτηρίζονται από ουδέτερη πλευστότητα (neutrally buoyant), είχαν διάμετρο περίπου 280 nm, ήταν υδρόφιλα και ισοδυναμούσαν με 80000 μόρια φλουορεσκεΐνης (fluorescein molecules). Από τη στιγμή που οι παγιδευμένες φθορίζουσες χρωστικές (fluorophores) εκτίθενται στον buffer, η ένταση φθορισμού τους μπορεί να μεγιστοποιηθεί.

Η ηλεκτροοσμωτική ροή συχνά προτιμάται από τη ροή λόγω πίεσης σε εφαρμογές μικρορευστομηχανικών τσιπ (microfluidic chips) εξαιτίας του αυξημένου ελέγχου της παροχής της ροής, της έλλειψης μηχανολογικού εξοπλισμού και της έλλειψης cross-stream κλίσεων ταχύτητας. Με εξαίρεση τον Cummings (2000), οι περισσότερες εφαρμογές της micro-PIV πριν το 2002 περιελάμβαναν μόνο ροές λόγω πίεσης. Η ηλεκτροοσμωτική ροή προκύπτει από ηλεκτροκινητικά φαινόμενα στο διεπιφανειακό όριο υγρού-τοιχώματος καναλιού. Η εφαρμογή της micro-PIV σε ηλεκτροκινητικές ροές παρουσιάζει επιπρόσθετες προκλήσεις ως προς το γεγονός ότι τα σωματίδια παρουσιάζουν διεπιφανειακά φαινόμενα, έχουν ηλεκτροφορητική κίνηση και δυνητικά επηρεάζουν την ηλεκτροκινητική ροή του ρευστού και τα διεπιφανειακά φαινόμενα στο τοίχωμα του καναλιού. Ο Devasenathipathy (2002) εφάρμοσε την micro-PIV για ηλεκτροκινητική ροή σε μικροκανάλι. Η ροή μέσα σε διατομή μικροκαναλιού με ομοιόμορφο δυναμικό ζ (uniform zeta potential) διερευνήθηκε και προέκυψε το παρακάτω προφίλ ταχύτητας:



Επίσης, διερευνήθηκε η ροή σε μικροκανάλι με μη ομοιόμορφο δυναμικό ζ (non-uniform zeta potential). Για να γίνουν οι μετρήσεις της ροής ποσοτικές, οι ηλεκτροφορητικές ταχύτητες (electrophoretic velocities) των σωματιδίων μετρήθηκαν με την εφαρμογή της μεθόδου PTV σε ένα ορθογώνιο μικροκανάλι. Η ηλεκτροοσμωτική κινητικότητα (electroosmotic mobility) του μικροκαναλιού

προσδιορίστηκε ανεξάρτητα με τη χρήση μιας τεχνικής ελέγχου του ρεύματος (current monitoring technique) (Huang (1988)). Ο Kim (2002) παρουσίασε ένα συνδυασμό μελέτης με micro-PIV και αριθμητικής μελέτης της ηλεκτροοσμωτικής ροής σε ένα μικροκανάλι με αυλακώσεις και σχήματος T. Το μικροκανάλι ήταν ρηχό (7  $\mu\text{m}$ ) σε σχέση με το βάθος απεικόνισης (11,4  $\mu\text{m}$ ) και έτσι χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος depthwise averaging και οι προσομοιώσεις ήταν δισδιάστατες.

Ο Tseng (2002) εφάρμοσε την micro-PIV για να μελετήσει τη διαδικασία πλήρωσης μικροδεξαμενών σε ένα δίκτυο μικροκαναλιών με υγρές φυσαλίδες (slugs). Ο Sugii (2002) χρησιμοποίησε ερυθρά αιμοσφαίρια ως ανιχνευτές σε micro-PIV για να λάβει δεδομένα ταχύτητας από εικόνες in vivo αίματος (in vivo blood images) ενός ευθείου αρτηριδίου (straight arteriole) του μεσεντερίου ενός αρουραίου χρησιμοποιώντας ένα intravital μικροσκόπιο. Ο MacInnes (2003) εφάρμοσε τη μέθοδο micro-PIV για να μελετήσει την ηλεκτροοσμωτική ροή, την ροή λόγω πίεσης και την ροή ανάμιξης (mixed flow) στη διατομή ενός twin-T μικροκαναλιού. Πριν τα πειράματα, οι κινητικότητες των σωματιδίων (particle mobilities) μετρήθηκαν σε στατική επιφάνεια ρευστού (stationary fluid surface) εντός κλειστού ηλεκτροκινητικού κυττάρου (closed electrokinetic cell). Οι μετρήσεις έδειξαν να είναι εντός του 5% των μετρήσεων που λήφθηκαν χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο δικτύου μικροκαναλιών (microchannel network model). Ο Sato (2003b) παρουσίασε μια υβριδική παραλλαγή της micro-PIV και μια κλιμακωτή τεχνική απεικόνισης της θερμοκρασίας (scalar-based temperature visualization technique). Μια φθορίζουσα ουσία που παρουσιάζει υψηλής θερμοκρασιακής εξάρτησης ένταση εκπομπής (highly temperature-dependant emission intensity) χρησιμοποιήθηκε ως επικάλυψη στην πάνω επιφάνεια ενός μικροκαναλιού σχήματος T και λήφθηκαν ταυτόχρονες μετρήσεις θερμοκρασίας και ταχύτητας. Ο Devasenathipathy (2003) εφάρμοσε τόσο micro-PIV όσο και PTV (particle tracking velocimetry) για ροές λόγω πίεσης σε ένα ευθύ κανάλι που καταλήγει σε μια μεγάλη δεξαμενή.

Επιπροσθέτως, παρουσιάστηκε μια μέθοδος για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας μέτρησης (measurement uncertainty) των μετρήσεων εντός πεδίου (in-plane measurements) που προκαλείται από την τρισδιάστατη κίνηση Brown. Οι Olsen και Bourdon (2003) συνέχισαν τις προσπάθειες των Olsen και Adrian (2000a, 2000b) να συμπεριλάβουν την κίνηση εκτός επιπέδου (out-of-plane motion) στο βάθος συσχέτισης (correlation depth). Σε αντίθεση με τη χρήση της μεθόδου temporal averaging (χρονικός μέσος όρος) για την εξάλειψη των επιδράσεων της κίνησης Brown, ο Sato (2003a) παρουσίασε μια τεχνική χωρικού μέσου όρου (spatial averaging technique) για time-resolved particle tracking velocimetry (SAT-PTV). Αυτή η τεχνική επικυρώθηκε χρησιμοποιώντας εικόνες συνθετικών σωματιδίων (synthetic particle images) και εφαρμόστηκε σε ασταθή ηλεκτροκινητική ροή παλλόμενη σε συχνότητα 5 Hz.

Ο Meinhart (2003) εφάρμοσε την micro-PIV για την μέτρηση εναλλασσόμενου ρεύματος ηλεκτροκινητικών ροών σε ακανόνιστες γεωμετρίες (irregular geometries). Σε πεδία εναλλασσόμενου ρεύματος, η κίνηση των σωματιδίων σε μικροκλίμακα επηρεάζεται από την διηλεκτροφόρηση (dielectrophoresis) (δύναμη που πηγάζει από τη διαφορά στην πολωσιμότητα (polarizability) μεταξύ του σωματιδίου και του ρευστού) καθώς και από τις συνεκτικές αλληλεπιδράσεις (viscous interactions) με το

ρευστό. Μέσω αριθμητικής προσομοίωσης και πειραμάτων με micro-PIV, επιβεβαιώθηκε ότι οι ηλεκτροθερμικές δυνάμεις διαδραμάτιζαν ένα σημαντικό ρόλο στη κίνηση του ρευστού. Μελετήθηκαν συχνότητες  $f=10-100$  kHz και λήφθηκαν μετρήσεις με σωματίδια δύο μεγεθών ώστε να υπολογιστεί μονοσήμαντα η κίνηση του ρευστού.

Οι Meinhart και Wereley (2003) παρουσίασαν μια βελτιωμένη θεωρία με μειωμένης διάθλασης ανάλυση (diffraction-limited resolution) για micro-PIV με μεγαλύτερη εφαρμοσιμότητα όσον αφορά το αριθμητικό άνοιγμα και τα μέσα βύθισης (immersion media). Η περίπτωση απεικόνισης στο νερό (imaging into water) διερευνήθηκε σε αυτή τη μελέτη και τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι οι φακοί βύθισης σε νερό (water-immersion lenses) μπορούν να παρέχουν καλύτερη μειωμένης διάθλασης ανάλυση σε σχέση με τους φακούς βύθισης σε έλαιο (oil-immersion objectives) με σχετικά υψηλότερο αριθμητικό άνοιγμα.

Ο Wong (2003) εφάρμοσε τη micro-PIV για να διερευνήσει το πεδίο της ροής και να υπολογίσει το ρυθμό διάτμησης (shear rate) σε ένα chip που χρησιμοποιούταν για τη μελέτη της αλλοίωσης των μορίων του DNA (deformation of DNA molecules) με υδροδυναμική εστίαση. Ο Chiu (2003) εφάρμοσε την micro-PIV για να αναλύσει τα χαρακτηριστικά της ροής που δημιουργείται σε ένα θάλαμο κατακόρυφης βαθμίδας (vertical step flow chamber) που χρησιμοποιούταν για να μελετηθούν οι επιδράσεις της ροής στην προσκόλληση μονοκυττάρων σε ενδοθηλιακά κύτταρα (ένας πρόδρομος της αθηροσκλήρωσης).

Οι Zettner και Yoda (2003) παρουσίασαν μια νέα προσέγγιση της micro-PIV εφαρμόζοντας φωτισμό φθίνοντος κύματος (evanescent-wave illumination) για τη μέτρηση της ταχύτητας των σωματιδίων για ροή Couette μέσα σε 376 nm σταθερής επιφάνειας και για χωρική ανάλυση  $40 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m} \times 376 \mu\text{m}$  ή 276 nm για σωματίδια με ακτίνες 250 nm και 150 nm. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιεί το φθίνον κύμα που παράγεται στο λιγότερο πυκνό μέσο όταν μια προσπίπτουσα δέσμη παθαίνει ολική εσωτερική ανάκλαση. Το μικρό βάθος διείσδυσης του φθίνοντος κύματος δημιουργεί μια λεπτή δέσμη φωτισμού κοντά στην επιφάνεια, ανάλογο με τη δέσμη laser (laser sheet) των μακροσκοπικών τεχνικών PIV. Οι Lee και Kim (2003) ανέπτυξαν ένα σύστημα PIV βασισμένο στις ακτίνες X, ικανό να μετρήσει πεδία ταχύτητας που βρίσκονται εντός αδιαφανούς υλικού. Με αυτή τη μέθοδο λήφθηκαν προφίλ ταχύτητας για ροή λόγω πίεσης σε ένα αδιαφανή σωλήνα από Teflon με εσωτερική διάμετρο 750  $\mu\text{m}$  χρησιμοποιώντας μικροσφαιρίδια  $\text{Al}_2\text{O}_3$  που απορροφούν ακτίνες X.

Ο Bourdon (2004a) διεξήγαγε τόσο υπολογιστική προσομοίωση όσο και πειράματα με micro-PIV για να επιβεβαιώσει προηγούμενα αναλυτικά μοντέλα που προσδιορίζουν το βάθος συσχέτισης (depth of correlation) (Olsen and Adrian (2000b), Olsen and Bourdon (2003)). Ο Bourdon (2004b) ανέπτυξε μια νέα μέθοδο φιλτραρίσματος εικόνων (image filtering method) για micro-PIV, με το όνομα power filtering. Χρησιμοποιώντας αυτή τη μέθοδο το βάθος συσχέτισης μπορεί να μεταβληθεί με την εφαρμογή ενός φίλτρου στις ληφθείσες εικόνες μέσω micro-PIV πριν τα δεδομένα ταχύτητας επεξεργαστούν με μια τεχνική διασυσχέτισης.

Ο Liu (2004) ανέπτυξε μια υπέρυθη micro-PIV (IR-PIV) για τη μέτρηση πεδίων ροής σε σιλικονούχες μικροσυσκευές. Η χρήση υπέρυθρου φωτός, που μεταδίδεται

διαμέσου της σιλικόνης σχετικά καλά, επεκτείνει σημαντικά την εφαρμοσιμότητα των τεχνικών micro-PIV. Με αυτή τη μέθοδο προσδιορίστηκαν προφίλ ταχύτητας κατά πλάτος ενός μικροκαναλιού με εσωτερική διάμετρο 225  $\mu\text{m}$  για ροή λόγω πίεσης με κεντρικές (centerline) ταχύτητες 500  $\mu\text{m/s}$  έως 1,5 m/s. Ο Park (2004) ανέπτυξε μια optically sliced micro-PIV χρησιμοποιώντας ομοεστιακή σαρωτική μικροσκοπία με laser (confocal laser scanning microscopy). Τα ομοεστιακά συστήματα φθορισμού (confocal fluorescence systems) χρησιμοποιούν σημειακές μετρήσεις που λαμβάνονται μέσω μιας μειωμένης διάθλασης εστίασης μιας ακτίνας laser και μπορούν να λάβουν εικόνες με οπτικό πάχος (optical thickness) μικρότερο του 1  $\mu\text{m}$ . Η ταχύτητα στην οποία μια εικόνα ή ένας όγκος μπορεί να σαρωθεί τυπικά περιορίζει την εφαρμοσιμότητα των μονοεστιακών συστημάτων σε εφαρμογές απεικόνισης σταθερής κατάστασης (steady-state imaging) και εφαρμογές μονοσημειακής ανίχνευσης (single-point detection). Ωστόσο, αυτό το μικροσκόπιο που χρησιμοποιήθηκε από τον Park (2004) είχε διπλούς υψηλής ταχύτητας περιστρεφόμενους δίσκους (dual high-speed rotating disks) που διέθεταν χιλιάδες μικροφακούς (microlenses) και μικρές τρύπες (pinholes), και είχε τη δυνατότητα για απεικόνιση πλήρους πεδίου (full-field imaging) έως 120 frames per second.

### **Βιβλιογραφία Κεφάλαιο 3**

Γλυνού, Α., Πειραματική μελέτη ροής σε υδρόφιλες και υδρόφοβες επιφάνειες μικροναλίων με χρήση της τεχνικής micro P.I.V.. 2012

Σακελαρίου, Κ., Πειραματική μελέτη ροής σε υπερυδροφόβα και υπερυδροφιλα μικρονάλια και μικροαναμίκτες. 2013

Bourdon C.J., Olsen M.G., Gorby A.D., 'Validation of an analytical solution for depth of correlation in microscope particle image velocimetry', *Measurement Science and Technology*, Volume 15, No 2, 318-327 (2004a)

Bourdon C.J., Olsen M.G., Gorby A.D., 'Power-filter technique for modifying depth of correlation in micro-PIV experiments', *Experiments in Fluids*, Volume 37, No 2, 263-271 (2004b)

Bown M.R., MacInnes J.M., Allen R.W.K., 'Micro-PIV simulation and measurement in complex microchannel geometries', *Measurement Science and Technology*, Volume 16, No 3, 619-626 (2005)

Chiu J-J, Chen C-N, Lee P-L, Yang C.T., Chuang H.S., Chien S., Usami S., 'Analysis of the effect of disturbed flow in monocytic adhesion to endothelial cells', *Journal of Biomechanics*, Volume 36, Issue 12, 1883-1895 (2003)

Cummings E.B., 'An image processing and optimal nonlinear filtering technique for particle image velocimetry of microflows', *Experiments in Fluids*, Volume 29, Issue 1 Supplement, S042-S050 (2000)

Devasenathipathy S., Santiago J.G., Takehara K., 'Particle tracking techniques for electrokinetic microchannel flows', *Analytical Chemistry*, Volume 74, Issue 15, 3704-3713 (2002)

Devasenathipathy S., Santiago J.G., Wereley S.T., Meinhart C.D., Takehara K., 'Particle imaging techniques for microfabricated fluidic systems', *Experiments in Fluids*, Volume 34, Issue 4, 504-514 (2003)

Etoh T., Takehara K., 'Development of a new algorithm and supporting technologies for PIV', In: *Proceedings of the International Workshop on PIV*, Fukui, Japan, 91-106 (1995)

Gui L., Wereley S.T., 'A correlation-based continuous window-shift technique to reduce the peak-locking effect in digital PIV image evaluation', *Experiments in Fluids*, Volume 32, Issue 4, 506-517 (2002)

Hart D.P., 'Super-resolution PIV by recursive local-correlation', *Journal of Visualization*, Volume 3, Issue 2, 187-194 (1998)

Hohreiter V., Wereley S.T., Olsen M.G., Chung J.N., 'Cross-correlation analysis for temperature measurement', *Measurement Science and Technology*, Volume 13, Issue 7, 1072-1078 (2002)

Huang X., Gordon M.J., Zare R.N., 'Current-monitoring method for measuring the electroosmotic flow rate in capillary zone electrophoresis', *Anal. Chem.*, 60, 1837-1838 (1988)

Keane R.D., Adrian R.J., 'Theory of cross-correlation analysis of PIV images', *Applied Scientific Research*, Volume 49, Issue 3, 191-215 (1992)

Keane R.D., Adrian R.J., Jensen O.S., 'Super-resolution particle imaging velocimetry', *Measurement Science and Technology*, Volume 6, No 6, 754-768 (1995)

Kim M.J., Beskok A., Kihm K.D., 'Electro-osmosis-driven micro-channel flows: a comparative study of microscopic particle image velocimetry measurements and numerical simulations', *Experiments in Fluids*, Volume 33, Issue 1, 170-180 (2002)

Klank H., Goranovic G., Kutter J.P., Gjelstrup H., Michelsen J., Westergaard C.H., 'PIV measurements in a microfluidic 3D-sheathing structure with three-dimensional flow behavior', *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Volume 12, Issue 6, 862-869 (2002)

Koutsiaris A.G., Mathioulakis D.S., Tsangaris S., 'Microscope PIV for velocity-field measurement of particle suspensions flowing inside glass capillaries', *Measurement Science and Technology*, Volume 10, No 11, 1037-1046 (1999)

Lee S-J, Kim G-B, 'X-ray particle image velocimetry for measuring quantitative flow information inside opaque objects', *Journal of Applied Physics*, Volume 94, Issue 5, 3620-3623 (2003)

Liu D., Garimella S.V., Wereley S.T., 'Infrared micro-particle image velocimetry of fluid flow in silicon-based microdevices', *Experiments in Fluids*, Volume 38, 385-392 (2005)

MacInnes J.M., Du X., Allen R.W., 'Prediction of electrokinetic and pressure flow in a microchannel T-junction', *Physics of Fluids*, Volume 15, Issue 7, 1992-2005 (2003)

Meinhart C.D., Wang D., Turner K., 'Measurement of AC electrokinetic flows', *Biomedical Microdevices*, Volume 5, Issue 2, 139-145 (2003)

Meinhart C.D., Wereley S.T., 'The theory of diffraction-limited resolution in microparticle image velocimetry', *Measurement Science and Technology*, Volume 14, No 7, 1047-1053 (2003)

Meinhart C.D., Wereley S.T., Gray M.H.B., 'Volume illumination for two-dimensional particle image velocimetry', *Measurement Science and Technology*, Volume 11, No 6, 809-814 (2000a)

Meinhart C.D., Wereley S.T., Santiago J.G., 'A PIV algorithm for estimating time-averaged velocity fields', *Journal of Fluids Engineering*, Volume 122, Issue 2, 285-289 (2000b)

Meinhart C.D., Wereley S.T., Santiago J.G., 'Micron-Resolution Velocimetry Techniques', Development in Laser Techniques and Applications to Fluid Mechanics, R.J. Adrian et al. (Eds.), Springer-Verlag, Berlin (1998)

Meinhart C.D., Wereley S.T., Santiago J.G., 'PIV measurements of a microchannel flow', Experiments in Fluids, Volume 27, Issue 5, 414-419 (1999)

Meinhart C.D., Zhang H., 'The flow structure inside a microfabricated inkjet printhead', Journal of Microelectromechanical Systems, Volume 9, No 1, 67-75 (2000)

Mielnik M.M., 'Micro-PIV and its application to some BioMEMS related microfluidic flows', Phd thesis, Department of Energy and Process Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway (2005)

Olsen M.G., Adrian R.J., 'Out-of-focus effects on particle image visibility and correlation in microscopic particle image velocimetry', Experiments in Fluids, Volume 29, Issue 1 Supplement, S166-S174 (2000a)

Olsen M.G., Adrian R.J., 'Brownian motion and correlation in particle image velocimetry', Optics and Laser Technology, Volume 32, Issues 7-8, 621-627 (2000b)

Olsen M.G., Bourdon C.J., 'Out-of-plane motion effects in microscopic particle image velocimetry', Journal of Fluids Engineering, Volume 125, Issue 5, 895-901 (2003)

Ovryn B., 'Three-dimensional forward scattering particle image velocimetry applied to a microscope field-of-view', Experiments in Fluids (Supplement), S175-S184 (2000)

Park J.S., Choi C.K., Kihm K.D., 'Optically sliced micro-PIV using confocal laser scanning microscopy (CLSM)', Experiments of Fluids, Volume 37, Issue 1, 105-119 (2004)

Prasad A.K., Adrian R.J., Landreth C.C., Offutt P.W., 'Effect of resolution on the speed and accuracy of particle image velocimetry interrogation', Experiments in Fluids, Volume 13, Issue 2-3, 105-116 (1992)

Santiago J.G., Wereley S.T., Meinhart C.D., Beebe D.J., Adrian R.J., 'A particle image velocimetry system for microfluidics', Experiments in Fluids, Volume 25, Issue 4, 316-319 (1998)

Sato Y., Inaba S., Hishiba K., Maeda M., 'Spatially averaged time-resolved particle-tracking velocimetry in microspace considering Brownian motion of submicron fluorescent particles', Experiments in Fluids, Volume 35, Issue 2, 167-177 (2003a)

Sato Y., Irisawa G., Ishizuka M., Hishida K., Maeda M., 'Visualization of convective mixing in microchannel by fluorescence imaging', Measurement Science and Technology, Volume 14, No 1, 114-121 (2003b)

Shinohara K., Sugii Y., Aota A., Hibara A., Tokeshi M., Kitamori T., Okamoto K., 'High-speed micro-PIV measurement of transient flow in microfluidic devices', *Measurement Science and Technology*, Volume 15, No 10, 1965-1970 (2004)

Silva G., Leal N., Semiao V., 'Micro-PIV and CFD characterization of flows in a microchannel: Velocity profiles, surface roughness and Poiseuille numbers', *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Volume 29, Issue 4, 1211-1220 (2008)

Singh A.K., Cummings E.B., Throckmorton D.J., 'Fluorescent liposome flow markers for microscope particle-image velocimetry', *Analytical Chemistry*, Volume 73, Issue 5, 1057-1061 (2001)

Sinton D., 'Microscale flow visualization', *Microfluidics and Nanofluidics*, Volume 1, No 1, 2-21 (2004)

Stone S.W., Meinhart C.D., Wereley S.T., 'A microfluidic-based nanoscope', *Experiments in Fluids*, Volume 33, Issue 5, 613-619 (2002)

Sugii Y., Knishes S., Okamoto K., 'In vivo PIV measurement of red blood cell velocity field in microvessels considering mesentery motion', *Physiological Measurement*, Volume 23, No 2, 403-416 (2002)

Takehara K., Adrian R.J., Etoh G.T., Christensen K.T., 'A Kalman tracker for super-resolution PIV', *Experiments in Fluids*, Volume 29, Issue 1, S034-S041 (2000)

Tretheway D.C., Meinhart C.D., 'Apparent fluid slip at hydrophobic microchannel walls', *Physics of Fluids*, Volume 14, Issue 3, L9-L12 (2002)

Tseng F-G, Yang I-D, Lin K-H, Ma K-T, Lu M-C, Tseng Y-T, Chieng C-C, 'Fluid filling into micro-fabricated reservoirs', *Volumes 97-98*, 131-138 (2002)

Wereley S.T., Gui L., Meinhart C.D., 'Advanced algorithms for microscale particle image velocimetry', *AIAA Journal*, Volume 40, Issue 6, 1047-1055 (2002)

Wereley S.T., Meinhart C.D., 'Second-order accurate particle image velocimetry', *Experiments in Fluids*, Volume 31, No 3, 258-268 (2001)

Wong P.K., Lee Y-K, Ho C-M, 'Deformation of DNA molecules by hydrodynamic focusing', *Journal of Fluid Mechanics*, Volume 497, 55-65 (2003)

Zettner C.M., Yoda M., 'Particle velocity field measurements in a near-wall flow using evanescent wave illumination', *Experiments in Fluids*, Volume 34, Issue 1, 115-121 (2003)

## 4 Κεφάλαιο 4 : Πειραματική διαδικασία

Το πείραμα μας στηρίζεται στην μέτρηση ταχυτήτων χρονικά μεταβαλλόμενης ροής. Τα πειραματικά αποτελέσματα λαμβάνονται σε δύο διαφορετικές συνθήκες μετρήσεων. Αρχικά το πείραμα πραγματοποιείται σε συγκεκριμένο βάθος καναλιού (86  $\mu\text{m}$ ) αλλά μεταβάλλοντας την περίοδο της ροής και το χρόνο καθυστέρησης της μικροαντλίας μεταξύ δύο τιμών παροχής. Έπειτα το πείραμα επαναλαμβάνεται σε συνθήκες σταθερής περιόδου και χρόνου καθυστέρησης της μικροαντλίας αλλά μεταβάλλοντας το βάθος στο οποίο πραγματοποιείται η μέτρηση.

### 4.1) Εξοπλισμός

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά οι ιδιότητες των συντελεστών που χρησιμοποιήθηκαν για την διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας. Στην Εικόνα 4.1 φαίνεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των πειραμάτων.



Εικόνα 4.1: Πειραματική Διάταξη

#### 4.1.1) Σωματίδια

Τα σωματίδια που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση των πειραμάτων είναι κατασκευασμένα από πολυστυρένιο. Εκπέμπουν στα 560 nm (κόκκινο). Επιπλέον, η διάστασή τους είναι 1  $\mu\text{m}$ . Τέλος, περιέχονται σε διάλυμα 5 mL με συγκέντρωση  $10 \times 10^9$  beads/mL.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η συγκέντρωση των σωματιδίων πολυστυρενίου που εγχύθηκαν στο νερό μετρήθηκε με τη χρήση της μικροπιπέτας (single channel της Transferpette) ώστε να είναι η αναλογία 50μl διαλύματος σωματιδίων σε 5ml νερού. Η μικροπιπέτα φαίνεται στην Εικόνα 4.2:



**Εικόνα 4.2:** Μικροπιπέτα

#### **4.1.2) Μικροκανάλι**

Τα μικροκανάλια κατασκευάζονται με υλικό PMMA (πολυμεθακρυλικό μεθύλιο). Η διάνοιξη των μικροκαναλιών σε PMMA γίνεται με εγχάραξη σε περιβάλλον πλάσματος οξυγόνου με τη χρήση κατάλληλης μάσκας από πυριτιούχο πολυμερές. Λόγω χρήσης του πυριτίου προκύπτουν μικροκανάλια τραπεζοειδούς διατομής κλίσης ίσης με 54°. Η σφράγιση των καναλιών γίνεται με τη μέθοδο thermal bonding.

Η εγχάραξη με πλάσμα οξυγόνου καθιστά την επιφάνεια ισχυρά υδρόφιλη, με γωνία επαφής ίση με 5° (πλήρης διαβροχή). Μάλιστα οι ιδιότητες αυτές κατακτώνται σε λιγότερο από 5 λεπτά κατεργασίας. Ο ισχυρά υδρόφιλος χαρακτήρας υποχωρεί σταδιακά λόγω φαινομένων γήρανσης (hydrophobic recovery). Ο υπέρ-υδρόφοβος χαρακτήρας των επιφανειών κατακτάται με εναπόθεση φθορανθρακικού υμενίου στην επιφάνεια. Η γωνία επαφής ανέρχεται σε 150°, ενώ η γωνία υστέρησης σε 10°.

Για τη μορφοποίηση του PMMA, καθώς και άλλων πολυμερών (όπως πλεξιγκλάς), χρησιμοποιείται η τεχνική της μορφοποίησης με θέρμανση και πίεση (θερμομόρφωση, hot-embossing). Για τη μορφοποίηση με αυτήν την τεχνική, το πολυμερές τοποθετείται σε κατάλληλη πρέσα με τη βοήθεια της οποίας εφαρμόζονται θλιπτικές τάσεις σε θερμοκρασίες κοντά στη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης του υλικού. Η μέθοδος αυτή είναι ταχεία και μπορεί να εφαρμοστεί σε ήδη μορφοποιημένο πολυμερές. Επίσης όταν γίνεται χρήση κενού, παρεμποδίζεται η παγίδευση αέρα ανάμεσα στο καλούπι και στο υλικό. Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι οι παραμένουσες τάσεις, που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της θερμής μορφοποίησης, και μπορεί να επιδράσουν αρνητικά στην μεταβολή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των καναλιών, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις νανο-κλίμακας.

#### 4.1.3) Μικροαντλία



Εικόνα 4.3: Μικροαντλία

Η μικροαντλία (syringe pump) που χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο της παροχής της ροής εντός του μικροκαναλιού ήταν η **CHEMYX fusion 200**. Η συγκεκριμένη αντλία μπορεί να επιτύχει παροχές από 0,0001 mL/min έως 65 mL/min και δέχεται σύριγγες χωρητικότητας έως 60 mL. Στο πείραμά μας η σύριγγα που χρησιμοποιήθηκε ήταν 5ml. Οι διαστάσεις της μικροαντλίας είναι 241 mm x 165 mm x 114 mm (μήκος x πλάτος x ύψος) και το βάρος της 3 kg.

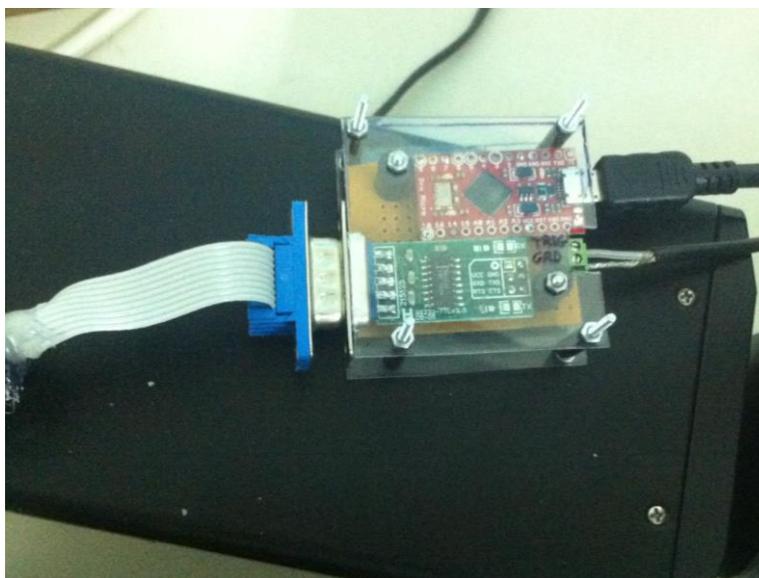
Η μικροαντλία αυτή λειτουργεί κάτω από κάποιες προδιαγραφές :

- Θερμοκρασία λειτουργίας 4°C-40°C
- Θερμοκρασία αποθήκευσης -10°C-70°C
- Υγρασία 20%-80%

#### 4.1.4) Microcontroller

Προκειμένου να έχουμε χρονικά μεταβαλλόμενη ροή χρησιμοποιήσαμε έναν microcontroller (Micro Processing Unit Εικόνα 4.4) στον οποίο εισάγουμε τις τιμές που θέλουμε να πάρει η παροχή, την περίοδο της και τις χρονικές στιγμές ενεργοποίησης της αντλίας με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού. Για το λόγο αυτό απαιτείται πριν τη λειτουργία της αντλίας να συνδεθεί ο μικροελεγκτής σε ηλεκτρονικό υπολογιστή από τον οποίο θα φορτωθούν οι επιθυμητές τιμές της παροχής και οι αντίστοιχες χρονικές στιγμές. Οι τιμές της παροχής που επελέγησαν

ήταν 20μL/min έως 40μL/min. Στη συνέχεια ο microcontroller συνδέεται με την μικροαντλία ελέγχοντας έτσι την παροχή ενώ ταυτόχρονα στέλνει στον synchronizer του συστήματος PIV έναν παλμό με συχνότητα 1Hz με σκοπό τη λήψη μετρήσεων σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές επιτρέποντας τη δυνατότητα εν φάσει μετρήσεων.



**Εικόνα 4.4:** Μικροελεγκτής

#### 4.1.5) Μικροσκόπιο



**Εικόνα 4.5:** Μικροσκόπιο

Το μικροσκόπιο που χρησιμοποιήθηκε είναι το ανεστραμμένο (δηλαδή ο φωτισμός γίνεται από την αντικειμενοφόρο τράπεζα και η παρατήρηση γίνεται κάτω από αυτήν) μικροσκόπιο Olympus IX71. Επίσης, το μικροσκόπιο μπορεί να επιτύχει ανεξάρτητα από το φακό επιπρόσθετη μεγέθυνση της τάξεως 1,6X.

Διαθέτει δύο επίπεδους (PLAN) φακούς (10X και 20X). Αυτοί είναι κατασκευασμένοι από γυαλί με φθορίτη και χρησιμοποιούν ως μέσο απεικόνισης αέρα. Ο φακός 10X έχει αριθμητικό άνοιγμα 0,3, εργαζόμενη απόσταση 10mm, διακριτική ανάλυση 1,08μm, βάθος συσχέτισης 19μm και δεν διαθέτει προστατευτικό κάλυμμα. Ο φακός 20X έχει αριθμητικό άνοιγμα 0,5, εργαζόμενη απόσταση 2,1mm, διακριτική ανάλυση 0,65μm, βάθος συσχέτισης 11,12μm και διαθέτει προστατευτικό κάλυμμα πάχους 0,17mm.

#### 4.1.6) Laser - Κάμερα



Εικόνα 4.6: Laser

Το laser που χρησιμοποιήθηκε είναι το YAG 15-Solo Nd, το οποίο εκπέμπει 532 nm. Η ενέργεια των παλμών του είναι 15 mJ και το πλάτος παλμού είναι 3-5 ns. Η πρώτη ενέργεια που πραγματοποιείται κατά τη χρήση του laser είναι το "ζέσταμα" του, μέσω της επιλογής internal-external. Ο χειρισμός του μπορεί να γίνει είτε χειροκίνητα, είτε μέσω υπολογιστή. Στην πρώτη περίπτωση πρέπει να επιλεγεί συνδυασμός internal-internal και η παύση λειτουργίας του πραγματοποιείται μέσω της επιλογής stand-by, ενώ στη δεύτερη ο συνδυασμός external-external και η παύση συντελείται μέσω της επιλογής laser-off που προσφέρει το πρόγραμμα Insight 3G. Γενικά επιλογή internal χρησιμοποιείται σπάνια, συνήθως όταν ξεκινάει το πείραμα.

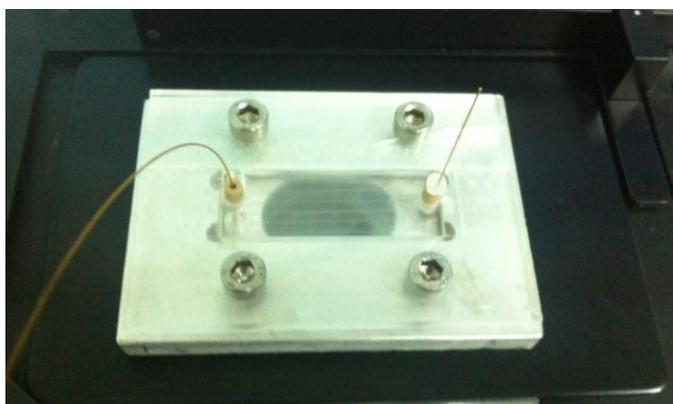
Η κάμερα που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των πειραμάτων ήταν το μοντέλο POWERVIEW CMOS 1.4 MP TSI. Η συγκεκριμένη 12-bit κάμερα ανάλυσης 1376 X 1040 pixel λαμβάνει 10 καρέ το δευτερόλεπτο (frames per second) και παρέχει χωρική ανάλυση (spatial resolution) 1,4 megapixel.

## 4.2) Διαδικασία

Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία προκειμένου να γίνουν οι απαραίτητες ρυθμίσεις των συσκευών στις διάφορες συνθήκες.

### 4.2.1) Προετοιμασία έναρξης

Η πρώτη ενέργεια που γίνεται είναι η στερέωση του μικροκαναλιού στην ειδική κατασκευή που απεικονίζεται στην Εικόνα 4.7 η οποία φέρει δυο μικρές οπές στις δύο άκρες του μικροκαναλιού. Με την βοήθεια πολύ λεπτών αγωγών συνδέεται η σύριγγα, η οποία φέρει το απιονισμένο νερό με τα σωματίδια με την διάταξη που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



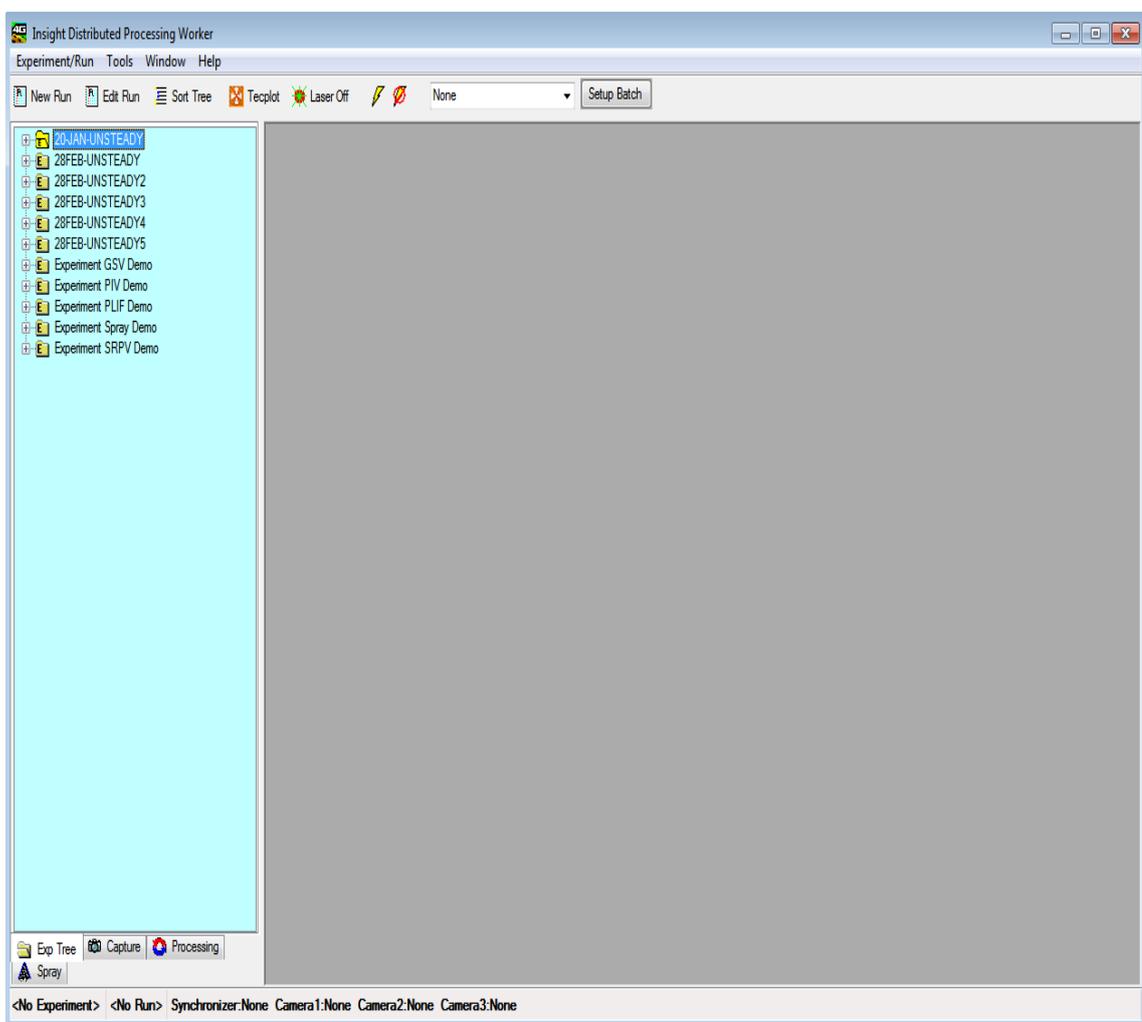
**Εικόνα 4.7:** Μικροκανάλι

Στη συνέχεια ακολουθεί η τοποθέτηση του μικροκαναλιού στο μικροσκόπιο και η εύρεση της σωστής θέσης του. Για την διόρθωση της θέσης του μικροκαναλιού έγινε χρήση, αφενός του λοβού εστίασης που βρίσκεται στα πλάγια του μικροσκοπίου και "ανεβοκατεβάζει" το φακό, αφετέρου του ειδικού μοχλού που βρίσκεται επίσης στα πλάγια του μικροσκοπίου, ο οποίος "μετακινεί" το μικροκανάλι αριστερά, δεξιά, εμπρός και πίσω.

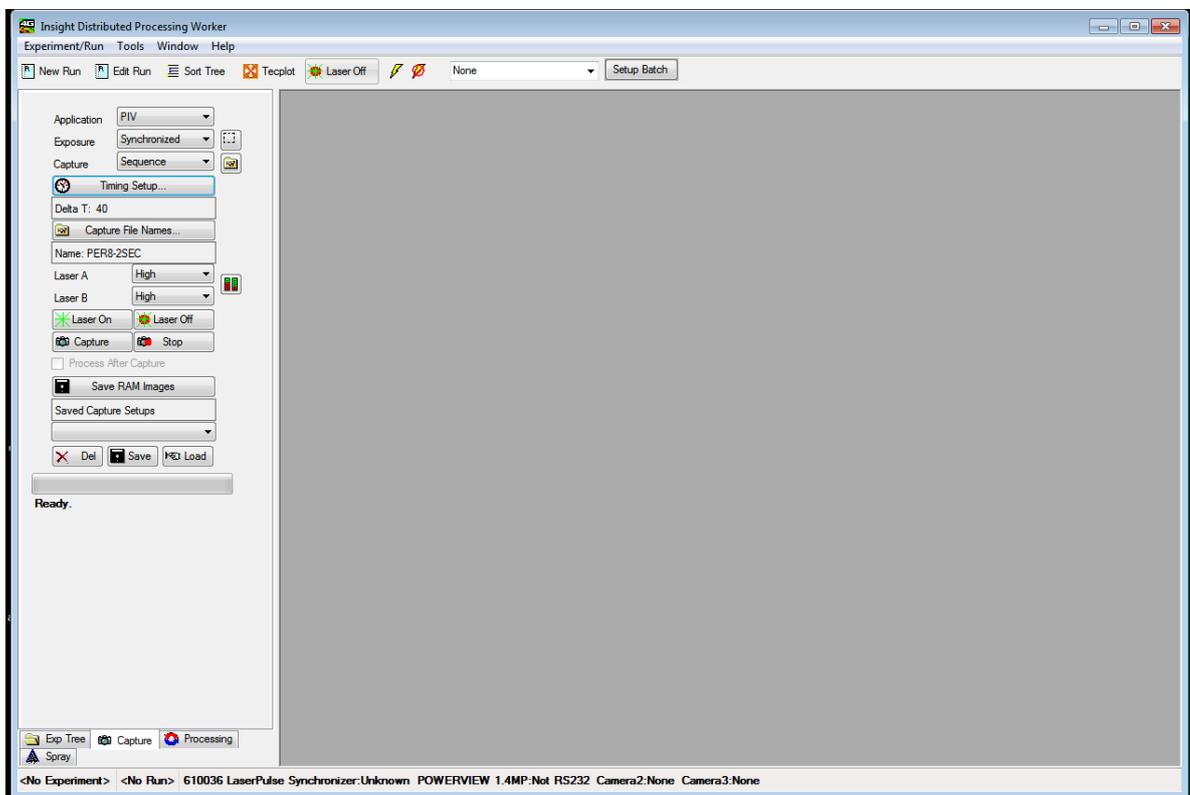
Μετά την εύρεση της σωστής θέσης του καναλιού, ακολουθεί η εισαγωγή απιονισμένου νερού στο μικροκανάλι ώστε να ελεγχθεί αν η ροή εντός του μικροκαναλιού είναι φυσιολογική κυρίως προσπαθώντας να απαλλαγούμε από την παρουσία αέρα υπό τη μορφή φυσαλίδων. Ο έλεγχος γίνεται οπτικά μέσω του μικροσκοπίου. Στη συνέχεια, εγχύουμε σε απιονισμένο νερό (5 mL) επαρκή ποσότητα σωματιδίων πολυστυρενίου (50 uL), δηλαδή με αναλογία 1:100 κατ' όγκον την οποία μετράμε με τη χρήση μικροπιπέτας. Το μίγμα νερού σωματιδίων εισάγεται στο μικροκανάλι, μέσω της σύριγγας που ωθείται από την μικροαντλία με την παροχή που έχουμε επιλέξει.

## 4.2.2) Λήψη εικόνων

Για την λήψη των εικόνων ανοίγουμε το λογισμικό Insight 4G, το οποίο αποτυπώνει την εικόνα του μικροσκοπίου στην οθόνη του υπολογιστή. Το Insight 4G διαθέτει τρεις καρτέλες: Exposure Tree, Capture και Processing. Η καρτέλα η οποία επιλέγεται στο επόμενο βήμα είναι η Exposure Tree. Αρχικά δημιουργούμε νέο φάκελο, πατώντας New Experiment όπου αποθηκεύονται όλα τα πειραματικά δεδομένα. Αφού δημιουργήσουμε το φάκελο τον καθιστούμε τρέχων, πατώντας current. Στη συνέχεια δημιουργούμε υποφάκελο ή υποφακέλους, πατώντας New Run, ανάλογα με τις πειραματικές παραμέτρους που θα χρησιμοποιηθούν κάθε φορά. Στη συνέχεια καθίσταται τρέχων πατώντας current. Να σημειωθεί ότι τόσο το όνομα του experiment όσο και του run δεν πρέπει να τελειώνει σε αριθμό. Το κάθε run έχει δύο υποφακέλους, τον Raw Data που αποθηκεύονται οι μη επεξεργασμένες εικόνες και τον Analysis που αποθηκεύονται τα αποτελέσματα επεξεργασίας. Το παράθυρο διαλόγου που εμφανίζεται απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα:



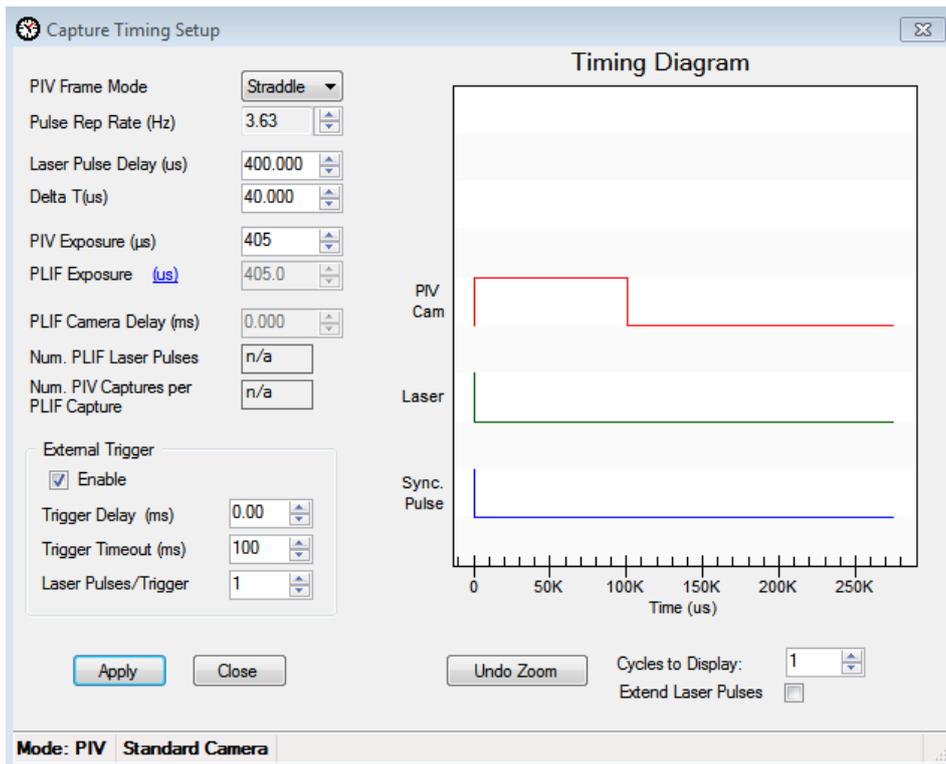
Μετά επιλέγουμε την καρτέλα Capture, η οποία περιλαμβάνει όλες τις παραμέτρους για τη λήψη των εικόνων. Το παράθυρο διαλόγου που εμφανίζεται απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα:



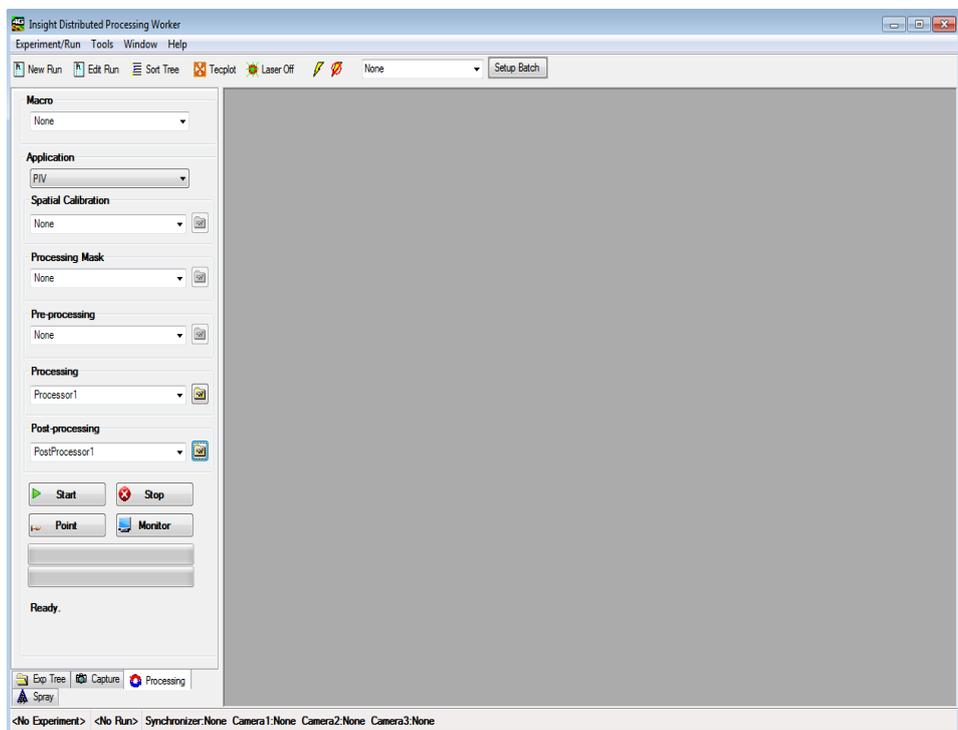
Αρχικά, θέλουμε να λάβουμε μια γρήγορη εικόνα της θέσης του μικροκαναλιού και της ροής εντός αυτού χωρίς το laser. Για αυτό το λόγο, στις καρτέλες Application, Exposure και Capture επιλέγουμε PIV, free και continuous αντίστοιχα και πατάμε capture. Για να είναι πιο ευκρινής η εικόνα μεταβάλλουμε την αντίθεση μεταξύ των σωματιδίων και του μικροκαναλιού επιλέγοντας διαδοχικά Tools, PIV/PIV LUT Table και pseudocolor και αλλάζοντας θέση στα βελάκια των δύο τελευταίων σειρών. Αν είναι ικανοποιητική η εικόνα σταματούμε τη λειτουργία free continuous πατώντας Stop και συνεχίζουμε με τη λήψη των εικόνων.

Ενώ είμαστε στην καρτέλα Capture, αντί για free-continuous επιλέγουμε synchronized-sequence, ούτως ώστε να ενεργοποιηθεί ο synchronizer, που συγχρονίζει το laser με την κάμερα. Στη συνέχεια επιλέγεται ο αριθμός των εικόνων που θα ληφθούν. Τα πειράματα θα γίνουν με 900 εικόνες. Γενικά, όσο περισσότερες εικόνες είναι δυνατόν να ληφθούν οδηγούν σε ποιοτικότερο αποτέλεσμα.

Συνεχίζοντας, επιλέγουμε την καρτέλα Timing setup. για να οριστούν οι παράμετροι 91 pulse repetition rate (συχνότητα) και Delta T (χρονικό διάστημα παρεμβολής μεταξύ δύο διαδοχικών παλμών του laser) Το παράθυρο διαλόγου που εμφανίζεται απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα:



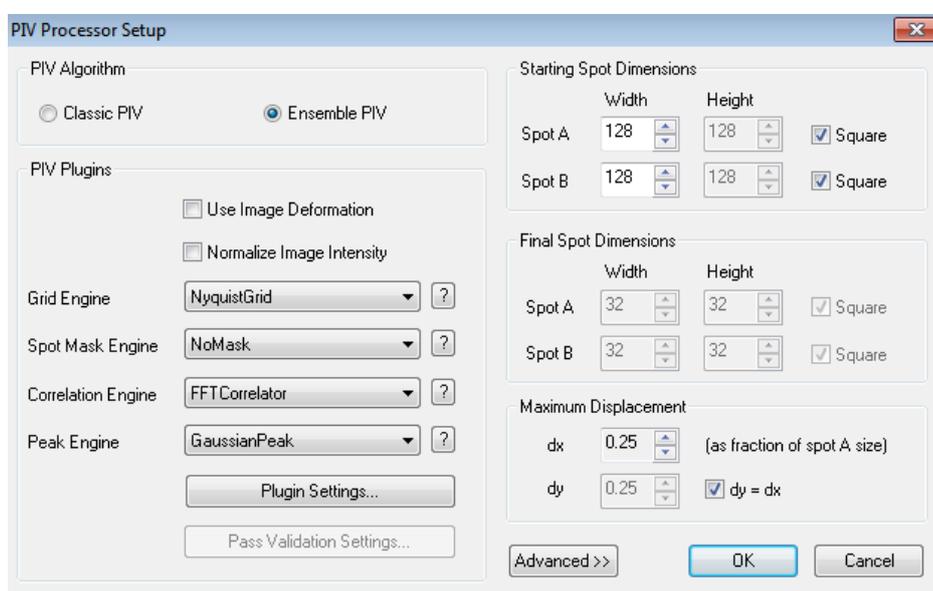
Το επόμενο βήμα είναι η επεξεργασία (processing) των εικόνων με σκοπό την εισαγωγή διανυσμάτων και γι' αυτό το λόγο επιλέγουμε την καρτέλα Processing. Το παράθυρο διαλόγου που εμφανίζεται απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα:



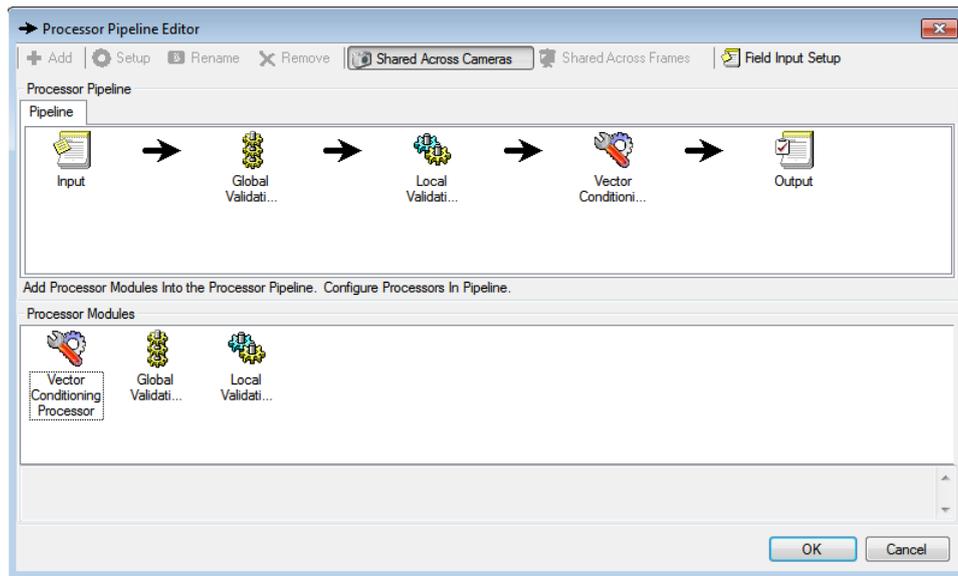
Παραμετροποίηση για την πραγματοποίηση των πειραμάτων στις δύο διαφορετικές συνθήκες

A) Συνθήκες συγκεκριμένου βάθους καναλιού αλλά με μεταβλητή περίοδο ροής και καθυστέρησης της μικροαντλίας:

Για την πρώτη ομάδα μετρήσεων θα πρέπει να οριστούν οι επιθυμητές παράμετροι επεξεργασίας. Αυτό γίνεται επιλέγοντας διαδοχικά τις καρτέλες Processing, Processor και Create new Processor. Το παράθυρο διαλόγου που εμφανίζεται είναι το εξής:

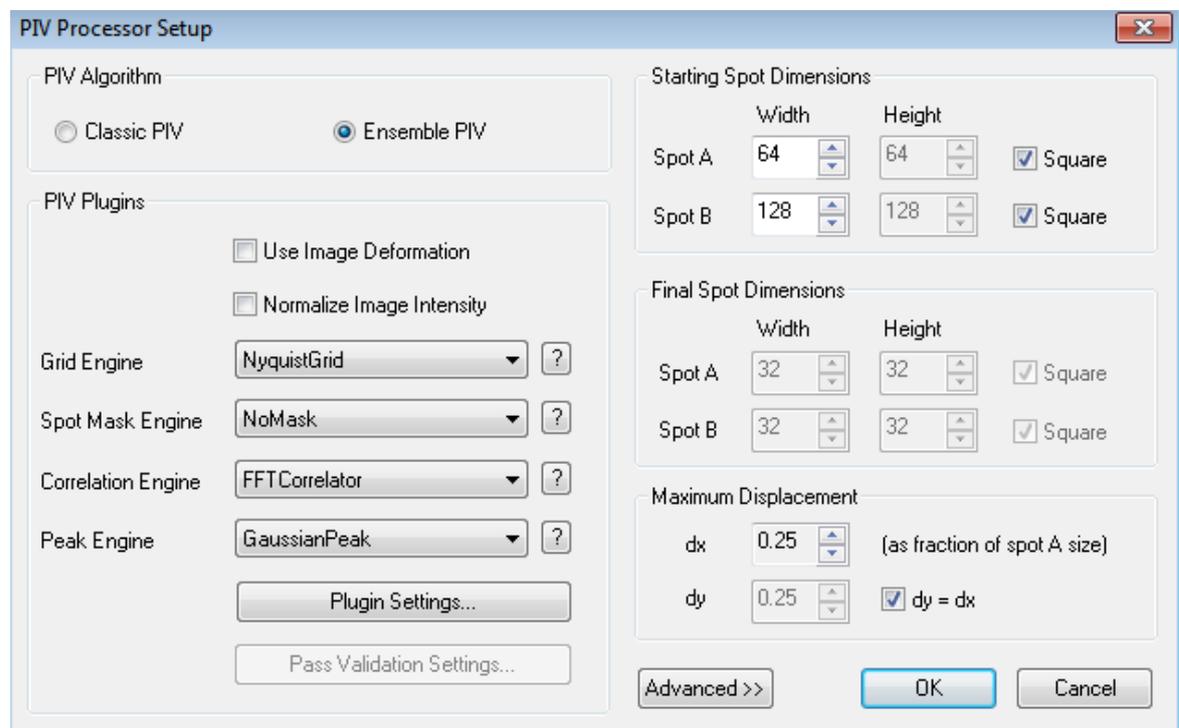


Στη συνέχεια, επιλέγουμε την καρτέλα Post-processing και δημιουργούμε ένα νέο post-processor ώστε να εισάγουμε κάποιες παραμέτρους που "διορθώνουν" την διαδικασία της επεξεργασίας ώστε να προκύψουν καλύτερα προφίλ. Το παράθυρο διαλόγου που εμφανίζεται απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα:



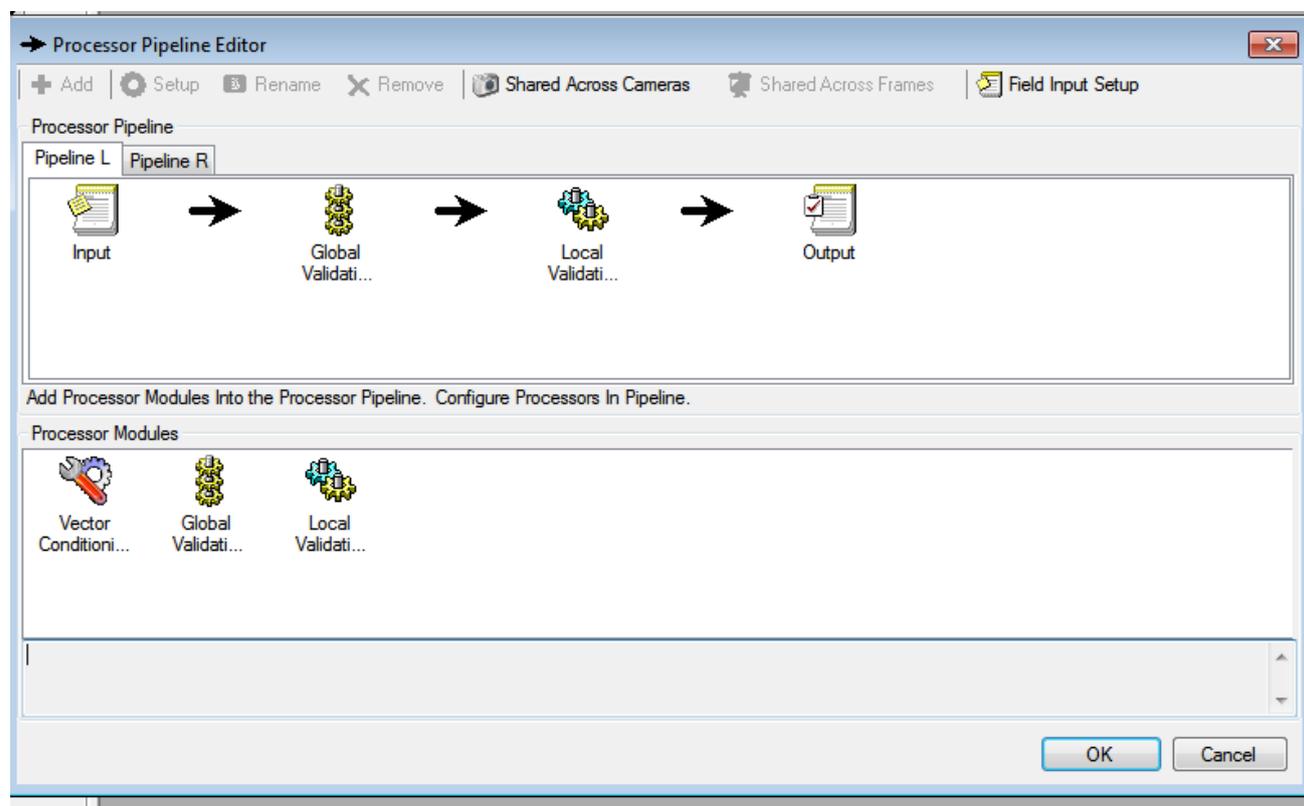
Β) Συνθήκες σταθερής περιόδου και καθυστέρησης της μικροαντλίας αλλά μεταβάλλοντας το βάθος πραγματοποίησης των μετρήσεων

Για την δεύτερη ομάδα, θα πρέπει να οριστούν οι επιθυμητές παράμετροι επεξεργασίας ως ακολούθως:



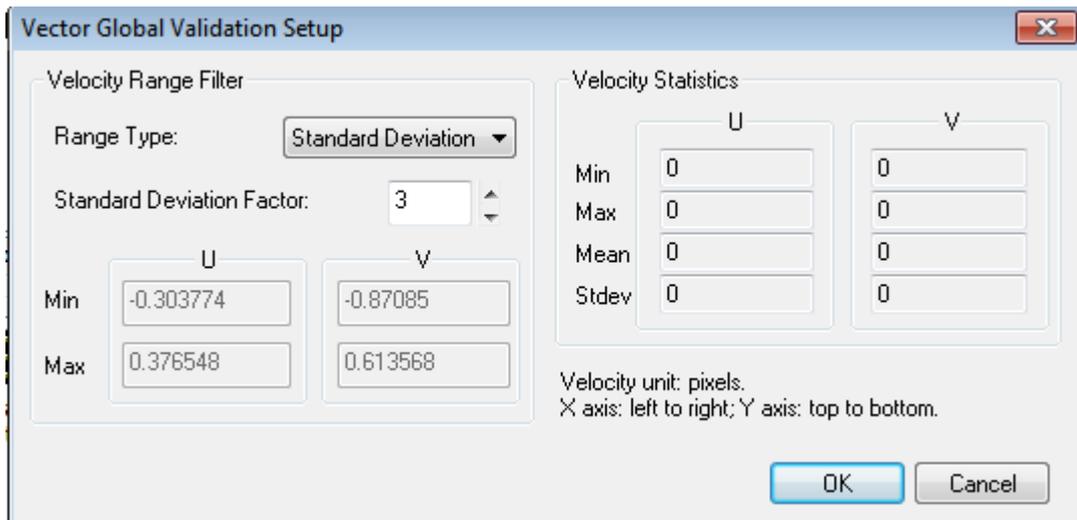
Έπειτα, επιλέγουμε την καρτέλα Post-processing και δημιουργούμε ένα νέο post-processor ώστε να εισάγουμε κάποιες παραμέτρους που "διορθώνουν" την

διαδικασία της επεξεργασίας ώστε να προκύψουν καλύτερα προφίλ. Το παράθυρο διαλόγου που εμφανίζεται απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα:

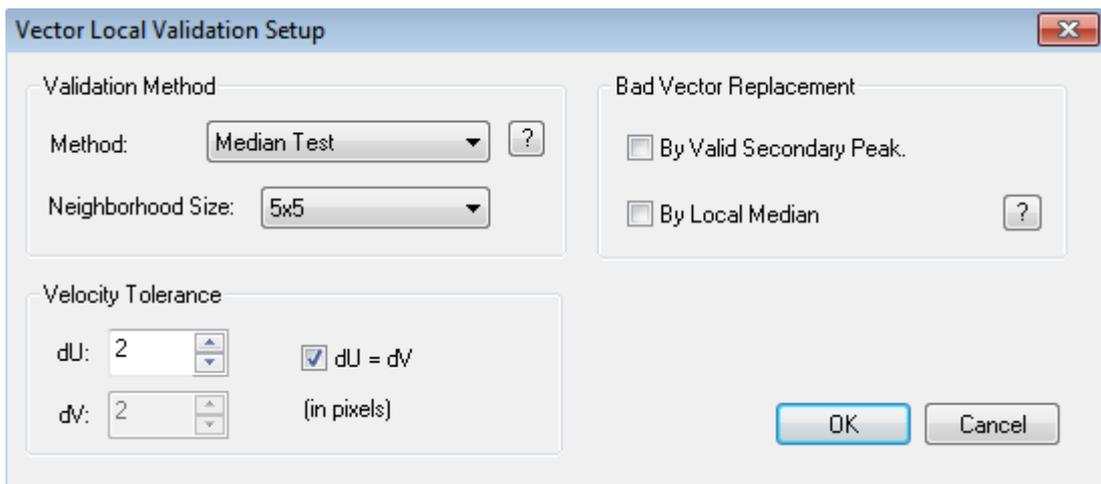


Στη συνέχεια ακολουθείται κοινή πορεία για τις ρυθμίσεις του συστήματος

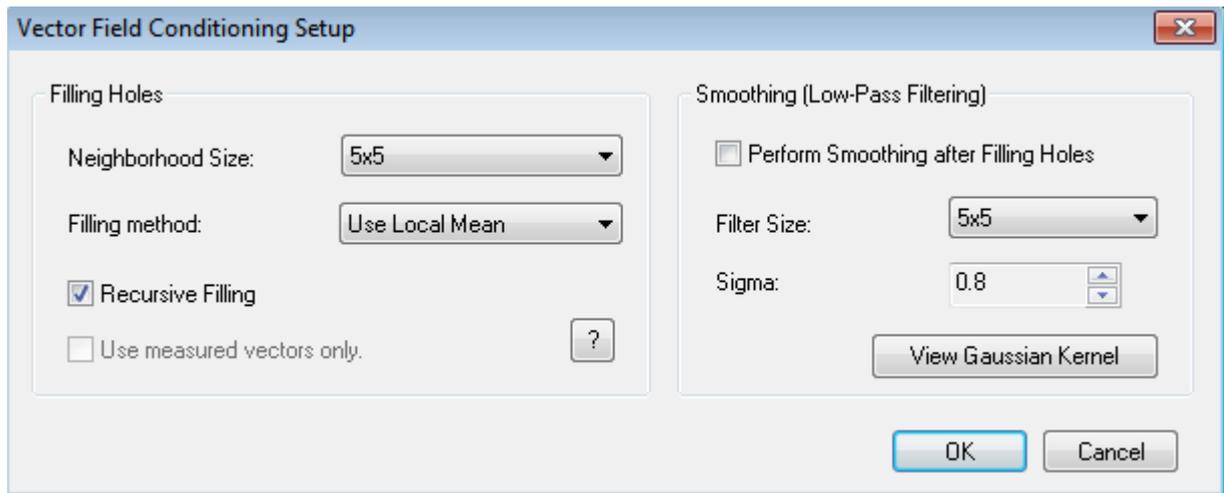
Επιλέγουμε με την σειρά Global Validation Processor, Local Validation Processor και Vector Conditioning Processor. Στην καρτέλα Global Validation Processor επιλέγουμε τον τύπο της διακύμανσης (range type) standard deviation και τον standard deviation factor τον ορίζουμε 3 όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα:



Στην καρτέλα Local Validation Processor επιλέγουμε τη μέθοδο Median Test, ορίζουμε μέγεθος γειτονιάς (neighborhood size) 5X5 και ορίζουμε την ανοχή ταχύτητας (velocity tolerance)  $dU=dV=2$  pixels όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Στην καρτέλα Vector Conditioning Processor ορίζουμε μέγεθος γειτονιάς (neighborhood size) 5X5, επιλέγουμε για filling method την Use Local Mean, επιλέγουμε Recursive filling και ορίζουμε το μέγεθος του φίλτρου (filter size) 5X5 όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Μετά τον έλεγχο και αφού έχουμε διαπιστώσει ότι η μικροαντλία λειτουργεί σωστά πάμε στο Insight 4G και αφού εκτελέσουμε όλα τα παραπάνω βήματα εκκινούμε την διαδικασία της επεξεργασίας πατώντας το Start η οποία ολοκληρώνεται σε μερικά λεπτά.

#### 4.2.3) Εισαγωγή τιμών παροχής στον μικροελεγκτή.

Παρακάτω φαίνεται το πρόγραμμα το οποίο δέχεται τις τιμές της παροχής, την περίοδο και το χρόνο ενεργοποίησης της αντλίας και της αποθηκεύει στον μικροελεγκτή.

```
//#include <Firmata.h>
#include <SoftwareSerial.h>
/*----- CONFIG HERE -----*/
#define MATSIZE 8
int rateMat[MATSIZE]={300,371,400,371,300,229,200,229};
long RateInterval=2000;
long TrigInterval=1000;
long T = 16000; // this must be RateInterval x MATSIZE
long dt = 0; // delay (Not used on "multi delay trigering")
int rate = 5000; //
long volume = 55000;
/* -----END OF CONFIGURATION -----*/
/* MAIN CODE */
// Define a stepper and the pins it will use
const int ledPin = 13; // the number of the LED pin
char buffer[50];
SoftwareSerial mySerial(10, 9); // RX, TX
int state; // values from 0 - 3 (4 states)
```

```

/* timer variables */
unsigned long currentMillis; // store the current value from millis()
unsigned long previousMillis; // for comparison with currentMillis
unsigned long previousCOMMillis;
unsigned long previousRateMillis;
unsigned long previousTrigMillis;
int phase=0;
long COMinterval=100;
boolean isstart=false;
void setup()
  // set the data rate for the SoftwareSerial port
  mySerial.begin(9600);
  currentMillis = millis();
  previousMillis = currentMillis;
  //previousCOMMillis = currentMillis;
  previousRateMillis = currentMillis;
  previousTrigMillis = currentMillis;
  delay(2000);
  //pinMode(ledPin, OUTPUT);
  setDiameter(10.3);
  delay(1000);
  setVolume(volume);
  delay(1000);
  setRate(200);
  delay(1000);
  pumpStart();
  state=2;
  pinMode(7, OUTPUT); // trigger
void loop()
float sg=1.0;
  currentMillis = millis()
  if(currentMillis - previousRateMillis > RateInterval) {
    previousRateMillis+=RateInterval;
    /* YOU MAY CHANGE CODE HERE */
    setRate(rateMat[phase]);
    phase=(++phase)%MATSIZE;
    if(currentMillis - previousMillis > T)
      previousMillis += T; // run this every Tms
    if(currentMillis - previousTrigMillis > TrigInterval)
      previousTrigMillis += TrigInterval; // run this every Tms
    if (currentMillis - previousTrigMillis > dt &&
        currentMillis - previousTrigMillis < (dt+10))
      digitalWrite(7,HIGH);
    else digitalWrite(7,LOW)
void pumpStop() {
  mySerial.print("stop\r");
void pumpStart() {
  mySerial.print("start\r");
void setRate(int value) { // 0.01 - 8400 ul/min
  float fv = (float)value / 10.0;

```

```

rate = value;
dtostrf(fv, 2, 2, buffer);
String command = String("set rate ");
String message = String(command + buffer);
message = String(message + "\r");
mySerial.print(message);
void setVolume(long value) { // values 0.78 - 8400 ul
volume= (float)value / 10.0;
dtostrf(volume, 2, 2, buffer);
String command = String("set volume ");
String message = String(command + buffer);
message = String(message + "\r");
mySerial.print(message);
void setDiameter(float value) { // values 0.78 - 8400 ul
dtostrf(value, 2, 2, buffer);
String command = String("set diameter ");
String message = String(command + buffer);
message = String(message + "\r");
mySerial.print (message);

```

#### 4.2.4) Ομαδοποίηση εικόνων

Ολοκληρώνοντας την παραπάνω διαδικασία παίρνουμε για κάθε πείραμα 900 εικόνες. Οι εικόνες αυτές θα πρέπει να ομαδοποιηθούν για να καταφέρουμε να βγάλουμε κάποιο συμπέρασμα. Σκοπός μας είναι να γίνει ομαδοποίηση των ανά φάση ροών μέσα σε μια περίοδο. Η ομαδοποίηση αυτή πραγματοποιείται με τη βοήθεια ενός προγράμματος σε γλώσσα C++ .

Ανοίγουμε το πρόγραμμα total command για να κάνουμε την ομαδοποίηση. Εμφανίζεται ένα παράθυρο που περιέχει δύο στήλες. Πάμε στην πρώτη στήλη και βρίσκουμε τον φάκελο που περιέχει τα Raw Data ,τα οποία θέλω να ομαδοποιήσω. Αφού εμφανιστούν στην πρώτη στήλη και τα 900 Raw Data, τότε πάω και γράφω octave στο κάτω πλαίσιο που υπάρχει και ανοίγει ένα νέο παράθυρο. Εντός της εντολής octave γράφω για την περίπτωση που έχω περίοδο 32sec και χρόνο αλλαγής της παροχής 4 sec "for k=0:31, FileSelector ('PER 32-4SEC',k,32);end " και πατάω enter. Με αυτόν τον τρόπο μέσα σε λίγα λεπτά γίνεται η ομαδοποίηση των εικόνων μου και προκύπτουν στη δεύτερη στήλη του παραθύρου total command τα ομαδοποιημένα αρχεία μου, που για την περίπτωση 32 sec προκύπτουν 32 νέα αρχεία.

Ο σκοπός μας είναι να ομαδοποιήσουμε τα ανά φάση αρχεία, για παράδειγμα όταν έχουμε περίοδο 32 sec για κάθε 1 sec δημιουργείται ένα νέο αρχείο, το οποίο για την περίπτωση των 0 sec (0,32,64,.....).

Το παρακάτω πρόγραμμα δέχεται τρία ορίσματα: την περίοδο, τον χρόνο αλλαγής της παροχής και τον κατάλογο του οποίου τα αρχεία θέλουμε να ομαδοποιήσουμε. Δημιουργεί έναν υποκατάλογο ,ο οποίος έχει δύο υποκαταλόγους, ο ένας περιέχει τα Raw data και ο άλλος τα Analysis αλλά αυτός είναι άδειος διότι δεν έχει γίνει η διαδικασία Processing από το Insight 4G. Επιλέγει τα αρχεία που ικανοποιούν τη συνθήκη για το χρόνο αλλαγής της παροχής και ομαδοποιεί τα ανα φάση αρχεία.

```
function FileSelector(prefix,DelayTime,Period)
target=sprintf('%sD%s',prefix,DelayTime);
filename=sprintf('%s000000_LeftPIV.tstmp',prefix);
fid=fopen(filename);
C=textscan(fid,'%s %d %d %d','headerlines',3,'returnonerror',1);
fclose(fid);
sn=round(double(C{2})./1e6);
%DelayTime=0;
DT=1;
%Period=30;

mkdir(['..\..\ ' target]);
mkdir(['..\..\ ' target '\\Analysis']);
mkdir(['..\..\ ' target '\\RawData']);
for T=DT+DelayTime:Period:length(C{2})
    idx=find(T==sn);
    if(~isempty(idx))
        cmd=sprintf('copy %s.*.* ..\..\%s\\RawData',cell2mat(C{1})(idx)),target);
        %disp(cmd);
        system(cmd);
    end
endfor
```

Στη συνέχεια πάμε στο Insight 4G, στο Processing και πατάμε start και προκύπτουν τα Analysis για κάθε νέο Raw Data.

#### 4.2.5) Επεξεργασία των αρχείων

Για κάθε περίπτωση παίρνουμε από το Insight 4G μόνο τα Analysis και όχι τα Raw Data και τα αποθηκεύουμε σε ένα αρχείο. Ανοίγοντας ένα τέτοιο αρχείο βλέπουμε ότι στην πρώτη γραμμή υπάρχουν X, Y,V,U. Αφαιρώντας την πρώτη γραμμή και αντικαθιστώντας όλα τα κόμμα με τελείες αποθηκεύουμε σε μορφή text τα αρχεία μας σε ένα αρχείο το οποίο ονομάσαμε INPUT. Αυτά τα αρχεία τα επεξεργαζόμαστε με τη βοήθεια ενός προγράμματος σε γλώσσα Fortran.

```
DIMENSION VR (30, 50, 50),V(100),X(100)
C2  FORMAT(A20)
C***** INPUT DATA FROM PIV FOR 16 TIME INSTANTS*****
  OPEN(1,FILE='C:\AUNSTEADY\INPUT\T0.TXT')
  OPEN(2,FILE='C:\AUNSTEADY\INPUT\T1.TXT')
  OPEN(3,FILE='C:\AUNSTEADY\INPUT\T2.TXT')
  OPEN(4,FILE='C:\AUNSTEADY\INPUT\T3.TXT')
  OPEN(5,FILE='C:\AUNSTEADY\INPUT\T4.TXT')
  OPEN(6,FILE='C:\AUNSTEADY\INPUT\T5.TXT')
  OPEN(7,FILE='C:\AUNSTEADY\INPUT\T6.TXT')
  OPEN(8,FILE='C:\AUNSTEADY\INPUT\T7.TXT')
  OPEN(9,FILE='C:\AUNSTEADY\INPUT\T8.TXT')
  OPEN(10,FILE='C:\AUNSTEADY\INPUT\T9.TXT')
  OPEN(11,FILE='C:\AUNSTEADY\INPUT\T10.TXT')
  OPEN(12,FILE='C:\AUNSTEADY\INPUT\T11.TXT')
  OPEN(13,FILE='C:\AUNSTEADY\INPUT\T12.TXT')
  OPEN(14,FILE='C:\AUNSTEADY\INPUT\T13.TXT')
  OPEN(15,FILE='C:\AUNSTEADY\INPUT\T14.TXT')
  OPEN(16,FILE='C:\AUNSTEADY\INPUT\T15.TXT')
C***** OUTPUT DATA *****
  OPEN(30,FILE='C:\AUNSTEADY\OUTPUT\OUT0.DAT')
  OPEN(31,FILE='C:\AUNSTEADY\OUTPUT\OUT1.DAT')
  OPEN(32,FILE='C:\AUNSTEADY\OUTPUT\OUT2.DAT')
  OPEN(33,FILE='C:\AUNSTEADY\OUTPUT\OUT3.DAT')
  OPEN(34,FILE='C:\AUNSTEADY\OUTPUT\OUT4.DAT')
  OPEN(35,FILE='C:\AUNSTEADY\OUTPUT\OUT5.DAT')
  OPEN(36,FILE='C:\AUNSTEADY\OUTPUT\OUT6.DAT')
  OPEN(37,FILE='C:\AUNSTEADY\OUTPUT\OUT7.DAT')
  OPEN(38,FILE='C:\AUNSTEADY\OUTPUT\OUT8.DAT')
  OPEN(39,FILE='C:\AUNSTEADY\OUTPUT\OUT9.DAT')
  OPEN(40,FILE='C:\AUNSTEADY\OUTPUT\OUT10.DAT')
  OPEN(41,FILE='C:\AUNSTEADY\OUTPUT\OUT11.DAT')
  OPEN(42,FILE='C:\AUNSTEADY\OUTPUT\OUT12.DAT')
  OPEN(43,FILE='C:\AUNSTEADY\OUTPUT\OUT13.DAT')
  OPEN(44,FILE='C:\AUNSTEADY\OUTPUT\OUT14.DAT')
  OPEN(45,FILE='C:\AUNSTEADY\OUTPUT\OUT15.DAT')
  OPEN(100,FILE='C:\AUNSTEADY\OUTPUT\AVERAGE.DAT')
C*****INPUT DATA FOR CALCULATIONS *****
  JSTART=1
  IST=1
```

```

SCALX=5.
  DT=40.
  DX=32.
  DY=32.
  I1=40
  J1=29
  ITOT=I1*J1
  KTOT=16
C**** Y IS THE VERTICAL AXIS PARALLEL TO THE MICROCHANNEL AXIS. UU IS ALONG THE
CHANNEL AXIS VELOCITY COMPONENT (parallel to y axis) *****
  M=29
*****READ DATA FROM PIV FILE *****
  DO 10 K=1,KTOT
    DO 10 I=1,ITOT
      READ(K,*) XX,YY,VV,UU,CON
      II=INT(XX/DX)
      JJ=INT(YY/DY)+1
      VR(K,II,JJ)=UU
10  CONTINUE
C*****
C*****CONVERT original data to velocity ( mm/s)*****
  DO 200 K=1,KTOT
    M=M+1
  DO 20 I=IST,I1
    SUMV=0.
    MM=0
  DO 16 J=JSTART,J1
    IF(VR(K,I,J).GT.1000.) GOTO 16
    MM=MM+1
    SUMV=SUMV+VR(K,I,J)
16  CONTINUE
    IF(MM.EQ.0) THEN
      V(I)=0.
      GOTO 20
    ENDIF
    V(I)=1000.*SUMV/(MM*DT*SCALX)
20  CONTINUE
C*****
C*****READ X and U in a file *****
  X(1)=0.
  DO 25 I=1,I1-1
    X(I+1)=X(I)+DX/SCALX
25  CONTINUE
  SUMV=0.
  K1=0
  DO 30 I=1,I1
    IF((X(I).LT.90.).OR.(X(I).GT.210.)) GOTO 30
    K1=K1+1
    X(I)=X(I)-96
    WRITE(M,*) X(I),V(I)
    SUMV=SUMV+V(I)

```

```

30 CONTINUE
C*****
C*****CALCULATE MEAN VELOCITY FOR A GIVEN PHASE OF THE PERIOD ****
      SVMEAN=SUMV/K1
      WRITE(100,*) K,SVMEAN
200 CONTINUE
C***** END OF LOOP *****8
      STOP
      END

```

Αρχικά το πρόγραμμα δέχεται από το INPUT τα δεδομένα και αποθηκεύει τα αποτελέσματα στο OUTPUT και στο AVERAGE. Δέχεται τις παρακάτω τιμές για να κάνει τους υπολογισμούς που χρειάζεται.

SCAL=5 τα 5 pixel αντιστοιχούν σε 1μm  
DT =40 μs χρόνος που αντιστοιχεί στις δύο " αναλαμπές " του laser  
DX=32 pixel  
DY=32 pixel  
I1=40  
J1=29  
KTOT=16 περίοδος μετρήσεων  
MM αριθμός "καλών" ταχυτήτων  
Στη συνέχεια διαβάζει τα X, Y,V,U διαιρεί τα X με DX και με SCAL γιατί θέλουμε να μετατρέψουμε τα pixel σε μm. Υπολογίζει την ταχύτητα σε mm/sec για κάθε J1. Τέλος υπολογίζει την μέση τιμή της ταχύτητας όλων των προφίλ (δηλαδή των 29 προφίλ) και την μέση τιμή της ταχύτητας του τελικού.

#### 4.3) Προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων

##### 4.3.1) Προσδιορισμός της θέσης της μικρής βάσης

Κατά την πραγματοποίηση των μετρήσεων με την μέθοδο micro P.I.V. έπρεπε να προσδιοριστεί ένα σημείο αναφοράς. Ως σημείο αναφοράς ορίστηκε η μικρή βάση του τραπεζίου. Λόγω κάποιων ασαφειών επιλέχθηκε να μην θεωρήσουμε την μεγάλη βάση ως σημείο αναφοράς καθώς είχαμε μεγαλύτερη αβεβαιότητα για τον προσδιορισμό της. Επομένως, **ως βάθος για την πραγματοποίηση των μετρήσεων (βάθος μέτρησης) ορίζεται η απόσταση από την μικρή βάση του τραπεζίου.** Ανάλογες δυσκολίες προσδιορισμού του ύψους των καναλιών έχουν αναφερθεί στην βιβλιογραφία όπως για παράδειγμα στην εργασία των Choi et al. (2003)

##### 4.3.2) Προσδιορισμός της παροχής από την οποία ξεκινούν οι μετρήσεις

Κατά την εκτέλεση των μετρήσεων παραλείψαμε να συγχρονίσουμε το capture με το trigger. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα τα να μην είναι ίδια η παροχή εκκίνησης των μετρήσεων μας.

#### 4.4) Υπολογισμοί των παραμέτρων της ροής

Το κανάλι που χρησιμοποιούμε στο πείραμα μας είναι τραπεζοειδές.

Μεγάλη πλευρά :200μm

Μικρή πλευρά :24μm

Ύψος : 130μm

Φέρνοντας κάθετη από την άκρη της πλευρά της μικρής βάσης σχηματίζεται τρίγωνο. Η κάθετη αυτή πλευρά θα είναι το ύψος του τραπεζιού και η άλλη πλευρά θα έχει μήκος

$$\frac{\text{Μεγάληβάση} - \text{Μικρήβάση}}{2} = \frac{200\mu\text{m} - 24\mu\text{m}}{2} = 88\mu\text{m}$$

Οπότε η εφαπτομένη της γωνίας  $\theta$  θα είναι

$$\tan \theta = \frac{130}{88} = 1,477272$$

και η γωνία  $\theta=55,9^\circ$ .

Η διαγώνια – υποτείνουσα του τριγώνου θα είναι

$$d = \sqrt{88^2 + 130^2} = 156,9\mu\text{m}$$

Επομένως η περίμετρος θα είναι

$$P = 2d + B + b = 2 \cdot 156,9 + 200 + 24 = 537,9\mu\text{m}$$

Και η διατομή έχει εμβαδόν:

$$A = \frac{B+b}{2} h = \frac{200+24}{2} 130 = 1,45 \cdot 10^{-8} m^2$$

Η παροχή κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 20μL/min και 40μL/min.

Άρα η μέση ταχύτητα του ρευστού είναι το πηλίκο της παροχής όγκου (20μL/min) προς το εμβαδόν της διατομής

$$u = \frac{Q}{A} = \frac{0,333 \cdot 10^{-9}}{1,45 \cdot 10^{-8}} = 0,0229 \frac{m}{s} = 22,9 \frac{mm}{s}$$

Η υδραυλική διάμετρος θα είναι

$$D_h = \frac{4A}{P} = \frac{4 \cdot 1,45 \cdot 10^{-8}}{537,9 \cdot 10^{-6}} = 0,0001078m$$

Και ο αριθμός Reynolds

$$Re = \frac{u \cdot D_h}{\nu} = \frac{0,0229 \cdot 0,0001078}{10^{-6}} = 2,4$$

Άρα η μέση ταχύτητα του ρευστού είναι το πηλίκο της παροχής όγκου (40μL/min) προς το εμβαδόν της διατομής

$$u = \frac{Q}{A} = \frac{0,666 \cdot 10^{-9}}{1,45 \cdot 10^{-8}} = 0,0459 \frac{m}{s} = 45,9 \frac{mm}{s}$$

Και ο αριθμός Reynolds

$$Re = \frac{u \cdot D_h}{\nu} = \frac{0,0459 \cdot 0,0001078}{10^{-6}} = 4,9$$

Η άλλη αδιάστατη παράμετρος που χαρακτηρίζει την ταλαντούμενη ροή σε αγωγό είναι ο αριθμός Stokes:

$\alpha = a \sqrt{\frac{\omega}{\nu}}$  όπου  $a$  είναι το μισό του εύρους του καναλιού και  $\nu$  είναι η κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού.

$$\text{Για } T=32\text{sec } \alpha = a \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} = 5,39 \cdot 10^{-5} \sqrt{\frac{2\pi}{32} \frac{1}{\nu}} = 0,02$$

$$\text{Για } T=16 \text{ sec } \alpha = a \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} = 5,39 \cdot 10^{-5} \sqrt{\frac{2\pi}{16} \frac{1}{\nu}} = 0,03$$

$$\text{Για } T=8\text{sec } \alpha = a \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} = 5,39 \cdot 10^{-5} \sqrt{\frac{2\pi}{16} \frac{1}{\nu}} = 0,05$$

## **Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 4**

CHEMYX ([www.chemyx.com](http://www.chemyx.com))

Insight 4G User's Guide

Olympus America ([www.olympusamerica.com](http://www.olympusamerica.com))

Operator's Manual Solo PIV Nd: YAG Laser

Tecplot User's Manual

TSI ([www.tsi.com](http://www.tsi.com))

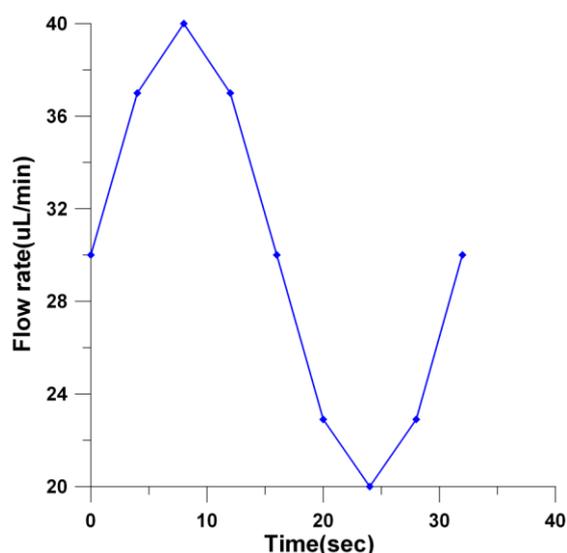
Choi, C.H., K.J.A. Westin, and K.S. Breuer, Apparent slip flows in hydrophilic and hydrophobic microchannels. *Physics of Fluids*, 2003. **15**(10): p. 2897-2902.

## Κεφάλαιο 5 : Αποτελέσματα

### 5.1) Αποτελέσματα μετρήσεων ταχυτήτων σε συγκεκριμένο βάθος του μικροκαναλιού ελέγχοντας την αντλία τύπου σύριγγας μέσω μικροελεγχτή

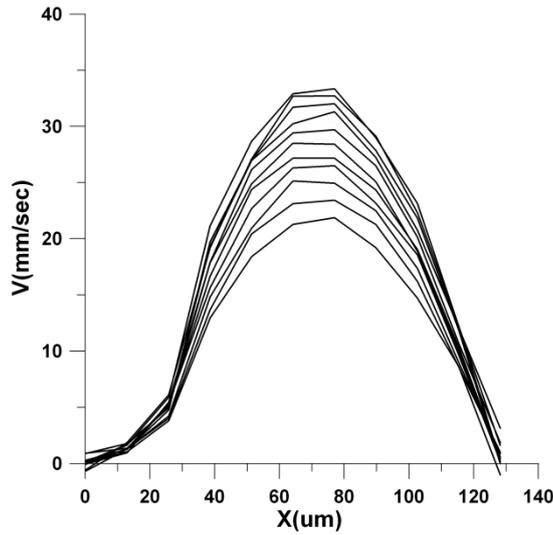
Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών που κάναμε προσπαθώντας να ελέγξουμε την αντλία τύπου σύριγγας μέσω μικροελεγχτή ώστε η παροχή να μετατραπεί από μόνιμη σε μη μόνιμη με επιθυμητό πλάτος. Για το λόγο αυτό μεταβάλλαμε την περίοδο από 32 sec έως 8 sec καθώς και το χρονικό διάστημα αλλαγής της παροχής από 1 sec έως 4 sec.

Στο Διάγραμμα 5.1 καθώς και στα Διαγράμματα 5.5, 5.9, 5.14, 5.18 που ακολουθούν παρουσιάζονται οι τιμές της παροχής και οι αντίστοιχες χρονικές στιγμές που εισάγουμε στο μικροελεγκτή (microcontroller) για την πραγματοποίηση των μετρήσεων.

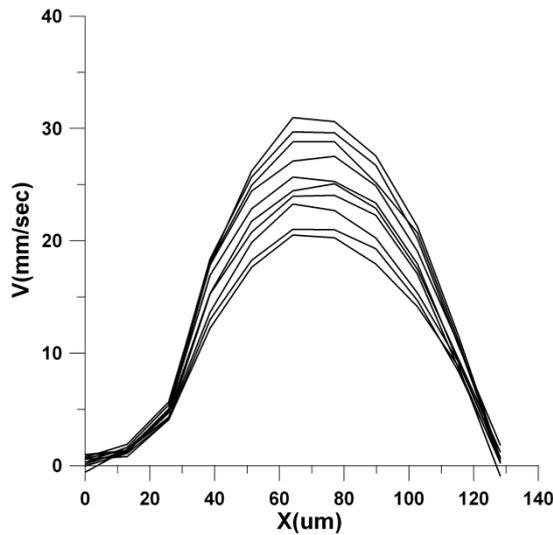


**Διάγραμμα 5.1:** Παροχή συναρτήσσει του χρόνου.

Ακολουθούν Διαγράμματα που παρουσιάζουν την φάση της επιτάχυνσης , της επιβράδυνσης και της μέσης τιμής της ταχύτητας για κάθε αλλαγή της περιόδου.

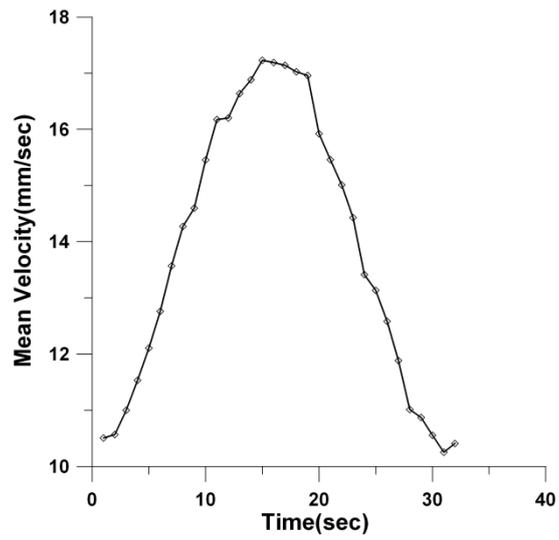


**Διάγραμμα 5.2:** Προφίλ ταχύτητας κατά την φάση της επιτάχυνσης. Περίοδος  $T= 32 \text{ sec}$  , Rate interval : 4 sec.

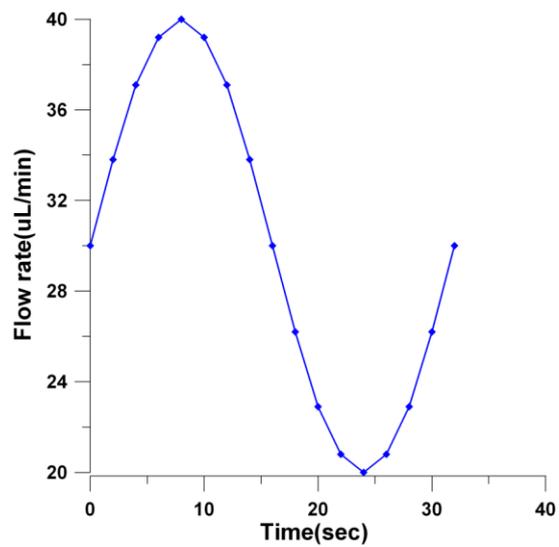


**Διάγραμμα 5.3:** Προφίλ ταχύτητας κατά την φάση της επιβράδυνσης. Περίοδος  $T= 32 \text{ sec}$  , Rate interval : 4 sec.

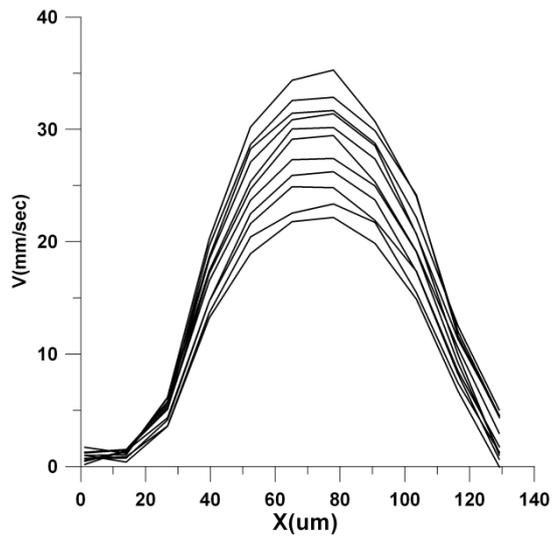
Στα Διαγράμματα 5.2 και 5.3 παρατηρούμε κάποια ασυμμετρία κοντά στο τοίχωμα του καναλιού που μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι το κανάλι δεν ήταν τοποθετημένο στο κέντρο παρατήρησης του φακού. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τον επηρεασμό των μετρούμενων ταχυτήτων από την περιοχή του καναλιού που ήταν εκτός του επιπέδου εστίασης (λόγω του λεγόμενου βάρους συσχέτισης).



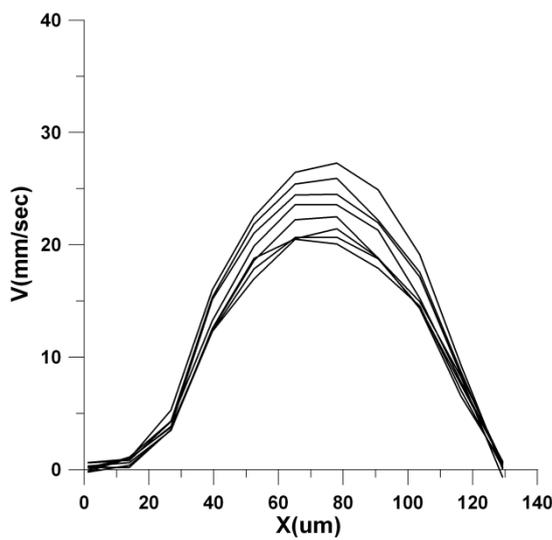
**Διάγραμμα 5.4:** Μέση τιμή ταχύτητας συναρτήσει της περιόδου.



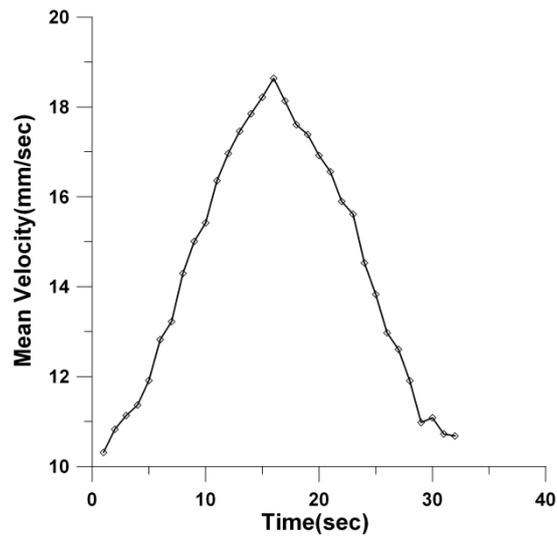
**Διάγραμμα 5.5:** Παροχή συναρτήσει του χρόνου.



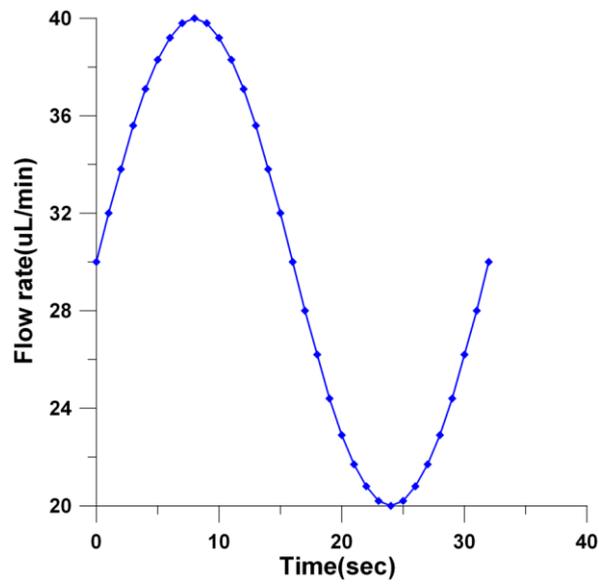
**Διάγραμμα 5.6:** Προφίλ ταχύτητας κατά την φάση της επιτάχυνσης. Περίοδος  $T= 32$  sec ,  
Rate interval : 2 sec.



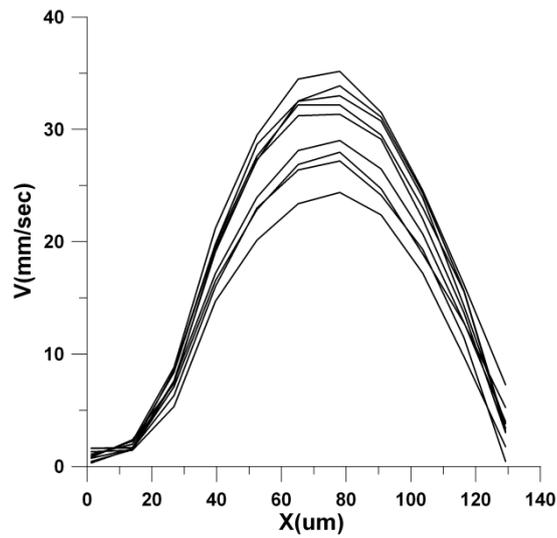
**Διάγραμμα 5.7:** Προφίλ ταχύτητας κατά την φάση της επιβράδυνσης. Περίοδος  $T= 32$  sec ,  
Rate interval : 2 sec.



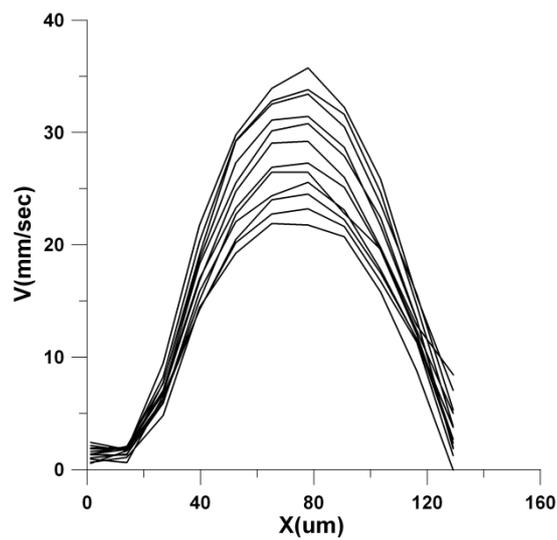
**Διάγραμμα 5.8:** Μέση τιμή ταχύτητας συναρτήσει της περιόδου.



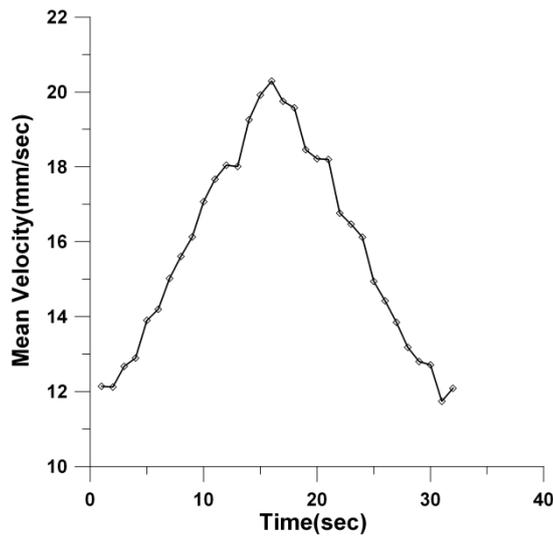
**Διάγραμμα 5.9:** Παροχή συναρτήσει του χρόνου.



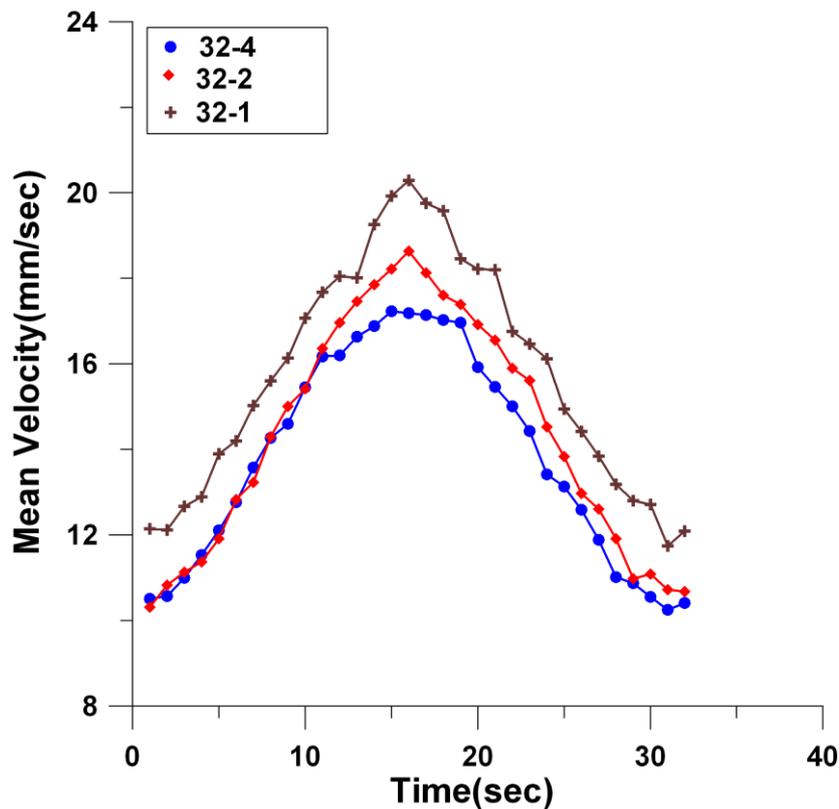
**Διάγραμμα 5.10:** Προφίλ ταχύτητας κατά την φάση της επιτάχυνσης. Περίοδος  $T= 32 \text{ sec}$  ,  
Rate interval : 1 sec



**Διάγραμμα 5.11:** Προφίλ ταχύτητας κατά την φάση της επιβράδυνσης. Περίοδος  $T= 32 \text{ sec}$  ,  
Rate interval : 1 sec

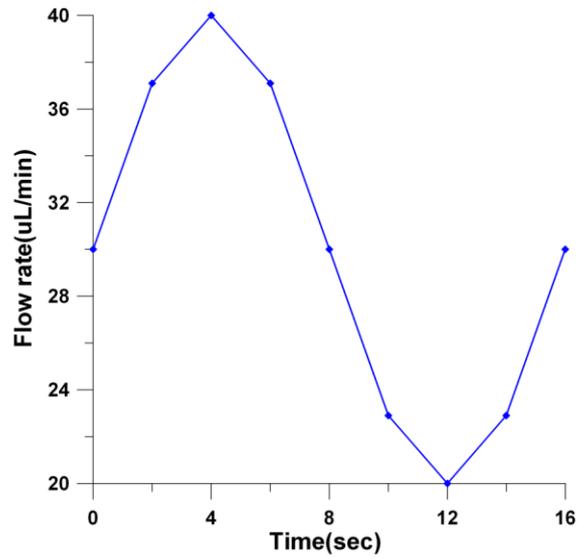


**Διάγραμμα 5.12:** Μέση τιμή ταχύτητας συναρτήσει της περιόδου.

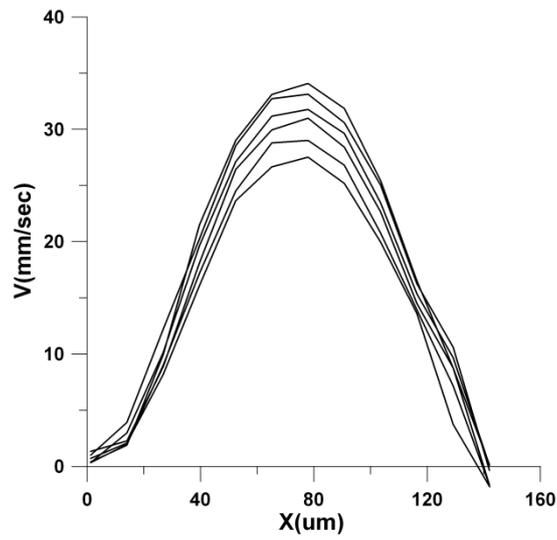


**Διάγραμμα 5.13:** Κατανομές ταχυτήτων για την ίδια περίοδο με διαφορετικό χρόνο υστέρησης.

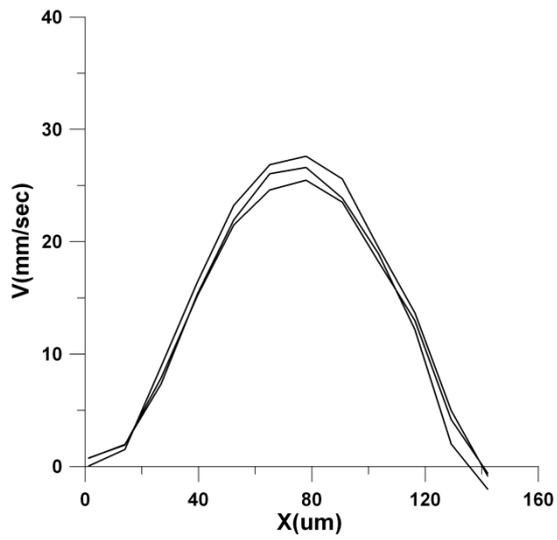
Παρατηρώντας το Διάγραμμα 5.13 βλέπουμε ότι η μεταβολή της παροχής σε σχέση με το χρόνο είναι πιο ομαλή στην περίπτωση 32-4 και στην 32-2 σε αντίθεση με την 32-1. Επίσης παρατηρούμε ότι χειροτερεύει προδευτικά η μέση καμπύλη της ταχύτητας όσο μικραίνει το διάστημα ενεργοποίησης της μικροαντλίας. Το πλάτος της ταχύτητας δεν μεταβάλλεται ιδιαίτερα.



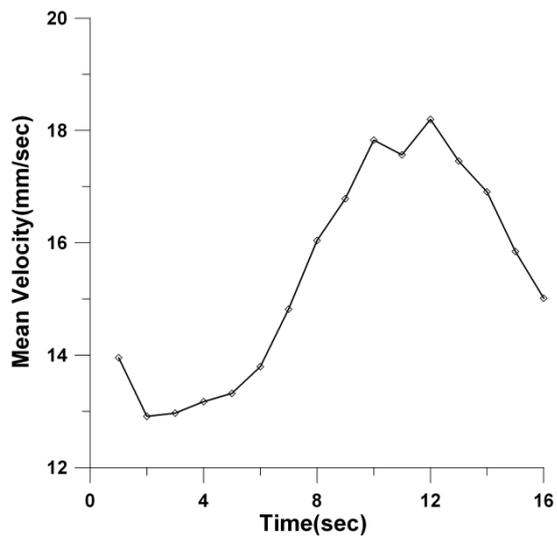
**Διάγραμμα 5.14:** Παροχή συναρτήσεις του χρόνου.



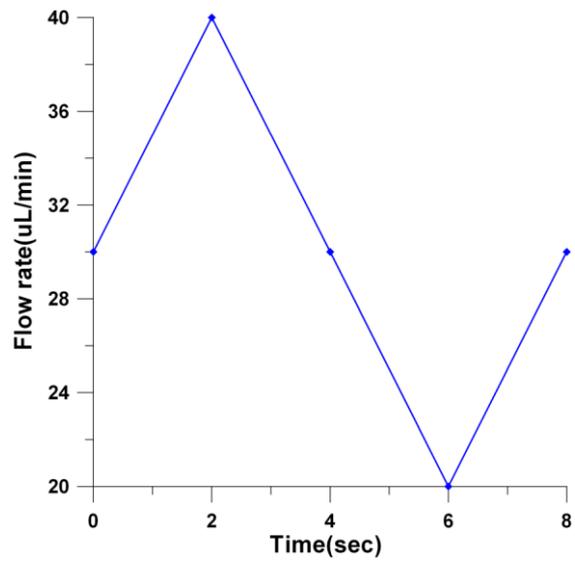
**Διάγραμμα 5.15:** Προφίλ ταχύτητας κατά την φάση της επιτάχυνσης. Περίοδος  $T=16$  sec , Rate interval : 2 sec



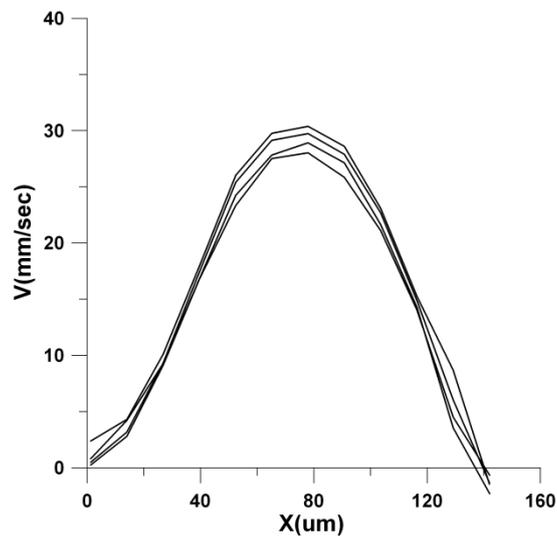
**Διάγραμμα 5.16:** Προφίλ ταχύτητας κατά την φάση της επιβράδυνσης. Περίοδος  $T=16$  sec , Rate interval : 2 sec



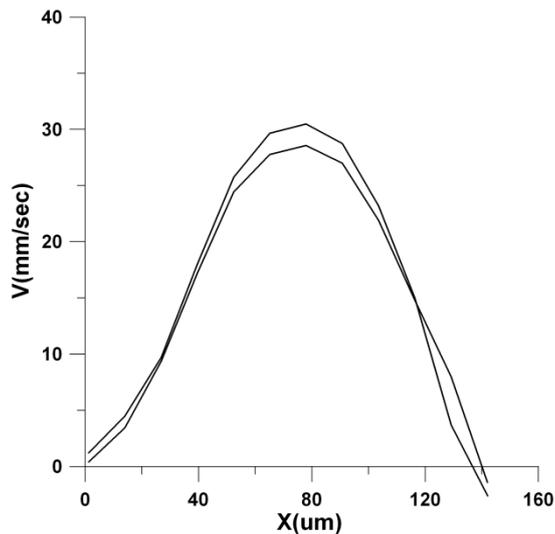
**Διάγραμμα 5.17:** Μέση τιμή ταχύτητας συναρτήσει της περιόδου.



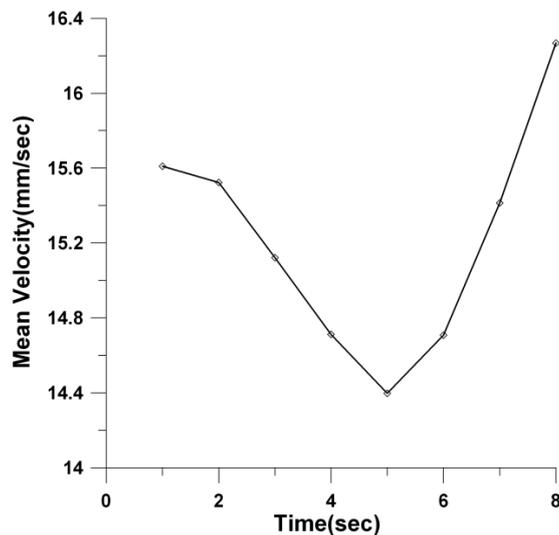
**Διάγραμμα 5.18:** Παροχή συναρτήσει του χρόνου.



**Διάγραμμα 5.19:** Προφίλ ταχύτητας κατά την φάση της επιτάχυνσης. Περίοδος  $T=8$  sec ,  
Rate interval : 2 sec



**Διάγραμμα 5.20:** Προφίλ ταχύτητας κατά την φάση της επιβράδυνσης. Περίοδος  $T=8$  sec , Rate interval : 2 sec

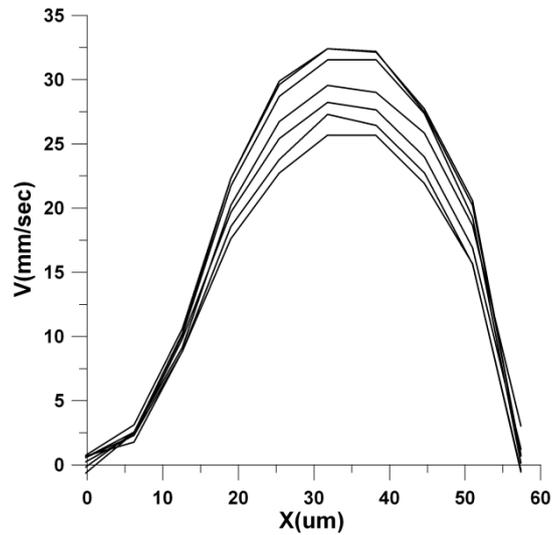


**Διάγραμμα 5.21:** Μέση τιμή ταχύτητας συναρτήσει της περιόδου.

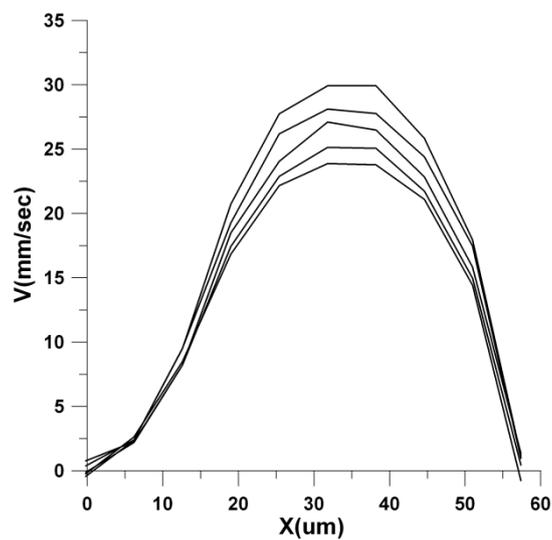
Στο Διάγραμμα 5.21 παρατηρούμε τη μέση τιμή της ταχύτητας συναρτήσει της περιόδου. Ο χρόνος ενεργοποίησης της αντλίας σε αυτή την περίπτωση είναι 2 sec, είναι πολύ μικρός, με αποτέλεσμα η τιμή της παροχής να μην προλαβαίνει να αλλάξει και αυτό προκύπτει απότομη αυτή καμπύλη.

Στη συνέχεια συγκρίνοντας τα Διαγράμματα 5.13, 5.17, 5.21 διαπιστώνουμε ότι το πλάτος της ταχύτητας μεταβάλλεται αρκετά. Ακόμη διαπιστώνουμε ότι δεν είναι δυνατόν να μελετήσουμε γρήγορες ροές με αυτόν τον τρόπο. Ένας τρόπος για να μελετήσουμε γρήγορες ροές θα ήταν να είχαμε έναν βηματικό κινητήρα τον οποίο θα τον ελέγαμε με έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή και μια σύριγγα μικρής διαμέτρου, έτσι ώστε σε μικρότερο διάστημα μεταβολής της παροχής με μικρότερη περίοδο το πλάτος της ταχύτητας να μην παρουσιάζει μεγάλες μεταβολές.

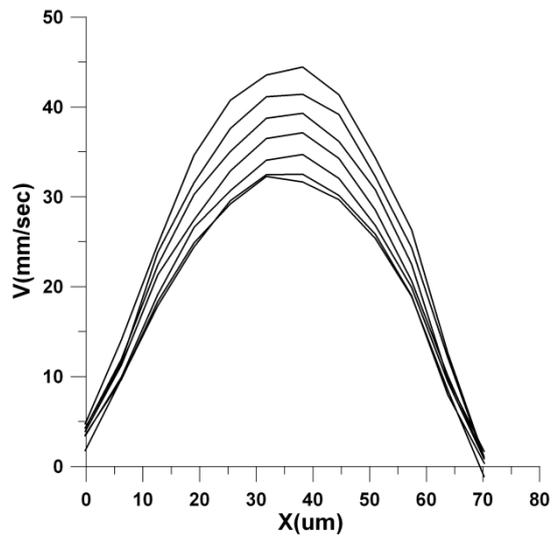
**5.2) Αποτελέσματα μετρήσεων ταχυτήτων για συνθήκες σταθερής περιόδου ( $T=16\text{sec}$ ) και καθυστέρησης ενεργοποίησης της μικροαντλίας (2sec) για διάφορα βάθη πραγματοποίησης των μετρήσεων.**



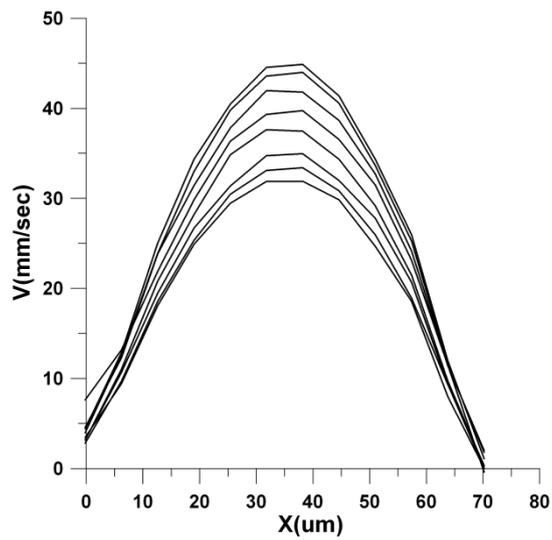
**Διάγραμμα 5.22 :** Προφίλ ταχύτητας κατά την φάση της επιτάχυνσης σε βάθος 33um με περίοδο 16 sec.



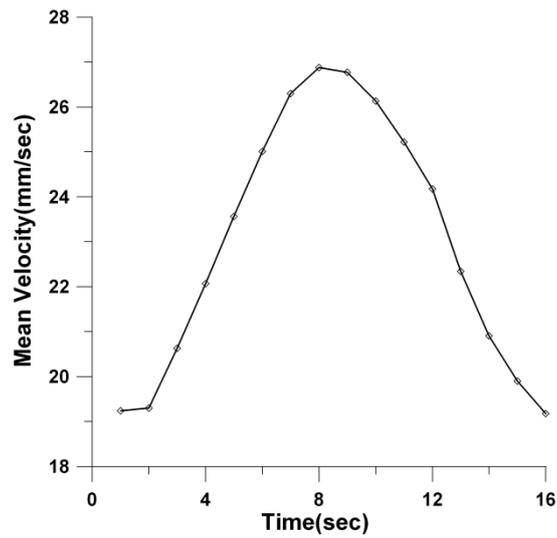
**Διάγραμμα 5.23:** Προφίλ ταχύτητας κατά την φάση της επιβράδυνσης σε βάθος 33um με περίοδο 16 sec.



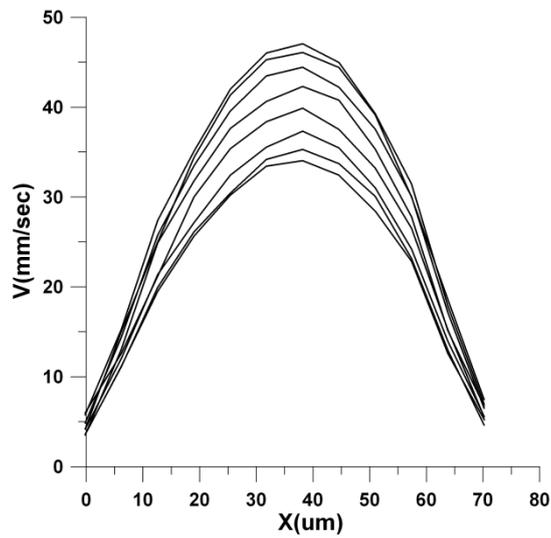
**Διάγραμμα 5.24:** Προφίλ ταχύτητας κατά την φάση της επιτάχυνσης σε βάθος 47um με περίοδο 16 sec.



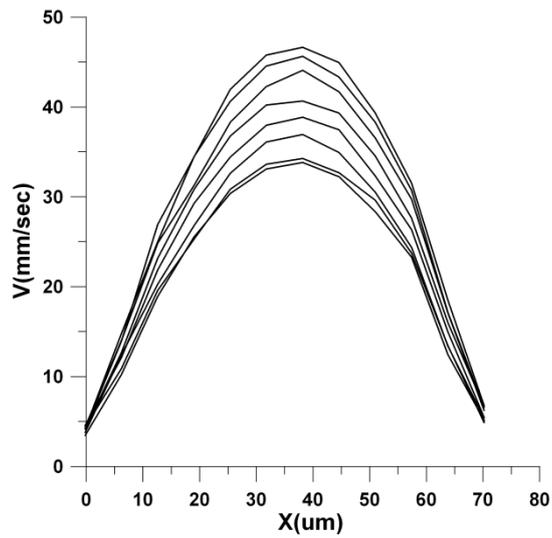
**Διάγραμμα 5.25:** Προφίλ ταχύτητας κατά την φάση της επιβράδυνσης σε βάθος 47um με περίοδο 16 sec.



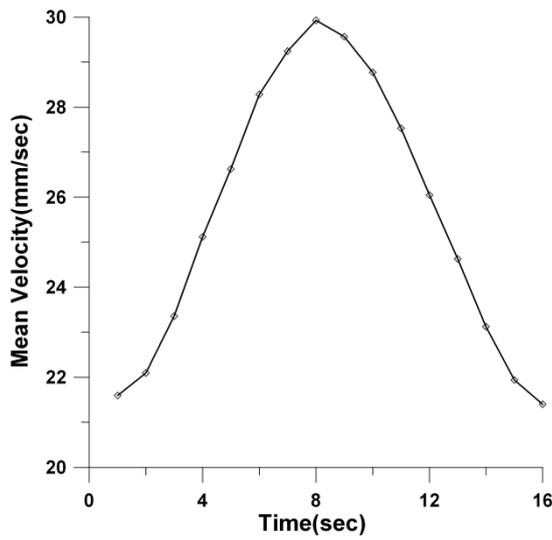
**Διάγραμμα 5.26:** Μέση τιμή ταχύτητας συναρτησει της περιόδου σε βάθος 47  $\mu\text{m}$ .



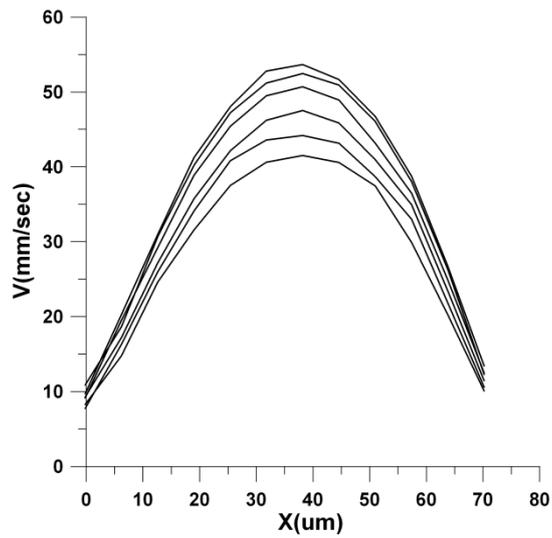
**Διάγραμμα 5.27:** Προφιλ ταχύτητας κατά την φάση της επιτάχυνσης σε βάθος 53 $\mu\text{m}$  με περίοδο 16 sec.



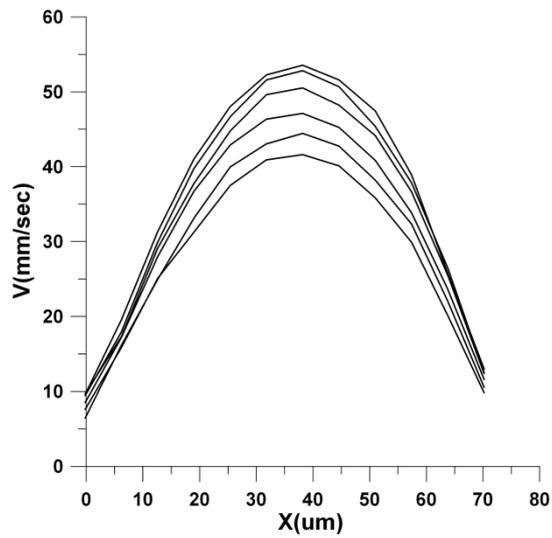
**Διάγραμμα 5.28:** Προφίλ ταχύτητας κατά την φάση της επιβράδυνσης σε βάθος 53um με περίοδο 16 sec.



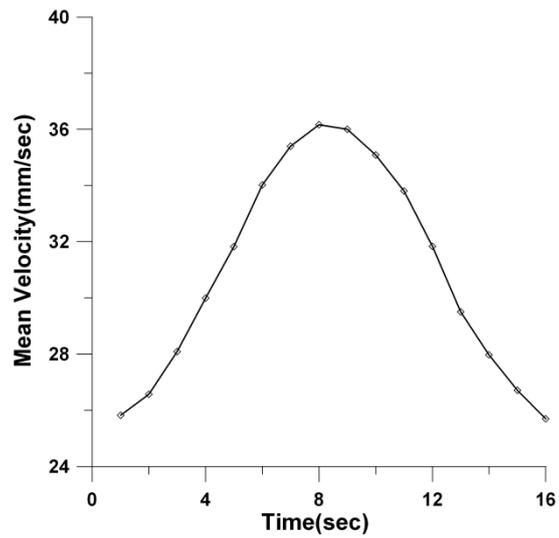
**Διάγραμμα 5.29:** Μέση τιμή ταχύτητας συναρτησει της περιόδου σε βάθος 53um.



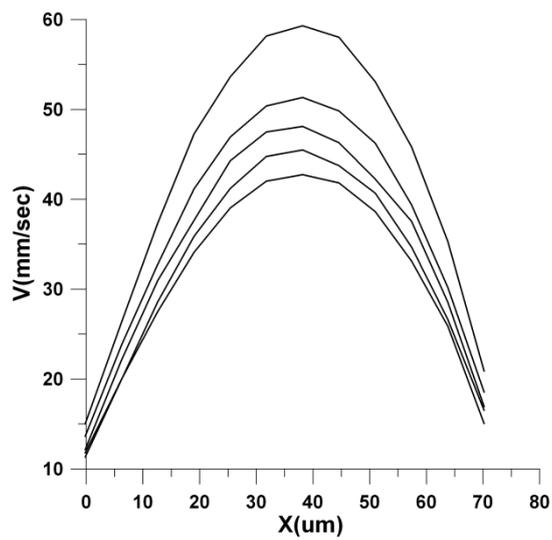
**Διάγραμμα 5.30:** Προφιλ ταχύτητας κατά την φάση της επιτάχυνσης σε βάθος 60um με περίοδο 16 sec.



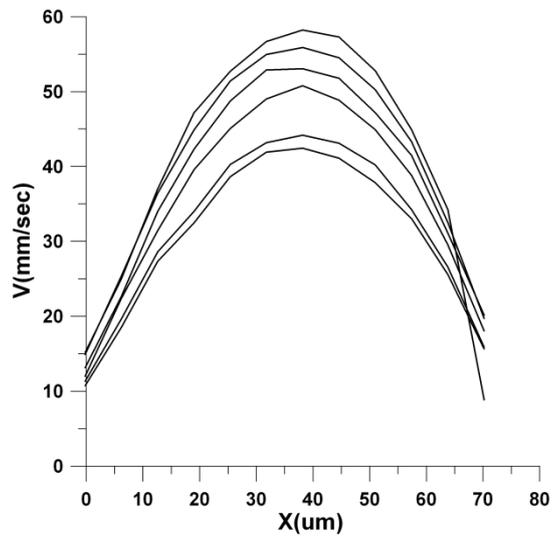
**Διάγραμμα 5.31:** Προφιλ ταχύτητας κατά την φάση της επιβράδυνσης σε βάθος 60um με περίοδο 16 sec.



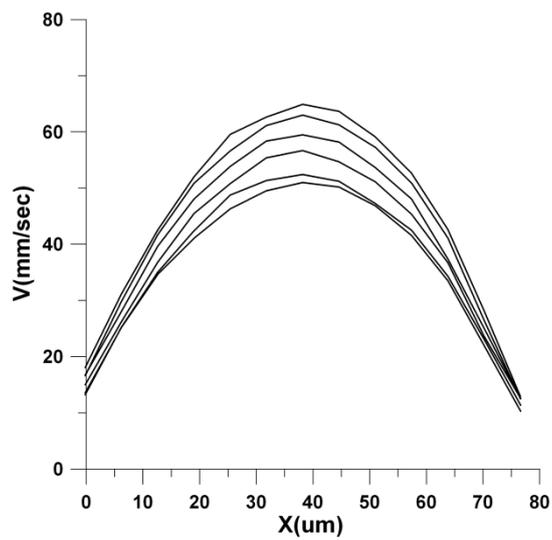
**Διάγραμμα 5.32:** Μέση τιμή ταχύτητας συναρτήσει της περιόδου σε βάθος 60μm.



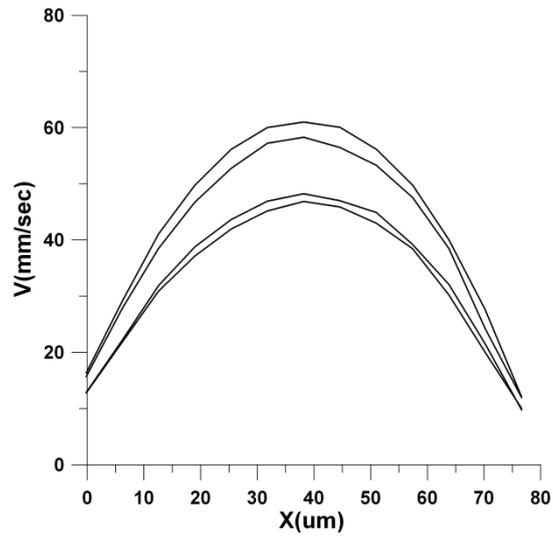
**Διάγραμμα 5.33:** Προφίλ ταχύτητας κατά την φάση της επιτάχυνσης σε βάθος 66 μm με περίοδο 16 sec.



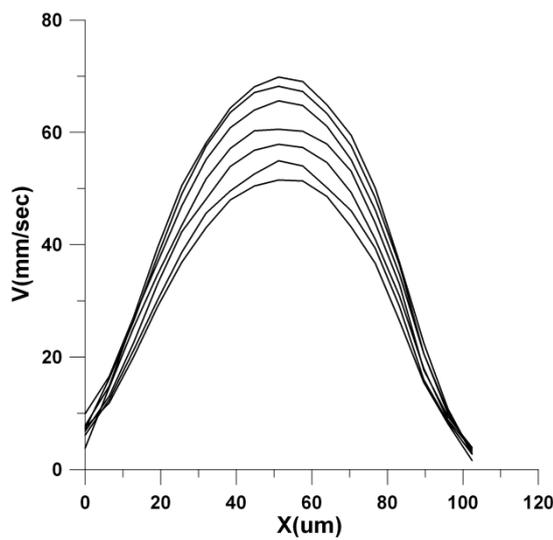
**Διάγραμμα 5.34:** Προφίλ ταχύτητας κατά την φάση της επιβράδυνσης σε βάθος 66um με περίοδο 16 sec.



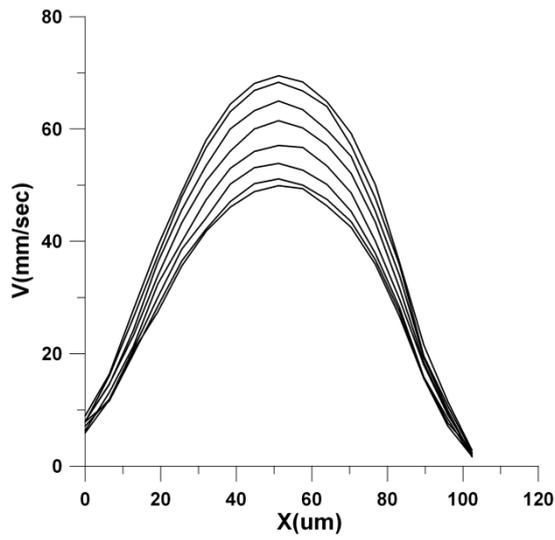
**Διάγραμμα 5.35:** Προφίλ ταχύτητας κατά την φάση της επιτάχυνσης σε βάθος 73um με περίοδο 16 sec.



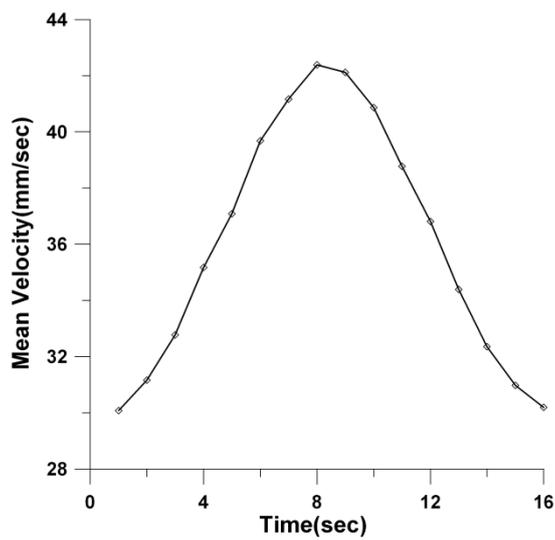
**Διάγραμμα 5.36:** Προφίλ ταχύτητας κατά την φάση της επιβράδυνσης σε βάθος 73um με περίοδο 16 sec.



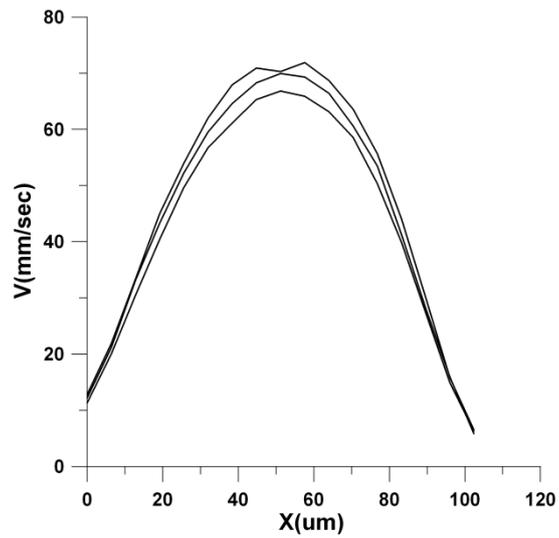
**Διάγραμμα 5.37:** Προφίλ ταχύτητας κατά την φάση της επιτάχυνσης σε βάθος 80um με περίοδο 16 sec.



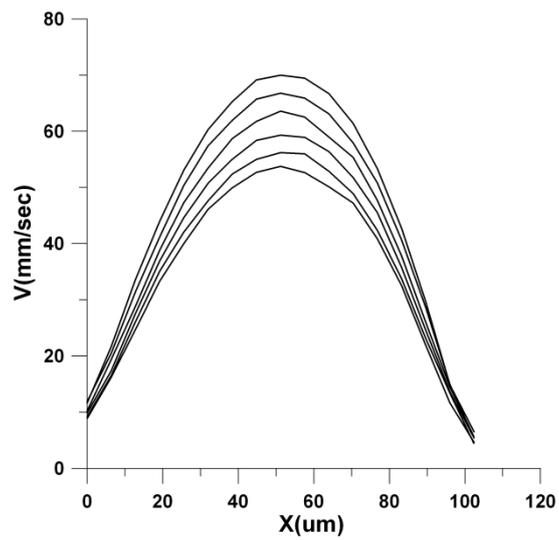
**Διάγραμμα 5.38:** Προφίλ ταχύτητας κατά την φάση της επιβράδυνσης σε βάθος 80 $\mu\text{m}$  με περίοδο 16 sec.



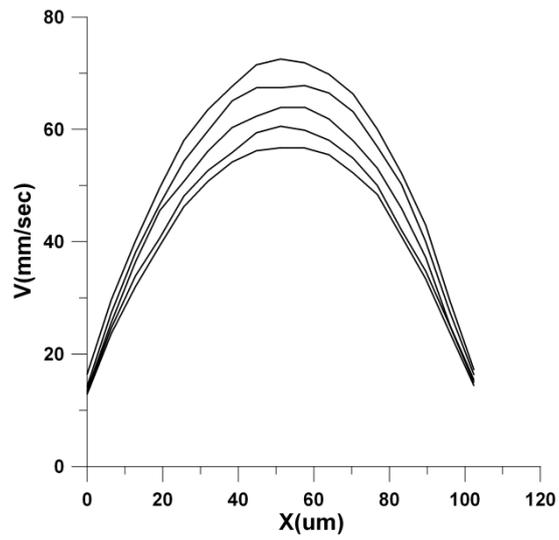
**Διάγραμμα 5.39:** Μέση τιμή ταχύτητας συναρτήσει της περιόδου σε βάθος 80 $\mu\text{m}$ .



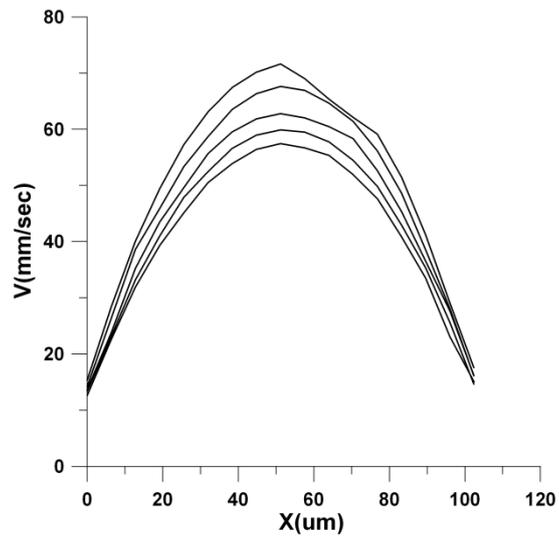
**Διάγραμμα 5.40:** Προφίλ ταχύτητας κατά την φάση της επιτάχυνσης σε βάθος 86um με περίοδο 16 sec.



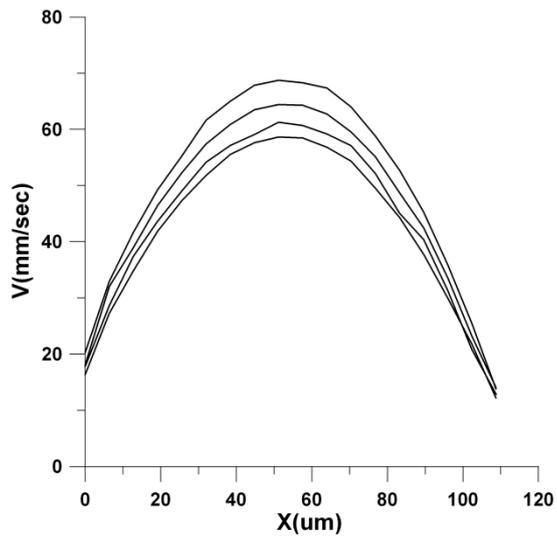
**Διάγραμμα 5.41:** Προφίλ ταχύτητας κατά την φάση της επιβράδυνσης σε βάθος 86um με περίοδο 16 sec.



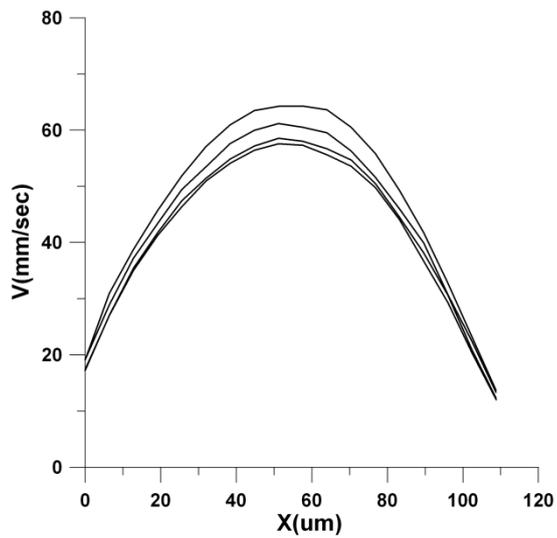
**Διάγραμμα 5.42:** Προφίλ ταχύτητας κατά την φάση της επιτάχυνσης σε βάθος 100um με περίοδο 16 sec.



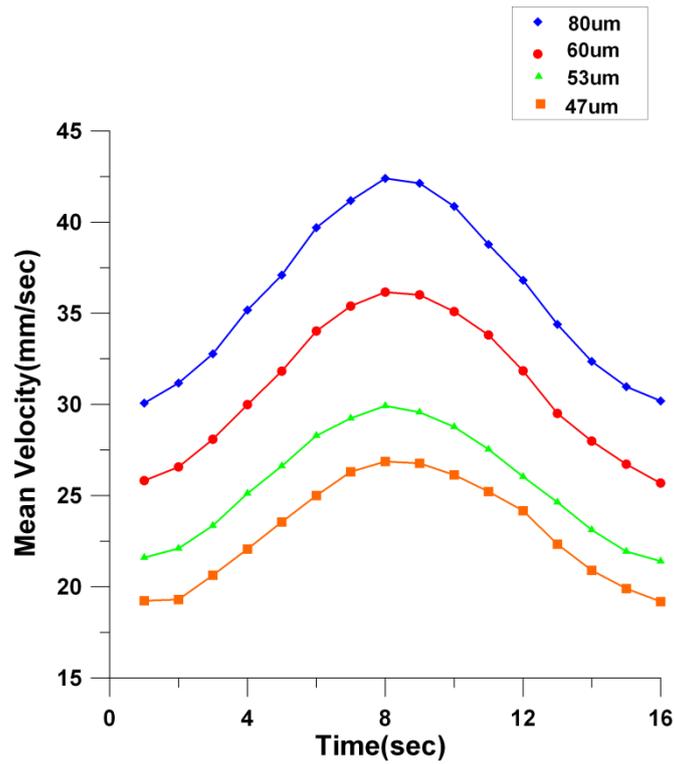
**Διάγραμμα 5.43:** Προφίλ ταχύτητας κατά την φάση της επιβράδυνσης σε βάθος 100um με περίοδο 16 sec.



**Διάγραμμα 5.44:** Προφίλ ταχύτητας κατά την φάση της επιτάχυνσης σε βάθος 106um με περίοδο 16 sec.

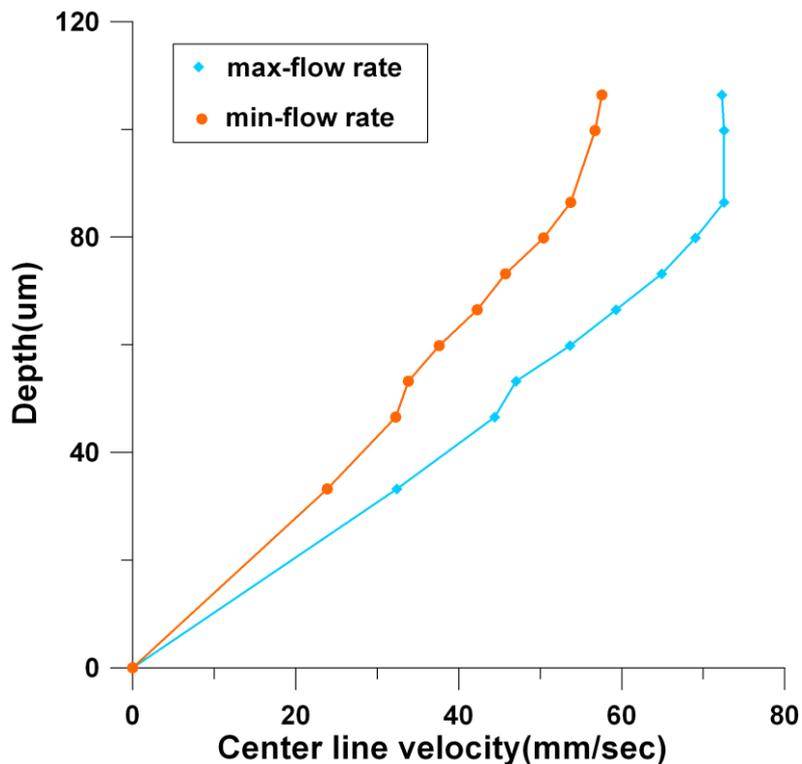


**Διάγραμμα 5.45:** Προφίλ ταχύτητας κατά την φάση της επιβράδυνσης σε βάθος 106um με περίοδο 16 sec.



**Διάγραμμα 5.46:** Στον κάθετο άξονα απεικονίζεται η μέση τιμή της ταχύτητας και στον οριζόντιο η περίοδος.

Από το Διάγραμμα 5.46 συμπαίρνουμε ότι ο ρυθμός με τον οποίο αλλάζει η παροχή είναι μεγαλύτερος καθώς απομακρυνόμαστε από τη μικρή βάση. Επίσης, η επιτάχυνση του ρευστού είναι πιο έντονη καθώς απομακρυνόμαστε από τη μικρή βάση.

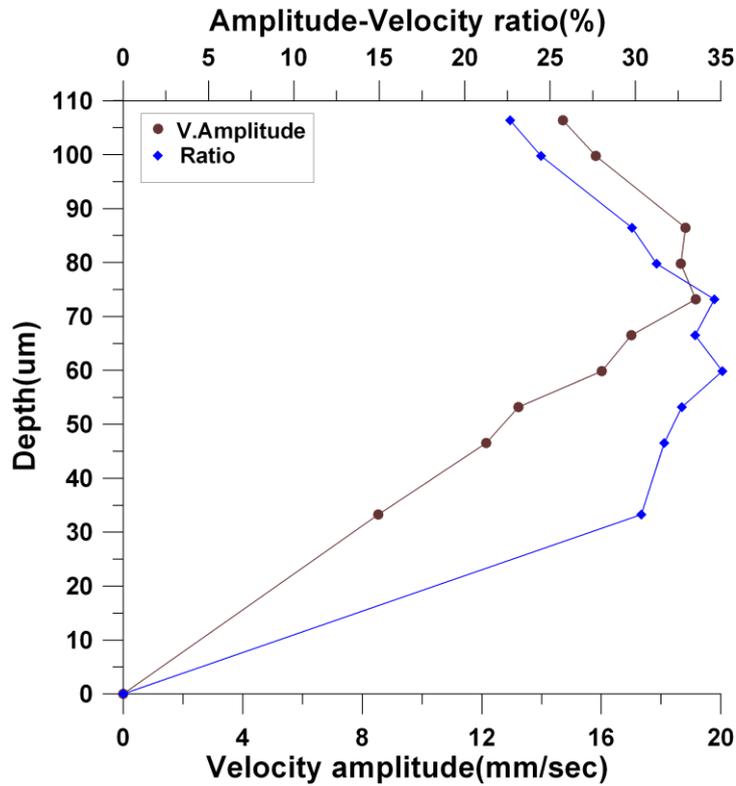


**Διάγραμμα 5.47:** Στον κάθετο άξονα απεικονίζεται το βάθος του καναλιού και στον οριζόντιο η τιμή της ταχύτητας στο κέντρο του καναλιού. Με πορτοκαλί απεικονίζεται η ελάχιστη τιμή και με γαλάζιο η μέγιστη τιμή της παροχής σε διαφορετικά βάθη.

Από το Διάγραμμα 5.47 θα αναμέναμε το μέγιστο της ταχύτητας να παρουσιάζοταν λίγο πιο πάνω από το μέσον του καναλιού περίπου στα 80  $\mu\text{m}$ , παρόλα αυτά στο παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε ότι εμφανίζεται περίπου στα 110  $\mu\text{m}$ . Το ίδιο συμβαίνει και για την μέγιστη και για την ελάχιστη παροχή. Η μορφή των καμπυλών είναι παρόμοια και φαίνεται να υπάρχει μια συνέπεια.

Τα τρία τελευταία σημεία των δύο καμπυλών δεν είναι ιδιαίτερα αντιπροσωπευτικά, διότι κατά την διάρκεια των υπολογισμών των ταχυτήτων παρουσιάστηκαν κάποια προβλήματα. Σε κάποιες φάσεις του κύκλου τα διανύσματα της ταχύτητας που προέκυψαν δεν ήταν συνεχόμενα και υπήρχαν κάποια κενά. Τα σφάλματα αυτά επηρεάζουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων μας. Θα περιμέναμε σε αυτά τα σημεία η ταχύτητα να αρχίσει να μειώνεται σταδιακά και όχι να αυξάνεται όπως βλέπουμε από τα σημεία αυτά.

Ο λόγος για τον οποίο παρατηρείται αυτή η φθίνουσα πορεία της ποιότητας των αποτελεσμάτων, πιθανόν να είναι η αλλοίωση των ιδιοτήτων του καναλιού με το χρόνο, καθώς επίσης και η συσσώρευση όλο και περισσότερων σωματιδίων στα τοιχώματα του καναλιού.

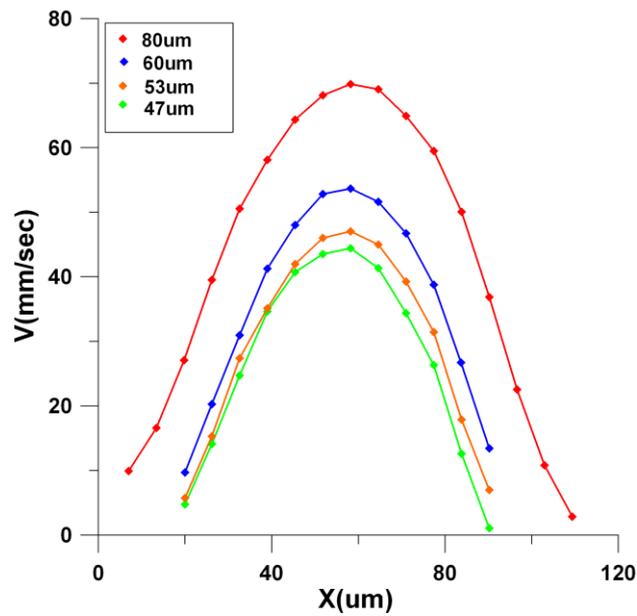


**Διάγραμμα 5.48:** Στον κάθετο άξονα απεικονίζεται το βάθος του καναλιού, στον επάνω οριζόντιο άξονα ο λόγος πλάτους μεταβολής της ταχύτητας προς τη μέση τιμή της και στον κάτω οριζόντιο το πλάτος της ταχύτητας.

Παρατηρούμε ότι ο λόγος πλάτους μεταβολής της ταχύτητας προς τη μέση τιμή της ταχύτητας παίρνει μικρές τιμές μεταξύ της μικρής πλευράς και του μέσου του βάθους του καναλιού. Καθώς κατευθυνόμαστε προς τη μεγάλη πλευρά ο λόγος αυτός προοδευτικά μειώνεται.

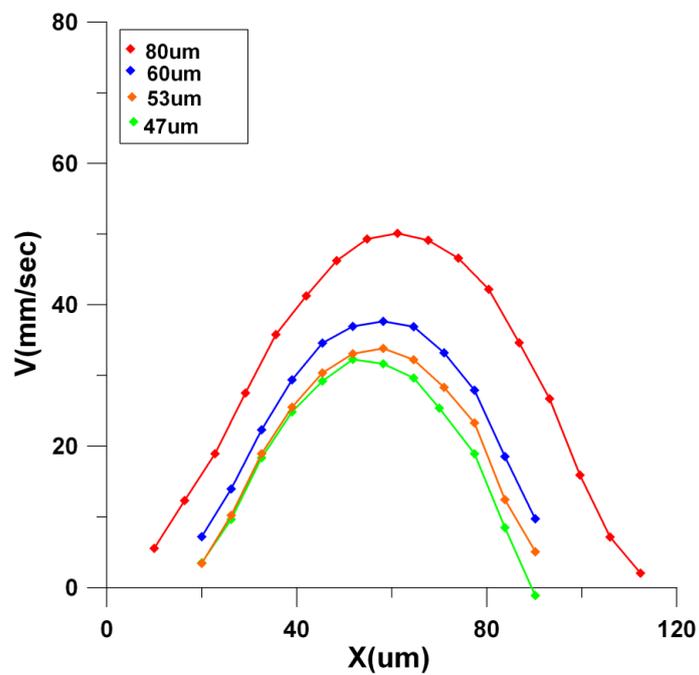
Παρόμοια συμπεριφορά με τον παραπάνω λόγο παρουσιάζει και το πλάτος μεταβολής της ταχύτητας. Το πλάτος αυξάνεται γραμμικά καθώς κατευθυνόμαστε από τη μικρή βάση μέχρι το μέσο του βάθους του καναλιού και μετά μειώνεται μέχρι να φθάσουμε στη μεγάλη πλευρά.

Παρόλο που στο Διάγραμμα 5.47 οι τιμές  $V_{max}$  και  $V_{min}$  για τα τρία τελευταία σημεία δεν είναι οι αναμενόμενες, στο Διάγραμμα 5.48 οι τιμές αυτές ανταποκρίνονται σε κάτι που περιμέναμε.



**Διάγραμμα 5.49:** Προφίλ μέγιστης ταχύτητας ως προς τον άξονα συμμετρίας του καναλιού.

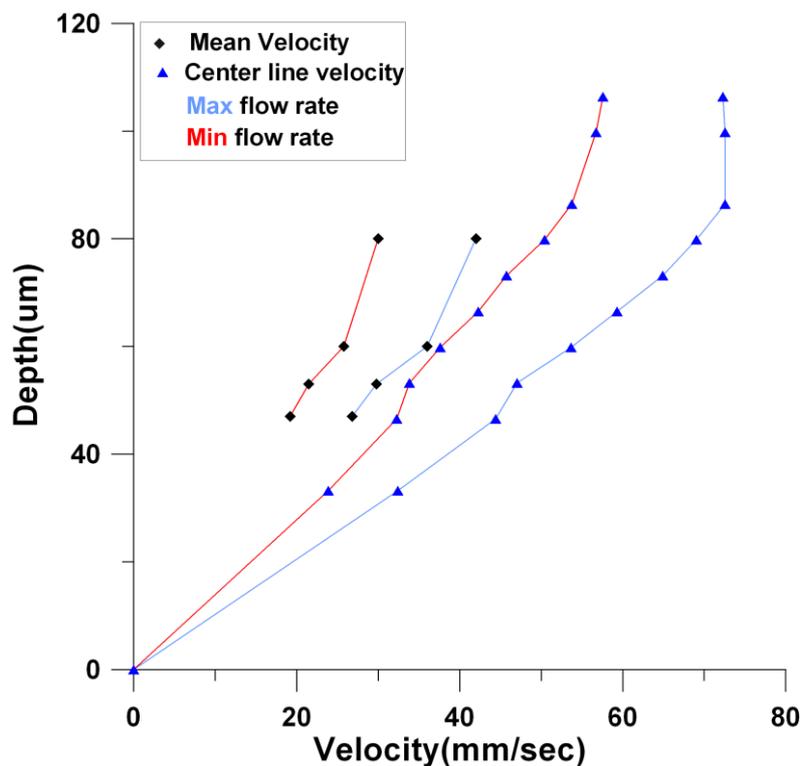
Από το Διάγραμμα 5.49 παρατηρούμε ότι καθώς το βάθος αυξάνεται μεγαλώνει και η μέγιστη ταχύτητα στην φάση της επιτάχυνσης.



**Διάγραμμα 5.50:** Προφίλ ελάχιστης ταχύτητας ως προς τον άξονα συμμετρίας του καναλιού.

Όπως και στην φάση της επιτάχυνσης έτσι και στην φάση της επιβράδυνσης καθώς το βάθος αυξάνεται μεγαλώνει και η ταχύτητα.

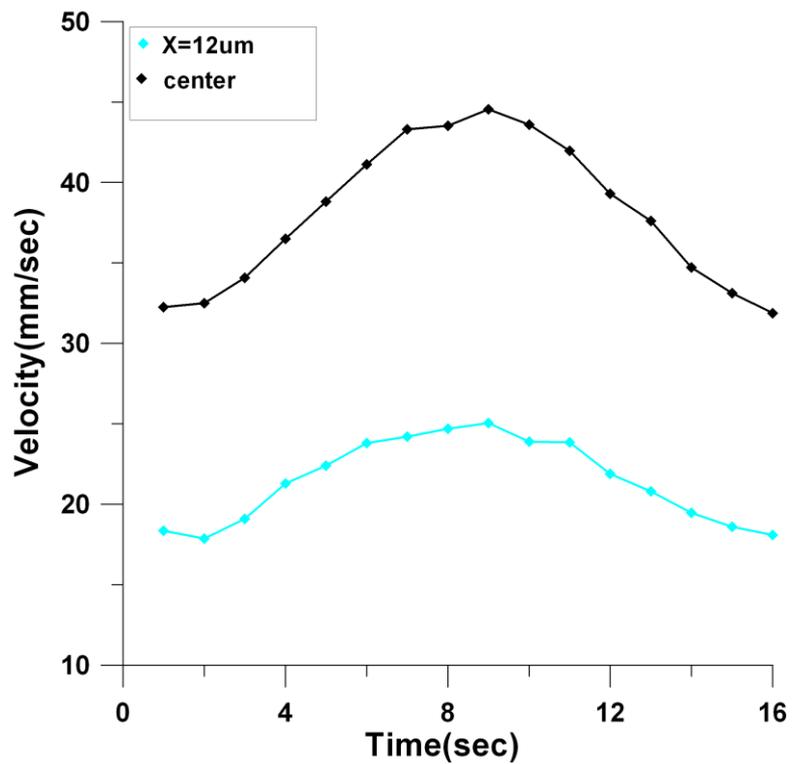
Συγκρίνοντας τα Διαγράμματα 5.49-5.50 προκύπτει ότι στη φάση της επιτάχυνσης ο λόγος  $du/dx$  που είναι η κλίση της καμπύλης γίνεται πιο έντονος για αυτό και η μορφή της καμπύλης είναι πιο απότομη. Σε αντίθεση, με τη φάση της επιβράδυνσης η καμπύλη είναι πιο ομαλή. Επίσης, διαπιστώνουμε ότι έχουμε μεγαλύτερες ταχύτητες στο κέντρο του καναλιού κάτι το οποίο είναι φυσιολογικό. Η μέγιστη ταχύτητα παρατηρείται λίγο μετά το μέσον του καναλιού επειδή το κανάλι μας είναι τραπεζοειδές.



**Διάγραμμα 5.51:** Προφίλ ταχύτητας συναρτήσεως του βάθους του καναλιού. Με μπλε φαίνεται η μέγιστη και με κόκκινη η ελάχιστη παροχή.

Οι δύο μικρές καμπύλες έχουν προκύψει από το Διάγραμμα 5.46 από το οποίο για κάθε βάθος έχουμε βρει τη  $V_{max}$  και  $V_{min}$ . Η κόκκινη γραμμή δείχνει την μέγιστη παροχή και η μπλε την ελάχιστη. Καθ' ύψος έχουμε πιο έντονες μεταβολές της ταχύτητας. Η κλίση είναι πιο έντονη για τη μέγιστη παροχή. Εντωμεταξύ το προφίλ στην ελάχιστη παροχή είναι πιο ομοιόμορφο από ότι στη μέγιστη. Η ταχύτητα στο κέντρο του καναλιού είναι 1,7 της μέσης ταχύτητας.

Σε ροή σε κυλινδρικό σωλήνα ο λόγος της ταχύτητας που παρουσιάζεται στο κέντρο του σωλήνα προς τη μέση ταχύτητα είναι 2. Σε προηγούμενα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο διαπιστώθηκε ότι για μόνιμη ροή μεταξύ δύο παράλληλων επίπεδων πλακών ο λόγος αυτός είναι 1,5.



**Διάγραμμα 5.52:** Προφίλ ταχύτητας συναρτήσει της περιόδου

Για συγκεκριμένο βάθος του καναλιού (47  $\mu\text{m}$ ) απεικονίζεται στο Διάγραμμα 5.52 η ταχύτητα συναρτήσει του χρόνου στο κέντρο του καναλιού (μαύρη καμπύλη) και κοντά στον τοίχο  $X=12 \mu\text{m}$  (γαλάζια καμπύλη). Συγκρίνοντας τις δύο καμπύλες προκύπτει ότι δεν υπάρχει διαφορά φάσης μεταξύ τους.

## Συμπεράσματα

Για την πρώτη σειρά μετρήσεων ταχυτήτων σε συγκεκριμένο βάθος του καναλιού, μειώνοντας το χρονικό διάστημα μεταξύ δυο διαδοχικών ενεργοποιήσεων της αντλίας μέσω του μικροελεγκτή, παρατηρούμε ότι γίνεται λιγότερο ομαλή η καμπύλη της μέσης χωρικά ταχύτητας συναρτήσει του χρόνου. Ακόμη, διαπιστώνουμε ότι δεν είναι δυνατόν να μελετήσουμε γρήγορες ροές με τον τρόπο αυτό διότι το πλάτος της παροχής μειώνεται όσο μειώνεται η περίοδος δεδομένου ότι η μεταβολή της παροχής κάθε φορά που ενεργοποιείται η μικροαντλία από τον μικροελεγκτή είναι αρκετά μικρότερη από την απαιτούμενη. Ένας τρόπος επίλυσης του προβλήματος αυτού θα ήταν η χρήση βηματικού κινητήρα του οποίου θα έχουμε τη δυνατότητα ελέγχου της επιτάχυνσής του.

Για την δεύτερη σειρά μετρήσεων ταχυτήτων για συνθήκες ημιτοειδώς μεταβαλλόμενης παροχής περιόδου  $T=16\text{sec}$  και ενεργοποίησης της μικροαντλίας κάθε  $2\text{sec}$  μετρώντας σε διάφορα βάθη διαπιστώνουμε ότι:

- 1) δεν παρουσιάζονται στο πεδίο ταχυτήτων διαφορές φάσης μεταξύ της περιοχής κοντά στον τοίχο και το κέντρο του καναλιού λόγω του μικρού αριθμού Womersley ( $<1$ )
- 2) η μέση χωρικά ταχύτητα μεγιστοποιείται λίγο μετά το μέσον του βάθους του καναλιού (προς την μεγαλύτερη πλευρά της τραπεζοειδούς διατομής)
- 3) Το πλάτος της ταχύτητας καθώς και ο λόγος του πλάτους της ταχύτητας προς τη μέση ταχύτητα μεγιστοποιούνται περί το μέσον του βάθους του καναλιού, όπου ο παραπάνω λόγος παίρνει μέγιστη τιμή 32%.
- 4) Ο λόγος της μέγιστης ταχύτητας προς την μέση ταχύτητα σε κάθε βάθος είναι περίπου 1.7. Σημειώνεται ότι στο ίδιο κανάλι υπό συνθήκες μόνιμης ροής ο λόγος αυτός ήταν 1.5 (όπως συμβαίνει στη μόνιμη ροή μεταξύ παράλληλων επιπέδων πλακών) για υπερυδρόφιλο κανάλι ανεξαρτήτως του βάθους ενώ για το υπερυδρόφιλο ο λόγος αυτός μεταβαλλόταν με το βάθος παίρνοντας τιμές μεταξύ 1.3 και 1.5.