



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΥΔΡΟΦΙΛΕΣ ΚΑΙ  
ΥΔΡΟΦΟΒΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΜΙΚΡΟΚΑΝΑΛΙΩΝ ΜΕ  
ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ *micro-PIV***

**ΓΛΥΝΟΥ ΑΣΗΜΙΝΑ**

**Επιβλέπων: Δ.Σ. ΜΑΘΙΟΥΛΑΚΗΣ**

**Αναπληρωτής Καθηγητής**

**Αθήνα, 2012**

## Πρόλογος

Είναι γνωστό ότι η ροή του νερού σε κανάλια, ή αλλιώς ροή Poiseuille, αποτελεί από τη σκοπιά της κλασσικής ρευστομηχανικής περίπτωση ασυμπίεστης ροής νευτωνίου ρευστού. Το παρόν θέμα ωστόσο, παρουσιάζει αρκετές διαφοροποιήσεις εξαιτίας δύο παραγόντων, οι οποίοι έχουν αποτελέσει έντονο αντικείμενο έρευνας τις τελευταίες δεκαετίες: της διαφορετικής κλίμακας στην οποία εξετάζεται η ροή του νερού, δηλαδή της *μικροκλίμακας*, και των ιδιαιτεροτήτων που χαρακτηρίζουν επιφάνειες διαφορετικής *διαβρεκτικής συμπεριφοράς*, όπως είναι οι υδρόφιλες και οι υδρόφοβες επιφάνειες.

Η ανάπτυξη μεθόδων τροποποίησης των διαβρεκτικών ιδιοτήτων μίας επιφάνειας, με σκοπό την εκδήλωση από μέρους της “εχθρικής” συμπεριφοράς στην εξάπλωση του νερού πάνω σε αυτή είναι ένας τομέας που αναπτύσσεται με έντονους ρυθμούς, λόγω της μειωμένης αντίστασης της τριβής που ασκείται στο ρευστό κατά τη ροή του πάνω σε αυτές. Ο λόγος για το φαινόμενο αυτό, είναι η *ολίσθηση της ροής* που λαμβάνει χώρα στις επιφάνειες αυτές.

Το φαινόμενο της ολίσθησης της ροής έχει διαπιστωθεί πειραματικά ότι ισχύει για τις επιφάνειες που παρουσιάζουν υδροφοβική ή και υπέρ-υδροφοβική συμπεριφορά, ενώ έχει εξετασθεί και ο μηχανισμός της δημιουργίας του. Από την άλλη πλευρά οι υδρόφιλες επιφάνειες φαίνεται να ακολουθούν την τάση της κλασσικής μηχανικής, με την συνθήκη μη-ολίσθησης να είναι έγκυρη για την περίπτωσή τους.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η ροή διαμέσου μικροκαναλιών τα οποία είναι υδρόφοβα, υδρόφιλα υπέρ-υδρόφοβα και υπέρ-υδρόφιλα, με στόχο την παρατήρηση των διαφορών που σημειώνονται. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η πειραματική διάταξη *micro-PIV*, μία μη-επεμβατική μέθοδος υπολογισμού των προφίλ της ταχύτητας σε ροές μικροκλίμακας, που τέθηκε σε λειτουργία για πρώτη φορά κατά την διεξαγωγή της διπλωματικής μου εργασίας. Έτσι πέρα από την κατανόηση της δομής των επιφανειών ιδιαίτερων διαβρεκτικών χαρακτηριστικών, η εξοικείωση με μία τέτοια διάταξη ήταν απαραίτητη.

Στο πρώτο κεφάλαιο, παρατίθενται οι βασικές έννοιες και σχέσεις που διέπουν την μηχανική των ρευστών από την κλασσική της θεώρηση έως τις περιπτώσεις μικροροών, όπου τα φαινόμενα που συντελούνται, είναι διαφορετικά. Έτσι περιγράφονται τα χαρακτηριστικά μικροροών, το είδος της ροής που παρατηρείται, καθώς επίσης και τα προφίλ της ταχύτητας που προκύπτουν για ολίσθηση είτε μη-ολίσθηση της ροής.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται εκτενής μελέτη της σημασίας της διαβροχής και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της. Αναλύεται η μαθηματική έκφραση της διαβροχής, με σκοπό να γίνουν κατανοητές οι διαφορές μεταξύ υδρόφιλων και υδρόφοβων επιφανειών. Στη συνέχεια δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην περιγραφή των

χαρακτηριστικών των υπέρ-υδρόφοβων επιφανειών που συγκεντρώνουν εξάλλου και το μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Τέλος περιγράφεται ο μηχανισμός ολίσθησης της ροής τόσο σε υδρόφοβες όσο και σε υπέρ-υδρόφοβες επιφάνειες, με παράθεση εφαρμογών που βασίζονται σε αυτές.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή της μεθόδου micro-PIV που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα, από τη βασική ιδέα μέχρι τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της. Αναλύεται η λειτουργία του μικροσκοπίου, της βασικής μονάδας δηλαδή της διάταξης, οι ιδιότητες των σωματιδίων που χρησιμοποιούνται για αυτές τις περιπτώσεις, οι διαφορές που εντοπίζονται μεταξύ του PIV και του micro-PIV, ενώ δίνονται και οι βασικές αρχές λειτουργίας του laser και της κάμερας.

Στο 4<sup>ο</sup> και 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο περιγράφονται οι συντελεστές του πειράματος που πραγματοποιήσαμε, τα βήματα της πειραματικής διαδικασίας, και τέλος τα αποτελέσματα που προέκυψαν, μέσω παρουσίασης των προφίλ, με παράλληλο σχολιασμό τους. Στο τέλος του κάθε κεφαλαίου παρατίθενται και οι βιβλιογραφικές αναφορές που του αντιστοιχούν.

Θα ήθελα στο σημείο θα ήθελα να αφιερώσω την παρούσα εργασία στην οικογένειά μου που με στήριζε συνεχώς καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, ενώ συνεχίζει να στέκεται δίπλα μου, προκειμένου να εκπληρώσω τους στόχους μου. Από το εργαστήριο θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Μαθιουλάκη, για την επιστημονική στήριξη που μου προσέφερε σε οτιδήποτε και αν χρειαζόμουν, για την προθυμία του, την εργατικότητά του, και την δυνατότητα που μου προσέφερε, να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον και καινοτόμο ερευνητικό θέμα. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω το Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών Επιστημών ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ, για την τεχνική στήριξη, εφόσον μας παρείχε τα μικροκανάλια και την μικροαντλία για τη διεξαγωγή των πειραμάτων.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	2
---------------	---

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	4
------------------	---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> : Βασικές έννοιες της Μηχανικής των Ρευστών

<b>1.1 Βασικοί Ορισμοί</b>	
1.1.1 Έννοια του Ρευστού.....	8
1.1.2 Συνεκτικότητα (ιξώδες), συμπιεστότητα.....	9
1.1.3 Υπόθεση της συνέχειας.....	10
1.1.4 Μικροροές.....	12
<b>1.2 Εξισώσεις Διατήρησης Νευτώνιων Ρευστών</b>	
1.2.1 Εξίσωση της συνέχειας, διατήρησης της ορμής.....	13
1.2.2 Εξισώσεις Navier-Stokes σε μικροροές.....	14
<b>1.3 Συνοριακές συνθήκες ολίσθησης-μη ολίσθησης</b>	
1.3.1 Το φαινόμενο της ολίσθησης, φυσική ερμηνεία.....	15
1.3.2 Ροή Poiseuille σε κανάλια με ή χωρίς ολίσθηση.....	16
<i>Αναφορές 1<sup>ο</sup> Κεφαλαίου</i> .....	19

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> : Θεωρία Διαβροχής

<b>2.1 Η έννοια της διαβροχής (wettability).....</b>	<b>21</b>
<b>2.2 Θεμελίωση της έννοιας της διαβροχής</b>	
2.2.1 Διεπιφάνειες-Νόμος Young.....	23
2.2.2 Δυνάμεις συνοχής, συνάφειας-Συντελεστής S.....	26
2.2.3 Γωνία υστέρησης.....	27
<b>2.3 Υδροφοβικότητα</b>	
2.3.1 Συντελεστές υδροφοβικότητας.....	29
2.3.2 Μηχανισμός εμφάνισης της ολίσθησης της ροής.....	32
2.3.3 Βιβλιογραφική επισκόπηση του φαινομένου.....	36
<b>2.4 Εφαρμογές Υδροφοβικότητας.....</b>	<b>39</b>

2.5 Υδροφιλικότητα και Εφαρμογές.....	44
<i>Αναφορές 2<sup>ον</sup> Κεφαλαίου</i> .....	47

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> : Micro-Particle Image Velocimetry

3.1 Η βασική ιδέα.....	51
3.2 Σωματίδια-‘ανιχνευτές’ της ροής	
3.2.1 Ρευστομηχανικές ιδιότητες.....	53
3.2.2 Κίνηση Brown, συγκέντρωση των σωματιδίων.....	54
3.2.3 Φθορισμός.....	56
3.3 Μικροσκόπιο	
3.3.1 Εισαγωγή.....	58
3.3.2 Ανατομία μικροσκοπίου φθορισμού.....	59
3.3.3 Αντικειμενικός φακός.....	62
3.4 Φωτισμός της ροής.....	68
3.5 Βάθος μέτρησης micro-PIV(Depth of Correlation)	
3.5.1 Συμβολή της διάθλασης.....	70
3.5.2 Επίδραση της γεωμετρίας.....	71
3.5.3 Συνολικό μετρούμενο βάθος.....	72
3.6 Επεξεργασία δεδομένων	
3.6.1 Image overlapping.....	73
3.6.2 Ensemble PIV.....	74
3.7 Αρχή λειτουργίας laser-κάμερας.....	75
<i>Αναφορές 3<sup>ον</sup> Κεφαλαίου</i> .....	79

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>: Πειραματική Διαδικασία

4.1 Εξοπλισμός.....	82
4.2 Προετοιμασία πριν την έναρξη.....	86
4.3 Λήψη εικόνων.....	87
4.4 Επεξεργασία Εικόνας	
4.4.1 Processing.....	89
4.4.2 Techplot.....	95
4.5 Υδρόφοβα και Υδρόφιλα μικροκανάλια	
4.5.1 Πρώτη σειρά πειραμάτων (Νοέμβριος 2011).....	103
4.5.2 Δεύτερη σειρά πειραμάτων (Ιανουάριος 2012).....	105
4.5.3 Τρίτη σειρά πειραμάτων (Φεβρουάριος 2012).....	106

<i>Αναφορές 4<sup>ο</sup> Κεφαλαίου</i> .....	108
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>: Αποτελέσματα-Σχολιασμός</b>	
5.1 Υπέρ-υδρόφιλα, υπέρ-υδρόφοβα μικροκανάλια.....	110
5.2 Υδρόφιλα μικροκανάλια.....	117
5.3 Υδρόφιλα-Υδρόφοβα μικροκανάλια.....	120
5.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα.....	129
ΠΕΡΙΛΗΨΗ (Ελληνικά).....	130
ΠΕΡΙΛΗΨΗ (Αγγλικά).....	131

# **Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>**

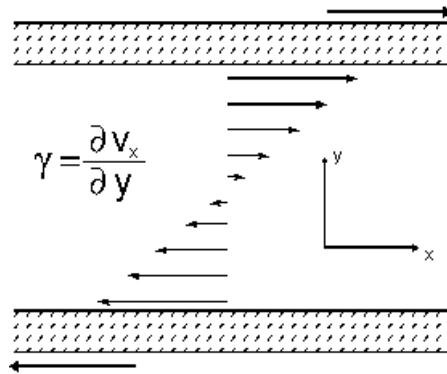
**Βασικές έννοιες της μηχανικής των  
ρευστών**

## 1.1 Βασικοί ορισμοί

### 1.1.1 Έννοια του ρευστού

Ως ρευστό νοείται μία ουσία που παραμορφώνεται συνεχώς, όταν βρίσκεται υπό την επίδραση διατμητικής τάσης. Διατμητική δύναμη είναι η συνιστώσα δύναμη, που δρα κατά την εφαπτομένη μίας επιφάνειας και η δύναμη αυτή διαιρούμενη με το εμβαδόν της επιφάνειας δίνει την διατμητική τάση. Διατμητική τάση σε ένα σημείο είναι το όριο του λόγου της διατμητικής δύναμης προς το εμβαδόν, όταν το εμβαδόν τείνει στο μηδέν.

Θεωρούμε μία ουσία που βρίσκεται μεταξύ δύο πλακών που έχουν μικρή απόσταση μεταξύ τους (βλ. **Εικόνα 1.1**). Η κάτω πλάκα είναι σταθερή και μία δύναμη  $F$  εφαρμόζεται στην πάνω πλάκα, η οποία ασκεί μία διατμητική τάση  $F/A$  σε οποιοδήποτε σημείο της ουσίας, όπου  $A$  είναι το εμβαδόν της πάνω πλάκας. Όταν η δύναμη  $F$  έχει σαν αποτέλεσμα να κινείται η πάνω πλάκα, όσο μικρή και αν είναι η  $F$ , τότε μπορεί να συμπεράνει κανείς ότι η ουσία μεταξύ των πλακών είναι ρευστό. Το συγκεκριμένο είδος ροής, ονομάζεται ροή Couette.



Εικόνα 1.1 Ροή Couette

Πειραματικά έχει αποδειχθεί ότι η δύναμη  $F$ , είναι ευθέως ανάλογη του  $A$ , και αντιστρόφως ανάλογη του πάχους της πλάκας  $t$ , όταν άλλες ποσότητες παραμένουν σταθερές. Αυτό εκφράζεται με την σχέση:  $F = \mu \frac{AU}{t}$ , όπου  $\mu$  το ιξώδες του ρευστού.

Αν  $\tau = \frac{F}{A}$  είναι η διατμητική τάση, τότε  $\tau = \mu \frac{U}{t}$ . Ο λόγος  $\frac{U}{t}$ , αποτελεί την γωνιακή ταχύτητα παραμόρφωσης του ρευστού. Η ταχύτητα αυτή μπορεί να γραφτεί επίσης και ως  $\frac{du}{dy}$ , αφού το  $\frac{U}{t}$ , αλλά και το  $\frac{du}{dy}$ , εκφράζουν το λόγο της μεταβολής της ταχύτητας ως προς το μήκος στο οποίο λαμβάνει χώρα η μετατροπή. Άρα η



προηγούμενη σχέση γράφεται  $\tau = \mu \frac{du}{dy}$  (1.1) , ονομάζεται νόμος ιξώδους του Νεύτωνα (Streeter et al, 1975), και δίνει τη σχέση μεταξύ διατμητικής τάσης και της γωνιακής παραμόρφωσης για μονοδιάστατη ροή ρευστού.

Τα ρευστά μπορούν να διαιρεθούν σε Νευτώνια και μη Νευτώνια. Στα Νευτώνια ρευστά η σχέση μεταξύ της διατμητικής τάσης και της ταχύτητας παραμόρφωσης είναι γραμμική, δηλαδή το ιξώδες είναι σταθερό. Στα μη Νευτώνια ρευστά, η σχέση μεταξύ διατμητικής τάσης και ταχύτητας παραμόρφωσης δεν είναι γραμμική.

Ένα ιδανικό πλαστικό έχει μία ορισμένη τάση διαρροής και μία σταθερή γραμμική σχέση μεταξύ διατμητικής τάσης και ταχύτητας παραμόρφωσης. Μία θιξοτροπική ουσία, όπως η τυπογραφική μελάνη, έχει ιξώδες, που εξαρτάται από την αμέσως επόμενη γωνιακή παραμόρφωση, και έχει την τάση να πήζει όταν είναι σε ακινησία. Τα αέρια και τα λεπτόρευστα υγρά, τείνουν να είναι Νευτώνια, ενώ οι παχύρευστοι, με δομή μακρών αλυσίδων υδρογονάνθρακες τείνουν να είναι μη Νευτώνια.

Κάθε στοιχείο ρευστού, είτε εν ηρεμία είτε εν κινήσει βρίσκεται σε εντατική κατάσταση. Διακρίνουμε δύο περιπτώσεις, την ορθή εντατική κατάσταση και την διατμητική εντατική κατάσταση.

Η έννοια της ορθής εντατικής κατάστασης, περιγράφει ρευστά σε ακινησία. Κατά την περίπτωση αυτή, μόνο κάθετες επιφανειακές δυνάμεις είναι δυνατόν να διαβιβαστούν μεταξύ των στοιχείων του ρευστού. Ορίζεται έτσι και το μέγεθος της πίεσης,  $P$ , ως την κάθετη επιφανειακή δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας. Η διατμητική εντατική κατάσταση, περιγράφει την περίπτωση που το ρευστό βρίσκεται σε κίνηση, και εκφράζει τη σχετική κίνηση δύο γειτονικών στοιχείων του ρευστού. Η διατμητική εντατική κατάσταση είναι μηδενική για την περίπτωση ακίνητων ρευστών.

### **1.1.2 Συνεκτικότητα (ιξώδες), Συμπιεστότητα**

Για τη μελέτη της ροής των ρευστών η ιδιότητα του ιξώδους χρειάζεται να μελετηθεί αναλυτικά, και ίσως περισσότερο από τις άλλες ιδιότητες του ρευστού. Μπορούμε να ορίσουμε το ιξώδες, ως την ιδιότητα των ρευστών να ανθίσταται στη διάτμηση. Έτσι η μολάσσα και η πίσσα έχουν μεγάλο ιξώδες, ενώ το νερό και ο αέρας μικρό ιξώδες.

Το ιξώδες των αερίων αυξάνεται ενώ το ιξώδες το υγρών μειώνεται, με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η διαφορετική αυτή συμπεριφορά με τη διαφορά θερμοκρασίας, εξηγείται αν ερευνήσει κανείς τους λόγους εμφάνισης του ιξώδους. Η αντίσταση ενός ρευστού σε διάτμηση εξαρτάται από τη συνοχή του και από την ταχύτητα μεταφοράς της μοριακής ορμής. Στα υγρά, οι αποστάσεις μεταξύ των μορίων είναι πολύ μικρότερες από ότι στα αέρια, και επομένως οι δυνάμεις συνοχής είναι πολύ μεγαλύτερες από ότι στα αέρια. Στα υγρά το ιξώδες, οφείλεται κυρίως στις δυνάμεις συνοχής και επειδή οι δυνάμεις αυτές μειώνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας,

μειώνεται και το ιξώδες. Στα αέρια αντιθέτως, οι δυνάμεις συνοχής είναι πολύ μικρές. Η αντίσταση σε διάτμηση οφείλεται κατά το μεγαλύτερο μέρος σε μεταφορά ορμής. Στα αέρια η μοριακή δραστηριότητα προκαλεί διατμητικές τάσεις πιο σημαντικές από τις δυνάμεις συνοχής, και επειδή η μοριακή κίνηση αυξάνεται όσο αυξάνεται και η θερμοκρασία, αυξάνεται επίσης και το ιξώδες.

Σε συνηθισμένες πιέσεις το ιξώδες είναι ανεξάρτητο της πίεσης και εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία. Σε πολύ μεγάλες πιέσεις, το ιξώδες μεταβάλλεται ακανόνιστα με τη μεταβολή της πίεσης στα αέρια, και στα περισσότερα υγρά.

Η τιμή του ιξώδους προσδιορίζεται από την εξίσωση ιξώδους του Νεύτωνα που παρουσιάστηκε προηγουμένως,  $\mu = \frac{\tau}{du/dy}$ .

Το ιξώδες  $\mu$  συχνά αναφέρεται ως απόλυτο ιξώδες ή δυναμικό ιξώδες, για να μην συγχέεται με το κινηματικό ιξώδες  $\nu$ , το οποίο είναι ο λόγος του ιξώδους προς την πυκνότητα της μάζας,  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ .

Συχνά στην ανάλυση ροής, γίνεται παραδεκτό ότι το ρευστό δεν έχει ιξώδες. Όταν το ιξώδες είναι μηδέν, η διατμητική τάση είναι παντού μηδέν, ανεξάρτητα από την κίνηση του ρευστού. Εάν το ρευστό θεωρηθεί επιπλέον ασυμπιεστο, τότε ονομάζεται ιδανικό ρευστό.

Με τον όρο συμπιεστότητα καλούμε την ιδιότητα των ρευστών να μεταβάλλουν την πυκνότητά τους με μεταβολή της πίεσης  $P$  (ορθή εντατική κατάσταση), είτε εν ηρεμία είτε εν κινήσει.

Για την περίπτωση των υγρών, λόγω της μεγάλης πυκνότητας των μορίων τους και άρα των μικρών τους αποστάσεων, ακόμα και κάτω από την επίδραση μεγάλων πιέσεων, η μεταβολή του όγκου τους είναι αμελητέα, άρα τα θεωρούμε ασυμπιεστα. Αντιθέτως, τα αέρια χαρακτηρίζονται από μεγάλες μοριακές αποστάσεις και μικρές δυνάμεις συνοχής, με αποτέλεσμα μικρή πυκνότητα. Άρα με επενέργεια εξωτερικών δυνάμεων, και επακόλουθη αύξηση της πίεσης, έχουμε αύξηση της πυκνότητας. Συμπεραίνουμε δηλαδή ότι τα αέρια είναι συμπιεστά ρευστά.

### 1.1.3 Υπόθεση της συνέχειας

Παρά το γεγονός, ότι η μάζα του ρευστού δεν είναι διατεταγμένη ομοιόμορφα στο σύνολο του όγκου του, σε πολλές περιπτώσεις ροής, το ρευστό αντιμετωπίζεται ως συνεχές και διαιρετό μέσο, με τη μοριακή του δομή να μην λαμβάνεται υπόψη. Η προσέγγιση αυτή εκφράζει την υπόθεση της συνέχειας.

Η υπόθεση της συνέχειας εισάγει την ιδέα των *σωματιδίων ρευστού* (*fluid particles*), των βασικών συστατικών δηλαδή, της θεωρίας των ρευστών (Bruus, 2008). Σε αντίθεση με τα ιδανικά σημειακά σωματίδια που συναντάμε στην

κλασική μηχανική, τα σωματίδια αυτά έχουν πεπερασμένο μέγεθος. Ο προσδιορισμός του επακριβούς μεγέθους τους δεν είναι απλός. Θεωρούμε μία ποσότητα ρευστού, όγκου  $V_{probe}$ , ο οποίος θεωρούμε ότι μεταβάλλεται από την ατομική στη μακροσκοπική κλίμακα. Στην περίπτωση μετρήσεων τοπικών χαρακτηριστικών της ροής (π.χ. πυκνότητα, ταχύτητα) στην ατομική κλίμακα, τα αποτελέσματα χαρακτηρίζονται από μεγάλες διακυμάνσεις, λόγω της μοριακής δομής του ρευστού. Ανεβαίνοντας τάξεις κλίμακας, τα αποτελέσματα των μετρήσεων εμφανίζονται περισσότερο σταθερά. Η σταθερότητα στα αποτελέσματα, οφείλεται στο ότι ο υπό εξέταση όγκος περιέχει επαρκή αριθμό μορίων, με αποτέλεσμα να έχουμε σταθερές μετρήσεις, με κάποιες στατιστικές αποκλίσεις.

Για την περίπτωση ενός υγρού, μία χαρακτηριστική τιμή μεγέθους, είναι  $\lambda^* = 10nm$ . Σωματίδιο αυτών των διαστάσεων περιλαμβάνει περίπου  $4 \times 10^4$  μόρια, και εμφανίζει στατιστικές διακυμάνσεις της τάξης του 0,5%. Για την περίπτωση αερίου, το  $\lambda^*$  λαμβάνει τιμές σχεδόν 10 φορές μεγαλύτερες από αυτές για υγρό. Αν το μέγεθος του σωματιδίου ληφθεί πολύ μεγάλο, σημειώνονται μεταβολές στις ιδιότητες του ρευστού, λόγω επίδρασης εξωτερικών δυνάμεων.

Συμπερασματικά, προκειμένου να ικανοποιείται η υπόθεση της συνέχειας, πρέπει τα σωματίδια να είναι μεγαλύτερα από μεγέθη μικροσκοπικής κλίμακας, δηλαδή 0,3nm, για να περιλαμβάνουν επαρκή αριθμό μορίων, και μικρότερα από μεγέθη μακροσκοπικής κλίμακας, δηλαδή 10μm, εφόσον πάνω από αυτή την τιμή δεν μπορούν να αμεληθούν οι εξωτερικές δυνάμεις που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

Για τα αέρια, η ικανοποίηση της υπόθεσης της συνέχειας, μπορεί να διερευνηθεί μέσω του αριθμού **Knudsen**, μία αδιάστατη παράμετρος, που ορίζεται ως ο λόγος της μέσης ελεύθερης διαδρομής του ρευστού (η διαδρομή δηλαδή που διανύουν τα μόρια ενός ρευστού μεταξύ των στιγμών που παρατηρούνται συγκρούσεις μεταξύ τους),  $\lambda$ , προς το χαρακτηριστικό γεωμετρικό μήκος της ροής,  $L$ ,  $Kn = \frac{\lambda}{L}$ . Σύμφωνα με την τιμή που λαμβάνει ο αριθμός Knudsen, προκύπτει ότι ικανοποίηση της υπόθεσης της συνέχειας έχουμε για  $Kn < 10^{-2}$ , ενώ ελεύθερη μοριακή ροή έχουμε για  $Kn > 10^{-1}$  (Karniadakis et al, 2002).

Για την περίπτωση των υγρών, όπου οι αποστάσεις μεταξύ των μορίων είναι αρκετά μικρότερες και οι δυνάμεις συνοχής αρκετά μεγαλύτερες, χρησιμοποιούμε έναντι της μέσης ελεύθερης διαδρομής του ρευστού, το μέγεθος της μέσης μοριακής απόστασης  $\delta$ , που ορίζεται ως  $\delta \propto n^{-1/3}$ , όπου  $n$ , ο αριθμός πυκνότητας. Για συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης και θερμοκρασία 0°C, ο αριθμός  $n$ , ισούται με  $2,69 \times 10^{-3}m^{-3}$ . Για την περίπτωση νερού, στις συνθήκες που παρουσιάστηκαν, η μέση μοριακή απόσταση είναι ίση με  $3,3 \times 10^{-9}m$ .

Αντικαθιστώντας στην σχέση ορισμού του αριθμού Knudsen, το  $\delta$  όπου  $\lambda$ , και λύνοντας ως προς τα χαρακτηριστικό μήκος της ροής  $L$ , προκύπτει ότι για  $Kn <$

$10^{-1}$ , η υπόθεση της συνέχειας ικανοποιείται για μικροκανάλια διαμέτρου μεγαλύτερης των 3nm (Mielnik, 2005).

### 1.1.4 Μικροροές

Όταν αναλύουμε τις φυσικές αρχές που διέπουν τις ροές σε μικροκανάλια, είναι σημαντικό να αναφέρουμε τους λεγόμενους νόμους κλίμακας (scaling laws). Ένας τέτοιος νόμος εκφράζει την μεταβολή των ιδιοτήτων ενός φυσικού συστήματος με την μεταβολή του μεγέθους του, όταν άλλες παράμετροι, όπως θερμοκρασία και πίεση, διατηρούνται σταθερές. Αν μελετήσουμε για παράδειγμα την αναλογία βαρυτικών και συνεκτικών δυνάμεων, ο νόμος κλίμακας εκφράζεται ως εξής:

$$\frac{\text{συνεκτικές δυνάμεις}}{\text{βαρυτικές δυνάμεις}} \propto \frac{l^2}{l^3} = l^{-1} \rightarrow \infty, \text{ όταν } l \rightarrow 0.$$

Το προηγούμενο συμπέρασμα, έχει τη σημασία ότι στις περιπτώσεις μικροροών, οι βαρυτικές δυνάμεις που στην καθημερινότητά μας είναι ιδιαίτερα σημαντικές, στις micro και nano κλίμακες, γίνονται ασήμαντες, με τις επιφανειακές δυνάμεις να αποκτούν ιδιαίτερη σημασία.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό που παρατηρούμε στις περιπτώσεις ροών σε μικροκλίμακα, είναι οι ιδιαίτερα μικρές ταχύτητες που αναπτύσσονται. Ειδικότερα οι ταχύτητες που σημειώνονται σε μικροκανάλια είναι αρκετά μικρότερες από την ταχύτητα του ήχου κατά την διάδοσή του ήχου στο ρευστό. Ως αποτέλεσμα η ροή ρευστού σε μικροκανάλια μπορεί να θεωρηθεί με καλή προσέγγιση ασυμπίεστη (Bruus, 2008).

## 1.2 Εξισώσεις διατήρησης Νευτώνιων Ρευστών

Ακολούθως περιγράφονται οι εξισώσεις διατήρησης που διέπουν την ροή νευτωνίου ρευστού. Προκειμένου να γίνει δυνατή η ολοκληρωματική και διαφορική έκφραση των εξισώσεων διατήρησης, εισάγεται η έννοια του *όγκου ελέγχου*. Ο όγκος ελέγχου,  $\tau$ , αναφέρεται σε μία περιοχή του χώρου, που περικλείεται από επιφάνεια ελέγχου,  $E$ , και χρησιμοποιείται στην ανάλυση περιπτώσεων όπου υπάρχει ροή από και προς το χώρο. Το μέγεθος και το σχήμα του όγκου ελέγχου μπορούν να είναι εντελώς αυθαίρετα άλλα χάριν απλουστεύσεως λαμβάνονται έτσι ώστε μερικά τμήματα της επιφάνειας ελέγχου να συμπίπτουν με φυσικά τοιχώματα και τα υπόλοιπα να είναι κάθετα προς τη διεύθυνση της ροής.

### 1.2.1 Εξίσωση της συνέχειας και διατήρησης της ορμής

Οι εξισώσεις συνέχειας αναπτύσσονται από τη γενική αρχή διατήρησης της μάζας,  $\frac{dm}{dt} = 0$ , που ορίζει ότι η μάζα ενός συστήματος παραμένει σταθερή συναρτήσει του χρόνου, δεν παράγεται και δεν εξαφανίζεται αυθόρμητα, για περιπτώσεις μη-σχετικιστικής μηχανικής. Με χρήση της έννοιας του όγκου ελέγχου για την εξαγωγή της ολοκληρωματικής έκφρασης της εξίσωσης της συνέχειας, καταλήγουμε στην έκφραση:

$$\frac{d}{dt} \int_{\tau} \rho dV = - \int_E \rho \vec{v} \cdot \vec{n} dE \quad (1.2)$$

όπου ο πρώτος όρος εκφράζει τον ρυθμό αύξησης της μάζας, και ο δεύτερος το ρυθμό συνολικής εισροής μάζας στον όγκο ελέγχου.

Με εφαρμογή του θεωρήματος Gauss λαμβάνουμε την εξίσωση της συνέχειας σε διαφορική μορφή:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \cdot \vec{v}) = 0 \quad (1.3)$$

Για την περίπτωση συμπιεστού ρευστού και μόνιμη ροή (δηλαδή την περίπτωση της ροής κατά την οποία οι συνθήκες ροής δεν αλλάζουν με το χρόνο:  $\frac{\partial P}{\partial t} = 0, \frac{\partial T}{\partial t} = 0, \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = 0$ ), η εξίσωση της συνέχειας γίνεται,

$$\nabla(\rho \vec{v}) = 0, \quad (1.4).$$

Για την περίπτωση ασυμπίεστης ροής ( $\rho = const$ ), μόνιμης η μη-μόνιμης η εξίσωση της συνέχειας λαμβάνει τη μορφή:

$$\nabla \vec{v} = 0. \quad (1.5),$$

Που αποτελεί και την πρώτη εξίσωση *Navier-Stokes*.

Σύμφωνα με την εξίσωση διατήρησης της ορμής, η ασκούμενη συνισταμένη δύναμη σε έναν όγκο ελέγχου ισούται με τον ρυθμό αυξήσεως της γραμμικής ορμής μέσα στον όγκο ελέγχου συν την συνολική εκροή της γραμμικής ορμής από τον όγκο ελέγχου.

Η ολοκληρωματική έκφραση της εξίσωσης της ορμής έχει την ακόλουθη μορφή:

$$\frac{d}{dt} \int_{\tau} \rho \vec{v} dV + \int_E [\rho \vec{v}(\vec{v} \cdot \vec{n}) - \vec{n} \sigma] dA = \int_{\tau} \vec{f} dV \quad (1.6),$$

Όπου  $\sigma = -\vec{p}I + \tau$ , με  $\tau$  τον τανυστή των συνεκτικών τάσεων, που δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\tau = \mu[\nabla\vec{v} + (\nabla\vec{v})^T] + \zeta(\nabla\vec{v})\mathbf{I} \quad (1.7),$$

με  $\mu$ , και  $\zeta$ , τους δύο συντελεστές της συνεκτικότητας, που ικανοποιούν τη σχέση του Stokes για τοπική θερμοδυναμική ισορροπία,  $2\mu + 3\zeta = 0$  (Karniadakis, 2005).

Η διαφορική διατύπωση της διατήρησης της ορμής είναι:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\vec{v}) + \nabla[\rho\vec{v}\vec{v} - \sigma] = \vec{f} \quad (1.8).$$

Με αντικατάσταση στην προηγούμενη σχέση των σχέσεων  $\zeta = -\frac{2}{3}\mu$ , και 1.7, η προηγούμενη διαφορική διατύπωση γίνεται:

$$\rho \left( \frac{\partial\vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla)\vec{v} \right) = -\nabla P + \mu\nabla^2\vec{v} + \frac{1}{3}\mu\nabla(\nabla \cdot \vec{v}) + \vec{f} \quad (1.9).$$

Εφαρμόζοντας την εξίσωση διατήρησης της ορμής σε μία μικρή περιοχή ρευστού, για ασυμπίεστη ροή, καταλήγουμε στην δεύτερη εξίσωση *Navier-Stokes*,

$$\rho \left( \frac{\partial\vec{v}}{\partial t} + (\vec{v}\nabla)\vec{v} \right) = -\nabla P + \mu\nabla^2\vec{v} + \vec{f} \quad (1.10),$$

Όπου ο πρώτος όρος του δεξιού μέλους, αναπαριστά την επίδραση της πίεσης, ο δεύτερος την επίδραση της συνεκτικότητας, και ο τρίτος τη δράση εξωτερικών δυνάμεων (π.χ. βαρυτικές δυνάμεις).

#### 1.2.4 Οι εξισώσεις Navier-Stokes σε μικροροές

Λόγω των μικρών ταχυτήτων που σημειώνονται σε ροές σε μικροκανάλια, έχουμε μικρούς αριθμούς  $Re$ , και ασυμπίεστη ροή, όπως επισημάνθηκε και προηγουμένως. Λόγω αυτής της θεώρησης, οι εξισώσεις Navier-Stokes που περιγράφουν τη ροή σε μικροκανάλια γίνονται:

$$\nabla\vec{v}=\mathbf{0}, \quad (1.11)$$

$$\rho \left( \frac{\partial\vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla)\vec{v} \right) = -\nabla P + \mu\nabla^2\vec{v} + \vec{f} \quad (1.12)$$

Η δεύτερη εξίσωση Navier-Stokes, με την θεώρηση της μικρής ταχύτητας ροής (μικρός Re), και χρήση της εξίσωσης της συνέχειας γίνεται:

$$-\nabla \vec{P} + \mu \nabla^2 \vec{v} + \vec{f} = \mathbf{0} \quad (1.13).$$

Αυτή η τελευταία σχέση είναι γνωστή ως *γραμμική σχέση Stokes* (Jesen, 2002)

### 1.3 Συνοριακές συνθήκες-ολίσθηση της ροής

#### 1.3.1 Το φαινόμενο της ολίσθησης-φυσική ερμηνεία

Η μελέτη των συνοριακών συνθηκών, και ως εκ τούτου και της μελέτης της ολίσθησης της ροής έχουν απασχολήσει αρκετά τους επιστήμονες στο διάστημα μεταξύ 18<sup>ου</sup> και 20<sup>ου</sup> αιώνα, λόγω της βαρύτητάς τους στον προσδιορισμό προφίλ ταχυτήτων. Η αντιμετώπιση του φαινομένου και η πρόταση λύσεων για τις συνοριακές συνθήκες, χωρίς να συνοδεύονται από πειραματικά δεδομένα, μπορούν να συνοψιστούν στις ακόλουθες περιπτώσεις (βλ. **Εικόνα 1.2**) :

- **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 στρώματος” (stagnant layer):** 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  $v_{slip}$  που συνδέεται με το μήκος ολίσθησης  $b$ , με την ακόλουθη έκφραση του Navier:

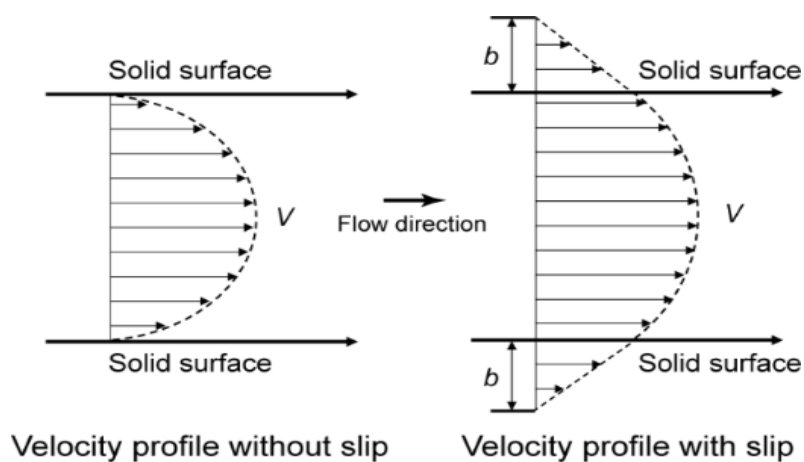
$$v_{slip} = \beta \frac{\partial v_b}{\partial y} \quad (1.14),$$

Όπου  $v_b$ , η ταχύτητα στο κέντρο της ροής, και  $y$  κατεύθυνση, η κάθετη στο τοίχωμα. Ως μήκος ολίσθησης  $\beta$  ορίζεται η πλασματική απόσταση από το τοίχωμα όπου έχουμε ολίσθηση, στην οποία η συνθήκη μη-ολίσθησης ικανοποιείται.

Όπως είναι εμφανές για μηδενική τιμή του μήκους ολίσθησης έχουμε μη-ολίσθηση της ροής, ενώ για τιμή του μήκους ολίσθησης διάφορης του μηδενός, έχουμε ολίσθηση της ροής, με το μήκος αυτό να εξαρτάται και από την κλίμακα στην οποία εξετάζεται το φαινόμενο (ένταση του φαινομένου σε περιπτώσεις μικροκλίμακας).

Απλουστευτικά μπορούμε να πούμε ότι η συνθήκη μη-ολίσθησης ικανοποιείται, όταν το ρευστό “κολλάει” πάνω στο στερεό τοίχωμα, οπότε έχει και την ταχύτητά του. Ας θεωρήσουμε ένα μόριο ρευστού κοντά σε ένα στερεό τοίχωμα. Οι δυνάμεις Van der Waals που ασκούνται μεταξύ των μορίων, τείνουν να το κρατήσουν σε μία

συγκεκριμένη “γειτονιά”, δρώντας ενάντια στις λοιπές τάσεις που ασκούνται σε αυτό και επιδιώκουν την απομάκρυνσή του.



Εικόνα 1.2 Σχηματικά απεικόνιση περιπτώσεων ολίσθησης-μη ολίσθησης της ροής

Απόσπαση του μορίου πραγματοποιείται, όταν οι δυνάμεις Van der Waals γίνουν ίσες με τις δυνάμεις που τείνουν να απομακρύνουν το μόριο. Τότε το μόριο υπόκειται σε μία κρίσιμη τιμή διάτμησης. Για τιμές διάτμησης μεγαλύτερες, τότε υφίσταται ολίσθηση της ροής, εφόσον τα μόρια δεν παραμένουν κολλημένα στο στερεό τοίχωμα.

Το φαινόμενο της ολίσθησης έχει σχετιστεί και με τον αριθμό Knudsen, που περιγράφηκε σε προηγούμενη ενότητα, ως στοιχείο προσδιορισμού της συνέχειας του ρευστού. Έτσι ολίσθηση της ροής έχουμε για  $10^{-2} < Kn < 0.1$  (Mielnik, 2005).

### 1.3.3 Ροή Poiseuille σε μικροκανάλια με ή χωρίς ολίσθηση

Στη ροή Poiseuille η ροή οδηγείται διαμέσου καναλιού μέσω εφαρμογής κλίσης πίεσης στα δύο άκρα του καναλιού (ροή *pressure-driven*). Η συγκεκριμένη περίπτωση ροής είναι πολύ βασική για την κατανόηση των αρχών που διέπουν τις συστήματα μικροροών όπως για παράδειγμα εφαρμογές lab-on-a-chip.

Θεωρούμε την περίπτωση ενός καναλιού μήκους  $L$ , βάθους  $2b$ , και πλάτους  $w$ . Υποθέτουμε διαμορφωμένη ροή, δηλαδή παράλληλη στον άξονα  $x$ . Έτσι οι συνιστώσες της ταχύτητας της ροής κατά τους άξονες  $z$  και  $y$  είναι μηδενικές, ενώ διάφορη του μηδενός είναι μόνο η συνιστώσα κατά  $x$ ,  $u$  (βλ. **Εικόνα 1.3**)

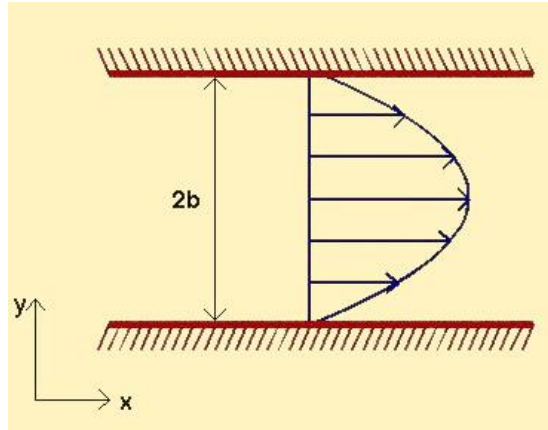
Θεωρούμε τη ροή νευτώνιου ρευστού, και εφόσον έχουμε την περίπτωση μικροκαναλιού η ροή θεωρείται επίσης ασυμπιεστή. Άρα όπως ειπώθηκε και προηγουμένως, οι εξισώσεις που εκφράζουν την ροή είναι:



$$\nabla \vec{v} = 0, \text{ και}$$

$$-\nabla \vec{P} + \mu \nabla^2 \vec{v} = 0,$$

θεωρώντας την επίδραση εξωτερικών δυνάμεων μηδενική.



Εικόνα 1.3 Ροή Poiseuille σε κανάλι βάθους  $2b$ .

Αναπτύσσοντας κατά  $x$  και  $y$ , την εξίσωση της ορμής έχουμε:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (1.16)$$

και

$$\frac{\partial P}{\partial y} = \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (1.17).$$

Όμως, από την εξίσωση της συνέχειας προκύπτει  $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$ , και  $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0$ , ενώ λόγω του ότι η ταχύτητα του πεδίου είναι συνάρτηση μόνο του  $x$ , έχουμε  $\frac{\partial P}{\partial y} = 0$ . Δηλαδή η πίεση σε κάθε διατομή που αντιστοιχεί σε μία συγκεκριμένη θέση  $x$  παραμένει σταθερή, ενώ ισχύει  $P = P(x)$ .

Η διαφορά πίεσης που εφαρμόζεται κατά μήκος του καναλιού είναι  $\frac{P_{in} - P_{out}}{L}$ , ή  $\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{P_{in} - P_{out}}{L}$ , όπου  $P_{in}$ , η πίεση εισόδου στο κανάλι και  $P_{out}$ , η πίεση εξόδου.

Επομένως ισχύει:  $\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{\partial P}{\mu \partial x} = \frac{P_{in} - P_{out}}{L \mu}$ .

Τώρα προκειμένου να προσδιοριστεί το προφίλ της ταχύτητας χρειαζόμαστε τις οριακές συνθήκες, οπότε εξετάζουμε ξεχωριστά την περίπτωση μη-ολίσθησης και ολίσθησης:

- **περίπτωση μη-ολίσθησης**

στην περίπτωση μη-ολίσθησης της ροής στα τοιχώματα έχουμε:  $u(\pm b) = 0$ . Επομένως το προφίλ της ταχύτητας εκφράζεται από τη σχέση:  $u = \frac{P_{in}-P_{out}}{2\mu L} (y^2 - b^2)$  (1.18). Η μέγιστη ταχύτητα της ροής σημειώνεται στο μέσο του καναλιού, δηλαδή για  $y = 0$ , και ισούται με  $u_{max} = \frac{P_{in}-P_{out}}{2\mu L} b^2$  (1.19), η μέση ταχύτητα της διατομής δίνεται από την έκφραση  $u_m = \frac{1}{2b} \int_{-b}^b u dy = \frac{2}{3} u_{max}$  (1.20) ενώ η ογκομετρική παροχή που διέρχεται από το κανάλι είναι  $Q = 2u_m b w = \frac{2(P_{in}-P_{out})}{3\mu l} w b^3$  (1.21).

- **περίπτωση ολίσθησης της ροής και στα δύο τοιχώματα του καναλιού**

Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούμε και στα δύο κανάλια την οριακή συνθήκη του Navier,  $v_{slip} = \beta \frac{\partial v_b}{\partial y}$ , δηλαδή  $u(\pm b) = \beta \frac{\partial u}{\partial y}$ . Έτσι η σχέση που δίνει το προφίλ της ταχύτητας για την περίπτωση αυτή είναι:  $u = \frac{P_{in}-P_{out}}{2L\mu} (y^2 - b^2) + \beta \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{P_{in}-P_{out}}{2L\mu} (y^2 - b^2) + \beta \frac{P_{in}-P_{out}}{\mu} b$  (1.22).

*Αναφορές*

Brigo L., “Water slippage over micro and nano structured surfaces”, Phd thesis, Universita’ Degli di Padova, Italy (2008)

Bruus H., “Theoretical Microfluidics”, Oxford Master Series in Physics (2008)

Jensen M. D., “Bubbles in Micrichannels”, Technical University of Denmark, Master Thesis (2002)

Karniadakis G. and Beskok A., “Microflows”, Springer (2002)

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

Mielnik M., “Micro-PIV and its application to some BioMEMS related microfluidic flows”, Phd thesis, Norwegian University of Science and Engineering, Norway (2005)

Streeter V. and Wylie E. B., “Μηχανική Ρευστών”, ΦΟΥΝΤΑΣ, 6<sup>η</sup> Έκδοση (1975)

# **Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>**

## **Θεωρία Διαβροχής**

## 2.1 Η έννοια της διαβροχής (wettability)

Ως διαβροχή, ορίζουμε την ικανότητα ενός υγρού να ‘‘έλκεται’’ από μία επιφάνεια και να απλώνεται πάνω σε αυτήν προς όλες τις κατευθύνσεις (Zisman William). Όπως είναι φανερό, πρόκειται για μία ιδιότητα, που σχετίζεται άμεσα με την επιφανειακή ενέργεια των υλικών από τα οποία είναι κατασκευασμένες οι επιφάνειες. Ειδικότερα, πρόκειται για ένα φαινόμενο, το οποίο έχει να κάνει με την ισχύ των δεσμών των μορίων της επιφάνειας.

Στη φύση έχουμε αρκετά παραδείγματα επιφανειών που παρουσιάζουν διαφορετική διαβρεκτική συμπεριφορά, και αποτέλεσαν το έναυσμα για την σε βάθος διερεύνηση του φαινομένου. Περισσότερο από δύο αιώνες πριν παρατηρήθηκε, ότι τα φύλλα κάποιων φυτών διατηρούσαν καθαρά τα φύλλα τους, παρά την ύπαρξη ακαθαρσιών πάνω σε αυτά (Solga et al, 2007), με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον να συγκεντρώνει ο λωτός.

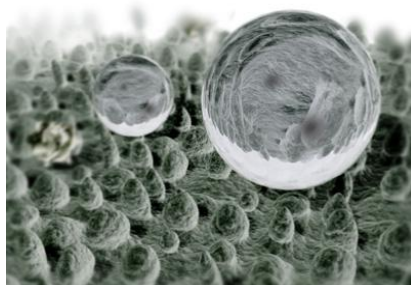
Ωστόσο το φαινόμενο αυτό, δεν ήταν δυνατό να εξηγηθεί με επιστημονική ακρίβεια, μέχρι το δεύτερο μισό του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Με την εισαγωγή της τεχνικής Scanning Electron Microscopy (Goldstein et al, 1981), κατέστη δυνατή η παρατήρηση της σύνθετης μικροδομής του φύλλου του λωτού, που είναι και υπεύθυνη για την ιδιαίτερη διαβρεκτική του συμπεριφορά. Πιο συγκεκριμένα η τεχνική SEM, επέτρεψε τη παρατήρηση και τον χαρακτηρισμό ετερογενών οργανικών, και ανόργανων υλικών σε κλίμακα nano και micro.

Με την παρατήρηση της μικροδομής του φύλλου του λωτού (βλ. **Εικόνα 2.1**), διαπιστώθηκε η ύπαρξη ενός πυκνού στρώματος επιδερμικών κρυστάλλων κεριού (epicuticular wax crystals), οι οποίοι αποτελούνται συνήθως από υδρογονάνθρακες, αλκοόλες και κετόνες (Koch et al, 2004). Η εξάρτηση της υπέρ-υδροφοβικής συμπεριφοράς, από την ύπαρξη αυτών των διαμορφώσεων (καθώς επίσης και από το μέγεθος τους), που δεν δημιουργούν τίποτα περισσότερο από μία ‘‘τραχιά’’ επιφάνεια, διαπιστώθηκε επιστημονικά μόλις πριν από 15 χρόνια, (Barthlott et al, 1997). Το φαινόμενο του λωτού (lotus effect), όπως ονομάστηκε, αποτέλεσε έναυσμα, για την περαιτέρω εκμετάλλευσή των χαρακτηριστικών του, τόσο βιολογικά όσο και τεχνολογικά. Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι η γωνία επαφής που σχηματίζει μία σταγόνα νερού με την επιφάνεια του φύλλου του λωτού είναι 150<sup>0</sup>.

Το φαινόμενο αυτό, του αυτοκαθαρισμού, μπορεί να συνοψιστεί ως εξής: Εφόσον η επιφάνεια του λωτού παρουσιάζει υδροφοβική συμπεριφορά, απωθεί δηλαδή το νερό, όταν σταγόνες νερού βρεθούν πάνω σε αυτό, διατηρούν τη σφαιρική τους μορφή αναλλοίωτη. Αν στο φύλλο δοθεί μία μικρή κλίση, οι σταγόνες κυλούν πάνω σε αυτό, συμπαρασύροντας και όλες τις επιφανειακές μολύνσεις (βλ. **Εικόνα 2.2**).

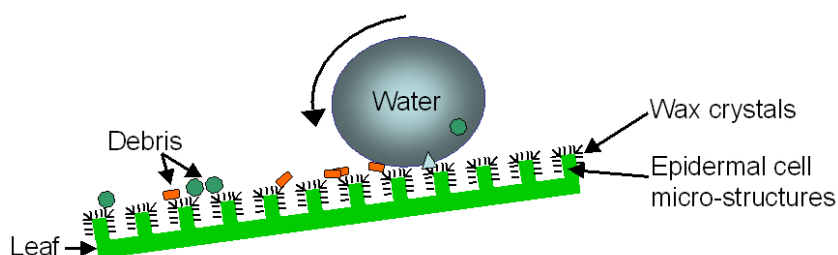
Άλλο χαρακτηριστικό παράδειγμα από τη φύση, είναι τα πόδια του εντόμου που περπατά στην θάλασσα και στις λίμνες (*water strider*), και τα φτερά του τερμίτη (Watson et al, 2010). Συγκεκριμένα για τα φτερά ενός water strider, έχει αποδειχθεί ότι στην επιφάνειά του φέρει ένα στρώμα από διαμορφώσεις που μοιάζουν με μικρές

βελόνες. Οι διαμορφώσεις αυτές παγιδεύουν αέρα ανάμεσά του, και ως αποτέλεσμα εκδηλώνεται μία έντονα υδροφοβική συμπεριφορά όταν το έντομο βρίσκεται στην επιφάνεια του νερού. Επίσης υπέρ-υδροφοβική συμπεριφορά έχει παρατηρηθεί και στα φτερά του τζίτζικα (cicada). Συγκεκριμένα η τάση αυτή που διαπιστώθηκε στα φτερά του τζίτζικα, φαίνεται να εξαρτάται από το επιφανειακό στρώμα κεριού που καλύπτει τα φτερά του, καθώς επίσης και από το μέγεθος της επιφάνειας των φτερών (Sun et al, 2009).



Εικόνα 2.1 3D μικροδομή του φύλου του λωτού.

Τα διάφορα φαινόμενα διαβροχής που εμφανίζονται στη φύση, οδήγησαν στην έντονη προσπάθεια μίμησης τους, τη λεγόμενη βιομιμητική (Biomimetics). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάστηκε εδώ και δεκαετίες για την επεξεργασία επιφανειών υπέρ-υδροφοβων, οι οποίες έχουν βρει εφαρμογή σε διατάξεις lap-on-a-chip, στην κατασκευή μικροκαναλιών, σε επιφάνειες self-cleaning (όπως για παράδειγμα γυάλινα τζάμια), σε ιατρικές συσκευές κτλ (Sun T. et al, 2005)



Εικόνα 2.2 Σχηματική αναπαράσταση του φαινομένου self-cleaning στο φύλο του λωτού.

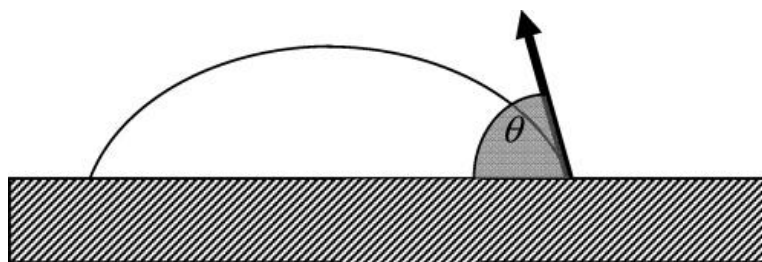
## 2.2 Θεμελίωση της έννοιας της διαβροχής

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η γωνία επαφής αποτελεί τη μαθηματική έκφραση της διαβροχής (Παπαγεωργίου Δ, 2009). Πρόκειται για ένα μέγεθος το οποίο μπορεί να μετρηθεί εύκολα στο εργαστήριο.

Προκειμένου να ορίσουμε τη γωνία επαφής, θεωρούμε μία σταγόνα νερού που έρχεται σε επαφή με τον αέρα και ισορροπεί σε μία στερεή επιφάνεια (βλ. **Εικόνα 2.3**). Γενικά όταν μία σταγόνα έρθει σε επαφή με μία ακλόνητη επιφάνεια, οι τριχοειδείς δυνάμεις οδηγούν την διεπιφάνεια υγρού-στερεού σε ισορροπία. Καθώς η σταγόνα απλώνει, η γωνία επαφής λαμβάνει μία σταθερή τιμή από την αρχική τιμή της (για τον υδράργυρο είναι  $180^0$ ) την στιγμή της επαφής, μέχρι τη γωνία που θα επέλθει ισορροπία, έστω  $\theta$ . Παρακάτω αναλύεται εκτενώς η φύση το φαινομένου από φυσικής και μαθηματικής σκοπίας, όπως επίσης και τα συναφή με αυτό φαινόμενα.

### 2.2.1 Διεπιφάνειες-Νόμος Young

Όπως φαίνεται η γωνία επαφής, είναι η γωνία που σχηματίζεται από την εφαπτομένη της διεπιφάνειας σταγόνας- αέρα και την στερεή επιφάνεια. Η γωνία εκφράζεται με τη βοήθεια του νόμου του Young, εφόσον έχουμε σύστημα 3 φάσεων, 2 εκ των οποίων είναι ρευστά (υγρό, ατμός). Η γωνία που προκύπτει είναι αποτέλεσμα της θερμοδυναμικής ισορροπίας της ελεύθερης επιφανειακής ενέργειας Gibbs (surface free energy),  $G$  στις διασυνδεδεμένες επιφάνειες υγρού, στερεού, αέρα (LaPorte, 1997).



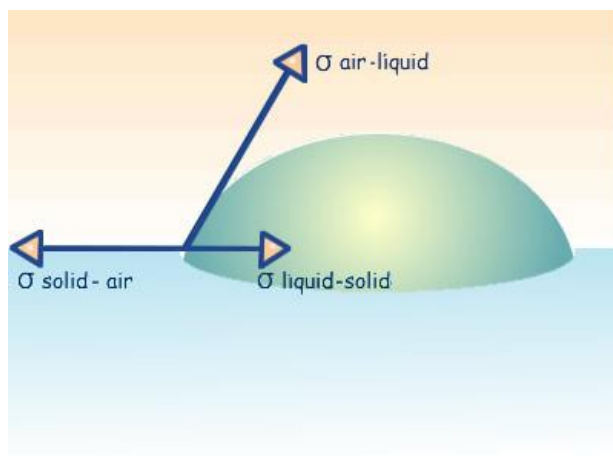
**Εικόνα 2.3** Σχηματική απεικόνιση σταγόνας που ισορροπεί σε μία στερεή επιφάνεια και περιτοιγίζεται από αέρα. Η γωνία επαφής συμβολίζεται με  $\theta$ .

Τις διεπιφάνειες τις συμβολίζουμε ως εξής:

- **S-V**, η διεπιφάνεια στερεού αέρα
- **S-L**, η διεπιφάνεια στερεού υγρού
- **L-V**, η διεπιφάνεια υγρού αέρα

Οι επιφανειακές τάσεις στις διεπιφάνειες είναι  $\gamma_{SV}$ ,  $\gamma_{SL}$ ,  $\gamma_{LV}$  (βλ. **Εικόνα 2.4**).

Η επιφανειακή τάση σε μία διεπιφάνεια ορίζεται ως η ελεύθερη ενέργεια Gibbs ανά επιφάνεια, για σταθερές τιμές θερμοκρασίας και πίεσης. Ορίζεται από την έκφραση:  $\gamma \equiv \left(\frac{\partial G}{\partial A}\right)_{P,T}$ . Η επιφανειακή τάση μπορεί να γίνει αντιληπτή και ως μέτρο της απαιτούμενης ενέργειας/έργου που απαιτείται για το σχηματισμό μίας επιφάνειας (Surface Tension-HyperPhysics). Ένα μακροσκοπικό μοντέλο που εξηγεί την προηγούμενη θεώρηση φαίνεται στην **εικόνα 2.5**. Ένα μόριο μακριά από την διεπιφάνεια νερού-αέρα σχηματίζει χημικούς δεσμούς με τα γειτονικά του μόρια (συγκεκριμένα 6 μόρια), με αποτέλεσμα κέρδος ενέργειας σύνδεσης (binding energy). Αντιθέτως, τα μόρια του νερού τα οποία βρίσκονται στη διεπιφάνεια, γειτνιάζουν με 5 μόρια, εφόσον έρχονται σε επαφή με τον αέρα και κατά συνέπεια δεν μπορούν να σχηματίσουν τους απαιτούμενους δεσμούς. Αυτή η έλλειψη δεσμών έχει ως αποτέλεσμα την ανάγκη για προσφορά ενέργειας προκειμένου να σχηματιστεί επιφάνεια. Η προαναφερθείσα προσφορά ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας, είναι η επιφανειακή τάση.



**Εικόνα 2.4** Αναπαράσταση των επιφανειακών τάσεων σε κάθε μία από τις διεπιφάνειες του συστήματος.

Η τάση της σταγόνας που βρίσκεται σε ισορροπία με την στερεή επιφάνεια είναι (όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως) η ελαχιστοποίηση της επιφανειακής ελεύθερης ενέργειας,  $G$ , η οποία εκφράζεται ως εξής:

$$G = \gamma_{SV}A_{SV} + \gamma_{LV}A_{LV} + \gamma_{SL}A_{SL} \quad (2.1)$$

Εάν η σταγόνα εξαπλωθεί απειροελάχιστα, έτσι ώστε η διεπιφάνεια S-L να αυξηθεί κατά  $dA$ , παρατηρείται ανάλογη μείωση στην διεπιφάνεια S-V, και ανάλογη αύξηση



στη διεπιφάνεια L-V. Η αλλαγή στην επιφανειακή ενέργεια  $G$  για την μεταβολή αυτή είναι :

$$dG = -\gamma_{SV}dA + \gamma_{LV}dA \cos\theta + \gamma_{SL}dA \quad (2.2)$$

Εφόσον όμως η σταγόνα ισορροπεί:

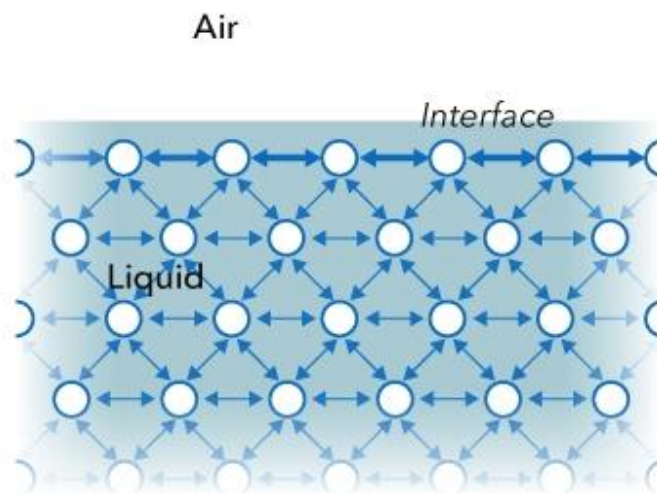
$$dG = 0, \text{ και επομένως:}$$

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos\theta, \text{ δηλαδή:}$$

$$\cos\theta = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \quad (2.3)$$

που αποτελεί και την έκφραση του νόμου του Άγγλου Φυσικού Thomas Young για την γωνία επαφής, σε μία τελείως επίπεδη επιφάνεια.

Από την σχέση 2.3, μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό, ότι τα φαινόμενα μικρής διαβροχής και ως εκ τούτου υδροφοβικότητας, σχετίζονται με μικρές διεπιφανειακές τάσεις  $\gamma_{SL}$ .



**Εικόνα 2.5.** Μικροσκοπικό μοντέλο για την περιγραφή της επιφανειακής τάσης σε διεπιφάνεια υγρού-αέρα.

Στην περίπτωση μίας μικροσκοπικής σταγόνας, μία επιπρόσθετη τιμή επιφανειακής τάσης, γνωστή ως line tension,  $\tau$ , συνεισφέρει στη συνολική ελεύθερη ενέργεια της σταγόνας (Wang et al, 2011). Λόγω του μήκους της τριπλής γραμμής στερεού-

υγρού-αέρα, ένας επιπρόσθετος όρος εμφανίζεται που οδηγεί στην τροποποιημένη εξίσωση του Young:

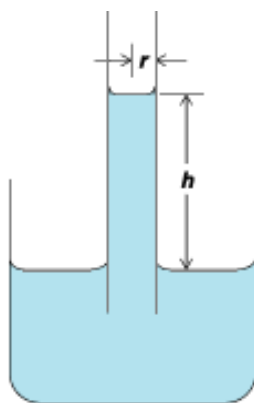
$$\gamma_{SV} = \gamma_b \cos \theta_\infty = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \left( \cos \theta + \frac{\tau}{R \gamma_{LV}} \right) = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \theta + \frac{\tau}{R} \quad (2.4).$$

Μία άμεση συνέπεια της ύπαρξης επιφανειακών τάσεων, και της ισοροπίας σταγόνας-στερεής επιφάνειας που εκφράζει ο νόμος του Young είναι τα **τριχοειδή φαινόμενα (capillary effects)**. Το όνομά τους προκύπτει από τη λατινική λέξη *capillus*, δηλαδή τρίχα. Η βαρύτητα των τριχοειδών φαινομένων είναι έντονη όταν εξετάζονται ροές μικροκλίμακας, δηλαδή ροές σε μικροκανάλια διαστάσεων ίδιων με τις διαστάσεις της ανθρώπινης τρίχας της τάξης των 50 μm (Brigo, 2008).

Παρακάτω βλέπουμε πως ένα τριχοειδές κανάλι, βυθισμένο σε μία δεξαμενή νερού, είναι γεμάτο μέχρι ενός ύψους  $h$ , τέτοιο ώστε η υδροστατική πίεση που προκύπτει από τη στήλη του υγρού να ισούται με τη μεταβολή της πίεσης του στην καμπύλη διεπιφάνεια υγρού-αέρα.

Η πίεση αυτή ισούται με:  $\rho_{water} h g = \Delta p_{air-water} = \frac{2 \gamma_{LV} \cos \theta}{r_0}$  (2.5).

Μπορούμε να πούμε ότι τα τριχοειδή φαινόμενα είναι η τάση των υγρών να προσκολλώνται σε επιφάνειες κατασκευασμένες από διαβρέξιμα υλικά. Εύκολα συμπεραίνει κανείς ότι λόγω του φαινομένου αυτού, είναι δύσκολη πλήρωση ενός υδροφοβικού καναλιού με νερό, και η απομάκρυνση νερού από ένα υδροφιλικό κανάλι.



Εικόνα 2.6 Ερμηνεία των τριχοειδών φαινομένων

### 2.2.2 Δυνάμεις συνοχής, συνάφειας-Συντελεστής $S$

Εκτός από την χρήση της γωνίας επαφής για την μαθηματική θεμελίωση του μεγέθους της διαβροχής μία επιφάνειας, ένας άλλος συντελεστής  $S$  (**Initial**

**spreading coefficient**) (Brigo, 2008) που ορίζεται από την διαφορά του έργου συνοχής και συνάφειας, μας δίνει ένα μέτρο της έντασης του φαινομένου.

Σύμφωνα με τον Dupré, το έργο συνοχής ανά μονάδα επιφάνειας (**cohesion work**), μίας υγρής έστω φάσης  $W_C$ , είναι το έργο που απαιτείται για να διαχωρίσουμε εγκάρσια μία στήλη υγρού σε δύο διεπιφάνειες υγρού-αέρα. Το έργο συνοχής δίνεται από την σχέση:  $W_C=2\gamma_{LV}$  (2.6). Εύκολα μπορεί να συμπεράνει κανείς, ότι το έργο συνοχής που απαιτείται εξαρτάται άμεσα από τις έντονες ενδομοριακές δυνάμεις που ασκούνται στο υγρό, δηλαδή από τις δυνάμεις συνοχής (**cohesive forces**). Κατά ανάλογο τρόπο ορίζεται το έργο συνάφειας ανά μονάδα επιφάνειας στερεού- υγρού (**adhesion work**), ως το έργο που απαιτείται για να διαχωρίσουμε μία στήλη στερεού-υγρού σε δύο στήλες στερεού-αέρα και υγρού-αέρα, σχηματίζοντας τις αντίστοιχες διεπιφάνειες. Το έργο συνάφειας ορίζεται ως εξής:  $W_A=\gamma_{SV}+\gamma_{LV}-\gamma_{SL}$  (2.7).

Ορίζεται στη συνέχεια ο συντελεστής  $S$ , ως:  $S=W_A-W_C$  (2.8). Υπάρχουν τρεις πιθανές καταστάσεις διαβροχής αναλόγως της τιμής του  $S$ :

- $S \geq 0$ . **Πλήρης διαβροχή.** Η μηχανική ισορροπία δεν μπορεί να επιτευχθεί. Μία σταγόνα νερού που θα τοποθετηθεί σε μία επιφάνεια, εξαπλώνεται, σχηματίζοντας ένα ομοιόμορφο στρώμα. Η γωνία επαφής είναι  $0^0$ .
- $S \leq -2\gamma_{LV}$ . **Καθόλου διαβροχή.** Η μηχανική ισορροπία δεν μπορεί να επιτευχθεί. Το υγρό διαμορφώνεται έτσι ώστε να ελαχιστοποιεί την διεπιφάνειά που δημιουργείται λόγω της επαφής του με το στερεό.
- $-2\gamma_{LV} < S < 0$ . **Μερική διαβροχή.** Η μηχανική ισορροπία επιτυγχάνεται για τιμή της γωνίας  $\theta$  που δίνεται από το νόμο του Young.

### 2.2.3 Γωνία υστέρησης

Οι πειραματικές τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί για την μέτρηση της γωνίας επαφής, μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: αυτές που βασίζονται στην γωνιομετρία (goniometry), και ασχολούνται με τις **στατικές γωνίες επαφής** και σε αυτές που βασίζονται στην μέτρηση των τάσεων (tensiometry), και πραγματοποιούν μετρήσεις των **δυναμικών γωνιών επαφής** (Vogonov et al, 2008). Πειραματικά έχει αποδειχθεί ότι η τιμή της στατικής γωνία επαφής εξαρτάται από την πρόσφατη ιστορία αλληλεπίδρασης της σταγόνας με το περιβάλλον (Eggers et al, 2004). Αν η σταγόνα έχει πρόσφατα εξαπλωθεί, ονομάζεται **γωνία επαφής εξάπλωσης (advanced CA)**, ενώ αν έχει πρόσφατα συσταλεί ονομάζεται **γωνία επαφής υποχώρησης (receded CA)**. Αν η σταγόνα κινείται, τότε πρόκειται για δυναμική γωνία επαφής και τα αντίστοιχα όρια καλούνται **advancing CA, receding CA** (βλ. **Εικόνα 2.7**). Η διαφορά των δύο γωνιών δίνει την γωνία υστέρησης, **hysteresis contact angle (CA)**.

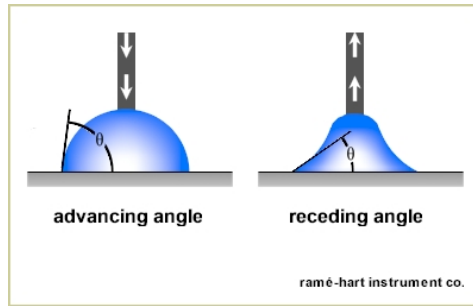
Η γωνία υστέρησης οφείλει την ύπαρξή της στην τραχύτητα της επιφάνειας και στην ύπαρξη ανομοιογενειών ή και επιφανειακών ρύπων. Εύκολα προκύπτει ότι η

υστέρηση αποτελεί μέγεθος για τον χαρακτηρισμό μίας επιφάνειας ως ετερογενή, καθώς επίσης και μέτρο της δυνατότητας κίνησης μίας σταγόνας σε μία τέτοια επιφάνεια. Σε περιπτώσεις προσομοιώσεων, όπου τα βαρυτικά φαινόμενα καθώς επίσης και οι συνθήκες ετερογένειας αμελούνται, η γωνία υστέρησης μπορεί να αμεληθεί και ο υπολογισμός της γωνίας επαφής να επιτευχθεί μέσω της χρήσης εξισώσεων που βασίζονται σε γεωμετρικές αρχές (Voropon S., 2006).

Όπως γίνεται αντιληπτό, η έννοια της γωνίας επαφής είναι ιδιαίτερα σημαντική για τα φαινόμενα διαβροχής. Ωστόσο η έννοια της διαβροχής διέπεται και από άλλες παραμέτρους, μερικές από τις οποίες περιγράφονται ακολούθως για λόγους πληρότητας:

- Τα μόρια του νερού έχουν την τάση να σχηματίζουν λεπτά στρώματα πάνω από επιφάνειες, κατασκευασμένες από αρκετά είδη υλικών. Αναλόγως του πάχους αυτών των στρωμάτων, η **πίεση αποσύνδεσης (disjoining pressure)**, μπορεί να οδηγήσει για θετικές τιμές σε ανάπτυξη στερεών στρωμάτων, δηλαδή σε αποσύνδεση των αρχικά σχηματιζόμενων στρωμάτων από το κυρίως ρεύμα του υγρού από το οποίο προέρχονται. Σε αυτήν την περίπτωση, η σταγόνα κοντά στην τριπλή γραμμή επαφής υγρού-νερού-στερεού, χάνει την σφαιρική της μορφή και τείνει να σχηματίσει ένα προκαταρκτικό στρώμα (Hirasaki G., 2002), και γι αυτό το λόγο η πραγματική γωνία επαφής που αναπτύσσεται είναι μικρότερη αυτής που παρατηρείται.
- Για πρακτικές περιπτώσεις, η γωνία επαφής που αναπτύσσεται με την εναπόθεση μίας σταγόνας σε μία στερεή επιφάνεια, θεωρείται στατική. Στην πραγματικότητα όμως, η εναπόθεση της σταγόνας συνοδεύεται με προσθήκη ποσότητας νερού στο σύστημα, που έχει σαν αποτέλεσμα εκδήλωση φαινομένων εξάτμισης. Είναι επομένως δύσκολο να αμελήσουμε τα δυναμικά φαινόμενα που εξελίσσονται στο σύστημα, ακόμα και όταν η θεώρηση είναι στατική.
- Στην περίπτωση μικρών σταγόνων και τριπλής γραμμής επαφής που παρουσιάζει καμπυλότητα, δεν πρέπει να αμελείται η επίδραση της τάσης **γραμμής επαφής-contact line tension**, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως.

Κλείνοντας το κεφάλαιο αυτό, επισημαίνεται ότι τιμές της γωνίας επαφής από  $0^{\circ}$  μέχρι  $90^{\circ}$ , έχουν ως αποτέλεσμα υδρόφιλη συμπεριφορά της επιφάνειας, με γωνίες κάτω των  $5^{\circ}$ , να χαρακτηρίζουν τις υπέρ-υδρόφιλες επιφάνειες, και την γωνία των  $0^{\circ}$  να χαρακτηρίζει την κατάσταση της πλήρους διαβροχής. Τιμές γωνίας επαφής μεγαλύτερης των  $90^{\circ}$  χαρακτηρίζουν υδρόφοβες επιφάνειες, με γωνίες μεγαλύτερες των  $120^{\circ}$  να αναφέρονται σε ultra-υδροφοβικές επιφάνειες, και με γωνίας μεγαλύτερες των  $150^{\circ}$ , να αναφέρονται σε υπέρ-υδροφοβικές επιφάνειες (Roach et al, 2007).



Εικόνα 2.7 Advancing CA, Receding CA.

## 2.3 Υδροφοβικότητα

Τις τελευταίες δεκαετίες έχει σημειωθεί αυξημένο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη υπέρ-υδρόφοβων επιφανειών. Ο λόγος είναι οι χαμηλές τιμές τριβών που συνοδεύουν τη ροή σε τέτοιες επιφάνειες, με το πεδίο των εφαρμογών να είναι ιδιαίτερα ευρύ: διατάξεις lab-on-a-chip, ανάπτυξη προστατευτικών επενδύσεων κατά της διάβρωσης, συμβολή στην οικονομία ενέργειας σε περιπτώσεις ροής σε αντλίες κτλ (Nosonovsky et al, 2009). Εκτός της περίπτωσης των υδροφοβικών επιφανειών, ενδιαφέρον παρουσιάζει και η μελέτη επιφανειών, που παρουσιάζουν “εχθρική” συμπεριφορά σε άλλα είδη υγρών, για παράδειγμα οργανικών υγρών (λάδι). Τέτοιες επιφάνειες χαρακτηρίζονται ως **superoleophobic** (Nosonovsky et al 2009). Σε περίπτωση που μια επιφάνεια εμφανίζει και τις δύο συμπεριφορές που αναφέρθηκαν, χαρακτηρίζεται ως **αμφοφοβική** (amphiphobic).

Η μείωση της τριβής που συνοδεύει τη ροή σε υδρόφοβες επιφάνειες, είναι το αποτέλεσμα της ολίσθησης που λαμβάνει χώρα στα τοιχώματά τους. Το φαινόμενο της ολίσθησης της ροής συζητήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, και ακολούθως θα εξετασθεί ο μηχανισμός που οδηγεί στην εμφάνισή του, συγκεκριμένα για την περίπτωση των υπέρ-υδρόφοβων επιφανειών. Προτού όμως φτάσουμε σε αυτό το σημείο, θα περιγραφούν οι παράμετροι που καθιστούν μία επιφάνεια υδρόφοβη, δηλαδή η χημική σύσταση της επιφάνειας, οι διαμορφώσεις τραχύτητας και η ύπαρξη νανοφουσαλίδων (nanobubbles) ανάμεσα στις διαμορφώσεις αυτές, με τη μεγαλύτερη προσοχή στραμμένη στην τραχύτητα.

### 2.3.1 Συντελεστές Υδροφοβικότητας

Η προϋπόθεση για να χαρακτηριστεί αρχικά μία επιφάνεια υδροφοβική είναι η χημική της σύσταση, εφόσον όπως σημειώθηκε και προηγουμένως η διαβρεξιμότητα είναι ευθέως ανάλογη της επιφανειακής ενέργειας. Υλικά που έχουν χαμηλή επιφανειακή ενέργεια όπως για παράδειγμα επιφάνειες που έχουν εξαγωνικούς δακτύλιους  $-CF_3$  είναι υπεύθυνα για την ανάπτυξη μεγάλων γωνιών επαφής (Παπαγεωργίου 2009). Οι υδρόφοβες επιφάνειες είναι εύκολο να καθαριστούν

εφόσον χαρακτηρίζονται από χαμηλή επιφανειακή ενέργεια, δεν εκδηλώνουν όμως ιδιότητες αυτοκαθαρισμού όπως συμβαίνει με τις υπέρ-υδρόφοβες επιφάνειες. Αύξηση της υδροφοβικότητας επιτυγχάνεται μέσω περαιτέρω χημικής τροποποίησης των επιφανειών, καθώς επίσης και επεξεργασίας της διαμόρφωσης των επιφανειών τους. Μέθοδοι χημικής επεξεργασίας είναι η εναπόθεση στην επιφάνεια νανοδιαμορφώσεων άνθρακα (Joseph et al,2006) με τη μέθοδο PECVD (Plasma-enhanced chemical vaporation deposition). Επίσης η εναπόθεση TEFLON (πολυτετραφθοροαιθυλενίου) στα τοιχώματα αποτελεί τρόπο ενίσχυσης της ήδη υπάρχουσας υδροφοβικότητας.

Η συμβολή της τραχύτητας στην εκδήλωση υπέρυδροφοβικής συμπεριφοράς εξηγείται με δύο μηχανισμούς (βλ. **Εικόνα 2.8**). Ο πρώτος μηχανισμός είναι γνωστός ως κατάσταση **Cassie**. Στην περίπτωση αυτή, αέρας είναι παγιδευμένος στις περιοχές (**air pockets**) που αναπτύσσονται στην επιφάνεια λόγω της τραχύτητας, με αποτέλεσμα το νερό να βρίσκεται εν μέρει στον αέρα, και όχι πάνω στην επιφάνεια, δηλαδή να αιωρείται. Η κατάσταση αυτή της αιώρησης του νερού είναι γνωστή και ως **σύνθετη κατάσταση** (composite).

Ο αέρας που βρίσκεται παγιδευμένος στις διαμορφώσεις της τραχύτητας, είναι υπό τη μορφή νανοφυσαλίδων (nanobubbles). Η ύπαρξη αυτών των φυσαλίδων έχει οδηγήσει στον χαρακτηρισμό της κατάστασης Cassie ως σύνθετη, εφόσον συνυπάρχουν οι διεπιφάνειες αέρα-υγρού και υγρού-στερεού, όπως θα εξετασθεί και παρακάτω. Η παρατήρηση των νανοφυσαλίδων κατέστη δυνατή από τα μέσα της δεκαετίας του 1990, λόγω της εμφάνισης πειραματικών εγκαταστάσεων υψηλής ακρίβειας, όπως για παράδειγμα της AFM (Atomic Force Microscopy) (Inshida et al, 2000).

Ο δεύτερος μηχανισμός είναι γνωστός ως κατάσταση **Wenzel**. Εδώ το νερό φαίνεται να ακολουθεί τις διαμορφώσεις της τραχύτητας της επιφάνειας, και να εισχωρεί σε αυτές. Στην συγκεκριμένη κατάσταση έχουμε αύξηση της διεπιφανειακής τάσης στην επιφάνεια στερεού-υγρού. Για την ομοιογενή διεπιφάνεια στερεού-υγρού που περιγράφει η κατάσταση Wenzel (είναι ομοιογενής, εφόσον το νερό ακολουθεί τη γεωμετρία της επιφάνειας), η γωνία επαφής της τραχιάς επιφάνειας έχει γραμμική σχέση με την αντίστοιχη γωνία της επίπεδης επιφάνειας, και η σχέση που τις συνδέει είναι:  $\cos\theta = R_f \cos\theta_0$ , (2.9), όπου  $R_f$  η αδιάστατη παράμετρος τραχύτητας που ορίζεται ως το κλάσμα του εμβαδού της τραχιάς επιφάνειας προς το εμβαδό της αντίστοιχης επίπεδης. Συμπεραίνουμε εύκολα ότι η τιμή της παραμέτρου αυτής συμβάλει στην αύξηση ή τη μείωση της γωνίας επαφής, και κατά συνέπεια στην ένταση του φαινομένου.

Για την κατάσταση Cassie, η εικόνα είναι διαφορετική, εφόσον πρόκειται για σύνθετη επιφάνεια. Τα δύο διαφορετικά τμήματα που συνθέτουν αυτήν την κατάσταση είναι τα  $f_{SL}$ , και  $f_{LA}$ , όπου το πρώτο αντιπροσωπεύει το κλάσμα της διεπιφάνειας στερεού-υγρού προς τη συνολική επιφάνεια, και το δεύτερο το κλάσμα

της διεπιφάνειας υγρού-αέρα προς τη συνολική επιφάνεια, με  $f_{SL}+f_{LA}=1$ . Επίσης οι γωνίες επαφής των διαφορετικών φάσεων συμβολίζονται με  $\theta_1$  και  $\theta_2$  αντίστοιχα.

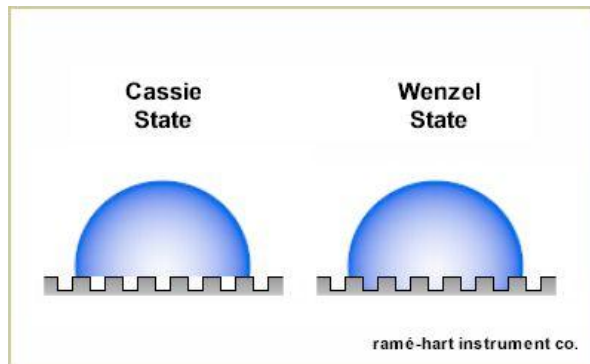
Η γωνία επαφής θα είναι το άθροισμα των γωνιών επαφής των δύο διαφορετικών τμημάτων:  $\cos\theta=f_1\cos\theta_1+f_2\cos\theta_2$  (2.10). Ισχύει  $f_1=f_{SL}$ ,  $f_2=f_{LA}=1-f_{SL}$ . Επίσης για την διεπιφάνεια υγρού-αέρα ισχύει  $\theta_2=180^\circ$ , και  $\theta_1=\theta_0$ , δηλαδή η γωνία επαφής της διεπιφάνειας στερεού-υγρού. Με βάση τα παραπάνω, η προηγούμενη σχέση γράφεται ως εξής (Nosonovsky et al, 2009) :

$$\cos\theta=f_{SL}R_f\cos\theta_0+(1-f_{SL})(-1)=R_f f_{SL}\cos\theta_0-1+f_{SL}, \text{ ή } \cos\theta=R_f\cos\theta_0-f_{LA}(R_f\cos\theta_0+1) \quad (2.11)$$

Με βάση την τελευταία σχέση, προκύπτει ότι για τις υδρόφοβες επιφάνειες, αύξηση της τιμής του  $f_{LA}$ , έχει ως αποτέλεσμα αύξηση της γωνίας επαφής. Μάλιστα έχει αποδειχθεί ότι αύξηση του  $f_{LA}$ , πέρα από κάποιο όριο, έχει ως αποτέλεσμα μετατροπή μίας υδρόφιλης επιφάνειας σε υδρόφοβη, με το όριο αυτό να είναι:  $f_{LA}=\frac{R_f\cos\theta_0}{R_f\cos\theta_0+1}$  (2.12), για  $\theta_0<90^\circ$  (Jung et al, 2006).

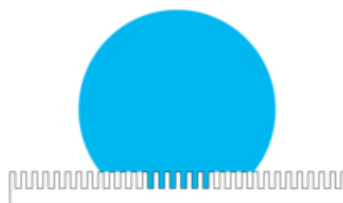
Πρακτικά η μετάβαση από την μία κατάσταση στην άλλη συντελείται όταν  $CA_{Cassie}=CA_{Wenzel}$ . Έχει αποδειχθεί ότι η κατάσταση Cassie παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές ενέργειας από την κατάσταση Wenzel, πράγμα το οποίο δείχνει ότι η μεταστροφή Cassie-Wenzel, παρατηρείται συχνά σε αντίθεση με την αντίστροφη που συντελείται μόνο υπό προϋποθέσεις. Οι παράγοντες που φαίνεται να επηρεάζουν τη μετάβαση, πιο συγκεκριμένα μπορεί να σχετίζονται με το βάρος της σταγόνας, την καμπυλότητα της γεωμετρίας της σταγόνας (πράγμα το οποίο έχει να κάνει με την διαφορά πίεσης ανάμεσα στο εσωτερικό και στο εξωτερικό της σταγόνας), την δράση ενός νουκλεονικού μηχανισμού που ξεκινά από τον πυρήνα της σταγόνας, την μετακίνηση της τριπλής γραμμής (triple line) αέρα-υγρού-στερεού λόγω εξωτερικών παραγόντων ή και μείωση του μεγέθους της σταγόνας που οδηγεί σε αύξηση της πίεσης Laplace  $P=\frac{2\gamma}{R}$ , που αποτελεί την τιμή πέρα από την οποία η κατάσταση Cassie χάνει τη σταθερότητά της (Marmur, 2003).

Γενικά, το μοντέλο Cassie προτιμάται έναντι του μοντέλου Wenzel, για τις υπέρ-υδροφοβικές επιφάνειες και αυτό λόγω της μικρότερης διεπιφάνειας στερεού-υγρού που σημειώνεται. Από την άλλη πλευρά, η ομογενής επιφάνεια του Wenzel, είναι πιο σταθερή, σε αντίθεση με την σύνθετη επιφάνεια του Cassie. Μία υδρόφοβη επιφάνεια, που εμφανίζει την συμπεριφορά Wenzel, δεν εμφανίζει την ίδια ένταση “εχθρική” συμπεριφορά στο νερό που θα εμφάνιζε μία αντίστοιχη επίπεδη επιφάνεια, και αυτό λόγω της τάσης των σταγόνων να “κολλάνε” στις διαμορφώσεις της τραχύτητας. Το αντίθετο συμβαίνει με την περίπτωση Cassie, αφού μία τέτοια επιφάνεια διευκολύνει σε σημαντικό βαθμό την κίνηση των σταγόνων από ότι μία ισοδύναμη επίπεδη επιφάνεια Wenzel (Roach et al, 2007).



**Εικόνα 2.8 Μοντέλο Cassie, Μοντέλο Wenzel.**

Μέσω προσομοιώσεων, έχει επιτευχθεί η ανάπτυξη επιφανειών που εμφανίζουν ενδιάμεση συμπεριφορά Cassie-Wenzel. Στην περίπτωση αυτή, οι σταγόνες προσκολλώνται εν μέρει στις διαμορφώσεις της επιφάνειας, ενώ υπάρχει ακόμα αέρας παγιδευμένος σε αυτές. Η ενδιάμεση κατάσταση Cassie-Wenzel (βλ. **Εικόνα 2.9**), έχει ως αποτέλεσμα μεγάλη γωνία υστέρησης, εφόσον η επιφανειακή ενέργεια της συγκεκριμένης επιφάνειας είναι ίση με αυτήν μίας αντίστοιχης επίπεδης επιφάνειας. Γίνεται έτσι κατανοητό, ότι η τραχύτητα πέρα από την επίδρασή της στη γωνία επαφής, επηρεάζει σημαντικά και τη γωνία υστέρησης, η οποία είναι αρκετά ευαίσθητη στις λεπτομέρειες σχεδιασμού μίας επιφάνειας. Γενικά για τις επιφάνειες που εκδηλώνουν υπέρ-υδροφοβική συμπεριφορά, η μέτρηση μίας μικρής γωνίας υστέρησης είναι επιθυμητή, αφού έτσι οι σταγόνες του νερού κυλούν ευκολότερα πάνω σε αυτές, κάτι το οποίο έχει δειχθεί για σύνθετες επιφάνειες με αύξηση του  $f_{LA}$  (Nosonovksy et al, 2009).



**Εικόνα 2.9 Ενδιάμεση συμπεριφορά Cassie-Wenzel.**

### ***2.3.2 Μηχανισμός της ολίσθησης της ροής σε υπερ-υδρόφοβες επιφάνειες***

Όπως διατυπώθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, η συνθήκη μη-ολίσθησης της ροής, είναι μία θεμελιώδης αρχή της μηχανικής των ρευστών σε περιπτώσεις



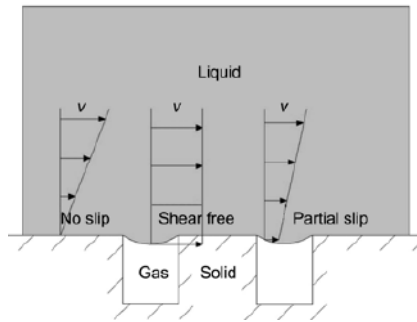
μακροκλίμακας, ενώ για μετάβαση σε περιπτώσεις μικροκλίμακας και νανοκλίμακας, η εγκυρότητά της τίθεται υπό αμφισβήτηση. Πειραματικά έχει αποδειχθεί ότι το φαινόμενο της ολίσθησης της ροής, λαμβάνει χώρα πάνω σε επιφάνειες μικροκαναλιών που φέρουν υδροφοβική επένδυση (Tretheway 2002). Για λείες υδροφοβικές επιφάνειες το φαινόμενο της ολίσθησης από σκοπιάς ρευστομηχανικής περιγράφεται μέσω της εξίσωσης 1.14.

Για την περίπτωση των υπέρ-υδροφοβικών επιφανειών (βλ. **Εικόνα 2.10**), έχει δειχθεί ότι ο μηχανισμός που προκαλεί την ολίσθηση είναι πολύπλοκότερος (Jian et al, 2009). Η διαπίστωση αυτή γίνεται κατανοητή αν λάβουμε υπόψη μας την ύπαρξη των διαμορφώσεων τραχύτητας που υπάρχουν στις υπέρ-υδρόφοβες επιφάνειες με αποτέλεσμα τις πολύ μικρότερες επιφανειακές τάσεις στη διεπιφάνεια στερεού-υγρού, από αυτές που καταγράφονται για την περίπτωση λείων υδροφοβικών επιφανειών. Λόγω αυτής της διαφοράς, το μήκος ολίσθησης στην διεπιφάνεια στερεού-υγρού, τείνει στις υπέρ-υδροφοβικές επιφάνειες στο άπειρο.

Ως εκ τούτου, προκειμένου να εκτιμηθεί η ολίσθηση σε υπέρ-υδροφοβικές επιφάνειες, εισήχθη η έννοια του **ενεργού μήκους ολίσθησης (effective slip length)**, το οποίο ορίζεται ως: για ροή με μεικτές συνθήκες ολίσθησης-μη ολίσθησης, το ενεργό μήκος ολίσθησης ορίζεται ως το μήκος ολίσθησης ροής που ικανοποιεί την 1.14, και: (i) οδηγείται από την ίδια κλίση πίεσης (ii) έχει την ίδια παροχή μάζας με τη ροή που εξετάζουμε.

Σε περιπτώσεις, όπου υπάρχει διαφορά ανάμεσα σε ροές που έχουν ως γενεσιουργό δύναμη την κλίση της πίεσης (ροή Poiseuille) και σε αυτές που πραγματοποιούνται λόγω της δράσης των δυνάμεων διάτμησης, το ενεργό μήκος ολίσθησης μπορεί να οριστεί ως το μήκος ολίσθησης μία ροής που ικανοποιεί την εξίσωση ορισμού που δόθηκε παραπάνω, οδηγείται από την ίδια δύναμη πίεσης με αυτήν της ροής που εξετάζεται, και έχει επίσης και τον ίδιο ρυθμό διάτμησης (Jian et al, 2009). Σύμφωνα με αυτόν τον ορισμό, το ενεργό μήκος ολίσθησης για τη ροή ρευστού μεταξύ δύο επίπεδων υπερ-υδροφοβικών επιφανειών, δίνεται από τη σχέση:  $b_{eff} = \frac{\mu\nu(D)}{\tau} - D$  (2.13), όπου,  $\mu$  η συνεκτικότητα του ρευστού μέσα στη διαμόρφωση,  $\nu(D)$  η σχετική ταχύτητα ανάμεσα στις δύο επιφάνειες,  $\tau$  η διατμητική τάση  $D$  η απόσταση των επιφανειών.

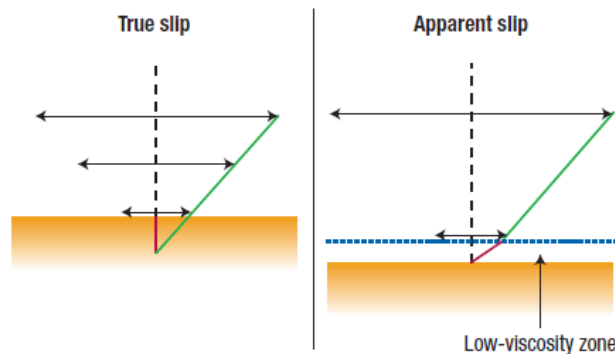
Πέρα από τον ορισμό του ενεργού μήκους ολίσθησης, είναι συνήθης η διάκριση της έννοιας σε **πραγματική ολίσθηση (true slip)** και **φαινόμενη ολίσθηση (apparent slip)** (Granick et al, 2003). Και στις δύο περιπτώσεις η ταχύτητα τείνει στο μηδέν σε μία υποθετική ταχύτητα μέσα στο τοίχωμα, ενώ πάνω σε αυτό έχει πεπερασμένη τιμή διάφορη του μηδενός.



Εικόνα 2.10 Διανομή των ταχυτήτων σε διαφορετικές θέσεις μίας υπέρ-υδρόφοβης επιφάνειας

Όταν αναφερόμαστε σε πραγματική ολίσθηση η κατάσταση είναι όντως έτσι. Στην περίπτωση της φαινόμενης ολίσθησης συμπεριλαμβάνεται στο ρευστό ένας συντελεστής χαμηλής συνεκτικότητας, ο οποίος διευκολύνει τη ροή λόγω του ότι βρίσκεται ανάμεσα στο ρευστό και στο τοίχωμα διαχωρίζοντάς τα. Η κλίση της ταχύτητας είναι εδώ μεγαλύτερη, και αυτό γιατί η συνεκτικότητα είναι μειωμένη (βλ. **Εικόνα 2.11**).

Στην εικόνα (**2.11**) η μπλε γραμμή δείχνει το σύνορο μεταξύ του ρευστού και της περιοχής που προκύπτει λόγω της συνιστώσας χαμηλού ιξώδους. Με βάση την πράσινη γραμμή φαίνεται ότι η ταχύτητα τείνει στο μηδέν μέσα στην επιφάνεια του τοιχώματος, όπως συμβαίνει και στην περίπτωση της πραγματικής ροής, ενώ στην πραγματικότητα αυτό δεν ισχύει (κόκκινη γραμμή). Δηλαδή απλούστερα, δημιουργείται η αίσθηση ότι υπάρχει ολίσθηση, ενώ το μόνο που συμβαίνει είναι η διευκόλυνση της κίνησης του ρευστού λόγω της ύπαρξης αυτής της συνιστώσας. Γενικά σε περιπτώσεις, όπου αναλύεται η συμπεριφορά πραγματικών συστημάτων με σκοπό την έρευνα της δομής και της χημικής σύστασης των υλικών, ο διαχωρισμός ανάμεσα σε αυτές τις δύο περιπτώσεις είναι αναγκαίος.



Εικόνα 2.11 Διαφορά πραγματικής ολίσθησης-φαινόμενης ολίσθησης

Ο μηχανισμός ολίσθησης της ροής, έχει τις βάσεις του στις αρκετά διαφοροποιημένες εξισώσεις δυναμικής που ισχύουν στις μικροροές (βλ. **Εικόνα 2.12**), και εξηγείται αναλυτικά ακολούθως (Παπαγεωργίου Δ, 2009).

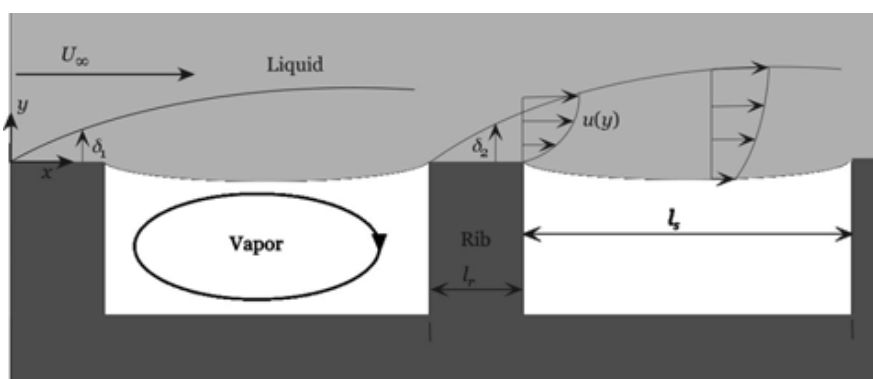
Θεωρούμε το υγρό το οποίο ρέει πάνω από τις διαμορφώσεις της τραχύτητας, κάθετα προς αυτές έστω με ταχύτητα  $U_\infty$ . Κατά τη διέλευση του υγρού πάνω από την κοιλότητα, παρατηρείται μείωση της επιφανειακής τάσης στην διεπιφάνεια, και παράλληλος σχηματισμός οριακού στρώματος. Εάν η κοιλότητα έχει μήκος τέτοιο, έτσι ώστε να επικρατήσει η ίδια συμπεριφορά του υγρού όσο αφορά το προφίλ ταχύτητας, η συνθήκη μη-ολίσθησης ισχύει κανονικά, και η ταχύτητα στο τοίχωμα γίνεται ίση με μηδέν. Κατά την ροή του υγρού πάνω στην κοιλότητα, δηλαδή για  $l_r < x < l_r + l_s$ , το υγρό δεν θα είναι πλέον σε επαφή με τη στερεή επιφάνεια, και η ταχύτητα του υγρού στη διεπιφάνεια υγρού-υδρατμού θα πρέπει να είναι μη-μηδενική. Κατά συνέπεια, στις επιφάνειες αυτές, λαμβάνουν χώρα φαινόμενα τα οποία δεν είναι συνήθη στις περιπτώσεις κλασσικής μηχανικής.

Καταρχάς η ταχύτητα του υγρού στις διεπιφάνειες υγρού-υδρατμού θα αυξάνεται, ξεκινώντας από το μηδέν στο απώτατο άκρο της διαμόρφωσης. Οι ταχύτητες υγρού και των υδρατμών είναι ίδιες, με παράλληλη μείωση των διεπιφανειακών τάσεων. Η μείωση αυτή έγκειται στην μεγαλύτερη τιμή του ιξώδους της υγρής φάσης από το ιξώδες της αέριας (συγκεκριμένα 2 τάξεις μεγέθους). Η κατάσταση αυτή χαρακτηρίζεται “*shear-free*”, εφόσον οι δυνάμεις συνάφειας γίνονται πολύ μικρές, και θεωρούνται τελικά αμελητέες. Η επίδραση των διαφορετικών τάξεων μεγέθους της συνεκτικότητας στην ένταση του φαινομένου γίνεται αντιληπτή και μέσω της σχέσης:  $\beta = h \left( \frac{n_1}{n_2} - 1 \right)$  (2.14), όπου  $h$ , το πάχος του στρώματος που σχηματίζει η αέρια φάση. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε ότι για λόγο  $\frac{n_1}{n_2}=50$ , προκύπτει σχετικό μήκος ολίσθησης ίσο με 500nm (Lauga et al, 2004).

Κατά την διέλευση του υγρού από τη δεύτερη κοιλότητα της τραχύτητας, δημιουργείται εκ νέου οριακό στρώμα, ενώ οι επιφανειακές τάσεις της διεπιφάνειας υγρού-αερίου μειώνονται κατά τη διεύθυνση κίνησης του υγρού. Η συμπεριφορά αυτής της ροής, επαναλαμβάνεται σε όλη την επιφάνεια της ροής, και μάλιστα η γεωμετρία των κοιλοτήτων μπορούν να καθορίσουν σημαντικά την πορεία του φαινομένου. Για διαμορφώσεις τραχύτητας ίδιου μοτίβου, καθ’ όλη την επιφάνεια, το φαινόμενο παρουσιάζει περιοδικό χαρακτήρα κατά μήκος του καναλιού.

Ένα ζήτημα που έχει απασχολήσει, είναι η σχέση της γωνίας επαφής με το μήκος ολίσθησης. Γενικά έχει επικρατήσει η άποψη, ότι μεγάλη γωνία επαφής έχει ως αποτέλεσμα μεγάλο μήκος ολίσθησης. Ειδικότερα, όταν αναζητείται επιφάνεια με την ιδιότητα της μικρής αντίστασης τριβής, η μεγάλη γωνία επαφής είναι το κύριο κριτήριο για την επιλογή. Από την άλλη πλευρά, η χρήση της γωνίας επαφής με σκοπό την ανάδειξη της υδροφοβικότητας, έχει αμφισβητηθεί, και αυτό λόγω του ότι δεν συνδέεται με τα δυναμικά φαινόμενα, όπως για παράδειγμα με την δύναμη που απαιτείται για να κινηθεί μία σταγόνα σε μία επιφάνεια. Στην πραγματικότητα

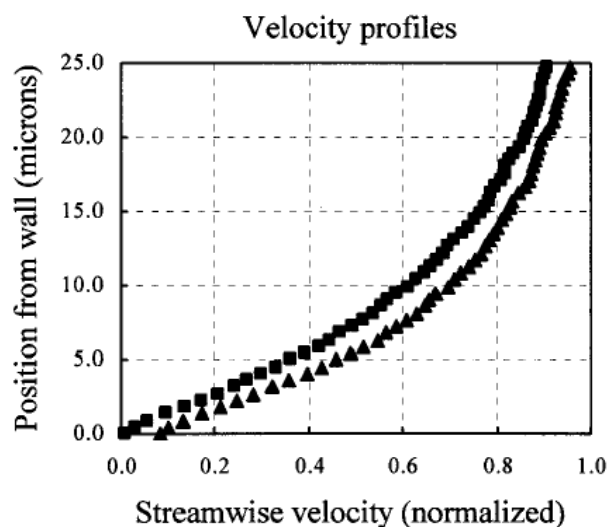
υπάρχουν ενδείξεις, ότι είναι πιθανό, το μήκος ολίσθησης να μειώνεται για μεγαλύτερη γωνία επαφής. Επιπροσθέτως, οι διαμορφώσεις της τραχύτητας μπορεί να έχουν διαφορετικά αποτελέσματα πάνω στο μέγεθος της γωνίας επαφής και στο μήκος ολίσθησης.



Εικόνα 2.12 Αναπαράσταση της διέλευσης της ροής πάνω από τις κοιλότητες λόγω ύπαρξης τραχύτητας.

### 2.3.3 Πειραματική μελέτη της ολίσθησης της ροής σε υδροφοβικές και υπερ-υδροφοβικές επιφάνειες

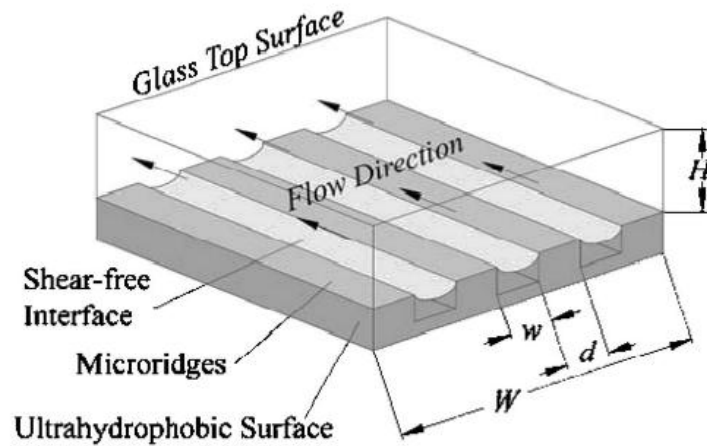
Οι Tretheway et al (Tretheway et al, 2002, Muharasam et al 1987) , με τη μέθοδο του  $\mu$ -PIV, πραγματοποίησαν μετρήσεις της ροής του νερού σε μικροκανάλια τα οποία εμφάνιζαν υδροφιλική συμπεριφορά, και σε μικροκανάλια επενδεδυμένα με το υδροφοβικό στοιχείο OCT. Τα κανάλια είχαν διαστάσεις  $30 \times 300 \mu\text{m}$ , και οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε βάθος  $450 \text{nm}$  από την επιφάνεια του καναλιού. Διαπιστώθηκε η ισχύς της συνθήκης μη-ολίσθησης για την περίπτωση των υδροφιλικών μικροκαναλιών, ενώ στα υδροφοβα μικροκανάλια μετρήθηκε ταχύτητα ολίσθησης ίση με το 10% της μέγιστης ταχύτητας της ροής με αντίστοιχο μήκος ολίσθησης της τάξης του  $1 \mu\text{m}$  (βλ. **Εικόνα 2.13**).



Εικόνα 2.13 Προφίλ της ταχύτητας για ροή στην επιφάνεια τετραγωνικού υδρόφιλου καναλιού και τριγωνικού υδρόφοβου καναλιού (Thretheway, 2002)

Οι Jian et al (Jian et al, 2009) πραγματοποίησαν μέτρηση του μήκους ολίσθησης κατά τη ροή υγρού (70% γλυκερίνη) πάνω σε υπέρ-υδρόφοβες επιφάνειες. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ρεόμετρο (rheometer). Προέκυψε μήκος ολίσθησης ίσο με 40 $\mu$ m. Επίσης οι Bushan et al (Bhushan et al, 2009) μελέτησαν τη συνθήκη ολίσθησης στα τοιχώματα υδρόφιλων, υδρόφοβων και υπέρ-υδρόφοβων επιφανειών, με τη μελέτη της μεθόδου AFM (Atomic Force Microscopy). Από την πειραματική διαδικασία προέκυψαν μήκη ολίσθησης 43nm και 236nm για την περίπτωση της υδρόφοβης και της υπέρ-υδρόφοβης επιφάνειας αντίστοιχα.

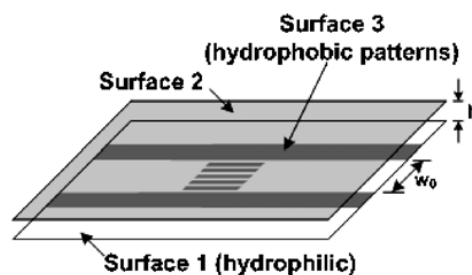
Οι Choi et al (Choi et al, 2003) εξέτασαν υδροφοβικά μικροκανάλια βάθους 2  $\mu$ m, καθώς επίσης και υδρόφιλα μικροκανάλια βάθους 1 $\mu$ m με τεχνικές μέτρησης της ροής υψηλή ακρίβειας, αφού πραγματοποιήθηκε ενίσχυση των χημικών ιδιοτήτων της κάθε επιφάνειας. Προέκυψε μήκος ολίσθησης ίσο με 30nm για τη ροή του νερού πάνω στις υδρόφοβες επιφάνειες. Επιπροσθέτως, οι Ou et al (Ou, 2005), διεξήγαγαν μία σειρά πειραμάτων με σκοπό τη μελέτη της κινηματικής του νερού κατά τη ροή του πάνω σε ultra-υδροφοβικές επιφάνειες. Οι επιφάνειες κατασκευάστηκαν από σιλκόνη, ενώ έφεραν διαμορφώσεις τραχύτητας ειδικά επεξεργασμένες με σκοπό την ενίσχυση της υδροφοβικής τους συμπεριφοράς (βλ. **Εικόνα 2.14**). Οι μετρήσεις της ταχύτητας πραγματοποιήθηκαν με διάταξη micro-PIV, και τα προφίλ που προέκυψαν έδειξαν την ύπαρξη ταχύτητας ολίσθησης στην διεπιφάνεια αέρα-υγρού, μέγιστης τιμής μεγαλύτερης του 60% της ταχύτητας του ελευθέρου ρεύματος.



Εικόνα 2.14 Διαμορφώσεις του μικροκαναλιού που χρησιμοποιήθηκε από τους Ou et al.

Το προφίλ της ταχύτητας είχε περιοδική μορφή, που εξαρτήθηκε από τη μορφή των διαμορφώσεων. Η συνθήκη μη-ολίσθησης φάνηκε να επανέρχεται κοντά στο γυάλινο κάλυμμα με το οποίο ήταν επενδεδυμένος ο πυθμένας του καναλιού, προκειμένου να γίνεται αντιληπτή η κίνηση των σωματιδίων.

Οι Suk et al (Suk et al, 2007) απέδειξαν τον τρόπο ελέγχου της ροής με χρήση υδροφιλικών και υδροφοβικών τμημάτων. Χρησιμοποίησαν μία διάταξη, η οποία αποτελείται από 2 παράλληλα πλακίδια (βλ. **Εικόνα 2.15**). Το κάτω πλακίδιο (bottom), φέρει ένα υδροφιλικό κανάλι που περιστοιχίζεται από υδροφοβικά τμήματα, κατασκευασμένα από PDMS, ενώ το πάνω πλακίδιο εμφανίζει υδροφιλική συμπεριφορά σε σχέση με το πρώτο, και είναι κατασκευασμένο από PMMA.



Εικόνα 2.15 Αναπαράσταση της διάταξης που χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο της ροής (Suk et al 2007)

Κατά τη ροή του νερού στο εσωτερικό της διάταξης παρατηρήθηκαν τρία βήματα:

- Κατά την είσοδο του νερού στη υδροφιλική επιφάνεια, το νερό δεν μπορούσε να “δραπετεύσει”, και αυτό λόγω των υδροφοβικών τμημάτων που περιστοιχίζουν το κανάλι.
- Το δεύτερο βήμα πραγματοποιείται όταν το νερό εισέρχεται στα υδροφοβικά τμήματα. Εδώ έχουμε μικρότερη πτώση πίεση και μικρότερη ταχύτητα.

- Το τρίτο βήμα είναι η έξοδος από τα υδροφοβικά τμήματα, όπου και έχουμε επαναφορά στις αρχικές τιμές ταχύτητας και πίεσης.

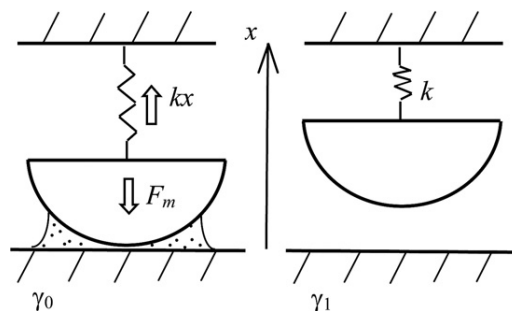
Το κύριο συμπέρασμα ήταν η μικρότερη κλίση πίεσης στα υδρόφοβα τμήματα σε σχέση με τα υδροφιλικά, γεγονός κατανοητό, αφού στις υδρόφοβες επιφάνειες η κίνηση του ρευστού διευκολύνεται.

## 2.4 Εφαρμογές της Υδροφοβικότητας

### *Αναστρέψιμη Υδροφοβικότητα*

Μία ιδιαίτερα σημαντική περιοχή εφαρμογών της super-υδροφοβικότητας, είναι αυτή που στηρίζεται στο φαινόμενο της *αναστρέψιμης υδροφοβικότητας (reversible super-hydrophobicity)*, δηλαδή η δυνατότητα μίας επιφάνειας να αλλάζει από υδροφοβική σε υδροφιλική και το αντίθετο, ή η αλλαγή των υδροφοβικών/υδροφιλικών χαρακτηριστικών υπό την επίδραση ηλεκτρικού δυναμικού, υπεριώδους ακτινοβολίας ή θερμοκρασίας (Nosonovsky et al, 2009). Μέσω αυτής της αλλαγής έχουμε αλλαγή της επιφανειακής ενέργειας σε μηχανική ενέργεια, ένας μηχανισμός που μπορεί να γίνει κατανοητός με βάση την ακόλουθη θεώρηση:

Θεωρούμε ένα σώμα το οποίο ισορροπεί πάνω από μία στερεή επιφάνεια, υπό την επενέργεια ενός ελατηρίου. Με την εφαρμογή ηλεκτρικού δυναμικού ή υπεριώδους ακτινοβολίας, η επιφανειακή ενέργεια του υποστρώματος αυξάνεται έστω στην τιμή  $\gamma_0$ , με αποτέλεσμα την επενέργεια των τριχοειδών δυνάμεων και την δημιουργία ενός “μηνίσκου” (βλ. **Εικόνα 2.16**). Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται εκτρέπουν το σώμα από τη θέση ισορροπίας του. Ανάλογη μείωση της επιφανειακής ενέργειας, έστω στην τιμή  $\gamma_1$ , έχει αποτέλεσμα στην επαναφορά του σώματος στη θέση ισορροπίας του (Bhushan et al, 2008).



**Εικόνα 2.16** Απεικόνιση της μεταβολής στην μηχανική ενέργεια λόγω της αναστρέψιμης super-υδροφοβικότητας.

## Lab-on-a-chip

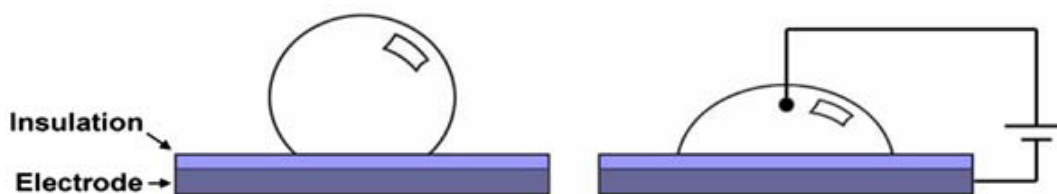
Η βάση για την ανάπτυξη της ιδέας του lab-on-a-chip, είναι η μόχλευση της μικρορευστομηχανικής σε πολλαπλές εφαρμογές, με σκοπό την μείωση της πολυπλοκότητας των ποικίλων βιοιατρικών εφαρμογών που λαμβάνουν χώρα σε ένα εργαστήριο. Γίνεται αντιληπτό ότι η λειτουργία ενός lab-on-a-chip, αναλαμβάνει την ολοκλήρωση όλων των λειτουργιών ενός εργαστηρίου, σε ένα μόνο chip, όπως για παράδειγμα, κυτταρικές αναλύσεις, αναλύσεις ενζύμων και πρωτεϊνών κτλ. Το μέγεθος μίας τέτοιας διάταξης είναι εξαιρετικά μικρό, της τάξης χιλιοστών μέχρι μερικών εκατοστών, ενώ η ποσότητες υγρού που χειρίζεται είναι της τάξης (και μικρότερες) pico.

Η αρχή λειτουργίας ενός lab-on-a-chip, είναι η **ηλεκτροδιαβροχή** (electrowetting on dielectring, EWD) (Fair, 2007). Πρόκειται για ένα φαινόμενο κατά το οποίο η δράση ενός ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να τροποποιήσει τη διαβρεκτική συμπεριφορά μιας σταγόνας η οποία έρχεται σε επαφή με ένα υδροφοβικό, μονωμένο ηλεκτρόδιο (βλ. **Εικόνα 2.17**). Η εφαρμογή δυναμικού ανάμεσα στο υγρό και στο ηλεκτρόδιο, έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του μονωτή που καλύπτει το ηλεκτρόδιο, με αποτέλεσμα την αύξηση της διεπιφανειακής τάσης στερεού-υγρού, σύμφωνα με την εξίσωση **Lippman-Young** :

$$-\left(\sigma_{ls} - \sigma_{sg} - \frac{EV^2}{2h}\right).$$

Είναι φανερό, ότι η εφαρμογή δυναμικού σε μία σειρά γειτονικών ηλεκτροδίων, δημιουργεί μία κλίση στη διεπιφανειακή τάση, γεγονός που οδηγεί στον χειρισμό της συμπεριφοράς των σταγόνων. Προκύπτει επομένως μία αυτόνομη ανάπτυξη ενέργειας, πράγμα απαραίτητο για τη λειτουργία μίας τέτοιας εφαρμογής.

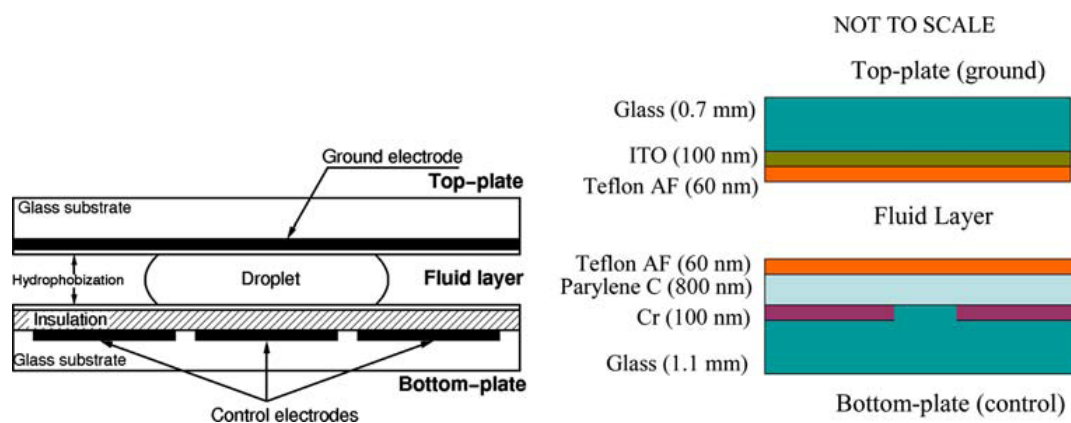
Οι σταγόνες τοποθετούνται συνήθως μεταξύ δύο παράλληλων πλακών. Η κάτω πλάκα (bottom), αποτελεί το chip της διάταξης, που στεγάζει την περιοχή των ηλεκτροδίων. Η πάνω πλάκα μπορεί να αποτελεί μία πλάκα γείωσης. Τα χαρακτηριστικά της εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του chip της διάταξης.



**Εικόνα 2.17** Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου electrowetting . Η σταγόνα είναι αρχικά σε ισορροπία. Παρατηρούμε την αύξηση της διαβροχής της επιφάνειας της σταγόνας, λόγω του δυναμικού.



Η εγκατάσταση απεικονίζεται στην **εικόνα 2.18**. Η επιφάνεια του chip είναι επενδεδυμένη με ένα μονωτικό στρώμα Paralyene-C (800nm), ενώ η πάνω και η κάτω πλάκα είναι καλυμμένες με ένα λεπτό στρώμα Teflon (60nm), με σκοπό την διασφάλιση της υδροφοβικότητας. Το διάστημα μεταξύ των δύο πλακιδίων πληρώνεται συνήθως λάδι σιλικόνης (silicon oils), μία ουσία που αποτρέπει την ατμοποίηση των σταγόνων και την εναπόθεση ακαθαρσιών στις επιφάνειες.



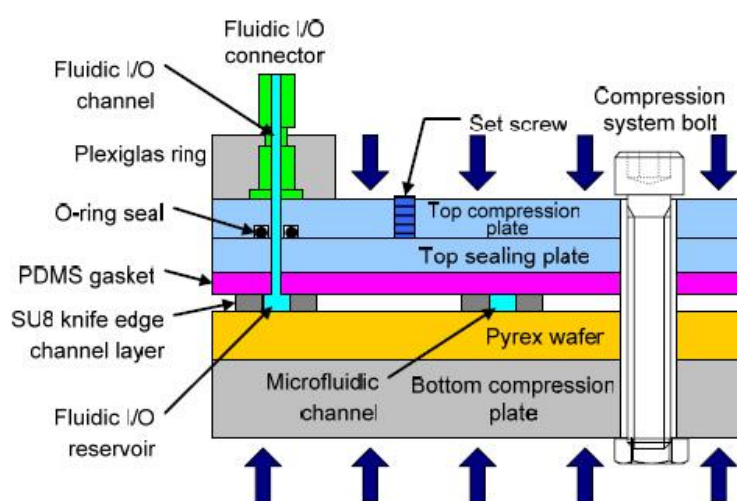
**Εικόνα 2.18** Σχηματική απεικόνιση ενός lab-on-a-chip.

### **BioMEMS**

Ήδη από το 1970, όπου έγινε η εισαγωγή των μικροηλεκτρομηχανικών συσκευών (micro-electro-mechanical devices), έγινε φανερή η ανάγκη ανάπτυξης τέτοιων συστημάτων για την αντιμετώπιση βιοιατρικών εφαρμογών. Βιολογικές ή Βιοιατρικές μικροηλεκτρομηχανικές συσκευές ή αλλιώς τα γνωστά BioMEMS (βλ. **Εικόνα 2.19**) συνιστούν, αποτελούν σήμερα μία περιοχή που υπόκειται σε σημαντική έρευνα, με σημαντικές εφαρμογές στη βιοιατρική τεχνολογία. Γενικά, μπορούμε να πούμε ότι τα BioMEMS είναι συσκευές τα οποία είναι κατασκευασμένα βάση τεχνικών, εμπνευσμένων από φαινόμενα μικρο και nano κλίμακας, που περιγράφουν την επεξεργασία, τον χειρισμό, και την ανάλυση βιολογικών ή χημικών διεργασιών. Η λειτουργία των BioMEMS, περιλαμβάνει όλες τις απαιτούμενες εφαρμογές από τις φυσικές επιστήμες, όπως επιλογή κατάλληλων διεπιφανειών, καθώς επίσης και τις φυσικές αρχές που συναντώνται σε φαινόμενα micro και nano κλίμακας. Τα πεδία εφαρμογής τους περιλαμβάνει συστήματα μελέτης σε κυτταρικό επίπεδο (DNA, πρωτεΐνες), micro-fluidics, ανάπτυξη υλικών για συγκεκριμένες χρήσεις, tissue engineering, ακόμα και συστήματα διανομής φαρμάκων. Τα συστήματα και οι ολοκληρωμένες εφαρμογές που χρησιμοποιούν τα BioMEMS είναι τα γνωστά lab-on-a-chip. Επομένως είναι εμφανής η σημασία κατασκευής των BioMEMS, από υλικά που εμφανίζουν τις απαραίτητες ιδιότητες που περιγράφηκαν προηγουμένως.

### **Εφαρμογές οικονομίας καυσίμου**

Μία περιοχή εφαρμογών είναι η εξοικονόμηση καυσίμου, στις περιπτώσεις που υπολείμματα καυσίμου παραμένουν σε δεξαμενές ή σε αντλίες. Στην περίπτωση αυτή, προκαλούνται σημαντικές απώλειες, και γι αυτό είναι επιθυμητή η χρήση επιφανειών “εχθρικών” στα οργανικά υγρά (oleophobic surfaces). Ωστόσο το εγχείρημα αυτό συνοδεύεται από την αρκετά χαμηλότερη επιφανειακή ενέργεια των οργανικών υγρών σε σχέση με το νερό, με αποτέλεσμα την δυσκολία κατασκευής τέτοιων επιφανειών. Προς αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος έχει προταθεί κατάλληλος συνδυασμός των διαμορφώσεων της επιφάνειας (π.χ. τραχύτητα) με την χημική τροποποίηση, για χρήση υγρών με χαμηλή επιφανειακή ενέργεια, όπως δεκάνιο και οκτάνιο (Tuteja et al, 2008).



Εικόνα 2.19 Απεικόνιση ενός BioMEMS

### **Υποθαλάσσιες Εφαρμογές**

Η ικανότητα των υπέρ-υδροφοβικών επιφανειών να κατακρατούν αέρα όταν βυθίζονται στο νερό, οδηγεί σε έναν σημαντικό αριθμό εφαρμογών. Μία τέτοια περιοχή είναι στην κατασκευή των υποβρυχίων, λόγω της μείωσης της αντίστασης τριβής που σημειώνεται. Το φαινόμενο της ολίσθησης της ροής, που συνοδεύει την ροή σε επιφάνειες μειωμένης διαβρεκτικής ικανότητας, μειώνει την αντίσταση στη ροή σε σημαντικό βαθμό (Wang et al, 2009). Η ικανότητα κατακράτησης αέρα που αναφέρθηκε προηγουμένως, έχει σαν αποτέλεσμα τον σχηματισμό σύνθετης επιφάνειας και ανάπτυξη της ολίσθησης σύμφωνα με τους μηχανισμούς που έχουν αναπτυχθεί.

### **Εφαρμογές υποθαλάσσιας αντί-μόλυνσης (Marine Antifouling)**

Πέρα από τη συμβολή της στο φαινόμενο της μείωσης της τριβής, μία super-υδροφοβική επιφάνεια, μπορεί να συμβάλλει καθοριστικά στην ανάπτυξη

εφαρμογών ενάντια στη μόλυνση του θαλάσσιου περιβάλλοντος, καθώς επίσης και στη μείωση του φαινομένου της προσκόλλησης θαλάσσιων οργανισμών πάνω σε επιφάνειες που βρίσκονται μέσα στη θάλασσα. Ωστόσο η ανάπτυξη τέτοιων επιφανειών είναι ένα αρκετά περίπλοκο θέμα, εφόσον πρέπει να ληφθούν υπόψη αρκετοί παράγοντες, όπως η ικανότητα των διάφορων μικροοργανισμών να “προσελκύονται” σε διαφορετικό βαθμό από επιφάνειες, ανάλογα με την προσαρμοστικότητά τους στο εκάστοτε περιβάλλον που βρίσκονται (Genzer et al, 2006). Πιο συγκεκριμένα, η προσκόλληση βακτηρίων που αναπτύσσονται στο θαλάσσιο περιβάλλον, πάνω σε στερεά στρώματα, σχετίζεται άμεσα με την αλληλεπίδραση των επιφανειακών ενεργειών των βακτηρίων, της στερεής επιφάνειας και του νερού που μεσολαβεί.

Η συμβολή στις εφαρμογές antifouling, μπορεί να γίνει κατανοητή, εφόσον σε υποθαλάσσιες εφαρμογές, στρώμα νερού σχηματίζεται μεταξύ μίας στερεής super-υδροφοβικής επιφάνειας και μίας “σταγόνας” ρύπου, με αποτέλεσμα την εφαρμογή της ιδιότητας self-cleaning κάτω από το νερό. Τα αποτελέσματα του φαινομένου αυτού, χρησιμοποιούνται ως φιλικές προς το περιβάλλον προσπάθειες μίμησης της φύσης, με στόχο την μείωση της μόλυνσης στα τμήματα των πλοίων που βρίσκονται μέσα στο νερό.

### **Οπτικές εφαρμογές**

Σε πολλές εφαρμογές, όπως στα παρμπρίζ του αυτοκινήτου ή στις επιφάνειες γυαλιών, η οπτική διαφάνεια είναι μία ιδιαίτερα σημαντική ιδιότητα. Η προετοιμασία μίας υπέρ-υδροφοβικής επιφάνειας που δύναται να εξασφαλίσει και την απαραίτητη διαφάνεια, έχει προκαλέσει το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών. Ωστόσο, οι απαιτήσεις για υπέρ-υδροφοβικότητα και διαφάνεια είναι αντικρουόμενες, εφόσον για την πρώτη είναι απαραίτητη η εκτράχυνση της επιφάνειας, ιδιότητα που δεν είναι επιθυμητή για την δεύτερη, εφόσον η αυξημένη τραχύτητα έχει ως αποτέλεσμα σημαντικές απώλειες, λόγω του διασκορπισμού του φωτός που συντελείται. Ως εκ τούτου ο έλεγχος της τραχύτητας της επιφάνειας εξασφαλίζει την ικανοποίηση των δύο βασικών παραγόντων για ένα ικανοποιητικό αποτέλεσμα. Οι Teshima et al (Teshima et al, 2005) καταλήγει σε μέγεθος των διαμορφώσεων τραχύτητας μικρότερων του μήκους κύματος του ορατού φωτός προκειμένου να εξασφαλίζεται η διαφάνεια.

## 2.5 Υδροφιλικότητα και Εφαρμογές

Όπως ορίστηκε και στην αρχή του κεφαλαίου, υδροφιλικότητα είναι η φιλική συμπεριφορά που παρουσιάζει μία επιφάνεια σε ποσότητα νερού που ρέει πάνω σε αυτήν. Η υδροφιλικότητα συνοδεύεται από τα χαρακτηριστικά της χαμηλής γωνίας επαφής και της χαμηλής ενέργειας στη διεπιφάνεια υγρού-στερεού. Έτσι, μία σταγόνα η οποία τοποθετείται σε μία υδροφιλική επιφάνεια, εξαπλώνεται και χάνει το αρχικό της σχήμα. Όπως συμβαίνει και με τις υδρόφοβες επιφάνειες, περαιτέρω επεξεργασία μίας ήδη υδροφιλικής επιφάνειας, όπως για παράδειγμα διαμορφώσεις τραχύτητας, έχει ως αποτέλεσμα εντονότερη εκδήλωση των υδροφιλικών χαρακτηριστικών της (Παπαγεωργίου, 2009).

Τα χαρακτηριστικά της υδροφιλικότητας έχουν μελετηθεί εκτενώς πειραματικά, ειδικότερα ως προς την ικανοποίησης της συνθήκης ολίσθησης της ροής. Παρά το γεγονός ότι η πλειοψηφία των πειραμάτων έδειξαν μηδενική ολίσθηση της ροής σε υδροφιλικά τοιχώματα, υπάρχει υπολογίσιμος αριθμός μελετών που δείχνουν εμφανή, έστω και μικρής κλίμακας, ολίσθηση. Οι Choi et al (Choi et al, 2003) πραγματοποίησαν μελέτη της ροής σε υδροφοβικά κανάλια (όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως) όπου και διαπίστωσαν την ολίσθηση, καθώς επίσης και σε υδροφιλικά κανάλια, για τα οποία δεν μπόρεσαν να εξάγουν σαφές συμπέρασμα λόγω της ευαισθησίας που αυτά παρουσιάζουν στις λεπτομέρειες κλίμακας nano των επιφανειών. Οι Bonaccurso et al (Bonaccurso et al, 2003) έδειξαν ότι σε πλήρως διαβρέξιμες επιφάνειες, οι οποίες έχουν εκτραχυνθεί και δεν είναι επενδεδυμένες με κάποιο πολυμερές, υπάρχει ολίσθηση της ροής, η οποία μάλιστα είναι αυξανόμενη για σημαντική αύξηση της τραχύτητας. Επίσης οι Vermesh et al (Vermesh et al, 2009), έδειξαν ότι σε νανοκανάλια διαστάσεων 20nm, τα οποία είναι κατασκευασμένα από υδροφιλικό υλικό ( $\text{SiO}_2$ ), στα οποία συντελέστηκε μεταφορά ιόντων μέσω εφαρμογής διαφοράς δυναμικού υφίσταται ολίσθηση της ροής.

Η υδροφιλικότητα είναι μία ιδιότητα ιδιαίτερα επιθυμητή για εφαρμογές στη βιοιατρική τεχνολογία, πιο συγκεκριμένα για την κατασκευή συσκευών που έρχονται σε επαφή με το εσωτερικό του ανθρώπινου σώματος, π.χ. εμφυτευμάτων, το οποίο παρουσιάζει υδροφιλικό χαρακτήρα. Γενικά μπορούμε να πούμε ότι η υδροφιλικότητα, είναι μία ιδιότητα η οποία γίνεται εκμεταλλεύσιμη ανάλογα με τη χρήση της συσκευής που θα επενδύσει. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις είναι τα εμφυτεύματα, όπως επίσης και οι υδροφιλικές επενδύσεις για λιγότερο επεμβατικές βιοιατρικές συσκευές (LaPorte, 1997), ή ακόμα και η χρήση υδροφιλικών επενδύσεων σε γυάλινες επιφάνειες με σκοπό την κατασκευή πρωτεϊνικών chips (Yeo et al, 2006).

Προκειμένου για τις υδροφιλικές επενδύσεις, είναι χαρακτηριστική η χρήση του υλικού PAA (Polyarylamide), το οποίο προκύπτει από πολυμερισμό των μονομερών της ακρυλαμίδης, σε εφαρμογές αγγειοπλαστικής, όπου είναι απαραίτητη η σωστή αλληλεπίδραση του εσωτερικού του οργανισμού που παρουσιάζει υδρόφιλη συμπεριφορά με το υλικό το οποίο χρησιμοποιείται. Άλλα παρόμοια υλικά που

χρησιμοποιούνται επίσης, είναι τα PEO και PNVP. Το PEO (POLY ethylene-oxide), η αλλιώς οξείδιο του πολυαιθυλενίου, είναι συνθετικός πολυαιθέρας με μοριακό βάρος μικρότερο του 100, που εμφανίζει αμφοφιλική συμπεριφορά. Το PNVP (Polyvinylpyrrolidone) είναι hydro-gel, το οποίο προκύπτει από πολυμερισμό του μονομερούς NVP. Παρουσιάζει αρκετά καλή βιοσυμβατότητα με το εσωτερικό του σώματος, καθώς επίσης και μειωμένη προσρόφηση πρωτεϊνών (fibrinogen), γεγονός που το καθιστά κατάλληλο για την χρήση του σε ανάπτυξη συστημάτων διανομής φαρμάκων μέσα στον οργανισμό ή και σε εφαρμογές Tissue Engineering.

Για την περίπτωση εμφυτευμάτων ή αντικατάστασης βιολογικών ιστών, η χρήση των hydrogels φαίνεται να είναι η ενδεικνυόμενη. Ο λόγος έγκειται στην διαπίστωση ότι οι βιολογικές επιφάνειες έχουν την ίδια συμπεριφορά με τις επιφάνειες των hydrogels, τα οποία χαρακτηρίζονται ως αμφοφιλικά. Γίνεται επομένως φανερό η βιο-συμβατότητα που επιδεικνύουν τα συγκεκριμένα υλικά. Η βιο-συμβατότητα είναι η βασικότερη ιδιότητα που πρέπει να διαθέτουν τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε τέτοιες εφαρμογές, αφού σε αντίθετη περίπτωση, το ανθρώπινο σώμα τα αποβάλλει με τον ίδιο τρόπο που αποβάλλει και όλα τα άλλα άχρηστα για αυτό στοιχεία. Επιπλέον ενίσχυση της συμβατότητας των hydrogels με το σώμα εξασφαλίζεται μέσω της επένδυσής τους με ηπαρίνη.

Ένα άλλο πεδίο εφαρμογών υλικών με υδροφιλική συμπεριφορά είναι οι φακοί επαφής. Η ανάπτυξη των φακών επαφής, άρχισε σε περιορισμένο έστω βαθμό, από τα τέλη του 18<sup>ου</sup> αιώνα, όταν γυάλινοι φακοί άρχισαν να αξιολογούνται ως κατάλληλοι για την ενίσχυση της όρασης. Ωστόσο, η ουσιαστική ενασχόληση με την κατασκευή φακών επαφής, δεν ξεκίνησε μέχρι τον δεύτερο Παγκόσμιο πόλεμο, όπου η διαθεσιμότητα πολυμερών (Bronzino, 1995) έκανε το εγχείρημα ευκολότερο. Τα τελευταία χρόνια όλο και περισσότερα μοντέλα φακών επαφής κατασκευάζονται, με υλικά από μία ευρεία γκάμα πολυμερών.

Γενικά οι φακοί επαφής, ταξινομούνται ως εξής: σκληροί φακοί, που κατασκευάζονται από άκαμπτα, διαπερατά από τον αέρα υλικά, απαλοί φακοί, που κατασκευάζονται από hydrogels ή σιλικονούχα ελαστομερή και ημισκληρους φακούς, που κατασκευάζονται από συνδυασμό των παραπάνω υλικών. Παρά το γεγονός ότι οι απαλοί φακοί είναι αρκετά δημοφιλείς, υπάρχει αρκετή ζήτηση και για τις άλλες δύο κατηγορίες.

Με εξαίρεση τους απαλούς φακούς οι οποίοι είναι κατασκευασμένοι από hydrogels, τα οποία επιδεικνύουν ιδιαίτερη ολισθηρότητα χωρίς επιπλέον τροποποίηση της επιφάνειας, η επεξεργασία των περισσότερων φακών μπορεί αναβαθμιστεί με την επένδυση της επιφάνειας τους με κάποιο υδροφιλικό υλικό. Ανάμεσα στις ιδιότητες που πρέπει να χαρακτηρίζουν ένα φακό, συγκαταλέγονται η επαρκής διαπερατότητα οξυγόνου, η οπτική διαφάνεια, αντίσταση στην τάση των πρωτεϊνών να επικαθονται στις επιφάνειες, και ικανοποιητικό βαθμό διαβροχής. Αρκετά από τα πολυμερή που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των φακών, μειονεκτούν στις απαιτούμενες

ιδιότητες διαβροχής και ολισθηρότητας, οπότε χρησιμοποιούνται σημαντικές τεχνικές επεξεργασίας των δυναμικών ιδιοτήτων της επιφάνειας.

## *Αναφορές*

- Barthlott W and Neinhuis C, "Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces", *Planta*, **202**, 1-8 (1997)
- Bhushan B. and Ling X., "Integrating electrowetting into micromanipulation of liquid droplets", *Journal of Physics*, **20** (2008)
- Bhushan B., Wang Y and Maali A., "Boundary slip Study on Hydrophilic, Hydrophobic, and Superhydrophobic Surfaces with Dynamic Atomic Force Microscopy", *Langmuir*, **25** (14), 8117-8121 (2009)
- Brigo L., "Water slippage over micro and nano structured surfaces", Phd thesis, Universita' Degli di Padova, Italy (2008)
- Bronzino D. J., "The Biomedical Engineering Handbook", CRC Press (1995)
- Choi C.H., Westin K.J. and Breuer K.S., "Apparent slip flows in hydrophilic and hydrophobic microchannels", *Phys. Fluids*, **15**(10) (2003)
- Eggers J. and Stone H., "Characteristic lengths at moving contact lines for a perfectly wetting fluid : the influence of speed on the dynamic contact angle", *J. Fluid. Mech*, **505**, pp. 309-321 (2004)
- Fair R., "Digital microfluidics: is a true lab-on-a-chip possible?", Springer-Verlag (2007)
- Genzer J. and Efimenko K., "Recent developments in superhydrophobic surfaces and their relevance to marine fouling: a review", *Biofouling*, **22**, 339-360 (2006)
- Goldstein J, Newbury D, Joy D, Lyman C, Echlin P, Lifshin E, Sawyer L and Michael J, "Scanning Electron Microscopy and X-Rays Microanalysis", New York: Plenum, **3** (1981)
- Granick S., Zhu Y. and Lee H., "Slippery questions about complex fluids flowing past solids", *Nature Materials*, **2**, 221-227 (2003)
- Hirasaki G. and Yang S., "Dynamic contact line with disjoining pressure, large capillary numbers, large angles and pre-wetted, precursor, or entrained films", **2**, pp.1-30 (2002)
- Inshida N., Inoue T., Miyahara M. and Higashitani K., "Nano bubbles on a hydrophobic surface in water observed by tapping-mode atomic force microscopy", *Langmuir*, **16**(16), (2000)
- Jian L., Lan C., Xia Y. and Run Yuan., "On the measurement of slip length for liquid flow over super-hydrophobic surface", *Chinese Science Bulletin*, **54** (24), 4560-4565 (2009)
- Joseph P., Bizonne C., Benoit J., Ybert C., Journet C., Tabeling C. and Bocquet L., "Slippage of water past superhydrophobic carbon nanotube forests in microchannels", *Labaratoire PMCN, Physico-Chimie Theorique, France* (2006)

Koch K, Neinhuis C, Enshat H J and Bartholtt W, "Self assembly of epicuticular waxes on living plant surfaces imaged by atomic force microscopy (AFM)", *Journal of Experimental Botany*, **55**, pp. 711-718 (2004)

LaPorte R.J., "Hydrophilic polymer coatings for medical devices: structure/properties, development, manufacture and applications", Lancaster, P.A. : Technomic (1997)

Lauga E. and Brenner M., "Dynamic mechanisms for apparent slip on hydrophobic surfaces", *Physical Review*, **70**, 026311(1-7) (2004)

Marmur A., "To be heterogeneous or not to be?", *Langmuir*, **19**, 8343-8 (2003)

Mutharasan L. and Apeliannf R., "Experimental observations of wall slip: tube and packed bed flow", **26**, 1609-1616 (1987)

Nosonovsky M. and Brushan B., "Multiscale effects and capillary interactions in functional biomimetic surfaces for energy conversion and green engineering", *The Royal Society*, **367**, 1511-1539 (2009)

Nosonovsky M. and Bhushan B., "Superhydrophobic surfaces and emerging applications: Non-adhesion, energy, green engineering", *Current opinion in colloid & interface surfaces*, **14**, 270-280 (2009)

Ou J. and Rothstein J., "Direct velocity measurements of the flow past drag- reducing ultrahydrophobic surfaces", *Physics of fluids*, **17**, 103606-103606-10 (2005)

Παπαγεωργίου Δ., "Κατασκευή Μικροκαναλιών Ροής με Νανοδομημένα Τοιχώματα Ελεγχόμενης Διαβροχής: Χαρακτηρισμός Νανοδομής και Μετρήσεις Πτώσης Πίεσης Ροής Νερού", Διπλωματική εργασία Μεταπτυχιακού Προγράμματος (2009)

Roach P., Shirtcliffe N. and Newton M., "Progress in superhydrophobic surface development", *Soft Matter*, **4**, 224-240 (2008)

Solga A, German Z, Striffler F B, Spaeth M and Barthlott W , "The dream of staying clean: Lotus and Biomimetics Surfaces", *Nees Institute for Biodiversity of Plants, University of Bonn, Germany*, **2**, S127 (2007)

Suk J. and Cho J., "Capillary flow control using hydrophobic patterns", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, **17**, N11-N15 (2007)

Sun M., Watson G., Zheng Y., Watson J. and Liang A., "Wetting properties on nanostructured surfaces of cicada wings", *The journal of Experimental Biology*, **212**, 3148-3155 (2009)

Sun T., Feng L., Gao X. and Jiang A., "Bioinspired Surfaces with Special Wettability", *American Chemical Society*, **38(8)**, 644-652 (2005)

Surface Tension-HyperPhysics, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/surten.html>



- Teshima K., Sugimura H., Inoue Y. and Takano A., "Transparent ultra water-repellent poly (ethylene terephthalate) surfaces fabricated by oxygen plasma treatment and subsequent hydrophobic coating", *Appl Surf Sci*, **244**, 619-622 (2005)
- Tretheway D. and Meinhart C., "Apparent fluid slip at hydrophobic microchannel walls", *Physics of Fluids*, **14** (3), L9-L12 (2002)
- Tuteja A., Choi W., Mabri J.M., McKinley GH. and Cohen RE., "Robust omniphobic surfaces", *Proc Natl Acad Sci U S A*, **105**(47) 2008
- Vermesh U., Choi J. W., Vermesh O., Fang R., Nagaraj J. and Heath R. J., "Fast Nonlinear Ion Transport via Field-Induced Hydrodynamic Slip in Sub-20-nm Hydrophilic Nanofluidic Transistors", *NANO LETTERS*, **9**(4), 1315-1319 (2009)
- Voronov S., "Slip Boundary Flow on Nanoscale Superhydrophobic Surfaces : A Molecular Dynamics Study- Slip Length as a Function of Wetting Properties", Mater Thesis, University of Oklahoma (2006)
- Voronov R. and Papavassiliou V., "Review of Fluid Slip over Superhydrophobic Surfaces and its Dependence on the Contact Angle", 100<sup>th</sup> Anniversary, **47**, 2455-2477 (2008)
- Wang J., Betelu S. and Law B., "Line tension approaching a first-order wetting transition: Experimental results from contact angle measurements", *Physical Review E*, **63**, 031601 (1)-031601(11) (2001)
- Wang Y., Bhushan B. and Maali A., "Atomic force microscopy of boundary slip on hydrophilic, hydrophobic and superhydrophobic surfaces", *American Vacuum Society*, **27**(4), 754-760 (2009)
- Watson S., Cribb B. and Watson L., "How Micro/Nanoarchitecture Facilitates Anti-Wetting: An Elegant Hierarchical Design on the Termite Wing", *American Chemical Society*, **4**(1), 129-136 (2010)
- Yeo S., Kwon T., Choi C., Park H., Hyun J. W., Jung D., "The patterned hydrophilic surfaces of glass slides to be applicable for the construction of protein chips", *Current Applied Physics*, **6**, 267-270 (2006)
- Yung YC. And Bhushan B., "Contact Angle, Adhesion and Friction Properties of micro and nanopatterned polymers for superhydrophobicity", *Nanotechnology*, **17**, 4970-80 (2006)

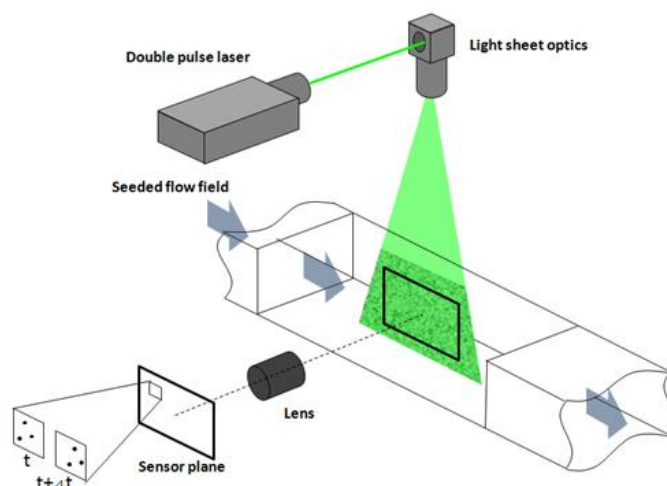
# **Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>**

## **Micro-Particle Image Velocimetry**

### 3.1 Η βασική ιδέα

Η τεχνική PIV (Particle Image Velocimetry) είναι μία οπτική, μη επεμβατική τεχνική για την μέτρηση του πεδίου της ταχύτητας ροών σε μακροσκοπική κλίμακα, με την οποία επιτυγχάνεται υψηλή διακριτική ανάλυση (spatial resolution). Μία πειραματική διάταξη PIV περιλαμβάνει αρκετά υποσυστήματα. Στην πλειοψηφία των εφαρμογών προστίθενται 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.

Μία τυπική πειραματική διάταξη PIV που χρησιμοποιείται 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.



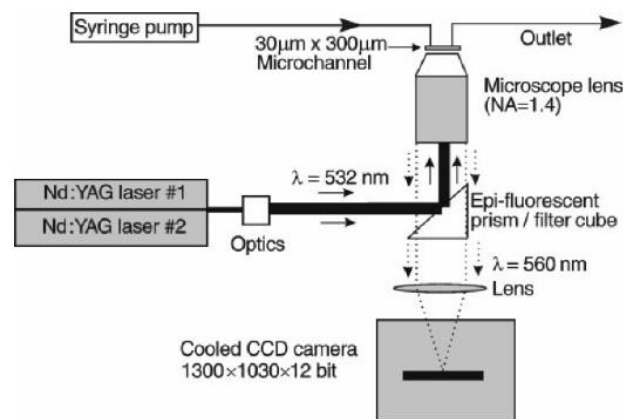
Εικόνα 3.1. Αρχή λειτουργίας της τεχνικής PIV

Για την επεξεργασία των εικόνων, το κάθε επίπεδο της ροής που καταγράφεται διαιρείται σε μικρότερες περιοχές, τις αποκαλούμενες *interrogation areas*. Το

διάνυσμα της ταχύτητας που δείχνει την μετακίνηση των σωματιδίων κατά το παρεμβαλλόμενο χρονικό διάστημα, προσδιορίζεται για κάθε interrogation area, με εφαρμογή στατιστικών μεθόδων. Υποθέτουμε ότι μέσα σε κάθε περιοχή που εξετάζουμε τα σωματίδια έχουν κινηθεί με ομογενή τρόπο, ανάμεσα στους δύο φωτισμούς του laser. Η διαδικασία αυτή εφαρμόζεται σε κάθε interrogation area, προκειμένου να έχουμε ολοκληρωμένη εικόνα του προφίλ της ταχύτητας. Μία πρώτη τάξης προσέγγιση που μας δίνει το διάνυσμα της ταχύτητας είναι  $\vec{u} = \frac{\vec{x}_{t+\Delta t} - \vec{x}_t}{\Delta t}$  (Εξ. 3.1) (Santiago et al, 1998).

Η τεχνική micro-PIV, είναι μία τροποποίηση της μεθόδου PIV, που εξυπηρετεί την ολοένα και αυξανόμενη ανάγκη της μελέτης ροών σε επίπεδα μικροκλίμακας, με αποτέλεσμα την επαρκή επίτευξη πολύ μικρής διακριτικής ανάλυσης (της τάξης microns), και έχει συμβάλει ιδιαίτερα στην διεξαγωγή in-vivo και in-vitro πειραμάτων (Anastasiadis et al, 2010). Το πρώτο επιτυχές πείραμα micro-PIV πραγματοποιήθηκε το 1998 από τον Santiago, όπου χρησιμοποιήθηκαν, μικροσκόπιο επιφθορισμού (epi-fluorescent microscope), CCD κάμερα, σωματίδια της τάξης των 300nm, και συνεχής πηγή φωτισμού Hg-arc lamp, με σκοπό την μέτρηση του πεδίου ταχύτητας ροής Hele-Shaw γύρω από ελλειπτικό κύλινδρο διαστάσεων 30μm. Μετρήθηκαν προφίλ ταχύτητας 50μm/sec, με χρονικό διάστημα παρεμβολής μεταξύ της λήψης των εικόνων 68,5ms (Santiago et al 1998).

Ένα χρόνο αργότερα συντελέστηκε δεύτερο πείραμα micro-PIV, όπου αντί για τη συνεχή πηγή φωτισμού που αναφέρθηκε προηγουμένως, χρησιμοποιήθηκε παλλόμενη πηγή laser Nd:YAG laser (βλ. **Εικόνα 3.2**). Στο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν μικροκανάλια βάθους 300μm. Τα αποτελέσματα του πειράματος, έδειξαν ταχύτητες τρεις τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες από το προηγούμενο, και μεγαλύτερη διακριτική ανάλυση (Meinhart et al 1999).



Εικόνα 3. 2. Απεικόνιση συστήματος micro-PIV με χρήση παλλόμενης πηγής laser

Ένα τυπικό σύστημα micro-PIV συνίσταται από μία κάμερα , από μικροσκόπιο (ευθύ ή ανεστραμμένο) συνήθως φθορισμού, από την πηγή φωτισμού της ροής (συνήθως laser), από τα απαραίτητα οπτικά (beam expanders, δηλαδή ενισχυτές της δέσμης) και τα φωσφορίζοντα σωματίδια. Ο κάθε συντελεστής ξεχωριστά θα μελετηθεί εκτενώς ακολούθως.

Αρχικά η δέσμη του laser ενισχύεται μέσω οπτικών , πριν την είσοδό της στο μικροσκόπιο. Στη συνέχεια η δέσμη εισέρχεται στο μικροσκόπιο και ανακλάται κατά  $90^{\circ}$  προς τα κάτω λόγω της ύπαρξης ενός διχρωματικού καθρέφτη (dichromatic mirror), που δρα σαν φίλτρο, αντανακλώντας μήκη κύματος μικρότερα μίας συγκεκριμένης τιμής, έστω  $\lambda_{pass}$ , καθιστώντας έτσι δυνατή τη μετάδοση ακτινοβολιών μεγαλύτερου μήκους κύματος. Για την περίπτωση αυτή πρέπει να ισχύει  $\lambda_{pass} > \lambda_{laser}$ .

Τελικά το φως μεταδίδεται μέσω του αντικειμενικού φακού του μικροσκοπίου στην περιοχή ενδιαφέροντος του υπό εξέταση μικροκαναλιού. Στη συνέχεια το εκπεμπόμενο από τα φωσφορίζοντα σωματίδια ‘‘σήμα’’, μαζί με τις αντανακλώμενες από τις επιφάνειες του μικροκαναλιού επιφάνειες, συγκεντρώνονται από τον αντικειμενικό φακό και μεταφέρονται πάλι στον διχρωματικό καθρέφτη. Τα σωματίδια είναι επενδεδυμένα με χρωστική ουσία τέτοια, έτσι ώστε το μήκος κύματος διέγερσης των σωματιδίων να συμπίπτει με το μήκος κύματος του laser, και το μήκος κύματος εκπομπής να είναι μεγαλύτερο από την κατώτατη τιμή  $\lambda_{pass}$  του διχρωματικού καθρέφτη. Καθ’ αυτόν τον τρόπο ο διχρωματικός καθρέφτης, επιτρέπει την μετάδοση του σήματος που προέρχεται μόνο από τα σωματίδια, φιλτράροντας έτσι την αχρείαστη ακτινοβολία (θόρυβος).

## 3.2 Σωματίδια-‘‘ανιχνευτές’’ της ροής

Όπως έγινε αντιληπτό, η μέθοδος micro-PIV βασίζεται στον άμεσο προσδιορισμό των δύο βασικών χαρακτηριστικών της ταχύτητας, δηλαδή του μήκους και του χρόνου. Από την άλλη πλευρά, η μέτρηση της ταχύτητας προκύπτει με έμμεσο τρόπο, αφού δεν προέρχεται από την μέτρηση της ταχύτητας της ίδιας της αλλά από μέτρηση της ταχύτητας των σωματιδίων. Για το λόγο αυτό η μελέτη των ιδιοτήτων τους είναι ιδιαίτερα σημαντική.

### 3.2.1 Ρευστομηχανικές ιδιότητες

Έστω  $\rho_D$ , η πυκνότητα του σωματιδίου, και  $\rho$  η πυκνότητα του ρευστού μέσου. Σε περίπτωση που οι πυκνότητες διαφέρουν σημαντικά, η δράση των βαρυτικών δυνάμεων στο σωματίδιο, μπορεί να επιδράσει αρνητικά στα αποτελέσματα των μετρούμενων πεδίων ταχύτητας. Εισάγοντας την έννοια της ταχύτητας του

σωματιδίου σε συνεκτικό πεδίο ροής μικρών αριθμών Reynolds λόγω δράσης βαρυτικών δυνάμεων όπως προκύπτει από το νόμο του Stokes (Raffel, 1998), έχουμε:  $\mathbf{U}_g = \mathbf{d}_p^2 \frac{(\rho_p - \rho)}{18\mu} \mathbf{g}$  (3.2), όπου  $\mu$ , η δυναμική συνεκτικότητα του ρευστού, και  $d_p$ , η διάμετρος του σωματιδίου.

Μπορούμε στη συνέχεια να εισάγουμε την ταχύτητα υστέρησης για ένα σωματίδιο σε επιταχυνόμενη ροή, καθώς επίσης και την έννοια του χρόνου χαλάρωσης του σωματιδίου, δηλαδή το χρόνο που απαιτείται για να προσαρμοστεί το σωματίδιο στις επικρατούσες συνθήκες ροής. Η ταχύτητα υστέρησης ορίζεται ως  $\mathbf{U}_s = \mathbf{U}_p - \mathbf{U} = \mathbf{d}_p^2 \frac{(\rho_p - \rho)}{18\mu} \boldsymbol{\alpha}$  (3.3), όπου  $U_p$  η ταχύτητα του σωματιδίου, και  $U$  η ταχύτητα της ροής.

Ο ρυθμός μείωσης της ταχύτητας του σωματιδίου δίνεται από τον εκθετικό νόμο, εφόσον η πυκνότητα του σωματιδίου είναι πολύ μεγαλύτερη από την πυκνότητα του ρευστού:  $\mathbf{U}_p(t) = \mathbf{U} \left[ \mathbf{1} - \exp\left(-\frac{t}{t_s}\right) \right]$  (3.4), με το χρόνο χαλάρωσης να ισούται με  $t_s = d_p^2 \frac{\rho_p}{18\mu}$  (Raffel, 1998).

Όπως φαίνεται από τις προηγούμενες σχέσεις, λόγω της διαφοράς πυκνότητας σωματιδίου-ρευστού, η διάμετρος των σωματιδίων πρέπει να είναι επαρκώς μικρή, έτσι ώστε να διασφαλίζεται σωστός προσδιορισμός της ταχύτητας της ροής. Από την άλλη πλευρά, όταν τα χρησιμοποιούμενα σωματίδια λειτουργούν μέσω ιδιοτήτων σκέδασης του φωτός, η διάμετρος τους πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ικανοποιητική ένταση του σκεδαζόμενου φωτός. Είναι επομένως φανερό η ανάγκη συμβιβασμού μεταξύ των δύο απαιτήσεων για την επιλογή της σωστής διαμέτρου. Ένας τρόπος να επιτευχθεί η βέλτιστη ποιότητα στα αποτελέσματα, με παράλληλη ικανοποιητική ένταση του φωτός και μικρή διάμετρο σωματιδίων, είναι η επιλογή φωσφορίζοντων σωματιδίων, διαμέτρου της τάξης των nm, που έχει ως αποτέλεσμα την αμελητέα επίδραση της ταχύτητας υστέρησης στις μετρήσεις (Mielnik 2005).

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι in-vivo περιπτώσεις μελέτης της ροής του αίματος κατά τις οποίες αντί για βιομηχανικά σωματίδια, τα οποία κατασκευάζονται συνήθως από πολυστερίνη, χρησιμοποιούνται ερυθροκύτταρα (8-10  $\mu\text{m}$ ) (Hove et. al. 2003, Lee J.Y, 2007), ή λιπώματα (400nm) (Vennemann et. al. 2005). Η χρήση συστατικών του αίματος ως σωματίδια μπορεί να μην επιδρά στη ροή, όπως τα βιομηχανικά σωματίδια, προκαλούν όμως δυσλειτουργίες λόγω του μεγάλου μεγέθους των σωματιδίων (7 $\mu\text{m}$  έναντι  $\sim 1\mu\text{m}$  των τεχνητών). Επίσης τα ερυθροκύτταρα έχουν την τάση να συγκεντρώνονται στο μέσο των αγγείων, με αποτέλεσμα να καθίσταται αδύνατος ο προσδιορισμός της ταχύτητας στα τοιχώματα, αφού δεν υπάρχουν σωματίδια (Kloosterman et al, 2009).

### 3.2.2 Κίνηση Brown, συγκέντρωση των σωματιδίων

Όπως περιγράφηκε και προηγουμένως, σε τεχνικές όπως η micro-PIV, όπου ο προσδιορισμός της ταχύτητας, γίνεται έμμεσα, μέσω της μετακίνησης σωματιδίων,

το μέγεθος αυτών των σωματιδίων είναι καθοριστικής σημασίας. Τα σωματίδια πρέπει να έχουν διαστάσεις τέτοιες, έτσι ώστε να εξασφαλίζουν καλό εκπεμπόμενο ‘‘σήμα’’, περιορίζοντας συγχρόνως την επίδραση της κίνησης Brown, τον ‘‘χορό’’ δηλαδή, σωματιδίων όταν αυτά αιωρούνται μέσα σε ρευστά.

Η κίνηση Brown είναι μία σημαντική παράμετρος που πρέπει να εξετάζεται, όταν για τον προσδιορισμό ταχύτητας ροής της τάξης των  $10\mu\text{ms}^{-1}$ , χρησιμοποιούνται σωματίδια διαστάσεων μικροκλίμακας. Στην περίπτωση που για τον υπολογισμό της ταχύτητας τα λαμβανόμενα χρονικά διαστήματα είναι αρκετά μεγαλύτερα από το χρόνο χαλάρωσης των σωματιδίων, το τετράγωνο της μέσης μετακίνησης λόγω διάχυσης των σωματιδίων είναι  $\langle s^2 \rangle = 2D\Delta t$  (3.2.2 α), με τον συντελεστή διάχυσης  $D$  να δίνεται από την έκφραση  $D = \frac{kT}{3\pi\mu d_p}$ , όπου  $k$  η σταθερά του Boltzmann, και  $T$  η απόλυτη θερμοκρασία του ρευστού.

Ένα σωματίδιο που ακολουθεί πιστά τη ροή του ρευστού ταχύτητας  $U$ , μετακινείται σε χρονικό διάστημα  $\Delta t$ , κατά διάστημα  $\Delta x$ , με  $\Delta x = U\Delta t$  (3.2.2 β). Ως εκ τούτου η απόκλιση στις μετρήσεις λόγω κίνησης Brown εκφράζεται ως (Santiago et al, 1998):

$\epsilon_B \frac{\langle s^2 \rangle^{\frac{1}{2}}}{\Delta x} = \frac{1}{U} \sqrt{\frac{2D}{\Delta t}}$  (3.5). Σε περιοχές του πεδίου ροής όπου η κλίση της ταχύτητας είναι μικρή, η επίδραση της κίνησης Brown, μπορεί να περιγραφεί ως ‘‘θόρυβος’’, που αυξάνει την αβεβαιότητα στις μετακινήσεις των σωματιδίων.

Πρακτικά, τα σφάλματα λόγω της κίνησης Brown, θέτουν ένα κατώτατο όριο στην διάμετρο των σωματιδίων, έτσι ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια μέτρησης. Η έκταση των αποκλίσεων των μετρήσεων λόγω της κίνησης Brown, μπορεί να αποφευχθεί μέσω της επεξεργασίας πολλών εικόνων σε ένα interrogation spot, η με την εφαρμογή της μεθόδου ensemble κατά την επεξεργασία των εικόνων, που θα εξετασθεί παρακάτω.

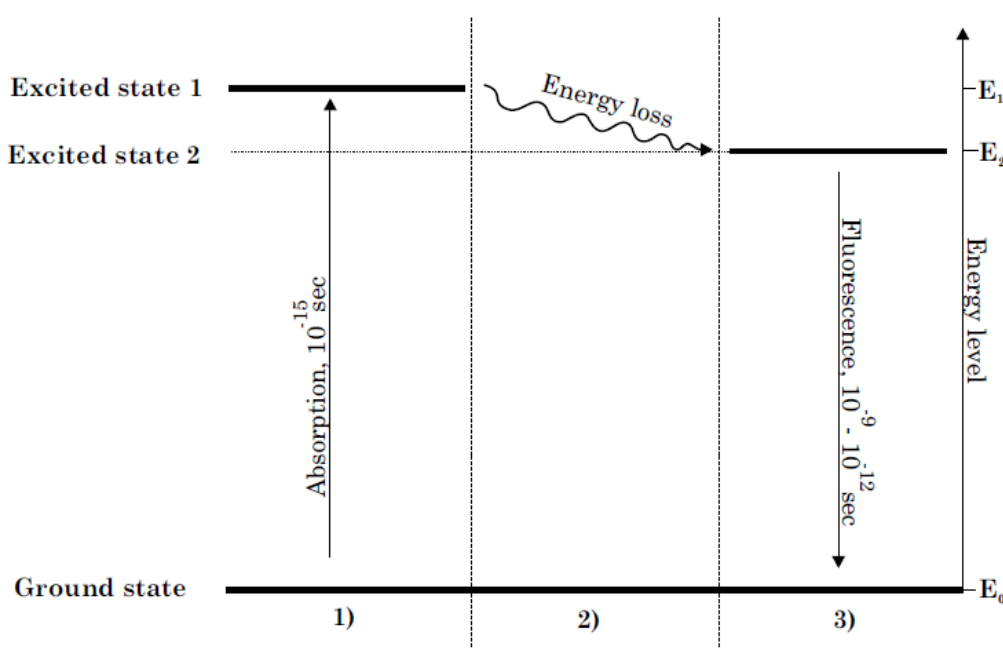
Πέρα από το φαινόμενο Brown, στου οποίου την έκταση επιδρά το μέγεθος των σωματιδίων, και η συγκέντρωσή τους καθορίζει σημαντικά την ποιότητα των αποτελεσμάτων, λόγω της συμβολής τους στον λόγο Signal-to-Noise (SNR). Πιο συγκεκριμένα δύο παράγοντες φαίνεται να εμπλέκονται στην αυξομείωση αυτού του λόγου, η συγκέντρωση των σωματιδίων και το βάθος του καναλιού (Meinhart et al, 2000).

Στην περίπτωση των μικροροών όπου τα μικροκανάλια που χρησιμοποιούνται εξυπηρετούν κάποιο συγκεκριμένο σκοπό, οι γεωμετρικές διαστάσεις του καναλιού είναι προκαθορισμένος, και ως αποτέλεσμα ο έλεγχος του φαινομένου μπορεί να πραγματοποιηθεί με έλεγχο της συγκέντρωσης των σωματιδίων. Συγκεκριμένα πρέπει να πραγματοποιηθεί μείωση της συγκέντρωσης τέτοια, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη ποιότητα. Ωστόσο, παρενέργειες στην καταγραφή της εικόνας μπορεί να προκύψουν και με μείωση της συγκέντρωσης, αφού ως αποτέλεσμα απαιτείται η εξέταση αρκετά μικρότερων interrogation regions, δηλαδή ανεπαρκής αριθμός σωματιδίων σε κάθε ένα από αυτά.

### 3.2.3 Φθορισμός

Σύμφωνα και με τη προηγούμενη ανάλυση, η εμφάνιση θορύβου αποτελεί σημαντικό ζήτημα για την ακρίβεια των εξαγόμενων μετρήσεων. Ειδικά στις περιπτώσεις όπου το "σήμα" των σωματιδίων λαμβάνεται μέσω του φαινομένου της ελαστικής σκέδασης, η επιδιωκόμενη ένταση του φωτός που σκεδάζεται, εξαρτάται σημαντικά από το μέγεθος του χρησιμοποιούμενου σωματιδίου, ενώ παράλληλα πρέπει να τεθεί ένα κατώτατο όριο στην διάμετρο του προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η ένταση του φαινομένου της κίνησης Brown. Πρέπει επομένως να συντελεστεί ένας διακανονισμός μεταξύ των δύο αυτών απαιτήσεων. Τη λύση στο ζήτημα αυτό δίνει το φαινόμενο του *φθορισμού*. Τα σωματίδια τα οποία παρουσιάζουν συμπεριφορά φθορισμού καλούνται φθοριοχρώματα (fluorochromes).

Κατά το φαινόμενο του φθορισμού, πραγματοποιείται εκπομπή ενός φωτονίου από άτομο ή μόριο, λόγω της προσωρινής διέγερσης της ηλεκτρονίων του, που προκαλείται από την απορρόφηση φωτονίου συγκεκριμένου μήκους κύματος (βλ. **Εικόνα 3.3**). Όπως φαίνεται και στη σχετική εικόνα, όταν ένα φθοριόχρωμα απορροφά ένα φωτόνιο ενέργειας  $E_1$ , ένα ηλεκτρόνιο του διεγείρεται και μεταβαίνει σε ενεργειακά υψηλότερη στοιβάδα (διεγερμένη κατάσταση 1), με άλμα ανάλογο της απορροφώμενης από το φωτόνιο ενέργειας. Λόγω των αλληλεπιδράσεων του σωματιδίου με το περιβάλλον του, υπάρχει απώλεια ενέργειας, που έχει ως αποτέλεσμα την αποδιέγερση του σωματιδίου και τη μετάβαση του στην ενεργειακή στοιβάδα  $E_2$ , από την οποία θα πραγματοποιηθεί και η εκπομπή του φωτονίου. Μετά το πέρας απειροελάχιστα μικρού χρονικού διαστήματος ( $10^{-9}$ - $10^{-12}$  seconds) το διεγερμένο ηλεκτρόνιο επιστρέφει στην κύρια στοιβάδα του (ενέργεια  $E_0$ ), με την ταυτόχρονη εκπομπή φωτονίου ενέργειας  $E_2-E_0$ .



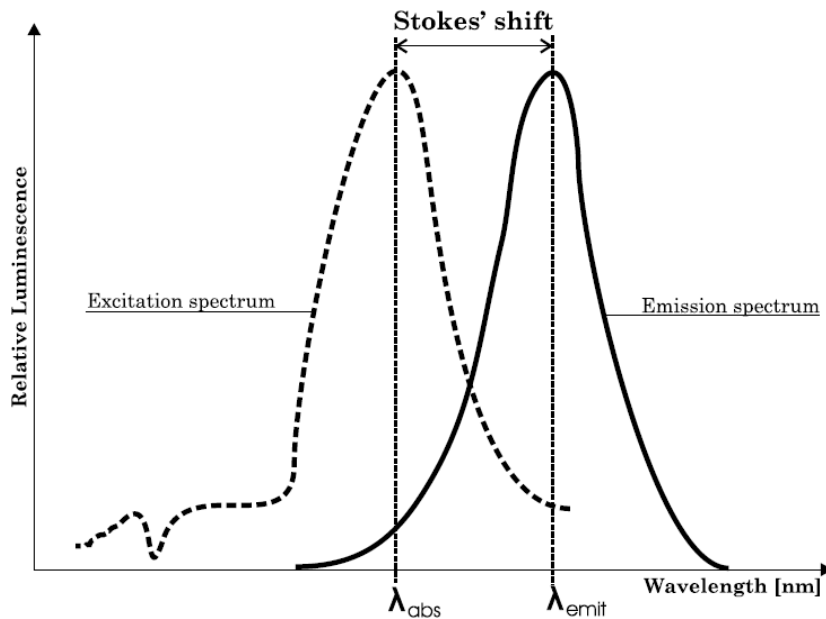
Εικόνα 3.3 Φυσική ερμηνεία του φαινομένου του φθορισμού.



Η ενέργεια του εκπεμπόμενου φωτονίου δίνεται από την σχέση  $E = \frac{hc}{\lambda}$  (3.6), όπου  $h$  η σταθερά του Planck,  $c$  η ταχύτητα του φωτός, και  $\lambda$  το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Λόγω των αλληλεπιδράσεων με το περιβάλλον που λαμβάνουν χώρα κατά την παραμονή του ατόμου στην διεγερμένη κατάσταση, απάγεται από αυτό ενέργεια, και ως αποτέλεσμα η ενέργεια του εκπεμπόμενου φωτονίου είναι μικρότερη από αυτήν που απορροφάται κατά τη διέγερση. Ως εκ τούτου, το μήκος κύματος του φωτονίου που εκπέμπεται είναι μεγαλύτερο από το μήκος κύματος της απορροφόμενης ακτινοβολίας, δηλαδή  $\lambda_{emit} > \lambda_{abs}$ .

Κάθε φθοριόχρωμο απορροφά φωτόνια από ένα συγκεκριμένο ενεργειακό φάσμα, το επονομαζόμενο φάσμα διέγερσης (excitation spectrum). Η μορφή του φάσματος διέγερσης ποικίλει ως προς τις ιδιότητές του (για παράδειγμα ενεργειακό μέγιστο, μορφή του φάσματος), ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του κάθε σωματιδίου. Επίσης, το φθοριόχρωμο εκπέμπει φωτόνια συγκεκριμένου ενεργειακού φάσματος, του φάσματος εκπομπής (emission spectrum). Τα δύο αυτά φάσματα είναι διακριτά μεταξύ τους, ωστόσο υπάρχουν περιπτώσεις κατά τις οποίες επικαλύπτονται (overlapping), και κατά συνέπεια είναι μη-διακριτά μεταξύ τους. Η διαφορά ανάμεσα στην μέγιστη τιμή ενέργειας που σημειώνεται στο φάσμα διέγερσης και στην αντίστοιχη τιμή του φάσματος εκπομπής ονομάζεται μετατόπιση Stokes (Stokes's shift) (Murphy, 2001), με την γραφική της εξήγηση να φαίνεται στην εικόνα παρακάτω εικόνα.

Στο micro-PIV, οι φθορίζουσες ιδιότητες των σωματιδίων είναι καθοριστικής σημασίας, για την εξασφάλιση ικανοποιητικής ποιότητας εικόνας. Η φθορίζουσα χρωστική ουσία με την οποία επικαλύπτονται τα σωματίδια, πρέπει να απορροφά φωτόνια μήκους κύματος κοντά στο εκπεμπόμενο μήκος κύματος του φωτός του laser, ενώ ταυτόχρονα η μετατόπιση Stokes πρέπει να είναι επαρκώς μεγάλη, για να επιτευχθεί το σωστό φιλτράρισμα των "άχρηστων" ακτινοβολιών που προέρχονται για παράδειγμα από σκεδάσεις πάνω στο αντικείμενο προς παρατήρηση, και να διατηρείται στην καλύτερη δυνατή ποιότητα το "σήμα" από τα σωματίδια (Fluorescence Fundamentals, Invitrogen).



Εικόνα 3. 4. Stoke's shift.

### 3.3 Μικροσκόπιο

#### 3.3.1 Εισαγωγή

Παρά τη μεγάλη εφαρμογή που βρίσκει η χρήση του μικροσκοπίου σε ιατρικές και βιολογικές εφαρμογές, η εδραίωση του ως ερευνητικό μέσο της μηχανικής των ρευστών βρίσκεται ακόμα σε πρωτογενές στάδιο. Παρ' όλα αυτά η δυνατότητα που προσφέρει το μικροσκόπιο στην επίτευξη όλο και καλύτερης διακριτικής ανάλυσης, το καθιστά ένα απαραίτητο εργαλείο στην μελέτη ροών μικροκλίμακας. Στη συνέχεια θα δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στα μικροσκόπια φθορισμού, την κατηγορία δηλαδή που χρησιμοποιείται και στη μέθοδο micro-PIV. Ωστόσο, προτού προχωρήσουμε σε αυτό το στάδιο, είναι χρήσιμη η περιγραφή των βασικών συντελεστών ενός κοινού οπτικού μικροσκοπίου (Φασσέας Κ., ΓΠΑ):

- Προσοφθάλμιος φακός, ο οποίος βρίσκεται στο πάνω μέρος του μικροσκοπίου, πριν τα κιάλια παρατήρησης.
- Περιστρεφόμενη κεφαλή με τους αντικειμενικούς φακούς, που φέρει συνήθως θέσεις για 3-6 φακούς. Σε ερευνητικά μικροσκόπια, η κεφαλή μπορεί να αφαιρεθεί εύκολα και να αντικατασταθεί με άλλη κατάλληλη για διαφορετικό set φακών.
- Αντικειμενικός φακός, που αποτελεί το πιο σημαντικό εξάρτημα του συστήματος, εφόσον από αυτόν εξαρτάται η διακριτική ικανότητα και η αρχική μεγέθυνση που πραγματοποιείται.
- Αντικειμενοφόρος τράπεζα, που μπορεί να είναι τετράγωνη και σταθερή ή στρογγυλή και περιστρεφόμενη, ενώ φέρει και σύστημα μικρομετρικών κοχλίων για την μετακίνηση του αντικειμένου.

- Μοχλός ρύθμισης της ίριδας (διαφράγματος). Ο ρόλος του διαφράγματος, είναι ο περιορισμός του φωτεινού κώνου που δέχεται το αντικείμενο, με αποτέλεσμα να αποκλείονται οι ακτίνες που προέρχονται από διάθλαση ή περίθλαση του φωτός. Δεν χρησιμοποιείται για αύξηση ή ελάττωση της έντασης της φωτεινής δέσμης. Η ρύθμισή της είναι πολύ σημαντική όταν πρόκειται να ακολουθήσει φωτογράφιση του αντικειμένου.
- Συγκεντρωτής ή συμπυκνωτής φακός (condenser lens). Σκοπός του εξαρτήματος αυτού είναι η εστίαση της φωτεινής πηγής στο επίπεδο του αντικειμένου. Κακή ρύθμιση του συμπυκνωτή έχει σαν αποτέλεσμα μεγάλη μείωση της διακριτικής ικανότητας του οργάνου.
- Λαβή εστίασης (μεγάλη για αδρή παρατήρηση, και μικρή για λεπτή παρατήρηση). Η κλίμακα που είναι χαραγμένη στο μικρομετρικό κοχλία εστίασης, μας δείχνει την κατακόρυφη μετακίνηση του αντικειμενικού φακού, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση του βάθους για παράδειγμα ενός καναλιού.
- Βάση μικροσκοπίου με ενσωματωμένο σύστημα φωτισμού. Στα περισσότερα μικροσκόπια υπάρχει ρεοστάτης για τη ρύθμιση της έντασης του φωτός.

Πρακτικά μπορούμε να περιγράψουμε τη λειτουργία του μικροσκοπίου ως εξής : Ο αντικειμενικός φακός έχει μικρότερη εστιακή απόσταση από τον προσοφθάλμιο. Το είδωλο του αντικειμένου είναι ανεστραμμένο και μεγεθυμένο κατά την μεγέθυνση του αντικειμενικού φακού. Στη συνέχεια ο προσοφθάλμιος φακός, αναλαμβάνει να δώσει την τελική μεγέθυνση του ειδώλου, που φτάνει δηλαδή στα μάτια μας.

Χρήσιμη είναι σε αυτό το σημείο η επισήμανση των διαφορών μεταξύ ενός μικροσκοπίου που είναι *ευθύ* (upright) και ενός *ανεστραμμένου* μικροσκοπίου (inverted). Στο ευθύ μικροσκόπιο το αντικείμενο προς παρατήρηση φωτίζεται κάτω από την αντικειμενοφόρο τράπεζα και η παρατήρηση γίνεται από πάνω. Το αντίστροφο συμβαίνει σε ένα ανεστραμμένο μικροσκόπιο.

### **3.3.2 Ανατομία του μικροσκοπίου φθορισμού**

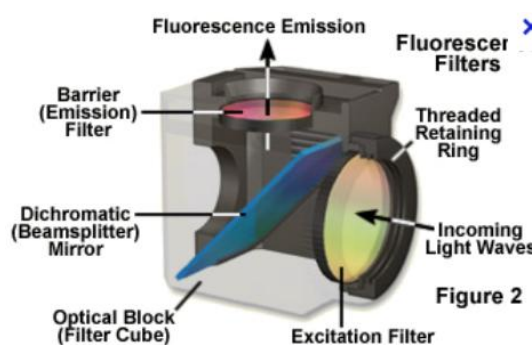
Προτού αναλυθεί η ανατομία ενός τέτοιου μικροσκοπίου, είναι χρήσιμη η περιγραφή των δύο διαφορετικών τρόπων φωτισμού του αντικειμένου παρατήρησης, ανάλογα με την τοποθέτηση της πηγής φωτός: του φθορισμού διελεύσεως (transmitted light), και τον φθορισμό προσπίπτοντος ακτινοβολίας (epi-fluorescence) (Φασσέας Κ., ΓΠΑ). Η δεύτερη μέθοδος έχει επικρατήσει της πρώτης, λόγω των πλεονεκτημάτων που προσφέρει:

- Ο αντικειμενικός φακός λειτουργεί και σαν συλλέκτης οπότε δεν χρειάζεται επιπλέον ρύθμιση.
- Στο μικροσκόπιο φθορισμού διελεύσεως ο φθορισμός παράγεται στα κατώτερα τμήματα του αντικειμένου, με αποτέλεσμα η ακτινοβολία κατά τη διέλευσή της μέσα από αυτό να διαχέεται, και να καθίσταται δυνατή η παρατήρηση

ενός τμήματος μόνο του αντικειμένου. Αντιθέτως στην δεύτερη περίπτωση επειδή και ο φωτισμός και η παρατήρηση του αντικειμένου γίνονται από την ίδια πλευρά η εικόνα από φθορισμό είναι πολύ πιο φωτεινή, με λιγότερο θόρυβο και καλύτερη ποιότητα.

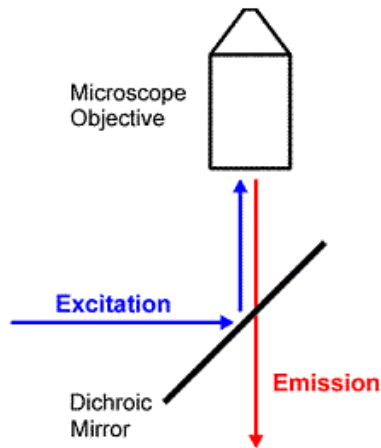
- Στο μικροσκόπιο φθορισμού προσπίπτουσας ακτινοβολίας, η προσπίπτουσα ακτινοβολία και η ακτινοβολία από φθορισμό δεν συγχέονται. Η πρώτη οδεύει μέσα από το αντικείμενο προς τα κάτω και χάνεται, με αποτέλεσμα να μην επηρεάζει την εικόνα από φθορισμό.

Ένα μικροσκόπιο φθορισμού φέρει τα ακόλουθα επιπρόσθετα οπτικά στοιχεία, σε σχέση με ένα κοινό οπτικό μικροσκόπιο (βλ. **Εικόνα 3.5**): διχρωματικός καθρέφτης (dichroic mirror), φίλτρο διέγερσης (excitation filter) και φίλτρο εκπομπής (excitation-barrier filter).



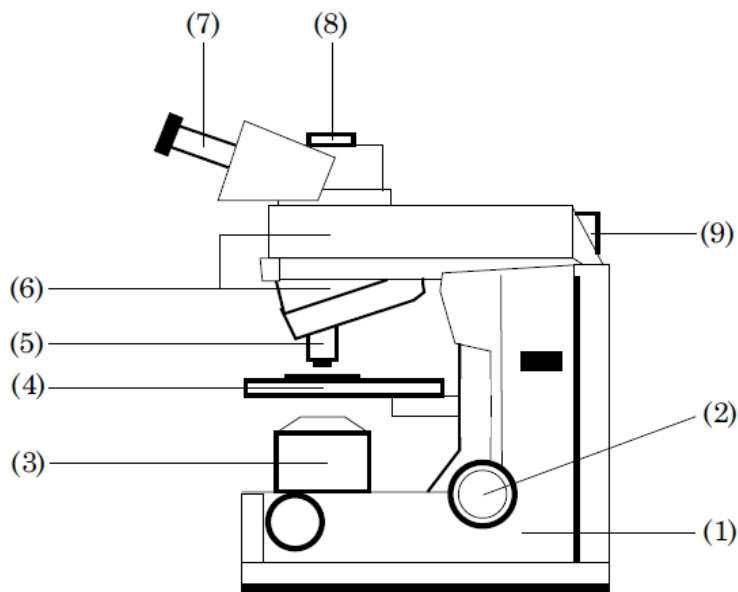
**Εικόνα 3.5.** Διχρωματικός καθρέφτης, φίλτρο εκπομπής, φίλτρο διέγερσης.

Το φίλτρο διέγερσης τοποθετείται πριν το διχρωματικό καθρέφτη, με σκοπό τη συλλογή της ακτινοβολίας διέγερσης που προέρχεται από το laser. Στη συνέχεια η ακτινοβολία διέγερσης πέφτει πάνω στον διχρωματικό καθρέφτη όπου και ανακλάται κατά  $90^{\circ}$  προς τα πάνω ή προς τα κάτω (βλ. **Εικόνα 3.6**), ανάλογα με την θέση του καθρέφτη ως προς τον αντικειμενικό φακό (για παράδειγμα στην περίπτωση ανεστραμμένου μικροσκοπίου, ο διχρωματικός καθρέφτης βρίσκεται κάτω από τον αντικειμενικό φακό). Ακολούθως η ακτινοβολία που εκπέμπεται από το αντικείμενο προς παρατήρηση, δηλαδή η ακτινοβολία εκπομπής κατευθύνεται είτε προς τα κιάλια είτε προς κάποιο άλλο σύστημα, όπως για παράδειγμα κάμερα προκειμένου να ληφθούν φωτογραφίες, αφού πρώτα περάσει από το φίλτρο εκπομπής. Ο πρακτικός ρόλος του φίλτρου εκπομπής είναι η αποτελεσματική συγκέντρωση της ακτινοβολίας και το φιλτράρισμα εναπομενουσών για παράδειγμα ακτινοβολιών διέγερσης (C & L Instruments, Inc.).



Εικόνα 3. 6. Θέση διχρωματικού καθρέφτη σε ανεστραμμένο μικροσκόπιο

Τελικά η ανατομία ενός μικροσκοπίου φθορισμού φαίνεται στην **Εικόνα 3.7.**



Εικόνα 3.7. Ανατομία του μικροσκοπίου. (1) Βάση του μικροσκοπίου, (2) Λαβή εστίασης, (3) Λάμπα φωτισμού, (4) Βαθμίδα τοποθέτησης του αντικειμένου, (5) Αντικειμενικός φακός, (6) Χώρος για τους φθορίζοντες παράγοντες, (7) Σύστημα οπτικής παρατήρησης, (8) Θέση κάμερας, (9) Άνοιγμα για την υποδοχή των εξωτερικών ακτινών φωτισμού

### 3.3.3 Αντικειμενικός φακός

Ο αντικειμενικός φακός είναι ίσως η σημαντικότερη παράμετρος ενός μικροσκοπίου, εφόσον είναι υπεύθυνος για τον πρωτογενή σχηματισμό εικόνας, και παίζει καθοριστικό ρόλο στην ποιότητα που ένα μικροσκόπιο είναι ικανό να αποδώσει. Ο αντικειμενικός φακός, σχετίζεται επίσης με την αρχική μεγέθυνση που θα λάβει χώρα στο σύστημα, καθώς και με την διακριτική ανάλυση που μπορεί να επιτευχθεί. Σε σχέση με τους υπόλοιπους συντελεστές ενός μικροσκοπίου, είναι ο δυσκολότερος στην κατασκευή και στην συναρμολόγησή του. Αξίζει να αναφερθεί ότι το όνομά του προέκυψε από την εγγύτητά του στο αντικείμενο παρατήρησης, και ως εκ τούτου ονομάστηκε αντικειμενικός.

Αρκετοί κατασκευαστές προσφέρουν μία μεγάλη γκάμα αντικειμενικών φακών, οι οποίοι διαθέτουν εξαιρετικά οπτικά χαρακτηριστικά, και παρέχουν διάφορους τρόπους διόρθωσης οπτικών σφαλμάτων που μπορεί να συντελεστούν. Παρακάτω φαίνεται ένας αντικειμενικός αποχρωματικός (apochromat) φακός Olympus, που συντίθεται από 14 οπτικά στοιχεία, τα οποία είναι ομαδοποιημένα σε διαφορετικές κατηγορίες. Ο φακός έχει επίσης ένα ημισφαιρικό μπροστινό τμήμα (hemispherical front lens), και έναν δεύτερο φακό σε σχήμα μηνίσκου, που δουλεύουν συγχρόνως, με σκοπό την "αιχμαλωσία" της δέσμης φωτός, με όσο το δυνατό μικρότερες αποκλίσεις και με ταυτόχρονα μεγάλο αριθμητικό άνοιγμα. Σε πολλούς φακούς υψηλής ανάλυσης, ίδιας σχεδίασης, υπάρχει και ένα κωνικό πρόσθετο, μία καλυπτρίδα δηλαδή, που αποτρέπει την φθορά του μπροστινού τμήματος του φακού, λόγω επαφής του με το αντικείμενο προς παρατήρηση (Olympus Microscopy Resource Center).

Τα εσωτερικά στοιχεία του φακού στεγάζονται σε μία σωληνοειδή διαμόρφωση από ορείχαλκο. Ο συγκεκριμένος φακός της εικόνας είναι σχεδιασμένος έτσι ώστε το μέσο απεικόνισης ανάμεσα στο μπροστινό φακό και την καλυπτρίδα να είναι αέρας. Ωστόσο σε άλλους φακούς, το ρόλο αυτό μπορεί να διαδραματίζει το νερό, γλυκερίνη, ή κάποιο λάδι με βάση τους υδρογονάνθρακες.

Η αναγκαιότητα της χρήσης κάποιου μέσου απεικόνισης, έχει να κάνει με τη διάδοση της φύση του φωτός στα διάφορα μέσα. Είναι γνωστό ότι όταν το φως περνάει από ένα υλικό δεδομένου δείκτη διάθλασης, σε ένα άλλο υλικό διαφορετικού δείκτη διάθλασης, αλλάζει κατεύθυνση. Στην περίπτωση που έχουμε τη διάδοση ακτινών φωτός διαφορετικού μήκους κύματος που προσπίπτουν με διαφορετικές γωνίες στις διάφορες επιφάνειες, έχουμε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη πολλών διαθλαστικών επιφανειών, ένα φαινόμενο που απαντάται στη λειτουργία του μικροσκοπίου, και οδηγεί σε μειωμένη αποδιδόμενη ευκρίνεια του συστήματος. Προκειμένου να περιοριστούν οι διαστάσεις του φαινομένου, είναι απαραίτητη η χρήση φακών μεγάλων μεγεθύνσεων, της τάξης του 400X. Ωστόσο ακόμα και τότε η επιτεύξιμη ευκρίνεια, δεν είναι η αναμενόμενη.

Την ευθύνη της αντιμετώπισης αυτού του φαινομένου, αναλαμβάνει το μέσο απεικόνισης. Το μέσο απεικόνισης, που συνήθως είναι λάδι ή κάποιο άλλο υγρό με

δείκτη διάθλασης ίδιο με του λαδιού, τοποθετείται ανάμεσα στην καλυπτρίδα και το μπροστινό τμήμα του αντικειμενικού φακού. Καθ' αυτόν τον τρόπο εξαφανίζονται οι διαθλαστικές επιφάνειες και το φως "απάγεται" ευκολότερα από τον φακό, ενώ επιτυγχάνονται μεγεθύνσεις της τάξης των 1000X, με ταυτόχρονη ικανοποιητική ευκρίνεια.

Σύγχρονοι αντικειμενικοί φακοί, συντίθενται από πολυάριθμα είδη γυαλιού και οπτικά στοιχεία, και έχουν φτάσει σε ένα υψηλό επίπεδο ποιότητας και απόδοσης, με την ικανότητά τους να αντιμετωπίζουν τις οπτικές αποκλίσεις να καθορίζει την χρησιμότητα και την τιμή τους. Η σχεδίαση των φακών πραγματοποιείται με χρήση προγραμμάτων CAD, με αποτέλεσμα την μεγαλύτερη ακρίβεια σχεδίασης. Επίσης η εφαρμογή προηγμένων τεχνικών έχει συντελέσει στην σημαντική βελτίωση των εικόνων που εξάγονται, ως προς τη φωτεινότητα και την ακρίβεια. Στη συνέχεια θα εξετασθούν τα σημαντικότερα στοιχεία ενός αντικειμενικού φακού.



Εικόνα 3.8. Σχηματική αναπαράσταση της εσωτερικής δομής ενός αντικειμενικού φακού.

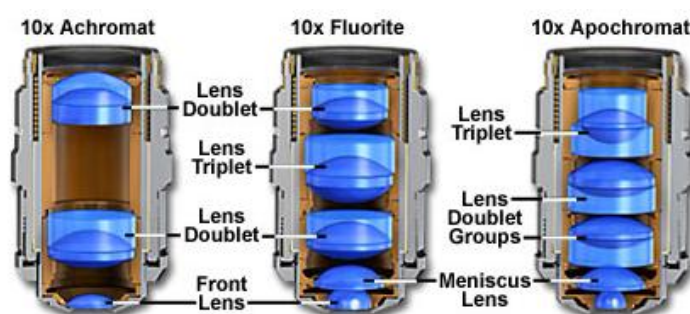
### Είδη φακών

Οι φθηνότεροι και πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι αντικειμενικοί φακοί σε εργαστηριακές εφαρμογές, είναι οι *αχρωματικοί* (achromats). Αυτοί οι φακοί επιδέχονται διορθώσεις για χρωματικές αποκλίσεις σε δύο μήκη κύματος (μπλε και κόκκινο, με 486 nm και 656 nm αντίστοιχα), που συλλέγονται σε ένα κοινό σημείο εστίασης. Επίσης οι αχρωματικοί φακοί διορθώνουν τυχόν σφαιρικές αποκλίσεις, όταν οι ακτίνες φωτισμού έχουν μήκος κύματος 546 nm, δηλαδή είναι χρώματος πρασίνου. Αυτό το περιορισμένο εύρος μηκών κύματος, οδηγεί σε σημαντικά λάθη όταν το δείγμα εξετάζεται με μεθόδους, όπως *φωτομικρογραφία* (photomicrography) και *χρωματική μικρογραφία* (color micrography). Τα τελευταία χρόνια αρκετοί ερευνητές, έχουν προσπαθήσει να εξαλείψουν αυτήν την αδυναμία των αχρωματικών φακών, δίνοντας στους φακούς που προέκυψαν την ονομασία planachromats.

Το αμέσως υψηλότερο επίπεδο σε ποιότητα και τιμή, συναντάται στους *φθορίζοντες* (fluorites) ή *ημι-αποχρωματικούς* (semi-apochromats) φακούς. Η ονομασία τους

οφείλεται στην χρήση του ορυκτού φθορίτη στην κατασκευή τους. Οι σύγχρονοι φθορίζοντες φακοί κατασκευάζονται από προηγμένα υαλικά σκευάσματα, που περιέχουν υλικά όπως αργυραδάμαντα, ή από συνθετικά υποκατάστατα. Οι νέες φόρμουλες που εφαρμόζονται για την κατασκευή τους, επιτρέπουν διόρθωση οπτικών παρεκκλίσεων σε αρκετά μεγάλο βαθμό. Όπως συμβαίνει και με τους αχρωματικούς φακούς, οι φθορίζοντες είναι διορθωμένοι για χρωματικές αποκλίσεις που οφείλονται στο κόκκινο και μπλε χρώμα. Επιπρόσθετα, οι φακοί αυτής της κατηγορίας, είναι διορθωμένοι για γεωμετρικές αποκλίσεις που μπορεί να προκληθούν από δύο ή τρία διαφορετικά μήκη φωτός, σε αντίθεση με τους αχρωματικούς, που διορθώνονται μόνο για ένα. Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε, ότι οι φθορίζοντες φακοί χαρακτηρίζονται από υψηλότερες τιμές αριθμητικού άνοιγματος, και επομένως καλύτερη ποιότητα εικόνας.

Στην υψηλότερη θέση διόρθωσης και τιμής βρίσκονται οι *αποχρωματικοί καθρέφτες* (apochromats). Οι αποχρωματικοί καθρέφτες, επιδέχονται διορθώσεις για χρωματικές αποκλίσεις σε τρία μήκη κύματος: κόκκινο, πράσινο και μπλε. Επίσης διορθώνονται για γεωμετρικές αποκλίσεις για δύο ή τρία μήκη κύματος. Λόγω των υψηλών επιπέδων διόρθωσης που προσφέρουν, οι αποχρωματικοί φακοί έχουν συνήθως για μεγαλύτερες μεγεθύνσεις, μεγαλύτερο αριθμητικό άνοιγμα σε σχέση με τους φακούς των δύο προηγούμενων κατηγοριών. Και οι τρεις κατηγορίες φακών φαίνονται παρακάτω (βλ. **Εικόνα 3.9**).



**Εικόνα 3.9.** Αναπαράσταση των τριών ειδών φακών.

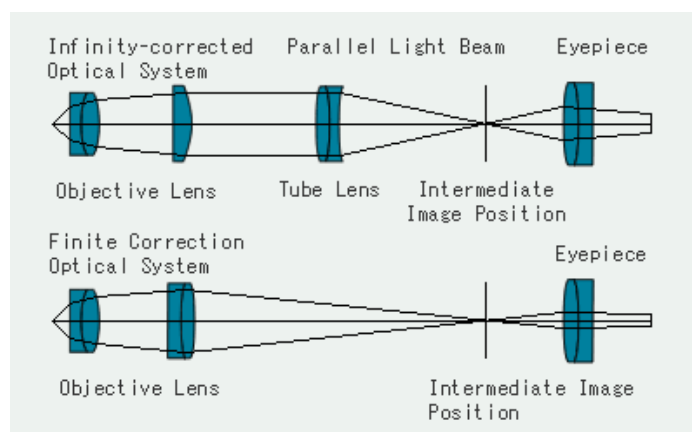
### *Infinity corrected systems-finite corrected systems*

Τα συστήματα infinity corrected είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να διευκολύνουν την εισαγωγή βοηθητικών συσκευών, όπως για παράδειγμα οπτικών φακών, μεταξύ του αντικειμενικού φακού και του προσοφθάλμιου, χωρίς γεωμετρικές αποκλίσεις, απαιτήσεις για αλλαγές στην εστίαση ή άλλου είδους επιπτώσεις στην εικόνα. Στα συστήματα finite correction η εικόνα αποδίδεται απευθείας από τον αντικειμενικό φακό, ενώ αντιθέτως στα infinity corrected, από τον αντικειμενικό φακό περνάει παράλληλη δέσμη φωτός (γι αυτό και η ονομασία infinity-corrected, εφόσον η δέσμη είναι εστιασμένη στο άπειρο) και η εικόνα σχηματίζεται από έναν άλλο φακό, τον tube lens (βλ. **Εικόνα 3.10**). Όπως επισημάνθηκε και στην αρχή της ανάλυσης, τα



συστήματα infinity-corrected, ευνοούν τις ενδιάμεσες αλλαγές, και πιο συγκεκριμένα:

- Όταν η απόσταση μεταξύ αντικειμενικού φακού και tube lens μεταβάλλεται, μετά την εισαγωγή κάποιου πρόσθετου έχουμε διατήρηση της μεγέθυνσης.
- Η εισαγωγή φίλτρων ή πρισμάτων ανάμεσα στο στους δύο φακούς, δεν έχει ως αποτέλεσμα παρεκκλίσεις της δέσμης, εφόσον η τελική εικόνα σχηματίζεται από τον tube lens.



Εικόνα 3.10 Συστήματα Infinity Corrected (πάνω)-Finite Corrected (κάτω)

### Διακριτική ανάλυση

Η διακριτική ανάλυση που επιτυγχάνεται για ένα οπτικό σύστημα όπως το μικροσκόπιο, όπου λαμβάνει χώρα και το φαινόμενο της διάθλασης, μπορεί να οριστεί ως η μικρότερη απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών σημείων που μπορεί να εντοπιστεί, με την μαθηματική της έκφραση να είναι η ακόλουθη:  $d = 0,61 \frac{\lambda}{n \sin \theta}$  (3.7), όπου  $\lambda$  το μήκος κύματος του φωτός και  $n$  ο δείκτης διάθλασης τους μέσου απεικόνισης που χρησιμοποιείται. Διαπιστώνουμε ότι η ανάλυση είναι ευθέως ανάλογη του μήκους κύματος των ακτίνων φωτισμού. Το ανθρώπινο μάτι αντιλαμβάνεται μήκη κύματος 400nm-700nm, το φάσμα δηλαδή ορατού φωτός. Παρατηρούμε ότι για τις περιπτώσεις όπου απαιτείται μικρή διακριτική ανάλυση πρέπει να μειωθεί είτε το μήκος κύματος του φωτός είτε να αυξηθεί ο παρονομαστής της προηγούμενης σχέσης, δηλαδή να έχουμε αύξηση της μεγέθυνσης του φακού.

### Αριθμητικό άνοιγμα $N.A.$

Το αριθμητικό άνοιγμα ενός φακού (numerical aperture) είναι ίσως το πιο σημαντικό μέγεθος που πρέπει να λάβουμε υπόψη μας, και αυτό λόγω του ότι δίνει ένα μέτρο δύο βασικών χαρακτηριστικών του φακού: της ικανότητας του να συγκεντρώνει το

φως και να διακρίνει στο μέγιστο τις λεπτομέρειες του δείγματος. Το αριθμητικό άνοιγμα ορίζεται μέσω του συντελεστή διάθλασης του μέσου απεικόνισης που χρησιμοποιείται, και της ημιγωνίας του φωτεινού κώνου που δέχεται ο φακός (βλ. Εικόνα 3.11), ως εξής:  $N.A = n \cdot \sin \theta$  (3.8).

Θεωρητικά, το υψηλότερο γωνιακό άνοιγμα που μπορεί να αποκτηθεί με ένα πρότυπο μικροσκόπιο, είναι  $180^\circ$ . Έτσι η ημιγωνία ανοίγματος αντιστοιχεί σε  $90^\circ$ . Για την περίπτωση αυτή το αριθμητικό άνοιγμα ισούται με  $n$ , γεγονός το οποίο δείχνει ότι η τιμή του περιορίζεται όχι μόνο από την ημιγωνία συλλογής του φωτός, αλλά και από το δείκτη διάθλασης του μέσου απεικόνισης που εμβαπτίζεται μεταξύ του μπροστινού τμήματος του αντικειμενικού φακού και της καλυπτρίδας. Η πλειοψηφία των μικροσκοπίων λειτουργούν με αέρα (το οποίο έχει δείκτη διάθλασης 1,0). Αυτό δίνει μια θεωρητική μέγιστη τιμή αριθμητικού ανοίγματος 1,00, αλλά στην πράξη, το μεγαλύτερο αριθμητικό άνοιγμα για έναν τέτοιο φακό είναι περίπου 0,95 (η ημιγωνία ανοίγματος υπολογίζεται ίση με  $72^\circ$ ).

Όπως προκύπτει από τα προηγούμενα, καθώς και από την **εικόνα 3.11**, επιθυμητή αύξηση του αριθμητικού ανοίγματος, μπορεί να συντελεστεί μέσω της επεξεργασίας των ακολούθων παραμέτρων: αύξηση του δείκτη διάθλασης του μέσου απεικόνισης, αύξηση της ημιγωνίας ανοίγματος, μείωση της εργαζόμενης απόστασης. Ως εργαζόμενη απόσταση (working distance) ενός φακού, ορίζεται η καθαρή απόσταση μεταξύ της επιφάνειας του αντικειμένου και του μπροστινού τμήματος του αντικειμενικού φακού. Γενικά η εργαζόμενη απόσταση μειώνεται με αύξηση της μεγέθυνσης και του αριθμητικού ανοίγματος. Επομένως φακοί μεγάλης μεγέθυνσης και άρα μικρής εργαζόμενης απόστασης, έχουν μεγάλο αριθμητικό άνοιγμα.

Στην περίπτωση που ο φακός λειτουργεί με αέρα ως μέσο απεικόνισης, δηλαδή  $n_{\text{air}}=1$ , η εργαζόμενη απόσταση του φακού πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται το βέλτιστο αριθμητικό άνοιγμα. Συμπεραίνουμε επομένως, ότι αν δεν έχουμε κάποιο μέσο απεικόνισης, θα πρέπει να πραγματοποιηθεί κατάλληλη μεταβολή της ημιγωνίας συλλογής του φωτός ή της εργαζόμενης απόστασης. Κατά την αντίθετη περίπτωση, η αύξηση του αριθμητικού ανοίγματος μπορεί να επιτευχθεί με χρήση μέσου απεικόνισης που το χαρακτηρίζει υψηλή τιμή του δείκτη διάθλασης. Τυπικές τιμές του δείκτη διάθλασης των μέσων που χρησιμοποιούνται είναι 1,515, ενώ η πιο συνηθισμένη τιμή για την χρήση ειδικών λαδιών, είναι 1,65 (Mielnik et.al, 2005).

### ***Βάθος πεδίου***

Η ανάλυση οποιουδήποτε οπτικού συστήματος περιορίζεται από το φαινόμενο της διάθλασης, που λαμβάνει χώρα όταν ακτίνες φωτός, αλληλεπιδρούν μεταξύ τους όταν διέρχονται από τον φακό του συστήματος. Η εικόνα που προκύπτει από μία σημειακή πηγή φωτός (στην περίπτωσή μας από ένα φθορίζων σωματίδιο), όταν αυτή απεικονίζεται μέσω ενός κυκλικού ανοίγματος, ονομάζεται δίσκος Airy.

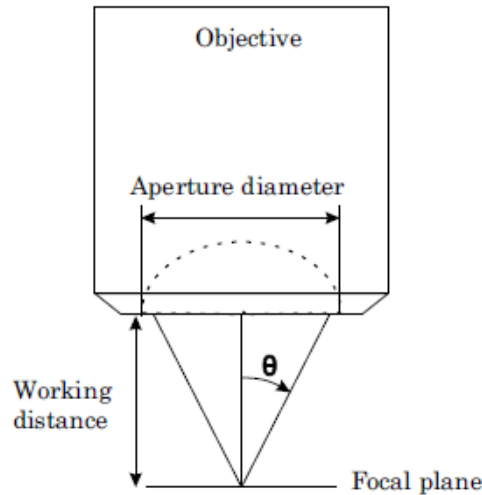
Πρόκειται για ένα κεντρικό δαχτυλίδι, το οποίο περιστοιχίζεται από έναν αριθμό επιπλέον ομόκεντρων δαχτυλιδιών. Η διάμετρος του δαχτυλιδιού Airy, δίνεται από τη σχέση  $d_s = 2,44M \frac{\lambda}{2(N.A.)}$  (3.9) όπου  $M$  η μεγέθυνση του φακού,  $N.A.$  το αριθμητικό άνοιγμα, και  $\lambda$  το μήκος κύματος του φωτός.

Με τον ορισμό της διαμέτρου του δαχτυλιδιού Airy, καθίσταται ικανή η εισαγωγή του κριτηρίου Rayleigh (Inoue & Spring, 1997), που ορίζει το πότε γίνονται διακριτά δύο γειτονικά μεταξύ τους σωματίδια, ως εξής: δύο γειτονικά μεταξύ τους σωματίδια διακρίνονται οριακά μεταξύ τους, όταν η απόσταση των κέντρων των δαχτυλιδιών τους ισούται με το μισό της διαμέτρου  $d_s$ . Για τιμές της απόστασης αυτής μικρότερες της προηγούμενης δεν ξεχωρίζουν καθόλου μεταξύ τους, ενώ ξεχωρίζουν εύκολα για τιμές μεγαλύτερης του μισού της διαμέτρου.

Το βάθος πεδίου ενός αντικειμενικού φακού ορίζεται ως το διάστημα που μπορεί να μετακινηθεί ο φακός κατά την κάθετη διεύθυνση, χωρίς να χάνεται η εστίαση στην παρατήρηση ενός απειροστά λεπτού αντικειμένου, με την μαθηματική έκφραση να είναι η εξής (Inoue & Spring, 1997):  $\delta z = \frac{n\lambda_0}{(N.A.)^2} + \frac{ne}{(N.A.)M}$  (3.10) όπου  $\lambda_0$  το μήκος κύματος του φωτός στο κενό, και  $e$  η μικρότερη απόσταση που μπορεί να αναλυθεί από την συσκευή λήψης και επεξεργασίας εικόνας που χρησιμοποιείται. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται μία CCD κάμερα, η απόσταση  $e$ , αντιστοιχεί στην απόσταση pixel-to-pixel του chip της κάμερας. Όπως φαίνεται από την προηγούμενη σχέση, το βάθος πεδίου είναι το άθροισμα του βάθους που οφείλεται στο φαινόμενο της διάθλασης και του βάθους λόγω γεωμετρικών παραγόντων. Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι το βάθος μέτρησης του αντικειμενικού φακού, δεν συμπίπτει με το βάθος μέτρησης του micro-PIV, όπως θα φανεί σε επόμενη ενότητα.

### **Φωτεινότητα εικόνας**

Για την περίπτωση που ως μέθοδο φωτισμού έχουμε τη διαφανοσκόπηση, δηλαδή τον φωτισμό με εφαρμογή κλασσικών μεθόδων (π.χ λάμπα), η φωτεινότητα της εικόνας ορίζεται ως ο λόγος του τετραγώνου του αριθμητικού ανοίγματος προς το τετράγωνο της μεγέθυνσης του φακού, δηλαδή  $B_{trans} \propto \frac{(N.A.)^2}{M^2}$  (3.11), ενώ για την περίπτωση του επιφθορισμού ορίζεται ως  $B_{epi} \propto \frac{(N.A.)^4}{(M)^2}$  (3.12) (Mielnik, 2005). Σημειώνουμε για άλλη μία φορά, την σημασία του αριθμητικού ανοίγματος για την ποιότητα των εικόνων. Συγκεκριμένα, για την περίπτωση όπου έχουμε τα φθορίζοντα σωματίδια στο ρόλο των ανιχνευτών της ροής, η επιλογή φακού με μεγάλο αριθμητικό άνοιγμα γίνεται όλο και σημαντικότερη, και αυτό λόγω του ασθενούς σήματος που στέλνουν τα σωματίδια.



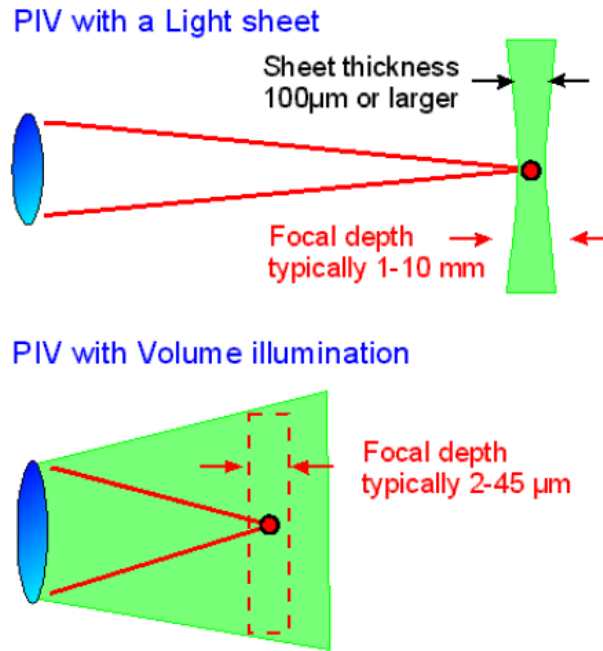
Εικόνα 3.11 Αριθμητικό άνοιγμα φακού

### 3.4 Φωτισμός της ροής

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου, στο PIV, ο φωτισμός της ροής συντελείται μέσω μίας λεπτής δέσμης φωτός laser. Η δέσμη φωτός, που είναι συνήθως λεπτότερη από το εστιακό βάθος του φακού της κάμερας που χρησιμοποιείται, καθορίζει ουσιαστικά και το επίπεδο της ροής που θα φωτιστεί, εφόσον μόνο τα σωματίδια που περιέχονται σε αυτό το επίπεδο σκεδάζουν φως που καταγράφεται από την κάμερα. Σε εφαρμογές micro-PIV, ο φωτισμός της ροής με αυτόν τον τρόπο δεν είναι δόκιμος για τους ακόλουθους λόγους (Meinhart et al, 2002, Dante Dynamics 2000):

- Οι περισσότερες συσκευές που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση ροών μικροκλίμακας, κατασκευάζονται με επεξεργασία πλακιδίων σιλικόνης, ενώ σφραγίζονται στην κορυφή τους με χρήση γυάλινου καλύμματος. Καθ' αυτόν τον τρόπο η οπτική πρόσβαση στη ροή περιορίζεται σε μία διεύθυνση, καθιστώντας τη μέθοδο φωτισμού με λεπτές δέσμες laser ακατάλληλη.
- Η εφαρμογή λεπτών δεσμών laser σε μικροσυσκευές απαιτεί την χρήση κατάλληλων οπτικών οδηγών μέσα στη συσκευή. Ωστόσο το αυξημένο κόστος και η πολυπλοκότητα που συνοδεύουν τέτοιες προσπάθειες είναι αποθαρρυντικά στοιχεία για την εφαρμογή τους.
- Οι διαστάσεις των καναλιών που εξετάζονται είναι της τάξης μερικών δεκάδων ή εκατοντάδων microns. Για να εφαρμοστεί η μέθοδος φωτισμού με δέσμη laser, θα πρέπει το πάχος της δέσμης να είναι της τάξης μερικών μικρομέτρων, πράγμα πρακτικά αδύνατο.

Για τους λόγους αυτούς, στο micro-PIV εφαρμόζεται φωτισμός της ροής σε ολόκληρο τον όγκο της, ενώ το επίπεδο μέτρησης καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά εστίασης του αντικειμενικού φακού του μικροσκοπίου. Ο τρόπος αυτός φωτισμού της ροής είναι γνωστός ως *bulk illumination*, ή *volume illumination* (βλ. Εικόνα 3.12).



Εικόνα 3.15 Light sheet VS Volume illumination

### 3.5 Βάθος μέτρησης micro-PIV (Depth of correlation)

Το βάθος μέτρησης μίας διάταξης micro-PIV, η αλλιώς βάθος συσχέτισης, διαφέρει από το βάθος μέτρησης του οπτικού συστήματος, όπως επισημάνθηκε και προηγουμένως. Οι Meinhart et.al διατύπωσαν τον εξής ορισμό για το βάθος μέτρησης του συστήματος micro-PIV (Meinhart et al. 2000a): το βάθος μέτρησης μπορεί να οριστεί ως το διπλάσιο της απόστασης από το κέντρο του πλάνου του αντικειμένου, μέχρι σημείο στο οποίο το εικονιζόμενο σωματίδιο είναι επαρκώς μη-εστιασμένο, έχοντας έτσι χαμηλή φωτεινότητα, με αποτέλεσμα να μην συνεισφέρει σημαντικά στην μέτρηση της ταχύτητας, δηλαδή απλούστερα πρόκειται για το βάθος πάνω από το οποίο τα σωματίδια συνεισφέρουν σημαντικά στη συνάρτηση συσχετισμού που εφαρμόζεται για υπολογισμό των ταχυτήτων. Απέδειξαν ότι αυτό συμβαίνει όταν η φωτεινότητα των σωματιδίων μειώνεται σε λιγότερο από το 10% της μέγιστης φωτεινότητας ενός καλά εστιασμένου σωματιδίου, ενώ υπέδειξαν τη

συμβολή του φαινομένου της διάθλασης, των γεωμετρικών παραγόντων και της γεωμετρίας των σωματιδίων στον υπολογισμό του, όπως θα εξετασθεί παρακάτω. Πρέπει να σημειωθεί εδώ, ότι στις διατάξεις micro-PIV το βάθος μέτρησης είναι αυτό που καθορίζει την τελική ανάλυση και όχι το βάθος πεδίου.

### 3.5.1 Συμβολή της διάθλασης

Η 3-D απεικόνιση της έντασης της φωτεινότητας λόγω του φαινομένου της διάθλασης για μία σημειακή πηγή εκτός εστίασης που αποτυπώνεται πάνω σε ένα κυκλικό άνοιγμα  $a$  (στην περίπτωσή μας ο φακός) δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις (Born & Wolf 1999), με χρήση των αδιάστατων μεταβλητών  $u, v$ :

$$I(u, v) = \left(\frac{2}{u}\right)^2 [U^2_1(u, v) + U^2_2(u, v)]I_0 \quad (3.13), \text{ και}$$

$$I(u, v) = \left(\frac{2}{u}\right)^2 \left\{ 1 + V^2_0(u, v) + V^2_1(u, v) - 2V_0(u, v) \cos \left[ \frac{1}{2} \left( u + \frac{v^2}{u} \right) \right] - 2V_1(u, v) \cos \left[ \frac{1}{2} \left( u + \frac{v^2}{u} \right) \right] \right\} I_0 \quad (3.14)$$

όπου  $U_n(u, v)$  και  $V_n(u, v)$ , οι συναρτήσεις Lommel, που μπορούν να εκφραστούν ως συναρτήσεις Bessel πρώτου είδους:

$$U_n(u, v) = \sum_{s=0}^{\infty} (-1)^s \left(\frac{u}{v}\right)^{n+2s} J_{n+2s}(v) \quad (3.15)$$

$$V_n(u, v) = \sum_{s=0}^{\infty} (-1)^s \left(\frac{v}{u}\right)^{n+2s} J_{n+2s}(v) \quad (3.16)$$

Οι αδιάστατες μεταβλητές διάθλασης ορίζονται ως εξής:  $u = 2\pi \frac{z}{\lambda} \left(\frac{\alpha}{f}\right)^2$ , και  $v = 2\pi \frac{r}{\lambda} \left(\frac{\alpha}{f}\right)^2$  (3.15), όπου  $z$ , η αξονική συνιστώσα εντός πλάνου,  $r$  η ακτινική συνιστώσα εκτός πλάνου (βλ. **Εικόνα 3.13**),  $\lambda$  το μήκος κύματος του φωτός και  $f$  το εστιακό μήκος του φακού. Το ζήτημα που ανακύπτει είναι η εξέταση του φαινομένου σε σημεία εκτός πλάνου, δηλαδή για  $r = v = 0$ . Γίνεται επομένως φανερό, ότι πρέπει να εισαχθεί η έκφραση  $I(u, 0)$ , θέτοντας  $v = 0$ , σε μία από τις

δύο εξισώσεις που δόθηκαν στην αρχή. Έτσι προκύπτει:  $V_1(u, 0) = 0$ , και  $V_0(u, 0) = J_0(0)$ , όπου  $J_0(x)$  είναι συνάρτηση Bessel πρώτου είδους και τάξης 0, οπότε για την τιμή  $x = 0$  παίρνει την τιμή 1.

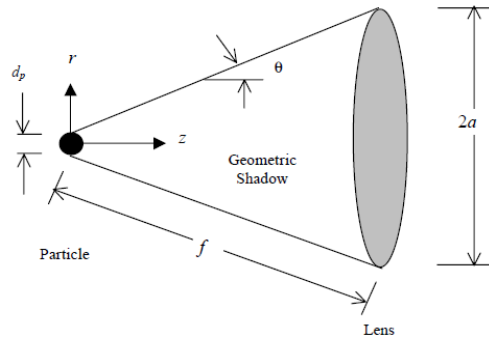
Επομένως η σχέση 3.14 γίνεται :  $I(u, 0) = \left(\frac{2}{u}\right)^2 \left[2 - 2 \cos\left(\frac{u}{2}\right)\right] I_0 = \left(\frac{\sin\left(\frac{u}{4}\right)}{\frac{u}{4}}\right)^2 I_0$  (3.17),

μετά από εφαρμογή της τριγωνομετρικής ταυτότητας  $\sin^2 \alpha = \frac{1}{2} [1 - \cos(2\alpha)]$ . Διαιρώντας την 3.17 με την μέγιστη τιμή  $I_0$ , και εισάγοντας το κριτήριο του 10% που αναφέρθηκε προηγουμένως, προκύπτει  $\left(\frac{\sin\left(\frac{u}{4}\right)}{\frac{u}{4}}\right)^2 = 0,1$ , από όπου με επίλυση της τριγωνομετρικής εξίσωσης εξάγεται η τιμή  $u \approx 3\pi$ . Αντικαθιστώντας την τιμή αυτή στη σχέση ορισμού της αδιάστατης μεταβλητής  $u$ , και λύνοντας για  $2z$  έχουμε:

$$2z = 3\lambda \left(\frac{f}{\alpha}\right)^2 \quad (3.18).$$

Μπορούμε να εισάγουμε εδώ την έννοια του αριθμητικού ανοίγματος που εξετάστηκε προηγουμένως,  $N.A. = n \cdot \sin \theta$ , με  $\sin \theta = \frac{\alpha}{f}$ , και  $\lambda_0 = n\lambda$ , οπότε το βάθος μέτρησης λόγω της συμβολής της διάθλασης μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\delta_{za} = \frac{3n\lambda_0}{(N.A.)^2} \quad (3.19)$$



**Εικόνα 3.13.** Απεικόνιση της σκιάς που σχηματίζεται από ένα σωματίδιο εκτός εστίασης πάνω στο επίπεδο εστίασης, με  $d_p$  τη διάμετρο του σωματιδίου,  $\theta$  τη γωνία συλλογής του φακού απεικόνισης και  $f$  το εστιακό μήκος.

### 3.5.2 Επίδραση της γεωμετρίας

Σύμφωνα με την **εικόνα 3.13**, η σκιά σωματιδίου εκτός εστίασης, όπως απεικονίζεται πάνω στο εστιακό πλάνο έχει ακτίνα ίση με  $r_{gs} = \frac{d_p}{2} + z \tan \theta$  (3.20). Υποθέτοντας ότι η απόσταση  $z$  είναι πολύ μικρή σε σχέση με την εστιακή απόσταση του φακού,

θεωρούμε ότι η γωνία  $\theta$  ταυτίζεται με την ημιγωνία ανοίγματος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του αριθμητικού ανοίγματος. Το βάθος μέτρησης υπολογίζεται για μία απόσταση  $z$  τέτοια ώστε η φωτεινότητα σε αυτή τη θέση να είναι το 10% της μέγιστης φωτεινότητας, λόγω της διεύρυνσης της σκιάς του σωματιδίου. Με την υπόθεση ότι η κατανομή της φωτεινότητας στο πλαίσιο της σκιάς του σωματιδίου είναι ομοιογενής, η μείωση της έντασης της φωτεινότητας υφίσταται όταν η σκιά του σωματιδίου εκτός εστίασης στο απεικονιζόμενο πλάνο είναι 10 φορές μεγαλύτερη της σκιάς σωματιδίου εντός εστίασης στο ίδιο πλάνο, δηλαδή όταν:  $\pi r_{gs}^2 = 10\pi \left(\frac{d_p}{2}\right)^2$  (3.21).

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (3.20) στην (3.21), προκύπτει η ακόλουθη τελική έκφραση του βάθους μέτρησης λόγω γεωμετρίας:  $\delta_{zg} = \frac{2,16d_p}{\tan\theta}$  (3.22). Η έκφραση αυτή προϋποθέτει την επαρκή ανάλυση των σωματιδίων από την κάμερα CCD (Meinhart et al., 2000). Για μη επαρκή ανάλυση η επίδραση της γεωμετρίας του συστήματος στο μετρούμενο βάθος εκφράζεται διαφορετικά.

### 3.5.3 Συνολικό μετρούμενο βάθος

Το συνολικό μετρούμενο βάθος προκύπτει από πρόσθεση του παράγοντα λόγω διάθλασης, λόγω γεωμετρίας, αλλά και λόγω των διαστάσεων των σωματιδίων. Επομένως μία ολοκληρωμένη έκφραση είναι η ακόλουθη:

$$\delta_{zm} = \frac{3n\lambda_0}{(N.A.)^2} + \frac{2,16 d_p}{\tan\theta} + d_p \quad (3.23).$$

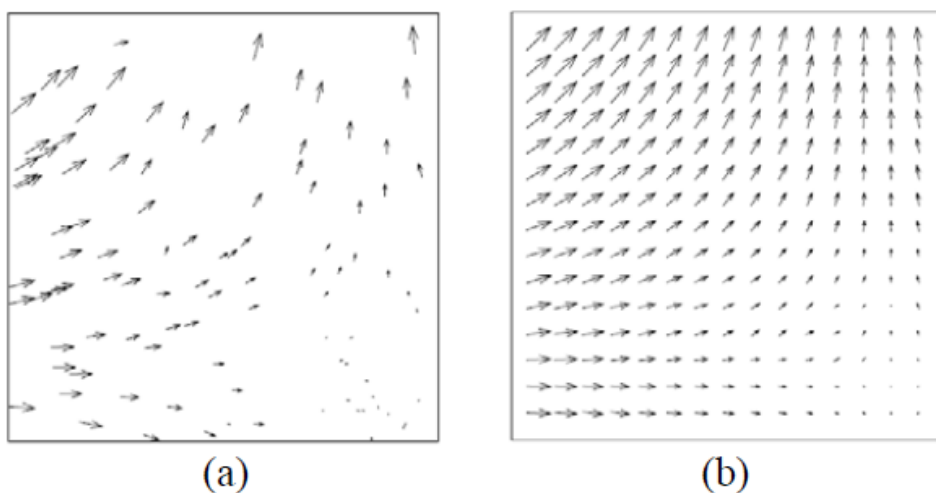
### 3.6 Επεξεργασία δεδομένων

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, προκειμένου να αποφευχθούν τα φαινόμενα θορύβου που συνοδεύουν υψηλές συγκεντρώσεις σωματιδίων στη ροή, πρέπει να πραγματοποιηθεί ανάλογη μείωση της συγκέντρωσης, που έχει ως αποτέλεσμα χαμηλή φωτεινότητα των εικόνων. Προκειμένου η ποιότητα των εικόνων να βελτιωθεί γίνεται χρήση είτε τεχνικών ψηφιακής επεξεργασίας, είτε προηγμένων αλγορίθμων επεξεργασίας εικόνας. Ακολούθως θα εξετασθούν τεχνικές που εφαρμόζονται, με σκοπό την επίτευξη ικανοποιητικής ποιότητας και φωτεινότητας στις εικόνες.



### 3.6.1 Image overlapping

Στην τεχνική overlapping, ζευγάρια εικόνων που έχουν ληφθεί σε ανεξάρτητα χρονικά διαστήματα, επικαλύπτονται με αποτέλεσμα την απόδοση εικόνων με επαρκή αριθμό σωματιδίων. Η μέθοδος overlapping μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά με την εξής έκφραση (Brigo, 2008):  $g_0(x, y) = \max\{g_k(x, y), k = 1 \dots N\}$  (3.24). Ο μέγιστος αριθμός των εικόνων που μπορούν να επικαλυφθούν περιορίζεται από τον αριθμό των σωματιδίων κάθε μίας από τις αρχικές εικόνες. Πρακτικά το overlapping πολλών εικόνων θα οδηγούσε σε αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωματιδίων των εικόνων σε βαθμό τέτοιο που δεν θα ωφελούσε ως προς την βελτίωση της ποιότητας. Στην επόμενη **εικόνα (3.14)** φαίνεται ξεκάθαρα η ευεργετική επίδραση της εφαρμογής ενός αλγορίθμου overlapping στην επεξεργασία των εικόνων, σε σύγκριση με τα διανύσματα που προκύπτουν χωρίς την εφαρμογή του.



Εικόνα 3.14. Επίδραση της τεχνικής image overlapping (εικόνα b) έναντι της μη-εφαρμογής της (εικόνα a).

### 3.6.2 Ensemble Correlation

Η συνάρτηση cross-correlation που εφαρμόζεται σε ένα συγκεκριμένο interrogation region διαστάσεων  $p \times q$  pixels έχει την ακόλουθη μορφή (Wereley et al, 2002):

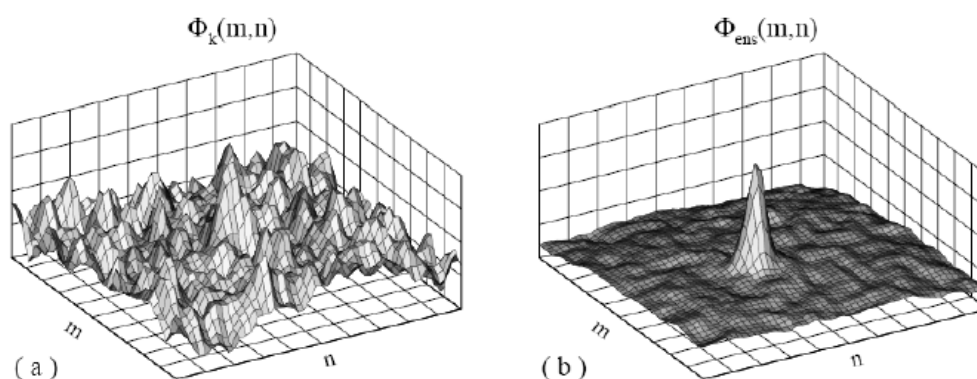
$$\Phi_k(m, n) = \sum_{j=1}^q \sum_{i=1}^p f_k(i, j) g_k(i + m, j + n) \quad (3.25),$$

όπου οι συναρτήσεις  $f$  και  $g$  αναφέρονται στις μετατοπίσεις των σωματιδίων τις χρονικές στιγμές  $t$  και  $t + \Delta t$ , αντίστοιχα. Για ένα δεδομένο ζευγάρι εικόνων που συντίθεται από επαρκή αριθμό σωματιδίων, η συνάρτηση  $\Phi$ , εμφανίζει ένα μέγιστο, το οποίο αντιστοιχεί στη μετακίνηση των σωματιδίων για δεδομένο χρονικό διάστημα, στο συγκεκριμένο interrogation window. Εκτός από αυτά τα μέγιστα, υπάρχει και ένα σημαντικό αριθμός μικρότερων κορυφών που προκύπτουν λόγω του θορύβου ή της λανθασμένης αντιστοίχισης των εικόνων, οι οποίες βρίσκονται διασκορπισμένες στο πλάνο συσχέτισης.

Σε εφαρμογές micro-PIV είναι σύνηθες, οι πραγματικές μετατοπίσεις να προκύπτουν μικρότερες από τις κορυφές που αναφέρθηκαν προηγουμένως, λόγω υψηλών επιπέδων θορύβου ή ανεπαρκούς συγκέντρωσης σωματιδίων. Ως εκ τούτου προκύπτουν εσφαλμένα διανύσματα ταχύτητας. Για τις περιπτώσεις μελέτης μικροροών όπου οι αριθμοί Reynolds είναι ιδιαίτερα μικροί και η ροή είναι στρωτή και σταθερή, η θέση της μέγιστης τιμής της συνάρτησης συσχέτισης που ανταποκρίνεται στην πραγματική μετακίνηση των σωματιδίων, δεν αλλάζει για λήψη εικόνων σε διαφορετικούς χρόνους. Η εμφάνιση των τυχαίων κορυφών, από την άλλη πλευρά, εμφανίζεται σε διάφορες θέσεις και σε διάφορες τιμές φωτεινότητας στο κάθε ζευγάρι εικόνων.

Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται λαμβάνοντας πολλά ζευγάρια εικόνων, για κάθε ένα από τα οποία υπολογίζεται ξεχωριστά η τιμή της συνάρτησης συσχέτισης  $\Phi$ , ενώ στη συνέχεια εξάγεται ο μέσος όρος όλων των τιμών  $N$  που έχουν προκύψει, για το κάθε interrogation window. Καθ' αυτόν τον τρόπο η θέση της πραγματικής μετακίνησης των σωματιδίων δεν μεταβάλλεται, ενώ ο μέσος όρος των τυχαία διασκορπισμένων κορυφών τείνει στο μηδέν (βλ. **Εικόνα 3.15**). Η συνάρτηση που περιγράφει την διαδικασία αυτή είναι η εξής (Meinhart et al, 2000):  $\Phi_{ens}(m, n) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \Phi_k(m, n)$  (3.26), όπου  $N$  ο συνολικός αριθμός ζευγαριών εικόνων που χρησιμοποιήθηκαν.

Για την εξαγωγή ικανοποιητικών αποτελεσμάτων κατά την εφαρμογή του ensemble PIV δεν υπάρχει κάποιο άνω όριο στον αριθμό των ζευγαριών εικόνων που θα συμμετάσχουν, όπως συμβαίνει με την τεχνική overlapping, και αυτό γιατί η επεξεργασία γίνεται στις τιμές της συνάρτησης συσχέτισης και όχι πάνω στις ίδιες τις εικόνες. Μάλιστα μεγαλύτερος αριθμός εικόνων προς επεξεργασία έχει ως αποτέλεσμα εξαγωγή όλο και καλύτερων αποτελεσμάτων.



Εικόνα 3.15. Απεικόνιση της επίδρασης της τεχνικής ensemble στην επεξεργασία εικόνας.

Τόσο η τεχνική overlapping όσο και η ensemble, εφαρμόζονται σε περιπτώσεις ροών μικρών αριθμών Reynolds. Έτσι για τις περιπτώσεις μικροροών, όπου οι αριθμοί Reynolds είναι αρκετά μικροί, αυτό είναι όντως έτσι. Ωστόσο έχουν παρατηρηθεί μεταβατικά φαινόμενα, όπως για παράδειγμα σε ηλεκτροκινητικές ροές, σε φαινόμενα ανάμιξης ροών ή σε διφασικά φαινόμενα ροών (two-phase flows) (Shinagora et al, 2004). Στις περιπτώσεις αυτές μέτρηση της ταχύτητας με το micro-PIV δεν είναι συνήθως εφικτή.

### 3.7 Αρχές λειτουργίας Laser-Κάμερας

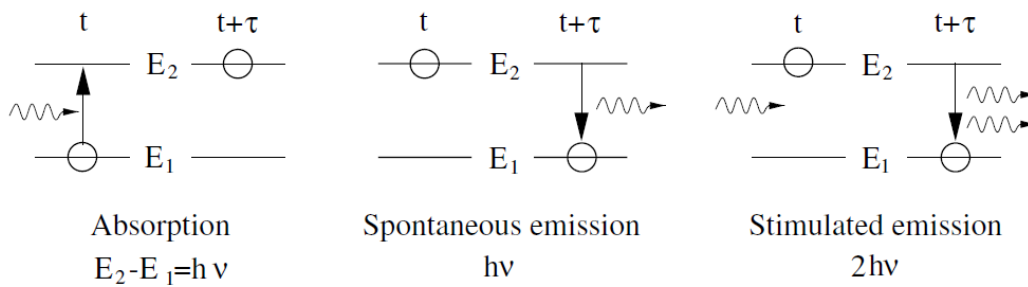
Τα laser χρησιμοποιούνται ευρέως στις εφαρμογές PIV, λόγω της ικανότητάς τους να εκπέμπουν μονοχρωματικό φως υψηλής ενεργειακής πυκνότητας, το οποίο ομαδοποιείται εύκολα σε δέσμες φωτός, φωτίζοντας έτσι τη ροή χωρίς να συνοδεύεται από χρωματικές αποκλίσεις. Το όνομα laser είναι ακρωνύμιο από τα αρχικά των λέξεων Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (ενίσχυση φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας). Η αρχή λειτουργίας του laser γίνεται κατανοητή με βάση τις έννοιες του φωτονίου και των ατομικών ενεργειακών σταθμών. Από την κβαντομηχανική, είναι γνωστό ότι ένα άτομο μπορεί να βρεθεί σε διάφορες ενεργειακές στάθμες, μέσω τριών τρόπων αλληλεπίδρασης με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (βλ. **Εικόνα 3.16**). Ένα διεγερμένο άτομο που βρίσκεται στην ενεργειακή στάθμη  $E_2$ , συνήθως πέφτει στην θεμελιώδη στάθμη  $E_1$ , με παράλληλη εκπομπή ενός φωτονίου ενέργειας  $E_2 - E_1 = h\nu$ . Αυτή η διαδικασία, ονομάζεται αυθόρμητη εκπομπή (spontaneous emission).

Από την άλλη πλευρά, υπάρχει η πιθανότητα ένα φωτόνιο συγκεκριμένης συχνότητας να συγκρουστεί με το άτομο, οπότε κατά συνέπεια δύο περιπτώσεις είναι πιθανές: είτε το άτομο θα απορροφήσει την ενέργεια του φωτονίου, οπότε θα

διεγερθεί και θα μεταβεί στην ενεργειακή στοιβάδα  $E_2$ , είτε το προσπίπτον φωτόνιο θα εξαναγκάσει το άτομο να εκπέμψει ένα άλλο φωτόνιο με την ίδια συχνότητα, την ίδια κατεύθυνση, την ίδια φάση και την ίδια πόλωση με αυτά του προσπίπτοντος φωτονίου. Τα δύο φωτόνια έχουν έτσι μία καθορισμένη σχέση φάσεων και αναδύονται μαζί ως σύμφωνη ακτινοβολία. Λόγω του ότι ενώ απορροφάται ένα φωτόνιο, εκπέμπονται δύο, για τον χαρακτηρισμό του φαινομένου χρησιμοποιείται ο όρος ενίσχυση του φωτός.

Για την πλειοψηφία των περιπτώσεων, υπερτερεί είτε το φαινόμενο της απορρόφησης φωτονίου είτε της εξαναγκασμένης εκπομπής. Ο παράγοντας που επηρεάζει την επικράτηση μίας εκ των δύο αυτών περιπτώσεων, είναι ο αριθμός ατόμων σε κάθε ενεργειακή στάθμη. Στην περίπτωση των αερίων αυτό καθορίζεται μέσω της κατανομής Maxwell-Boltzmann. Σύμφωνα με αυτήν, όταν ένα σύστημα βρίσκεται σε θερμική ισορροπία σε απόλυτη θερμοκρασία  $T$ , ο αριθμός των ατόμων  $N$  των ατόμων σε μία κατάσταση με ενέργεια  $E$ , είναι ανάλογος του  $e^{-E/kT}$ , όπου  $k$  η σταθερά του Boltzmann. Εξαιτίας του αρνητικού εκθέτη είναι εμφανής η μείωση του αριθμού των ατόμων σε μία ενεργειακή στάθμη, με αύξηση της ενέργειάς της. Συμπεραίνουμε επομένως, ότι ο αριθμός των ατόμων σε μία διεγερμένη στάθμη  $E_2$  είναι μικρότερος από τον αριθμό των ατόμων στην θεμελιώδη κατάσταση  $E_1$ . Το νόημα αυτής της τοποθέτησης, είναι ότι σε οποιαδήποτε λογική τιμή θερμοκρασίας στις διεγερμένες στάθμες δεν υπάρχει επαρκής αριθμός φωτονίων, έτσι ώστε να επιτευχθεί αξιόλογος ρυθμός εξαναγκασμένης εκπομπής από αυτές τις στάθμες.

Η επιθυμητή αύξηση του αριθμού των ατόμων στις διεγερμένες καταστάσεις θα μπορούσε να επιτευχθεί με την εισαγωγή μίας δέσμης ακτινοβολίας με συχνότητα  $\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$ . Ένας αριθμός ατόμων θα απορροφήσει φωτόνια ενέργειας  $E$  και θα μεταπηδήσει σε μία διεγερμένη κατάσταση, αυξάνοντας έτσι τον λόγο των πληθυσμών  $\frac{N_2}{N_1}$ . Επειδή όμως το  $N_1$  είναι αρχικά τόσο πολύ μεγαλύτερο του  $N_2$ , είναι απαραίτητη η εφαρμογή μίας εξαιρετικά έντονης δέσμης φωτός για να αυξηθεί το  $N_2$  σε μία συγκρίσιμη τιμή με το  $N_1$ . Ο ρυθμός με τον οποίο απορροφάται η ενέργεια της δέσμης από τα  $N_1$  στη θεμελιώδη κατάσταση, υπερτερεί κατά πολύ έναντι του ρυθμού με τον οποίο προστίθεται ενέργεια στη δέσμη λόγω εξαναγκασμένης εκπομπής από τα σπάνια διεγερμένα άτομα  $N_2$ .



Εικόνα 3.17 Είδη αλληλεπιδράσεων μεταξύ των ατόμων και της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Απαιτείται επομένως η δημιουργία μίας κατάστασης μη-ισορροπίας, στην οποία ο αριθμός  $N_2$  των ατόμων σε μία διεγερμένη στάθμη να είναι σημαντικά αυξημένος σε σχέση με τον αριθμό  $N_1$  της θεμελιώδους στάθμης (Young, 1994). Μία τέτοια κατάσταση ονομάζεται **πληθυσμιακή αναστροφή (population inversion)**. Όταν ο  $N_2$  είναι αρκετά μεγάλος, ο ρυθμός με τον οποίο ακτινοβολείται ενέργεια λόγω εξαναγκασμένης εκπομπής υπερβαίνει τον ρυθμό απορρόφησης. Το σύστημα δρα τότε ως πηγή ακτινοβολίας, με ενέργεια φωτονίων ίση με  $E$ . Επιπροσθέτως, επειδή τα φωτόνια είναι αποτέλεσμα εξαναγκασμένης εκπομπής, έχουν όλα την ίδια συχνότητα, φάση, πόλωση και κατεύθυνση. Η προκύπτουσα ακτινοβολία είναι επομένως σύμφωνη σε πολύ μεγάλο βαθμό από ότι το φως από συνήθεις πηγές, στις οποίες οι εκπομπές φωτονίων από μεμονωμένα άτομα δεν είναι συντονισμένες. Αυτή η σύμφωνη εκπομπή είναι το κύριο χαρακτηριστικό του laser.

Η απαιτούμενη αναστροφή πληθυσμού μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους. Για παράδειγμα τα στερεά υλικά laser απαιτούν την εφαρμογή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, οι ημιαγωγοί ηλεκτρικό ρεύμα, ενώ τα αέρια υλικά τη σύγκρουση μορίων ή ατόμων με ηλεκτρόνια και ιόντα. Ένα κοινό παράδειγμα είναι το laser ηλίου-νέου, μία συνήθης και φτηνή διάταξη που χρησιμοποιείται αρκετά συχνά σε εργαστηριακές εφαρμογές για εκπαιδευτικούς λόγους. Ένα μίγμα ηλίου και νέου, το καθένα τυπικά σε πίεση της τάξης των 100 Pa, είναι εγκλωβισμένο σε ένα γυάλινο δοχείο, μέσα στο οποίο υπάρχουν δύο ηλεκτρόδια. Όταν εφαρμοστεί μία αρκετά μεγάλη διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα ηλεκτρόδια, προκαλείται εκκένωση στο αέριο. Οι συγκρούσεις ανάμεσα στα ιονισμένα άτομα και τα ηλεκτρόνια της εκκένωσης διεγείρουν τα άτομα σε διάφορες ενεργειακές καταστάσεις.

Η πιο σημαντική διάταξη laser για εφαρμογές PIV είναι η ND-YAG laser (Raffel, 1998), με χρησιμοποιούμενο μέσο ιόντα  $\text{Nd}^{+3}$ , τα οποία μπορούν να ενσωματωθούν σε αρκετά υλικά. Τα συνήθη χρησιμοποιούμενα υλικά είναι κρύσταλλοι YAG (yttrium- aluminum-garnet). Τα συγκεκριμένα laser έχουν αρκετά καλές μηχανικές και θερμικές ιδιότητες, όπως επίσης και υψηλές δυνατότητες ενίσχυσης της προκύπτουσας δέσμης. Η επιθυμητή ακτινοβολία προκύπτει μέσω της μετάβασης

των ατόμων σε διεγερμένες ζώνες ενέργειας (χρήση κατάλληλου τροφοδοτικού) και εν συνεχεία μετάβαση των διεγερμένων ατόμων στη μετασταθή ανώτατη ενεργειακά στάθμη του laser, χωρίς την παράλληλη εκπομπή ακτινοβολίας.

Τα laser στερεάς κατάστασης μπορούν να τροφοδοτηθούν από πηγές λευκού φωτός, λόγω της διάταξης των ατόμων του υλικού τους που σχηματίζουν δικτυώματα. Η συγκεκριμένη αυτή μορφή έχει ως αποτέλεσμα συνεχή μορφή της ανώτατης ενεργειακής στάθμης, και όχι διακριτή όπως συμβαίνει στην περίπτωση των ατόμων που δεν έχουν κάποια ιδιαίτερη συνοχή. Τα ND-YAG laser είναι διατάξεις τεσσάρων επιπέδων. Σε κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας, εκπέμπει ακτινοβολίες μήκους κύματος 1064nm. Τα ND-YAG laser που είναι διαθέσιμα στο εμπόριο έχουν μήκος της τάξης των 150mm και διάμετρο της τάξης των 10mm.

Οι κάμερες CCD (charge-coupled device) είναι οι συχνότερα χρησιμοποιούμενες στις εφαρμογές PIV. Γενικά το CCD μπορεί να οριστεί ως ένας ηλεκτρονικός αισθητήρας που μετατρέπει το φως (δηλαδή τα φωτόνια) σε ηλεκτρικό φορτίο (δηλαδή ηλεκτρόνια). Πιο συγκεκριμένα, ένας αισθητήρας CCD αποτελείται από μερικά εκατομμύρια στοιχεία ημιαγωγίου υλικού, τα οποία βρίσκονται διατεταγμένα είτε σε μορφή γραμμής, είτε σε τετραγωνική μορφή. Το κάθε ένα από τα στοιχεία αυτά καλείται pixel, με το μέγεθός του να είναι της τάξης των  $10 \times 10 \mu\text{m}^2$  (ή 100pixel/ $\mu\text{m}$ ).

Η δεύτερη συνηθέστερη κατηγορία αισθητήρων που χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές PIV είναι οι αισθητήρες CMOS (Complimentary Metal Oxide Semiconductor). Οι CMOS βασίζονται στην τεχνολογία APS (Active Pixel Sensor), κατά την οποία, εκτός της φωτοδιόδου, ενσωματώνεται στο κάθε pixel ένας ενισχυτής ανάγνωσης (readout amplifier). Όπως και οι αισθητήρες CCD μετατρέπουν το φως σε ηλεκτρόνια. Ο ενισχυτής ανάγνωσης μετατρέπει την φόρτιση που υπάρχει συσσωρευμένη στη φωτοδίοδο σε δυναμικό, το οποίο ενισχύεται μέσα στο pixel και στη συνέχεια μεταφέρεται στις ακολουθίες στοιχείων που βρίσκονται μέσα σε αυτό, με σκοπό την περαιτέρω επεξεργασία σήματος στα κυκλώματα (Raffel, 1998).

Γενικά οι αισθητήρες CCD παράγουν εικόνες υψηλής ποιότητας και χαμηλού θορύβου, ενώ από την άλλη πλευρά οι CMOS είναι πιο "επιρρεπείς" στην ανάπτυξη θορύβου. Για το λόγο αυτό οι CMOS τείνουν να είναι φθηνότεροι, και να καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια. Ειδικότερα οι αισθητήρες CCD καταναλώνουν 100 φορές περισσότερη ενέργεια από ότι οι CMOS (How Stuff works).

## Αναφορές

Anastasiou A., Spyrogianni A. and Paras S., “Experimental study of pulsatile blood flow in micro channels”, Laboratory of Chemical Process and Plant Design, Department of Chemical Engineering, AUTH, Greece (2010)

Born M. and Wolf E., “Principles of Optics”, Oxford: Pergamon (1997)

Bourdon C., Olsen M. and Gorby A., “Validation of an analytical solution for depth of correlation in microscopic particle image velocimetry”, **15**, 318-327 (2004)

Brigo L., “Water slippage over micro and nano structured surfaces”, Phd thesis, Università Degli di Padova, Italy (2008)

C&L Instruments Inc. “Optics of a Fluorescence Microscope”

Φασσέας Κ., “ΟΠΤΙΚΑ ΦΩΤΟΝΙΚΑ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ. ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ”, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, [www.aua.gr/fasseas/optikamikroskopia.htm](http://www.aua.gr/fasseas/optikamikroskopia.htm)

Fluorescence Fundamentals, [www.invitrogen.com](http://www.invitrogen.com)

Hove J., Köster R., Forouhar A., Acevedo-Bolton G., Fraser S., and Gharib M., “Intracardiac fluid forces are an essential epigenetic factor for embryonic cardiogenesis”, Nature **421**, 172-177 (2003)

“Infinity-Corrected Optical System”, [www.olympus-ims.com](http://www.olympus-ims.com)

Inoue S. and Spring K., “Video Microscopy: The Fundamentals”, 2<sup>nd</sup> Edition, Plenum Press (1997)

Kloosterman A., Poelma C. and Westerweel J., “Accuracy of Micro-PIV Method for Biological Applications”, 8<sup>th</sup> International Symposium on Particle Image Velocimetry (2009)

Lee J.Y., Ji H.S. and Lee S.J., “Micro-PIV measurements of blood flow in extraembryonic blood vessels of chicken embryos”, Physiological Measurement, **28**, 1149-1162 (2007)

Meinhart C., Wereley S., Santiago J., “PIV measurements of a microchannel flow”, **27**, 414-419 (1999)

Meinhart C., Wereley S. and Gray M., “Volume illumination for two-dimensional particle image velocimetry”, **11**, 809-814 (2000)

Meinhart C. and Wereley S., “The theory of diffraction-limited resolution in microparticle image velocimetry”, **14**, 1047-1053 (2003)

“Microfluidics-PIV, Microfluidic Velocity Measurements” Dante Dynamics (2000)

Mielnik M., "Micro-PIV and its application to some BioMEMS related microfluidic flows", Phd thesis, Norwegian University of Science and Engineering, Norway (2005)

Murphy D., "Fundamentals of light Microscopy and Electronic Imaging", Wiley-Liss (2001)

Olsen M.G. and Adrian R.J., "Out-of-focus effects on particle image visibility and correlation in microscopic particle image velocimetry", *Experiments in Fluids*, **29**, S166-S174 (2000)

Olympus Microscopy Resource Center, <http://www.olympusmicro.com/>

Raffel M., Willert C.E. and Kompenhans J., "Particle image velocimetry: a practical guide", Springer (1998)

Santiago J., Wereley S., Meinhart C., Beebe D., Adrian R., "A particle image Velocimetry system for microfluidics", **25**, 316-319 (1998)

Shinohara K., Sugii Y., Aota A., Hibara A., Tokeshi M., Kitamori T. and Okamoto K., "High-speed micro-PIV measurements of transient flow in microfluidics devices", Institute of Physics Publishing, **15**, 1965-1970 (2004)

Venemmann P., Kiger K., Lindken R., Groenendijk B., Stekelenburg-de Vos S., Ten-Hagen T., Ursem N., Poelamann R., Westerweel J., Hierck B., "In vivo particle image velocimetry measurements of blood-plasma in the embryonic avian heart", *Journal of Biomechanics* **39**, 1191-1200 (2006)

Wereley S., Gui L. and Meinhart C., "Advanced algorithms for microscale particle image velocimetry", *AIAA Journal*, **40**(6), pp 1047-1055 (2002)

"What is the difference between CCD and CMOS IMAGE sensors in a digital Camera?", [www.electronics.howstuffworks.com](http://www.electronics.howstuffworks.com)

Young H., "ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ ΠΤΙΚΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΦΥΣΙΚΗ", Τόμος Β, ΠΑΡΙΑΖΗΣΗ (1994)

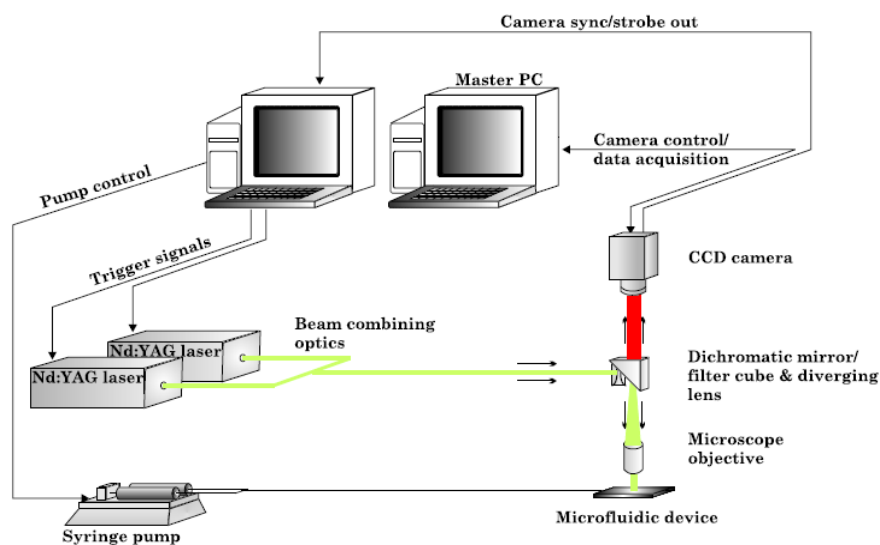


# **Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>**

## **Πειραματική Διαδικασία**

## 4.1 Εξοπλισμός

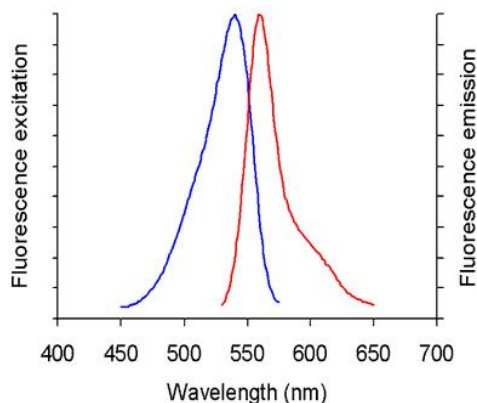
Στην ενότητα αυτή θα περιγραφούν με λεπτομέρεια οι ιδιότητες των συντελεστών που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας. Αξίζει να παρατεθεί η παρακάτω εικόνα, που δείχνει τον πειραματικό εξοπλισμό που χρησιμοποιείται σε ένα τυπικό πείραμα micro-PIV (βλ. **Εικόνα 4.1**).



Εικόνα 4.1 Απεικόνιση τυπικής διάταξης micro-PIV

## Σωματίδια

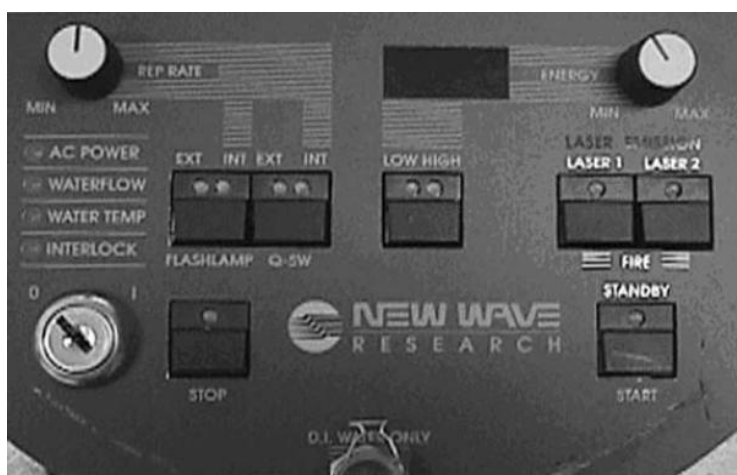
Τα σωματίδια που χρησιμοποιήθηκαν για ανίχνευση της ροής, είναι κατασκευασμένα από έναν αρωματικό υδρογονάνθρακα που παράγεται από το μονομερές στυρένιο, το πολυστυρένιο. Περιέχονται σε διάλυμα ποσότητας 5ml, οι διαστάσεις τους είναι 1μm, ενώ η συγκέντρωσή τους στο διάλυμα είναι της τάξης των  $1.0 \times 10^{10}$  beads/ml (life technologies). Απορροφούν μήκη κύματος της τάξης των 540nm (πράσινο), ενώ εκπέμπουν στα 560nm (κόκκινο) (βλ. **Εικόνα 4.2**).



Εικόνα 4.2 Μήκη κύματος διέγερσης (αριστερά) και εκπομπής (δεξιά) των σωματιδίων

### ***Laser-Κάμερα***

Το laser που χρησιμοποιήθηκε είναι της σειράς Solo, σχεδιασμένο ειδικά για συστήματα PIV. Πιο συγκεκριμένα το μοντέλο είναι YAG 15-Solo Nd. Εκπέμπει στα 532nm (~ το μήκος κύματος που διεγείρει τα σωματίδια), ενώ η ενέργεια των παλμών είναι της τάξης των 15Mj/pulse (New wave research, 2003). Η πρώτη ενέργεια που πραγματοποιείται κατά τη χρήση του laser είναι το “ζέσταμά” του, μέσω της επιλογής internal-external (βλ. **Εικόνα 4.3**). 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 στην δεύτερη ο συνδυασμός external-external, και η παύση συντελείται μέσω της επιλογής laser-off που προσφέρει το πρόγραμμα Insight 3G. Γενικά η επιλογή internal, χρησιμοποιείται σπάνια, συνήθως όταν ξεκινάει το πείραμα. Ολοκληρώνοντας, πρέπει να σημειωθεί ότι όσο αφορά την ένταση των παλμών, σε περίπτωση πειράματος πρέπει να είναι σε υψηλά επίπεδα, δηλαδή high-high. Η κάμερα που χρησιμοποιήθηκε είναι μοντέλο POWERVIEW CMOS 1.4 MP TSI.



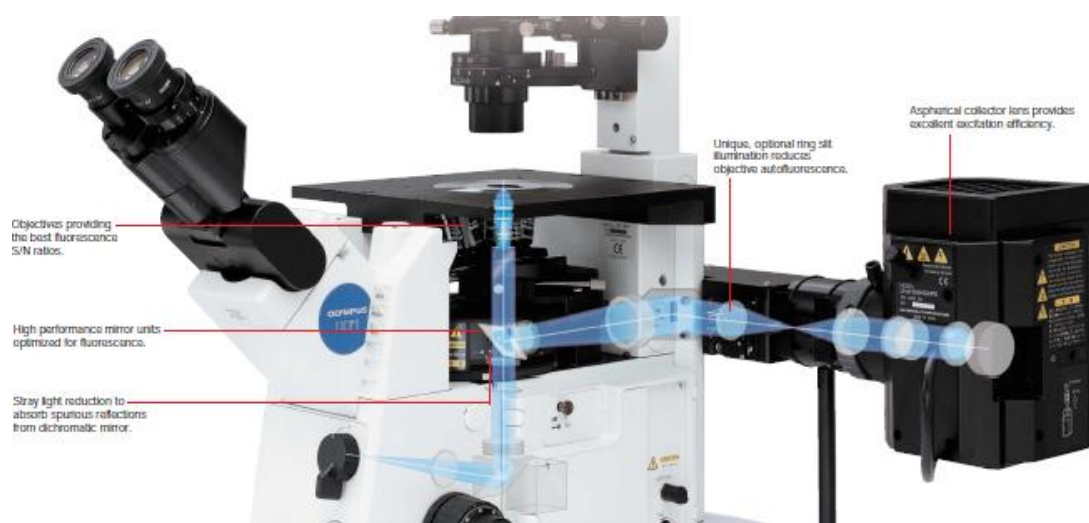
**Εικόνα 4.3** Επιλογές λειτουργίας του laser

### ***Μικροσκόπιο-Φακοί***

Το μικροσκόπιο που χρησιμοποιήθηκε είναι ανεστραμμένο (δηλαδή ο φωτισμός γίνεται πάνω από την αντικειμενοφόρο τράπεζα και η παρατήρηση γίνεται κάτω από αυτήν) μοντέλο IX71 της Olympus (βλ. **Εικόνα 4.4**). Η επιπλέον μεγέθυνση που προσφέρεται από το μικροσκόπιο χωρίς να αλλάζει ο φακός που χρησιμοποιείται κάθε στιγμή, είναι της τάξης του 1,6X. Οι διατιθέμενοι φακοί δουλεύουν με αέρα ως

μέσο απεικόνισης (dry), είναι επίπεδοι (PLAN), δηλαδή όλα τα σημεία του οπτικού πεδίου εστιάζουν στο ίδιο επίπεδο, κατασκευασμένοι από ειδικό γυαλί που δεν φθορίζει (fluorite), και ως εκ τούτου είναι οι κατάλληλοι για διατάξεις μικροσκοπίας φθορισμού. Ο φακός 10X/0,30 έχει αριθμητικό άνοιγμα N.A. ίσο με 0,30, δεν έχει κάλυμμα (cover glass), εργαζόμενη απόσταση 10mm, και αριθμό εστίασης (focal number) ίσο με 26,5. Ο δεύτερος φακός 20X/0,5 έχει αριθμητικό άνοιγμα ίσο με 0,50, έχει προστατευτικό κάλυμμα πάχους 0,17mm, εργαζόμενη απόσταση ίση με 2,1mm και αριθμό εστίασης ίσο με 26,5.

Για τον φακό 10X, η διακριτική ανάλυση υπολογίζεται ίση με 1,08 $\mu$ m, ενώ το βάθος συσχέτισης ίσο με 19 $\mu$ m. Για τον φακό 20X έχουμε αντίστοιχα διακριτική ανάλυση ίση με 0,65 $\mu$ m και βάθος συσχέτισης 11,12 $\mu$ m



Εικόνα 4.4 Πορεία φωτός σε ανεστραμμένο τηλεσκόπιο

### **Επεξεργασία δεδομένων και εικόνας**

Για την επεξεργασία των δεδομένων, και τον τελικό προσδιορισμό των διανυσμάτων χρησιμοποιήθηκαν τα προγράμματα Insight 3G, λογισμικό που έχει αναπτυχθεί από την Microsoft, ενώ για την παρουσίαση των τελικών προφίλ της ταχύτητας με τα διανύσματα, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Techplot. Τα δύο προγράμματα συνδέονται άμεσα μεταξύ τους, μέσω επιλογής που υπάρχει στο Insight 3G.

### **Μικροαντλία (Syringe Pump)**

Η μικροαντλία που χρησιμοποιήθηκε για την πλήρωση των καναλιών με συγκεκριμένη κάθε φορά παροχή μάζας δόθηκε από τον ΔΗΜΟΚΡΙΤΟ (βλ. **Εικόνα 4.5**). Αφού ρυθμιστεί το άνοιγμα της μικροαντλίας, μπορεί να εισαχθεί και η

επιθυμητή παροχή. Η μέγιστη παροχή που μπορεί η αντλία να διαχειριστεί είναι 5μl/min.



Εικόνα 4.5 Μικροαντλία

### *Μικροκανάλια*

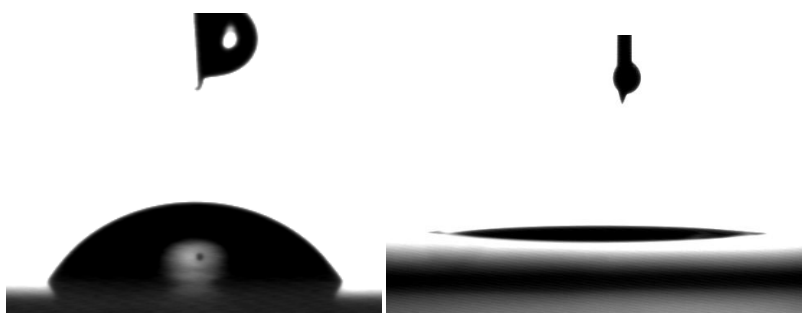
Τα μικροκανάλια (βλ **Εικόνα 4.6a**) κατασκευάζονται με το υλικό PMMA (πολυμεθακρυλικό μεθύλιο). Η διάνοιξη των μικρο-καναλιών σε PMMA γίνεται με εγχάραξη σε περιβάλλον πλάσματος οξυγόνου με τη χρήση κατάλληλης μάσκας από πυριτιούχο πολυμερές. Λόγω χρήσης του πυριτίου προκύπτουν μικροκανάλια τραπεζοειδούς διατομής κλίσης ίσης με  $54^{\circ}$ . 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  $5^{\circ}$  (πλήρης διαβροχή). Μάλιστα οι ιδιότητες αυτές κατακτώνται σε λιγότερο από 5 λεπτά κατεργασίας (βλ. Εικόνα 4.6b) 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  $150^{\circ}$ , ενώ η γωνία υστέρησης σε  $10^{\circ}$ .



Εικόνα 4.6 Μικροκανάλια που χρησιμοποιήθηκαν

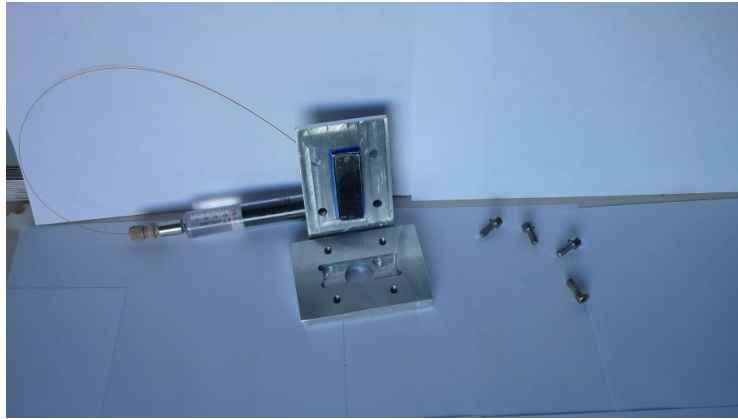
Για τη μορφοποίηση του PMMA, καθώς και άλλων πολυμερών (όπως για παράδειγμα πλεξιγκλάς), χρησιμοποιείται η τεχνική της μορφοποίησης με θέρμανση και πίεση (θερμομόρφωση, hot-embossing). Για τη μορφοποίηση με αυτήν την τεχνική, το πολυμερές τοποθετείται σε κατάλληλη πρέσα με τη βοήθεια της οποίας εφαρμόζονται 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 (Βουρδας Ν., 2007).



**Εικόνα 4.6 b** Ισχυρά υδρόφιλος χαρακτήρας μετά από 5min επεξεργασίας

## 4.2 Προετοιμασία πριν την έναρξη

Προτού ξεκινήσει το πείραμα και ληφθούν τα ζεύγη των εικόνων, είναι απαραίτητος ο εντοπισμός του μικροκαναλιού μέσω του μικροσκοπίου, καθώς επίσης και η θέση του φακού σε τέτοιο σημείο έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ικανοποιητική εικόνα του. Για την περίπτωση χρήσης του μεγάλου φακού (20X) σε συνδυασμό με τη μεγέθυνση 1,6X που προσφέρεται, ήταν απαραίτητη η χρήση ειδικού στηρίγματος του καναλιού που έφερε ειδική οπή (βλ. **Εικόνα 4.7**). Για το ‘‘ανεβοκατέβασμά’’ του φακού προσφέρεται η δυνατότητα χρήσης δύο λαβών εστίασης που φέρει το μικροσκόπιο στα πλάγια: με την μεγάλη λαβή πραγματοποιούνται μεγαλύτερες μετατοπίσεις του φακού, ενώ με την μικρή μικρότερες. Προκειμένου να έχουμε καλύτερη εποπτεία των αλλαγών που συντελούνταν κατά την κίνηση του φακού χρησιμοποιήθηκε η μικρή λαβή.



**Εικόνα 4.7 Στήριγμα για τη χρήση του φακού 20X.**

Διαπιστώθηκε ότι με δεξιόστροφη μετακίνηση της λαβής, ο φακός κατέβαινε και επομένως η παρατήρηση του καναλιού κατευθύνονταν προς τον πυθμένα του. Το αντίστροφο συνέβαινε για αριστερόστροφη κίνηση του φακού. Η εικόνα που λαμβάνουμε, μεταφέρεται από το μικροσκόπιο μέσω του Insight 3G στον υπολογιστή. Το Insight 3G φέρει τρεις διαφορετικές καρτέλες: Exposure Tree, Capture και Processing.

Η καρτέλα Exposure Tree είναι η πρώτη που επισκέπτεται ο χρήστης. Μέσω αυτής παρέχεται η δυνατότητα αποθήκευσης όλων των πειραμάτων σε ξεχωριστό directory, καθώς επίσης και η δημιουργία ξεχωριστών runs για τις διαφορετικές παραμέτρους που μπορεί να χρησιμοποιηθούν, όπως για παράδειγμα διαφορετικά βάθη μέτρησης, διαφορετικές παροχές κτλ. Η έναρξη κάθε πειράματος προϋποθέτει την σύνταξη ενός directory, το οποίο γίνεται τρέχων (current), καθώς επίσης και την σύνταξη ενός συγκεκριμένου run το οποίο πρέπει επίσης να γίνει τρέχων (current).

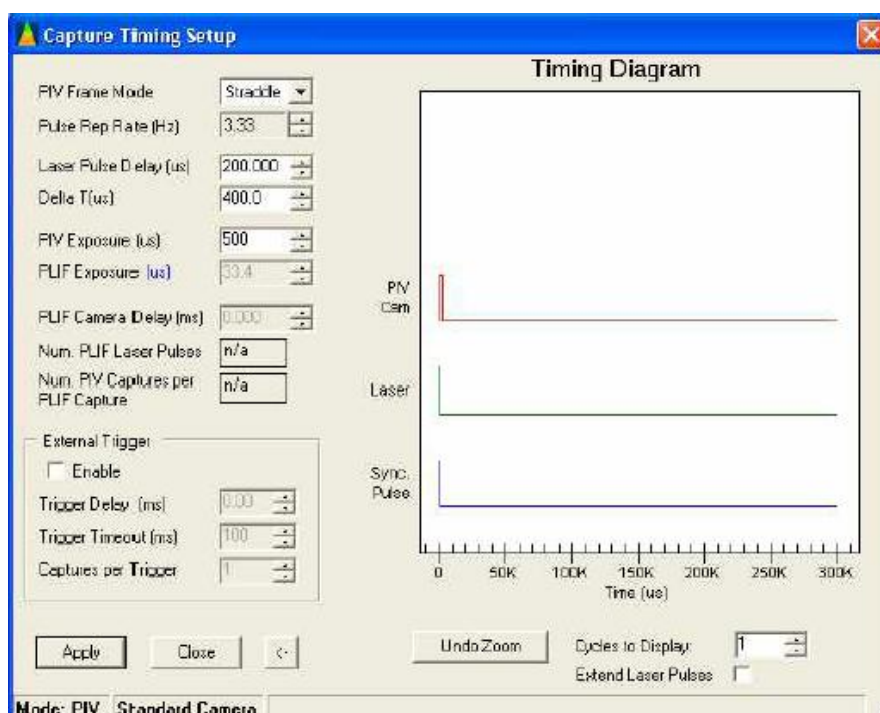
Στη συνέχεια προκειμένου να έχουμε εικόνα του μικροκαναλιού ακολουθεί η εισαγωγή στην καρτέλα Capture. Εδώ συναντώνται όλες οι παράμετροι για την λήψη των εικόνων. Στην αρχική αυτή φάση του πειράματος που βρισκόμαστε, προκειμένου να έχουμε μία γρήγορη αναπαράσταση της θέσης του καναλιού, χωρίς το laser, επιλέγουμε free-continuous. Εφόσον είμαστε ικανοποιημένοι από την εικόνα που παρουσιάζεται, μπορούμε να προχωρήσουμε στον καθορισμό των τιμών που είναι απαραίτητες για την λήψη των εικόνων.

### **4.3 Λήψη εικόνων**

Προκειμένου να προχωρήσουμε στη λήψη εικόνων (capturing), το πρώτο βήμα είναι η παύση της λειτουργίας free-continuous, καθώς διαπιστώθηκε ότι όταν επιχειρήσαμε να ξεκινήσουμε να εισάγουμε τις νέες παραμέτρους χωρίς να έχουμε σταματήσει την προηγούμενη λειτουργία, το πρόγραμμα κόλλαγε. Στη συνέχεια επιλέγουμε synchronized-continuous. Με αυτόν τον τρόπο ενεργοποιείται ο synchronizer, που συγχρονίζει το laser με την κάμερα. Ακολούθως επιλέγεται ο

αριθμός των εικόνων (number of captures), και ο αριθμός που αντιστοιχεί στην πρώτη εικόνα. Συνίσταται η λήψη μεγάλου αριθμού εικόνων, αφού έτσι το αποτέλεσμα είναι ποιοτικότερο. Επίσης ο αριθμός πρώτης εικόνας τίθεται ίσος με 1, και αυτό γιατί σε διαφορετική περίπτωση η αρίθμηση των εικόνων ξεκινάει αυτόματα με βάση τον τελευταίο αριθμό της προηγούμενης σειράς μετρήσεων.

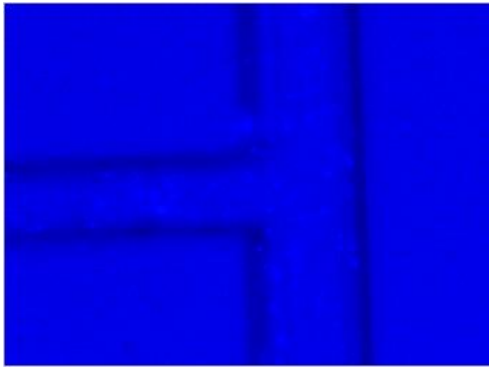
Οι επόμενες βασικές τιμές που πρέπει να προσδιοριστούν συναντώνται στο Capture Timing setup (βλ. **Εικόνα 4.8**), και είναι η συχνότητα (pulse repetition rate), και το χρονικό διάστημα παρεμβολής μεταξύ των δύο διαδοχικών παλμών του laser. Σημειώνεται ότι η συχνότητα λήψης των εικόνων δεν πρέπει να ξεπερνάει τα 5Hz, ενώ στην σωστή εκλογή του χρονικό διαστήματος  $\Delta t$ , καταλήγουμε μετά από δοκιμές στις οποίες μπορεί να φανεί πόσο γρήγορη ή αργή είναι η ροή. Ο τρόπος με τον οποίο καταλήγουμε σε ένα τέτοιο συμπέρασμα, στηρίζεται στον καθορισμό ενός άνω ορίου μετακίνησης των σωματιδίων (maximum displacement), (βλ. Παρακάτω). Μπορεί επίσης να καθοριστεί το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο ζευγαριών παλμών του laser (laser pulse delay).



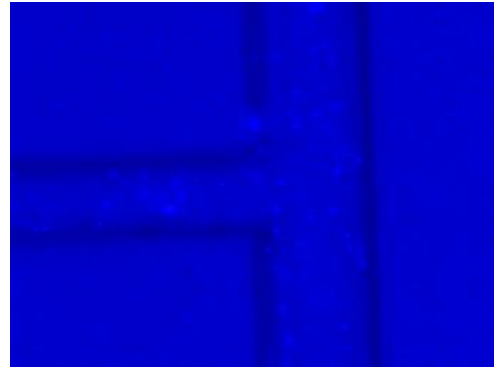
**Εικόνα 4.8 Capture Timing Setup**

Εφόσον καθοριστούν όλες αυτές οι παράμετροι ενεργοποιείται το laser (όπως περιγράφηκε προηγουμένως) και επιλέγουμε capture. Οι διπλές εικόνες που προκύπτουν (βλ. Εικόνες **4.9a**, **4.9b**), αποθηκεύονται στο Directory Raw Data, από τον οποίο τα παίρνουμε στη συνέχεια για να πραγματοποιήσουμε το processing.





Εικόνα 4.9a Χρονική στιγμή  $t$



Εικόνα 4.9b Χρονική στιγμή  $t+\Delta t$

Μία τελευταία ενέργεια που μπορούμε να πραγματοποιήσουμε αφού πάρουμε τις εικόνες, προκειμένου να βελτιώσουμε την ευκρίνεια των εικόνων, είναι η αλλαγή της αντίθεσης (contrast) μεταξύ των σωματιδίων και του καναλιού. Η επιλογή αυτή προσφέρεται από το Tools→PIV/PIV LUT Table, όπου επιλέγεται το pseudocolor, και στη συνέχεια η αντίθεση αλλάζει μετακινώντας τα βελιάκια των δύο τελευταίων στηλών, που καθορίζουν την ένταση του background και των σωματιδίων.

#### 4.4 Επεξεργασία εικόνας

Μετά την λήψη των εικόνων απαιτείται η περαιτέρω επεξεργασία τους με σκοπό την εισαγωγή των διανυσμάτων. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται μέσω των επιλογών της καρτέλας Processing του Insight 3G. Προκειμένου να εξασφαλιστεί η βέλτιστη ποιότητα των εικόνων, συντελέστηκαν δοκιμές με αλλαγή κάθε φορά των παραμέτρων. Για το σκοπό αυτό ασχοληθήκαμε με κανάλια τετραγωνικής διατομής βάθους 100μm που έφεραν διακλαδώσεις. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν είναι:

- Ensemble PIV-Classic PIV
- Grid engine, για την δημιουργία του πλέγματος
- Spot mask engine, για την δημιουργία της μάσκας
- Correlation Engine, για την συνάρτηση cross-correlation
- Peak Engine, για την εύρεση του μέγιστου της συνάρτησης cross-correlation
- Threshold values

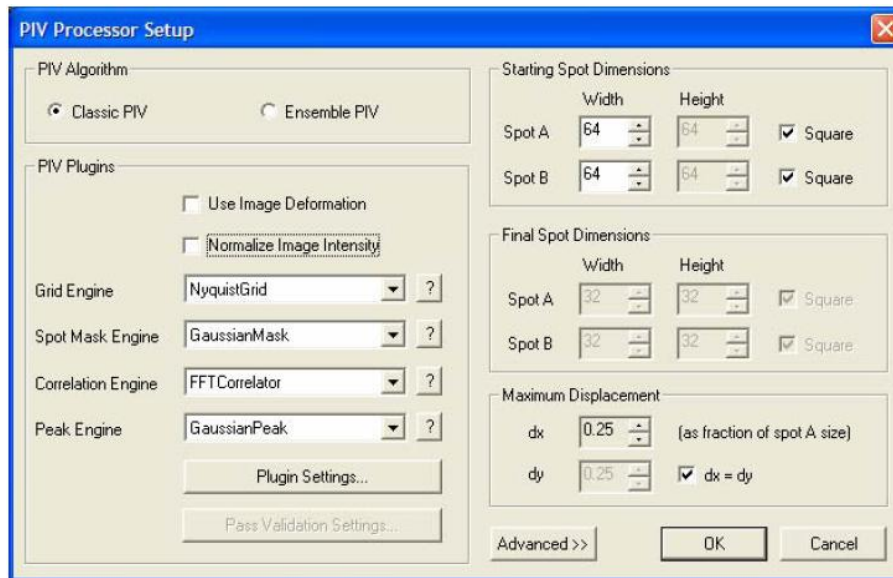
##### 4.4.1 Processing

Οι επιθυμητές παράμετροι επεξεργασίας εισάγονται μέσω της επιλογής *Create new Processor*. Ο χρήστης μπορεί είτε να χρησιμοποιήσει έναν έτοιμο processor, ο οποίος είχε συνταχθεί παλιότερα, είτε να δημιουργήσει έναν καινούργιο, οπότε είναι

απαραίτητη και η ονομασία του. Στην περίπτωση αυτή, είναι ιδιαίτερα χρηστικό ένα όνομα το οποίο σχετίζεται με την ημερομηνία που πραγματοποιήθηκε η επεξεργασία. Μετά τον ορισμό του processor, ανοίγει το σχετικό παράθυρο διαλόγου που περιλαμβάνει όλες τις παραμέτρους (βλ. **Εικόνα 4.10**) που συγκεντρώνουν το ενδιαφέρον όσον αφορά την επεξεργασία.

Ένα πρώτο στοιχείο που πρέπει να επιλεγεί είναι ο αλγόριθμος που θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των μετατοπίσεων των σωματιδίων. Οι επιλογές είναι δύο: **Classic PIV** και **Ensemble PIV**. Στο προηγούμενο κεφάλαιο περιγράφηκε η δράση ενός αλγορίθμου ensemble στην ποιότητα των αποτελεσμάτων. Ακολούθως πρέπει να επιλεγούν τα **PIV Plugins**: η μηχανή πλέγματος (grid engine), η μηχανή μάσκας (spot mask engine), η μηχανή της συνάρτησης συσχέτισης (correlation engine) και η μηχανή εύρεσης του μεγίστου της συνάρτησης που θα χρησιμοποιηθεί (peak engine). Οι τελευταίες τιμές που πρέπει να δοθούν είναι οι τιμές των spots, δηλαδή των interrogation windows, μέσω των επιλογών **Starting Spot Dimensions** και **Final Spot Dimensions**. Πιο συγκεκριμένα, με τον ορισμό των starting spot dimensions, ξεκινάει η εξέταση των περιοχών δεδομένων διαστάσεων, ενώ με τα final spot dimensions, υπάρχει η δυνατότητα αλλαγής των διαστάσεων ανάλογα με την μορφή των διανυσμάτων.

Επιπρόσθετα, αξίζει να αναφερθεί ότι πριν την εφαρμογή της συνάρτησης cross-correlation, οι εικόνες μπορούν να κανονικοποιηθούν, πράγμα που σημαίνει ότι χρησιμοποιείται η μέγιστη και η ελάχιστη ένταση τους, με επιλεγμένη την παράμετρο **Normalize Image Intensity**. Τέλος η μέγιστη επιθυμητή μετατόπιση των σωματιδίων, μπορεί να οριστεί σαν κλάσμα των διαστάσεων του αρχικού grid, μέσω επεξεργασίας της επιλογής **Maximum Displacement**. Στην επεξεργασία εικόνας που πραγματοποιήσαμε για όλες τις μετρήσεις μας, η μέγιστη μετατόπιση επιλέχθηκε ίση με το 25% (δηλαδή 0,25 maximum displacement), των διαστάσεων του grid. Η παράμετρος αυτή λειτούργησε και ως τρόπος εκλογής τους κατάλληλου χρονικού διαστήματος παρεμβολής ανάμεσα στη λήψη των δύο εικόνων. Δηλαδή για μετατοπίσεις μεγαλύτερες της προηγούμενης τιμής, επιλέγαμε μικρότερο χρονικό διάστημα  $\Delta t$ , εφόσον η ροή αποδεικνυόταν γρηγορότερη.



Εικόνα 4.10 Παράθυρο διαλόγου Processor

Το πρώτο βήμα για την έναρξη της επεξεργασίας των εικόνων είναι η διαμόρφωση της μηχανής πλέγματος (grid engine). Η συγκεκριμένη παράμετρος πραγματοποιεί την “κατάτμηση” των εισαγόμενων εικόνων σε μικρότερες γειτονιές, “spots”, από τα οποία προκύπτει και το διάνυσμα της ταχύτητας. Πρόκειται δηλαδή για τη μηχανή δημιουργίας των interrogation windows. Για τη συγκεκριμένη διαδικασία υπάρχουν οι ακόλουθες εναλλακτικές λύσεις:

- **Nyquist Grid**: είναι η κλασική μέθοδος που χρησιμοποιείται στο PIV, και χαρακτηρίζεται από την ταχύτητά της. Η διαδικασία ολοκληρώνεται σε ένα μόνο πέρασμα, και για το λόγο αυτό έχουμε καθορισμό μόνο των spot start dimensions. Αξίζει να σημειωθεί το 50% overlapping των εικόνων που συντελείται.
- **Recursive Nyquist Grid**: η παραλλαγή αυτή της προηγούμενης μεθόδου χρησιμοποιείται για την επίτευξη υψηλότερης διακριτικής ανάλυσης και ακρίβειας. Η επεξεργασία λαμβάνει χώρα σε δύο ή περισσότερα περάσματα. Κατά το πρώτο πέρασμα, υπολογίζονται τα διανύσματα σε interrogation windows, των οποίων οι διαστάσεις ορίζονται από τα spot start dimensions, με 50% overlapping. Τα αποτελέσματα της πρώτης αυτής επεξεργασίας χρησιμοποιούνται στα interrogation windows που ορίζονται από τα final spot dimensions.
- **Rectangular Grid**: η μέθοδος αυτή προσφέρει πολύ καλύτερη εποπτεία των παραμέτρων δημιουργίας του grid από ότι οι προηγούμενες δύο. Δίνεται επίσης η δυνατότητα χρήσης τιμών overlapping μεγαλύτερων του 50 ενώ η αλλαγή των spot start dimensions σε final μπορεί να γίνει κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας.
- **Deformation Grid**: χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις ροής όπου υπάρχουν αυξημένες τιμές διάτμησης, και απαιτείται μεγάλη ακρίβεια.

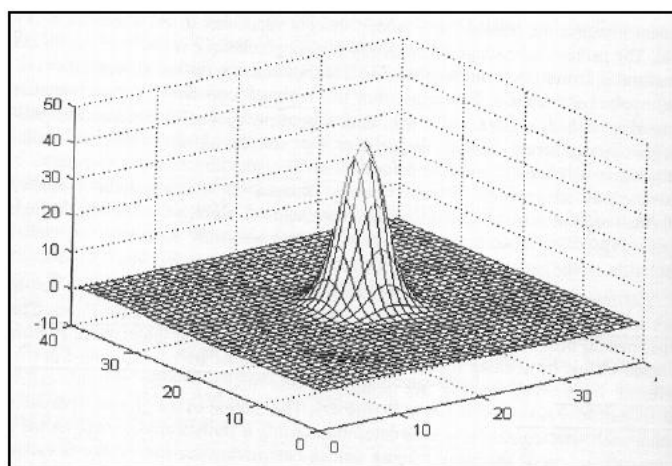
Η εφαρμογή **Spot Mask Engine** επεξεργάζεται τα interrogation windows προτού αρχίσει η επεξεργασία τους με βάση την συνάρτηση cross-correlation. Η επίδραση

αυτού του βήματος είναι ευεργετική στη διαμόρφωση της εικόνας, εφόσον αυξάνεται έτσι ο λόγος signal-to-noise (SNR). Υπάρχουν οι εξής επιλογές:

- **Gaussian Mask**: κάθε pixel στα πρώτα spots πολλαπλασιάζεται με ένα συντελεστή Gauss, με αποτέλεσμα τα pixels να προκύπτουν φωτεινά στο κέντρο και σκοτεινά στις άκρες. Μεγαλύτερη βαρύτητα δίνεται στα pixels που εντοπίζονται στο κέντρο της εικόνας, και όχι σε αυτά που βρίσκονται στις άκρες.
- **ZeroPad Mask**: η μάσκα ZeroPad υπολογίζει τη μέση τιμή της έντασης των pixels που βρίσκονται στο interrogation window που προορίζεται για επεξεργασία, και στη συνέχεια την αφαιρεί από το κάθε pixel ξεχωριστά. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας, είναι η αύξηση του SNR, που συνοδεύεται όμως από παράλληλη αύξηση του απαιτούμενου χρόνου επεξεργασίας.
- **Deformation Mask**: είναι σχεδιασμένη για να χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με το Deformation Grid.
- **No Mask**: το αρχικό interrogation window εισάγεται απευθείας στην correlation engine, χωρίς καμία επιπρόσθετη αλλαγή.

Ο υπολογισμός των μετατοπίσεων μέσω της συνάρτησης συσχέτισης cross-correlation αποτελεί το τελικό στάδιο πριν την εξαγωγή των διανυσμάτων της ταχύτητας. Η παράμετρος **Correlation Engine**, εξυπηρετεί ακριβώς αυτόν τον σκοπό, εφαρμόζει δηλαδή τον αλγόριθμο συσχέτισης, σε όλα τα pixels των interrogation windows που έχουν προκύψει. Το αποτέλεσμα αποδίδεται με τη μορφή ενός ‘‘χάρτη συσχέτισης’’ (correlation map) (βλ. **Εικόνα 4.11**).

Παρατηρώντας την εικόνα 4.11, διαπιστώνουμε την ύπαρξη μίας κορυφής (peak), που αντιστοιχεί στην μέγιστη μετατόπιση που προκύπτει από την επεξεργασία δεδομένων στοιχείων. Οι υπόλοιπες κορυφές που μπορεί να ανακύπτουν, αντιστοιχούν σε φαινόμενα θορύβου, τα οποία αντιμετωπίζονται με τεχνικές overlapping ή ensemble, όπως περιγράφηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο.



**Εικόνα 4.11 Correlation map**

Το Insight 3G διαθέτει τους ακόλουθους αλγορίθμους συσχέτισης:

- **FFT Correlation:** η συνάρτηση συσχέτισης υπολογίζεται με χρήση μετασχηματισμού Fourier. Οι διαστάσεις των interrogation windows πρέπει να είναι δυνάμεις του δύο, και ταυτόχρονα ίδιες. Στην περίπτωση που οι διαστάσεις τους τις δύο χρονικές στιγμές είναι διαφορετικές, είναι αναγκαία η χρήση της ZeroPad Mask.
- **Hart Correlation:** χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος Hart Correlation του καθηγητή D. Hart από το MIT, με βάση τον οποίο μόνο τα πιο σημαντικά pixels λαμβάνονται υπόψη για τον υπολογισμό των ταχυτήτων.
- **Direct Correlation:** η συνάρτηση συσχέτισης εξάγεται με βάση την εξής διαδικασία: αρχικά υπολογίζεται η μέση ένταση του κάθε Interrogation window και αφαιρείται από το κάθε pixel. Στη συνέχεια προστίθενται οι εντάσεις των pixels. Πρόκειται για την πιο αργή διαδικασία.

Η κορυφή του κάθε χάρτη συσχέτισης, και κατά συνέπεια η εύρεση της μέγιστης μετακίνησης των σωματιδίων μπορεί να υπολογιστεί μέσω των επόμενων τρόπων που περιλαμβάνονται στα εργαλεία της εφαρμογής **Peak Engine:**

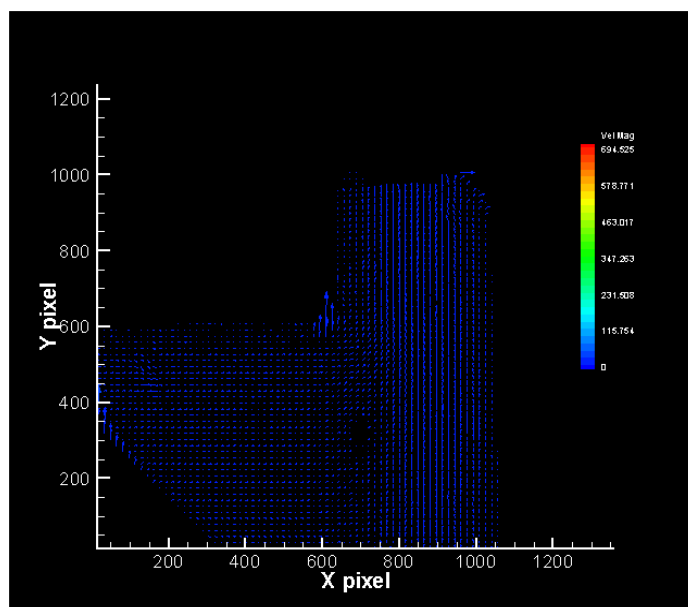
- **Gaussian Peak:** προσδιορίζει την κορυφή της συνάρτησης προσαρμόζοντας μία γκαουσιανή καμπύλη στο υψηλότερο pixel και στα 4 γειτονικά του. Ειδικότερα γίνονται δύο προσαρμογές σε 3 σημεία η καθεμία: μία κατά την διεύθυνση x με το pixel που αντιστοιχεί στην κορυφή της συνάρτησης (peak pixel) και άλλα δύο δεξιά και αριστερά του, και μία δεύτερη με το pixel κορυφής και πάλι και άλλα δύο πάνω και κάτω από αυτό. Η εξίσωση που δίνει την τοποθεσία της κορυφής για την μέθοδο αυτή είναι η : 
$$dx = x + \frac{(\log(l)) - \log(r)}{2(\log(l) + (\log(r) - 2\log(c)))} - x_0$$
, όπου  $l, r, c$ , είναι οι τιμές της έντασης που αντιστοιχούν στα pixels που βρίσκονται αριστερά και δεξιά του pixel κορυφής και στο ίδιο το pixel κορυφής αντίστοιχα,  $x$  η μετατόπιση, και  $x_0$  η θέση μηδενικής μετατόπισης. Η Gaussian peak είναι ενδεδειγμένη για τους αλγορίθμους συσχέτισης Direct Correlator και FFT Correlator

- **Bilinear Peak:** προσδιορίζει την κορυφή της συνάρτησης εφαρμόζοντας μία σειρά γραμμικών συναρτήσεων στο υψηλότερο pixel και στα τέσσερα γειτονικά του. Ομοίως με την προηγούμενη περίπτωση, πραγματοποιούνται δύο προσαρμογές ανά τρία σημεία, με την εξίσωση που δίνει τη θέση της κορυφής να είναι: 
$$dx = x + \frac{(r-l)}{2 \cdot \max(c-l, c-r)} - x_0$$
.

Μία επιπλέον παράμετρος που εξετάστηκε, είναι η κατώτατη τιμή threshold της φωτεινότητας των σωματιδίων που θέλουμε να ληφθούν υπόψη. Η επεξεργασία της παραμέτρου αυτής, γίνεται με είσοδο στο Plugin Settings, και αλλαγή της προκαθορισμένης τιμής threshold στο **MinAvgIntensity**.

Στη συνέχεια θα περιγραφούν οι δοκιμές που συντελέστηκαν με τις προαναφερθείσες παραμέτρους, καθώς επίσης και τα προφίλ που προέκυψαν.

Το πρώτο βήμα, ήταν η εξέταση των εικόνων που προκύπτουν με εφαρμογή των δύο αλγορίθμων συσχέτισης, του ensemble, και του classic. Χρησιμοποιήθηκαν ακριβώς οι ίδιες παράμετροι και τις δύο φορές, δηλαδή Nyquist grid, no mask, FFT Correlator και Gaussian Peak. Αξίζει να σημειώσουμε εδώ, ότι πέρα από αυτήν τη διαδικασία, προκειμένου να μην ληφθούν υπόψη σωματίδια εκτός της περιοχής που θέλουμε να εξετάσουμε, μέσω της εφαρμογής mask μπορούμε να καθορίσουμε τα όρια του καναλιού που μας ενδιαφέρουν, σχεδιάζοντάς τα. Σε περίπτωση που δεν επιλεγεί μάσκα η παρατήρηση του προφίλ μέσα στο κανάλι γίνεται δυσκολότερη (βλ. **Εικόνα 4.12**)



**Εικόνα 4.12** Μορφή εικόνας χωρίς μάσκα

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν δοκιμές στο σημείο του καναλιού που υπάρχει διακλάδωση, με την επιλογή των εξής παραμέτρων: Classic PIV, Rectangular grid, No Mask, FFT Correlator και Gaussian Peak, ενώ άλλαζε συνεχώς η τιμή του threshold της φωτεινότητας, και για την κάθε τιμή οι διαστάσεις των interrogation window SSD και FSD. Οι συνδυασμοί που συντελέστηκαν περιγράφονται στον ακόλουθο πίνακα (**Πίνακας 1**).

threshold	SSD	FSD	Όνομα
1	128x128	64x64	P001
	128x128	32x32	P002
5	128x128	80x80	P003
	128x128	32x32	P004
10	128x128	72x72	P005
	128x128	32x32	P006
15	128x128	72x72	P007
	128x128	32x32	P008
20	128x128	72x72	P009
	128x128	32x32	P010
30	128x128	64x64	P011
	128x128	32x32	P012
50	128x128	80x80	P013
	128x128	32x32	P014

Πίνακας 1

Η τρίτη και τελευταία σειρά δοκιμών, έγινε με διαφορετικούς συνδυασμούς Spot mask engine, Correlation Engine, Peak Engine και threshold, ενώ τα SSD και FSD διατηρήθηκαν σταθερά σε όλες τις δοκιμές (Πίνακας 2). Ενδεικτικά θα παρουσιαστούν στην επόμενη ενότητα δύο ζευγάρια εικόνων που αναδεικνύουν τις διαφορές λόγω των παραμέτρων (P001 και P011 για διαφορά από μικρή σε μεγάλη MINAVG, και P003-P004 για μείωση της ποιότητας εικόνας πέφτοντας στις διαστάσεις του grid).

Spot mask engine	Correlation Engine	Peak Engine	threshold	SSD	FSD	Όνομα
ZeroPad	FFT Correlator	Gaussian Peak	2	128x128	64x64	P015
ZeroPad	FFT Correlator	Gaussian Peak	10	128x128	64x64	P016
ZeroPad	FFT Correlator	Gaussian Peak	20	128x128	64x64	P017
ZeroPad	Direct Correlator	Gaussian Peak	10	128x128	64x64	P018
ZeroPad	Hart Correlator	Bilinear Peak	10	128x128	64x64	P019
No mask	FFT Correlator	Gaussian Peak	10	128x128	64x64	P020
Gaussian	Hart Correlator	Gaussian Peak	10	128x128	64x64	P021
Gaussian	Hart Correlator	Gaussian Peak	20	128x128	64x64	P022
Gaussian	Hart Correlator	Gaussian Peak	2	128x128	64x64	P023

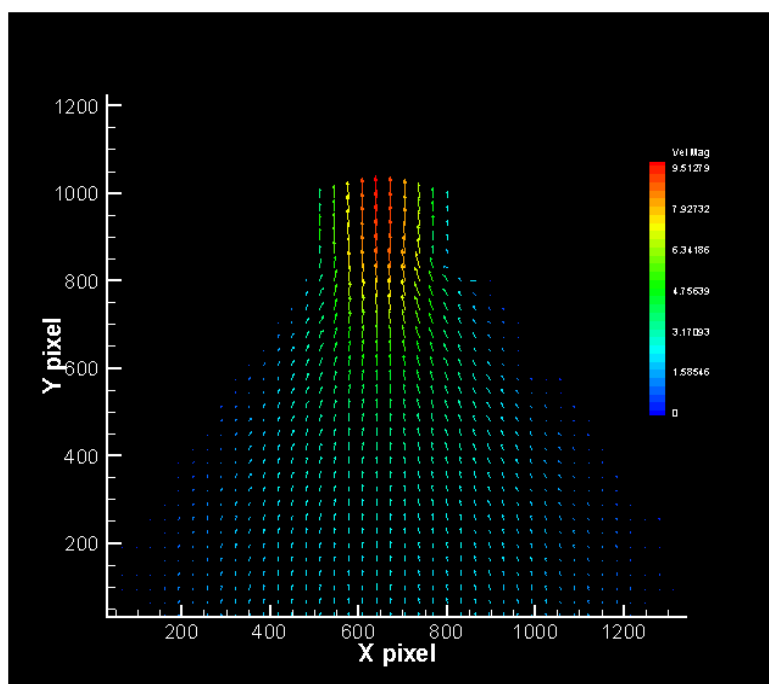
Πίνακας 2

#### 4.4.2 Techplot

Μετά την επεξεργασία των εικόνων μέσω του processing, και την τελική εισαγωγή των διανυσμάτων της ταχύτητας σε αυτές, αποθηκεύονται στο directory Analysis. Η

είσοδος στο Techplot πραγματοποιείται, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, μέσω σχετικής επιλογής του Insight 3G. Στην περίπτωση που ο αλγόριθμος συσχέτισης που έχουμε διαλέξει είναι ο κλασικός (classic), μετά την εισαγωγή των εικόνων στο Techplot πρέπει να υπολογιστεί το μέσο πεδίο (Compute Avg Field). Κατά τη δεύτερη περίπτωση που ο αλγόριθμος είναι ensemble, προκύπτει μόνο μία εικόνα από το Processing, οπότε δεν απαιτείται κάποια επιμέρους επεξεργασία των παραμέτρων.

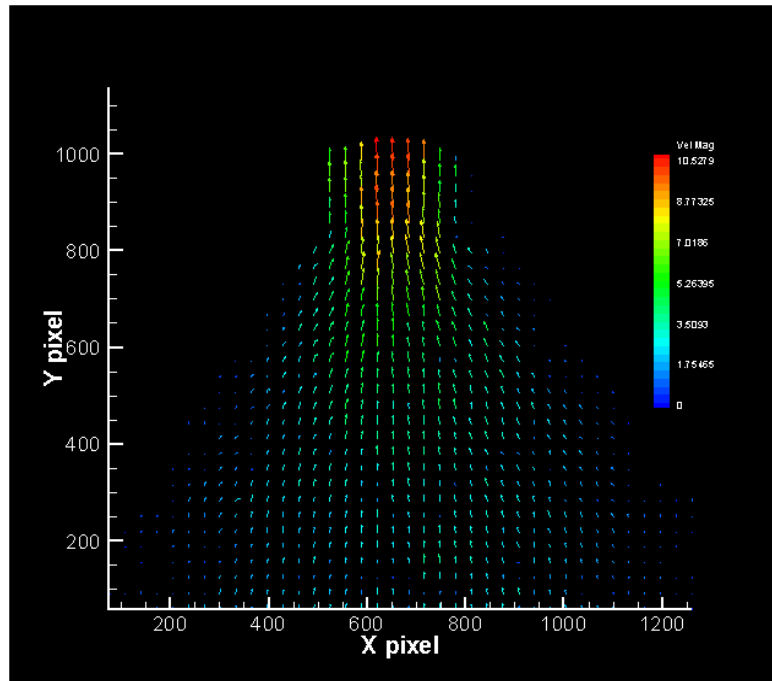
Οι πρώτες εικόνες που παρατίθενται αποδεικνύουν τις διαφορές ανάμεσα στον αλγόριθμο ensemble και classic (βλ. **Εικόνες 4.13 a, 4.13 b**).



**Εικόνα 4.13 a Ensemble PIV**

Από παρατήρηση της προηγούμενης εικόνας, προκύπτει ότι η κατανομή των διανυσμάτων είναι αρκετά ομοιόμορφη. Πιο συγκεκριμένα στο κέντρο του καναλιού, όπου αναμένεται η μέγιστη ταχύτητα της ροής, τα διανύσματα χρώματος κόκκινου είναι απολύτως κατανομημένα. Επίσης παρατηρούμε ότι στο προφίλ δεν υπάρχουν περιοχές “άδειες” δηλαδή κενές από διανύσματα.

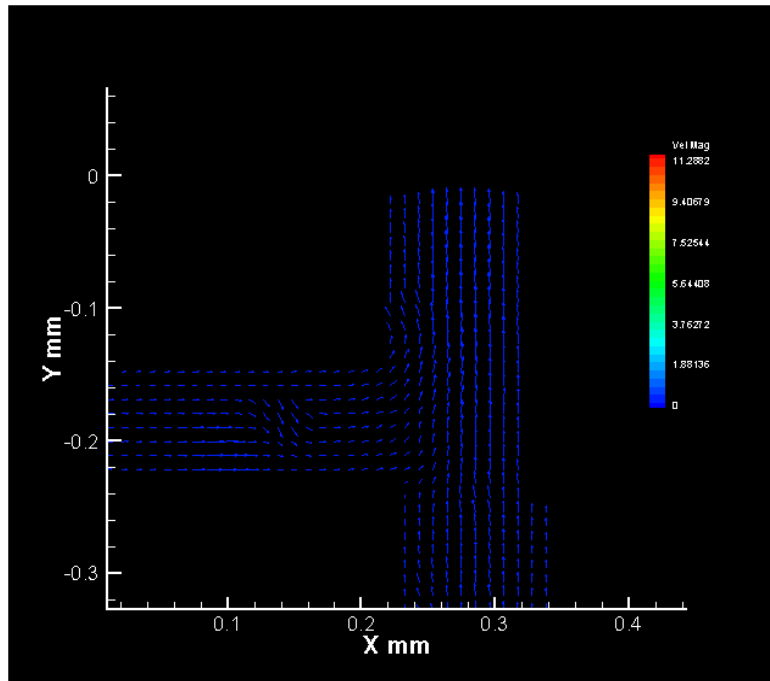




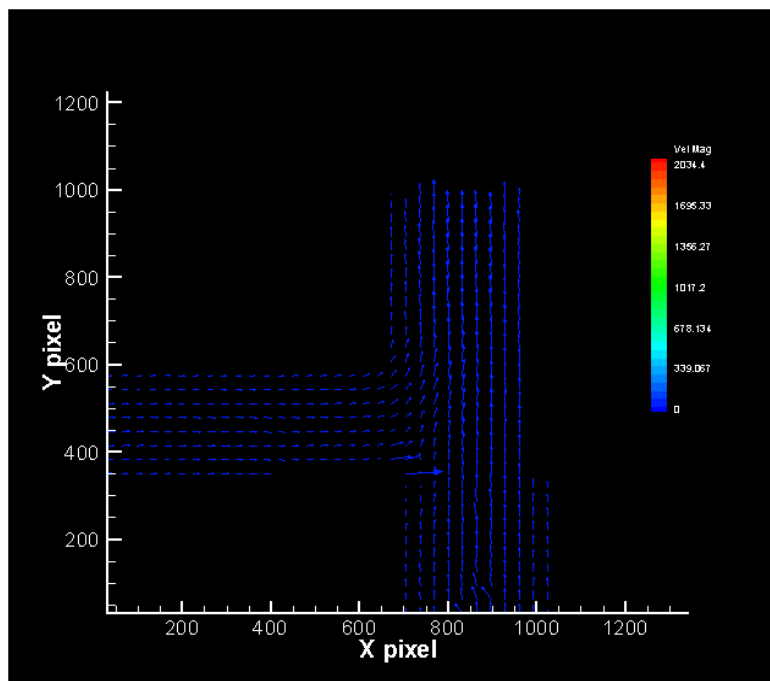
Εικόνα 4.13 b Classic PIV

Στο προφίλ που προκύπτει με εφαρμογή του αλγορίθμου classic, παρατηρούμε σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση, ότι τα διανύσματα δεν είναι ομοιόμορφα καταναμημένα, εφόσον στο κέντρο του καναλιού εκτός από κόκκινα, υπάρχουν και άλλων χρωμάτων που αντιπροσωπεύουν χαμηλότερες τάξεις ταχύτητας. Επίσης διαπιστώνουμε την ύπαρξη περιοχών που δεν έχουν επαρκή αριθμό διανυσμάτων. Ως εκ τούτου, γίνεται φανερή η υπεροχή εφαρμογής αλγορίθμων ensemble έναντι classic.

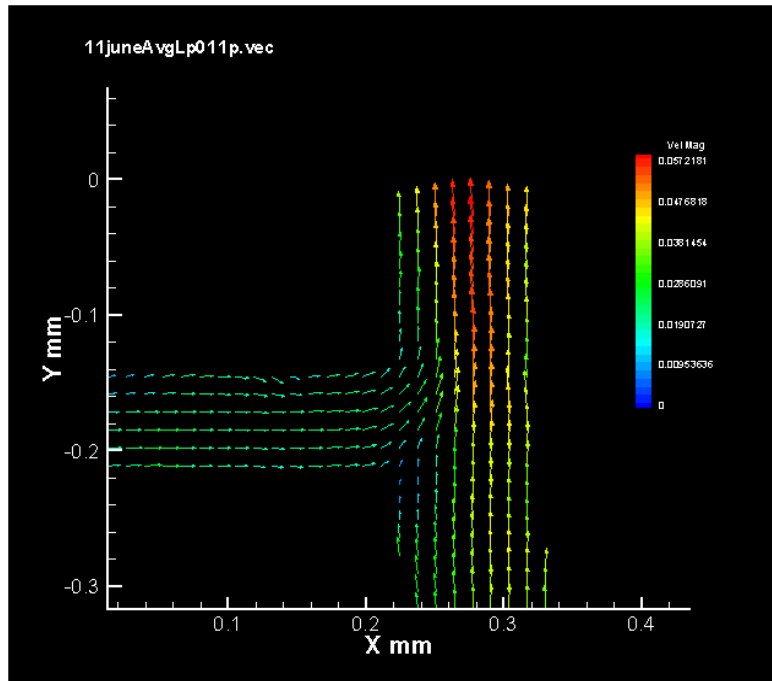
Ακολούθως παρατίθενται τα προφίλ που προκύπτουν για διαφορετικά threshold φωτεινότητας (βλ. Εικόνες 4.14 a, 4.14 b) και μειούμενες διαστάσεις grid (βλ. Εικόνες 4.15 a, 4.15 b).



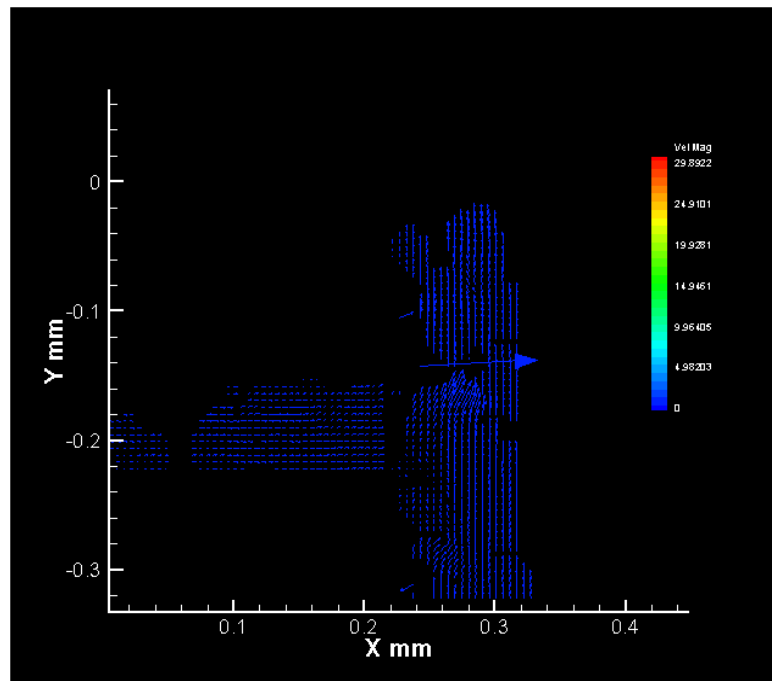
Εικόνα 4.14 a 128X128,64X64, threshold=1



Εικόνα 4.14 b 128X128, 64X64, threshold=30



Εικόνα 4.15 a 128X128, 64X64, threshold=5

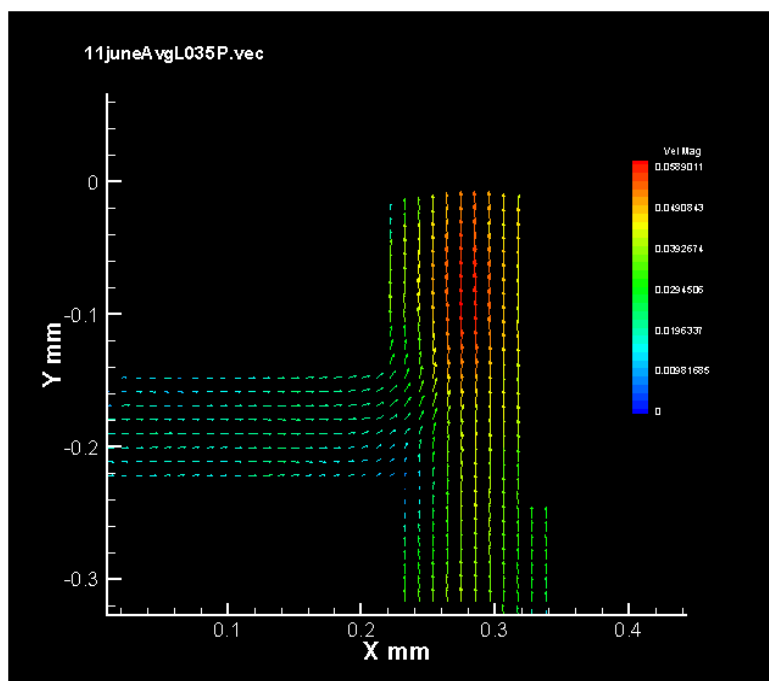


Εικόνα 4.15 b 128X128, 32X32, threshold=5

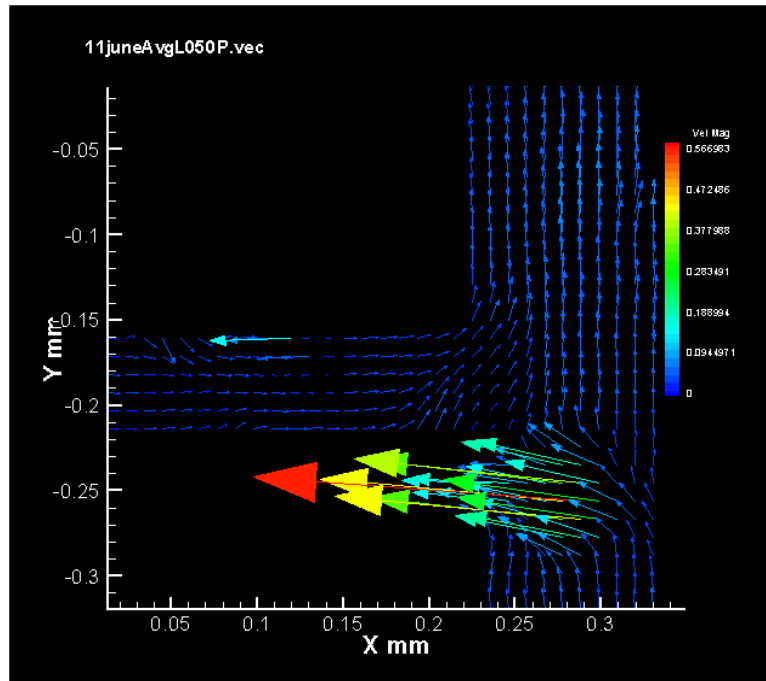
Από τις εικόνες που προέκυψαν, συμπεράναμε αρχικά την σημασία του μεγέθους των interrogation windows. Για ιδιαίτερα μικρές τιμές, και πιο συγκεκριμένα της

τάξης των 32X32, τα προφίλ δεν είναι ποιοτικά ανεξαρτήτως του threshold που χρησιμοποιείται. Ιδιαίτερα στην εικόνα 4.16 b φαίνεται ότι για αυξημένο threshold και μικρές final spot dimensions, προκύπτουν αρκετές κενές περιοχές, αφού ο αριθμός των σωματιδίων που μετέχουν σε κάθε interrogation window δεν είναι επαρκής. Επιπροσθέτως, είναι προφανής η χειροτέρευση των εικόνων για αυξανόμενο threshold, ενώ παρατηρήσαμε ότι για τιμές μεγαλύτερες του 80 δεν φαίνεται σχεδόν τίποτα.

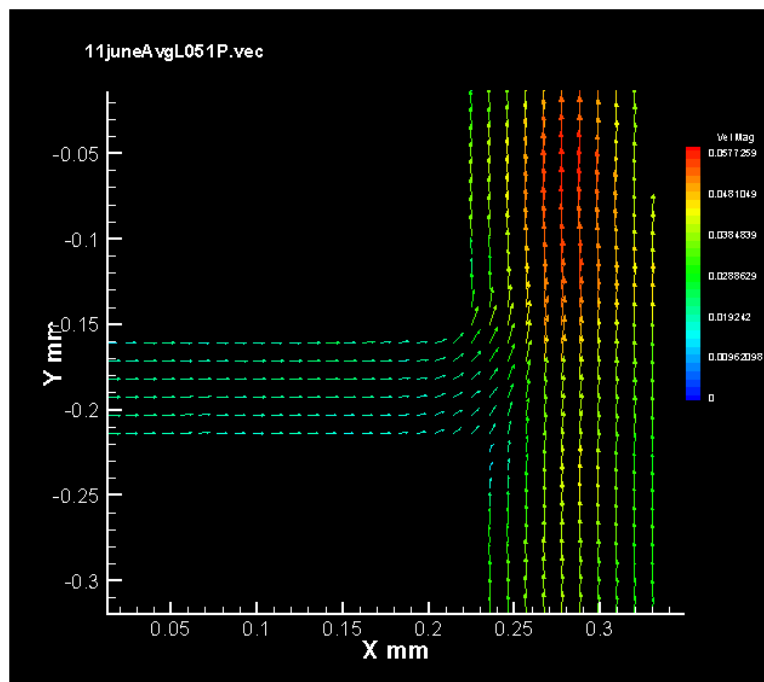
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διάφορα προφίλ που προκύπτουν από διαφόρους συνδυασμούς spot mask engine, correlation engine, peak engine (βλ. Εικόνα **4.16**, **4.17**, **4.18**, **4.19**, **4.20**). Τα προφίλ προέκυψαν από ίδιες τιμές SSD=128X128, FSD=64X64 και threshold=10.



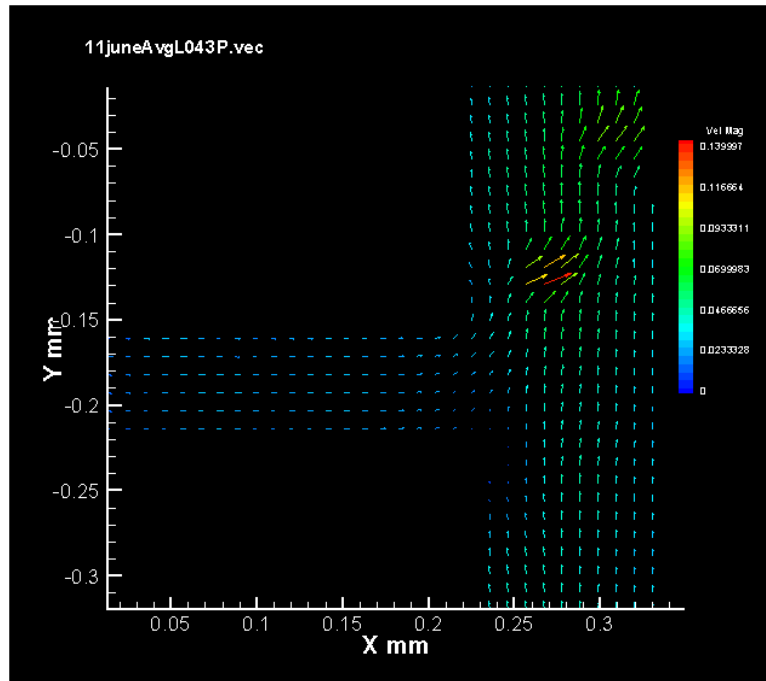
Εικόνα 4.16 ZeroPad , FFT, Gaussian Peak



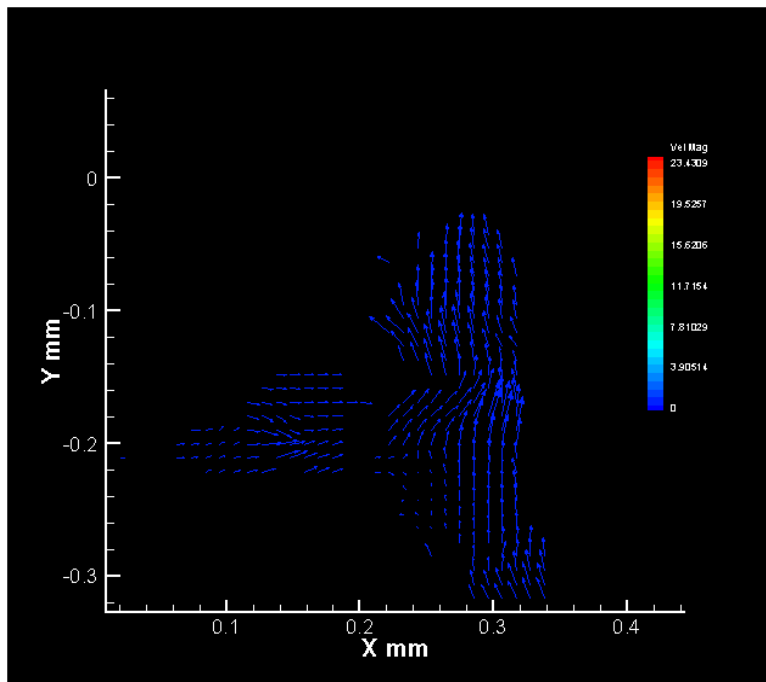
Εικόνα 4.17 ZeroPad, Direct, Gaussian



Εικόνα 4.18 ZeroPad, Hart, Bilinear



Εικόνα 4.19 NoMask, FFT, Gaussian



Εικόνα 4.20 Gaussian, Hart, Gaussian

Από τα προφίλ που προέκυψαν διαπιστώθηκε ότι με χρήση της ZeroPad έχουμε πολύ καλύτερα αποτελέσματα, σε σχέση με την εφαρμογή της Gaussian ή NoMask. Επίσης αποδείχθηκε ότι η επεξεργασία με Direct Correlation απαιτεί το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

Παρά το γεγονός ότι η ZeroPad αποδίδει καλύτερα, στα processing που πραγματοποιήσαμε χρησιμοποιήθηκε η επιλογή NoMask. Η ZeroPad, χρησιμοποιήθηκε σε περιπτώσεις που τα αποτελέσματα δεν ήταν ικανοποιητικά και για αυτό το λόγο διερευνήθηκε και η επίδραση των παραμέτρων επεξεργασίας εικόνας. Επίσης συνήθως επιλέγαμε μεγέθη interrogation spots 128X128, ενώ σε κάποιες εφαρμογές και 64X64. Οι άλλες παράμετροι ήταν Nyquist Grid, FFT Correlator και Gaussian Peak, ενώ γενικά προτιμήθηκε το ensemble PIV, με εξαίρεση περιπτώσεων που για αδιευκρίνιστους λόγους το Classic έδινε καλύτερα αποτελέσματα.

## **4.5 Υδροφίλα και Υδρόφοβα Μικροκανάλια**

### **4.5.1 Πρώτη Σειρά Πειραμάτων (Νοέμβριος 2011)**

Όπως έγινε φανερό και από τα προηγούμενα, τα πρώτα κανάλια χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά για εξοικείωση με την πειραματική διάταξη και τις παραμέτρους του Insight 3G. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν με αυτά, δεν είχαμε στη διάθεση μας τη μικροαντλία, και ως εκ τούτου δεν ήταν δυνατή η καταγραφή της διατιθέμενης κάθε φορά παροχής νερού.

Τα πρώτα κανάλια που βρέθηκαν στη διάθεσή μας ήταν τραπεζοειδούς διατομής, διαστάσεων 260 $\mu\text{m}$  και 175 $\mu\text{m}$ , και βάθους 60 $\mu\text{m}$ . Η κλίση τους ήταν (54<sup>0</sup>). Η πρώτη κίνηση ήταν ο υπολογισμός της αντιστοιχίας pixels/ $\mu\text{m}$ . Στο εργαστήριο υπήρχαν διαθέσιμα μικροκανάλια γερμανικής κατασκευής για τα οποία ήταν γνωστές με βεβαιότητα οι διαστάσεις αλλά και η αντιστοιχία 4pixels/ $\mu\text{m}$ . Προσπαθήσαμε επομένως να επιβεβαιώσουμε την αντιστοιχία αυτή.

Για τον σκοπό αυτό ήταν απαραίτητη η εξασφάλιση καλής εικόνας των τοιχωμάτων του πυθμένα και της κορυφής του καναλιού. Ανεβοκατεβάζοντας τον φακό 10X με την λαβή εστίασης, με παράλληλη παρατήρηση του καναλιού στο μικροσκόπιο η προηγούμενη απαίτηση ικανοποιήθηκε, οπότε μετά με τον συνδυασμό των επιλογών free-continuous, είχαμε την εικόνα στον υπολογιστή. Μέσω της διαδικασίας αυτής διαπιστώθηκε ότι για τα συγκεκριμένα κανάλια, η μεγάλη βάση του τραπεζίου

αποτελεί την κορυφή, εφόσον ανεβάζοντας το φακό γινόταν όλο και πιο ευδιάκριτη, ενώ η μικρή βάση αντιστοιχεί στον πυθμένα.

Οι δοκιμές αφορούσαν αρχικά τον πυθμένα του καναλιού και συνοψίζονται στον **Πίνακα 3**.

Y Pixels	X1 pixels	X2 pixels	ΔX	Αντιστοιχία
408	253	797	544	3,1 pixels/μm
372	265	807	542	3,1pixels/μm
375	259	805	546	3,12pixels/μm
318	256	801	545	3,11pixels/μm

**Πίνακας 3 Αντιστοιχία pixels/μm για τον πυθμένα**

Παρατηρήσαμε ότι ανεξαρτήτως του πόσο αλλάζουμε την εστίαση του φακού, για τον πυθμένα η αντιστοιχία είναι ίδια και ίση με 3,1pixels/μm.

Για την κορυφή του καναλιού πραγματοποιήθηκε μόνο μία δοκιμή, για Y=49, όπου προέκυψε X<sub>1</sub>=41 και X<sub>2</sub>=1062, οπότε για τη δομένη διάσταση της μεγάλης βάσης η αντιστοιχία προέκυψε ίση με 3,9 pixels/μm. Λόγω του ότι και η δοσμένη τιμή είναι πιο κοντά σε αυτήν που προέκυψε για την κορυφή, κρατήσαμε αυτήν, δηλαδή 4pixels/μm.

Τα κανάλια αυτά δεν χρησιμοποιήθηκαν για μετρήσεις, γιατί συσσωρεύτηκαν αρκετά σωματίδια, τα οποία ‘κάθισαν’ στα τοιχώματά τους, και δεν μπορέσαμε να πάρουμε αποτελέσματα. Γενικά το φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε και στην πρώτη σειρά πειραμάτων. Τα κανάλια δεν μπορούσαν να καθαριστούν, και ως αποτέλεσμα η συγκέντρωση των σωματιδίων όλο και αυξανόταν, οπότε από ένα σημείο και μετά αχρηστεύονταν. Στην προσπάθεια να καθαρίσουν τα κανάλια, προσθέσαμε ποσότητα αλατιού μέσα στο νερό, χωρίς να υπάρχει όμως αποτέλεσμα.

Στις επόμενες μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν υπέρ-υδρόφιλα και υπέρ-υδρόφοβα κανάλια, που κατασκευάστηκαν επίσης στον ΔΗΜΟΚΡΙΤΟ (βλ. **Εικόνα 4.21**). Το βάθος τους είχε δοθεί ίσο με 100μm, και οι διαστάσεις τους 233μm και 330μm. Η παροχή που χορηγήθηκε στο κανάλι μέσω της μικροαντλίας ήταν 60μl/min, ενώ για να εστιάσουμε στο κανάλι χρησιμοποιήθηκε η μικρή λαβή εστίασης, προκειμένου να έχουμε λεπτομερέστερη παρατήρηση. Ασχοληθήκαμε αρχικά με τα υπέρ-υδρόφιλα κανάλια. Παρατηρήσαμε ότι καλή εικόνα είχαμε από 0microns μέχρι 30microns (κατεβάζοντας το φακό). Οι μετρήσεις πάρθηκαν στις ακόλουθες ενδείξεις: 0microns, 80microns, 60microns, 40microns, 30microns, με τα 0microns να αντιπροσωπεύουν την κορυφή του καναλιού και τα 30microns τον πυθμένα. Για τις τιμές αυτές φτιάξαμε και τα αντίστοιχα runs στο exposure tree.



Το μέγεθος του grid τέθηκε ίσο με 128X128, ενώ το κατάλληλο χρονικό διάστημα παρεμβολής μεταξύ των παλμών του laser προσδιορίστηκε με βάση το κριτήριο της μέγιστης μετατόπισης του σωματιδίου προκειμένου να θεωρηθούν αποδεκτές οι μετρήσεις. Έτσι οι πρώτες εικόνες λήφθηκαν για  $\Delta t=200\mu\text{sec}$ . Παρατηρήσαμε ότι οι μετατοπίσεις των σωματιδίων ήταν μεγαλύτερες του 25% του grid, οπότε επιλέξαμε το χρονικό διάστημα  $100\mu\text{sec}$ . Αποδείχθηκε βάση του ίδιου κριτηρίου ότι η μετατόπιση ήταν μικρότερη του ορίου, οπότε κρατήσαμε το  $\Delta t=100\mu\text{sec}$ . Η συχνότητα του laser τέθηκε ίση με 3Hz. Ο αριθμός των εικόνων ήταν ίσος με 100.



**Εικόνα 4.21 Μικροκανάλια πρώτης σειράς πειραμάτων**

Τα υπέρ-υδρόφοβα μικροκανάλια είχαν ακριβώς τις ίδιες διαστάσεις με τα υπέρ-υδρόφιλα. Η παρατήρησή τους μέσω του μικροσκοπίου μας οδήγησε στο συμπέρασμα ότι εικόνα της κορυφής έχουμε στην ένδειξη 30microns, ενώ εικόνα του πυθμένα έχουμε στα 50microns. Ως εκ τούτου πήραμε μετρήσεις στις ακόλουθες τιμές: 30microns, 10microns, 90microns, 70microns, 50microns. Η παροχή ήταν και πάλι 60ml/min, ενώ και όλες οι υπόλοιπες παράμετροι ήταν ίδιες.

Προτού ξεκινήσει η επεξεργασία του Processing καθορίσαμε με την επιλογή της μάσκας την περιοχή ενδιαφέροντος. Στη συνέχεια στο παράθυρο διαλόγου του Processing επιλέξαμε Nyquist Grid, FFT Correlation, Gaussian Peak και Classic PIV. Ο λόγος που επιλέξαμε το Classic PIV, ήταν η αδυναμία του ensemble να αποδώσει ποιοτικά προφίλ. Τα προφίλ που προέκυψαν μετά από επεξεργασία των εικόνων με τα διανύσματα στο Techplot, καθώς επίσης και από το Graph φαίνονται στο επόμενο κεφάλαιο (βλ. 5.1).

#### **4.5.2 Δεύτερη σειρά πειραμάτων (Ιανουάριος 2012)**

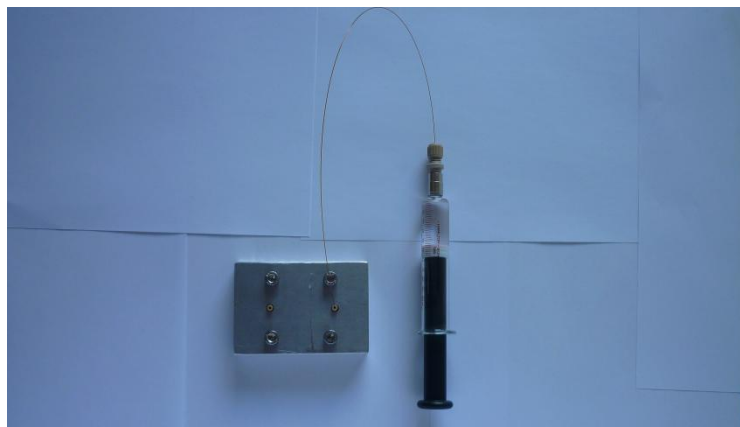
Το κανάλι που χρησιμοποιήθηκε ήταν υδροφίλο διαστάσεων 233 $\mu\text{m}$  και 330 $\mu\text{m}$ , και βάθους 100 $\mu\text{m}$ , ένα στοιχείο το οποίο διαπιστώθηκε και από την κατακόρυφη μετακίνηση του φακού. Πάνω στην ίδια πλακέτα είχαν χαραχτεί και άλλα μικροκανάλια εκτός από αυτό με το οποίο ασχοληθήκαμε (βλ. **Εικόνα 4.22**). Ο λόγος για τον οποίο δεν τα μελετήσαμε είναι υπόδειξη από το ΔΗΜΟΚΡΙΤΟ ότι δεν είχαν βγει καλά. Για την παρατήρησή του καναλιού χρησιμοποιήθηκε ο φακός 20X, με παράλληλη εκμετάλλευση και της δυνατότητας επιπλέον μεγέθυνσης 1.6, οπότε η συνολική μεγέθυνση ήταν 32X. Για το σκοπό αυτό το κανάλι τοποθετήθηκε σε ειδική διαμόρφωση, που έφερε οπή κατάλληλη για την αποτελεσματική παρατήρησή του με τον μεγάλο φακό. Η σύνδεση της διαμόρφωσης με τη σύριγγα της μικροαντλίας φαίνεται στην **εικόνα 4.23**.

Κατά την παρατήρηση του καναλιού, εκτός από την διαπίστωση της τάξης μεγέθους του βάθους του, παρατηρήσαμε και τα εξής: κατεβάζοντας το φακό προς τα κάτω, δηλαδή πλησιάζοντας τον πυθμένα εμφανίστηκαν κάποια στίγματα. Τα στίγματα αυτά οφείλονται στην ύπαρξη ενός υλικού σαν ζελοτέιπ με το οποίο σφραγίζονται τα κανάλια, και είναι το πρώτο υλικό το οποίο βλέπει το φως. Αντιθέτως η επιφάνεια των καναλιών φέρει μόνο την επένδυση, που προσδίδει και τον υδροφίλο χαρακτήρα, και όχι το υλικό σφράγισης. Επομένως η γεωμετρία του καναλιού ξεκινάει πάνω από αυτά τα στίγματα, με καλή ποιότητα εικόνας να αποκτάται στα 20  $\mu\text{m}$  από την ένδειξη της λαβής εστίασης όπου αυτά εντοπίζονται.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε βάθος 20 $\mu\text{m}$  πάνω από τον πυθμένα, στις ακόλουθες παροχές: 400 $\mu\text{l}/\text{min}$ , 600 $\mu\text{l}/\text{min}$ , 800 $\mu\text{l}/\text{min}$ , 200 $\mu\text{l}/\text{min}$  (δύο φορές με αυτήν την παροχή), 1000 $\mu\text{l}/\text{min}$ , 160 $\mu\text{l}/\text{min}$ , 120 $\mu\text{l}/\text{min}$  και 80 $\mu\text{l}/\text{min}$ . Το χρονικό διάστημα παρεμβολής που χρησιμοποιήθηκε ήταν  $\Delta t=50\mu\text{sec}$ , και ο αριθμός των εικόνων ίσος με 100. Πριν την έναρξη του Processing χρησιμοποιήθηκε η επιλογή της μάσκας για τον καθορισμό της περιοχής ενδιαφέροντος, ενώ για το Processing χρησιμοποιήθηκε στην πλειοψηφία των εικόνων ensemble PIV, Nyquist Grid, No Mask, FFT Correlator και Gaussian Peak. Μόνο στην επεξεργασία των 5 $\mu\text{l}/\text{min}$  έγινε επεξεργασία και με ZeroPad Mask, λόγω του ότι η ποιότητα των προφίλ ήταν ιδιαίτερα χαμηλή, οπότε ερευνήθηκε και η περίπτωση της επίδρασης των παραμέτρων επεξεργασίας εικόνας στα αποτελέσματα (βλ. 5.2).



**Εικόνα 4.22 Υδρόφιλα μικροκανάλια**



**Εικόνα 4.23 Σύνδεση διαμόρφωσης με τη σύριγγα της μικροαντλίας**

### **4.5.3 Τρίτη σειρά πειραμάτων (Φεβρουάριος 2012)**

Χρησιμοποιήθηκαν υδρόφοβα και υδρόφιλα μικροκανάλια, τα οποία εξετάστηκαν σε διαφορετικές παροχές και διαφορετικά χρονικά διαστήματα. Ο αριθμός των εικόνων που λάβαμε ήταν 200 σε κάθε περίπτωση. Το βάθος του πεδίου στο οποίο εστίασαμε ήταν 20 $\mu\text{m}$  πάνω από τον πυθμένα, όπως και προηγουμένως, προκειμένου να απομακρυνθούμε από τα στίγματα του πυθμένα. Για την εξαγωγή των διανυσμάτων χρησιμοποιήσαμε τον αλγόριθμο ensemble, και τα προφίλ που προέκυψαν φαίνονται στο κεφάλαιο 5.3

*Αναφορές*

Βουρδας Ν., “ ΜΙΚΡΟ-ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΓΙΑ ΧΗΜΙΚΗ ΚΑΙ ΒΙΟΛΟΓΙΚΗ ΜΙΚΡΟ-ΑΝΑΛΥΣΗ: ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΜΕ ΠΛΑΣΜΑ ΑΕΡΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΛΕΚΤΙΚΗ ΕΓΧΑΡΑΞΗ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ ΑΥΤΩΝ”, Διδακτορική Διατριβή (2007)

Invitrogen Detection Technologies ([www.invitrogen.com](http://www.invitrogen.com))

Insight 3G User’s Guide

Operator’s manual Solo PIV Nd: YAG Laser

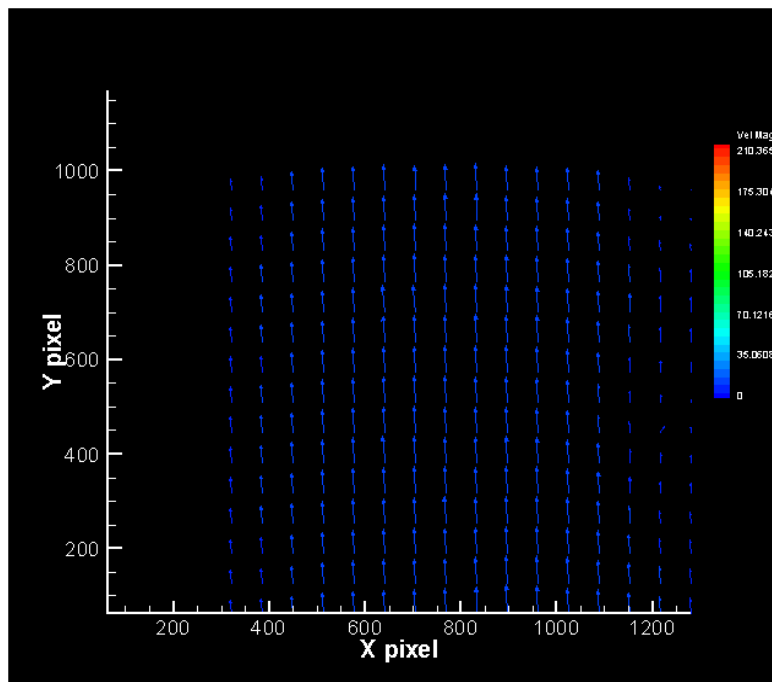
Olympus America ([www.olympusamerica.com](http://www.olympusamerica.com))

# **Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>**

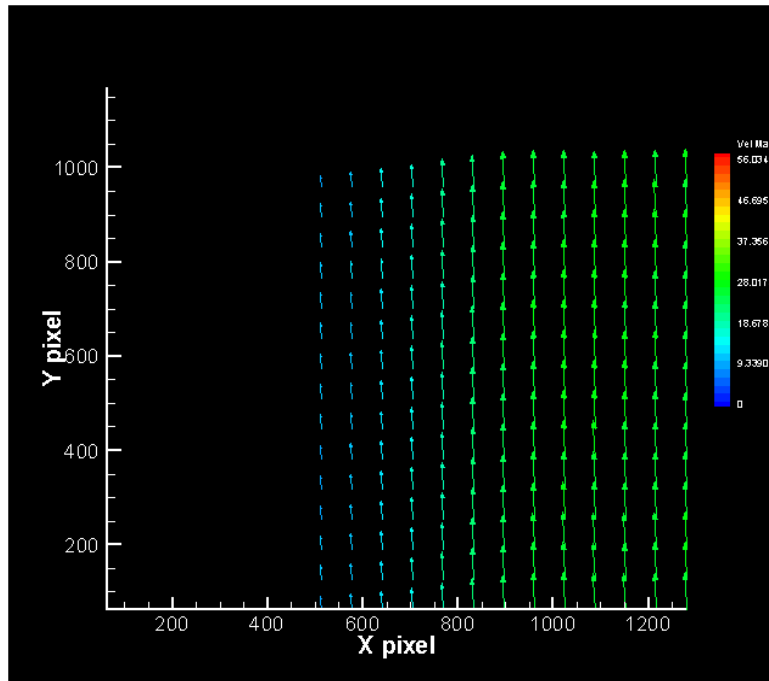
## **Αποτελέσματα και Σχολιασμός**

### 5.1 Υπέρ-υδρόφιλα, υπέρ-υδρόφοβα μικροκανάλια

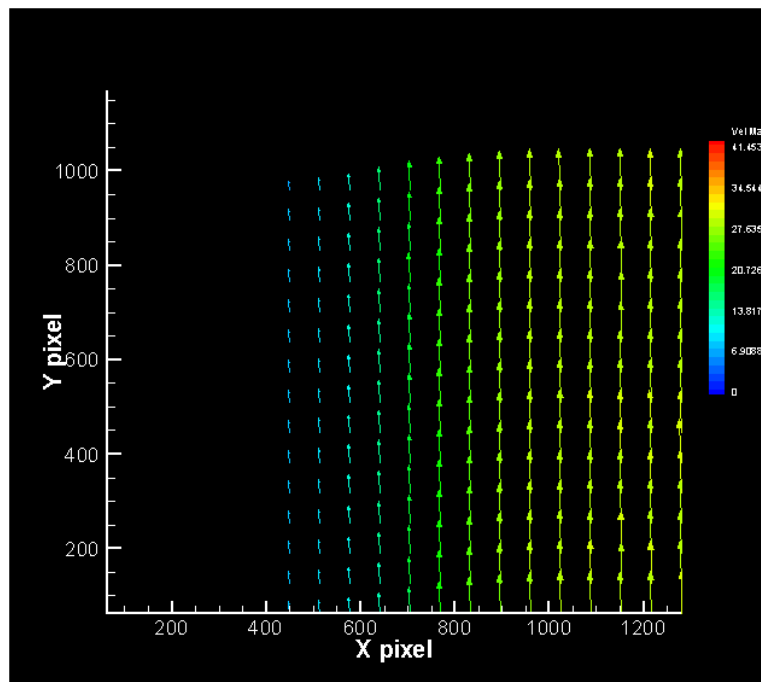
Η πρώτη σειρά πειραμάτων αναφέρεται στα υπέρ-υδρόφιλα και τα υπέρ-υδρόφοβα κανάλια βάθους 100μm, που εξετάστηκαν κατά την περίοδο του Νοεμβρίου. Τα προφίλ που προέκυψαν από το Techplot για το εκάστοτε βάθος του καναλιού στο οποίο λήφθηκαν μετρήσεις φαίνονται ακολούθως, πρώτα για τα υπέρ-υδρόφιλα και στη συνέχεια για τα υπέρ-υδρόφοβα.



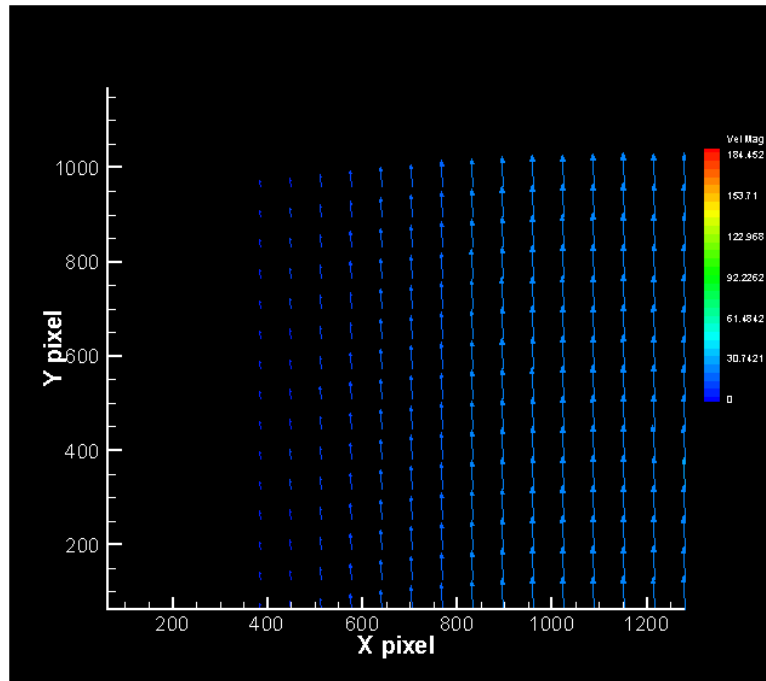
Εικόνα 5.1 super-hydrophilic,0microns



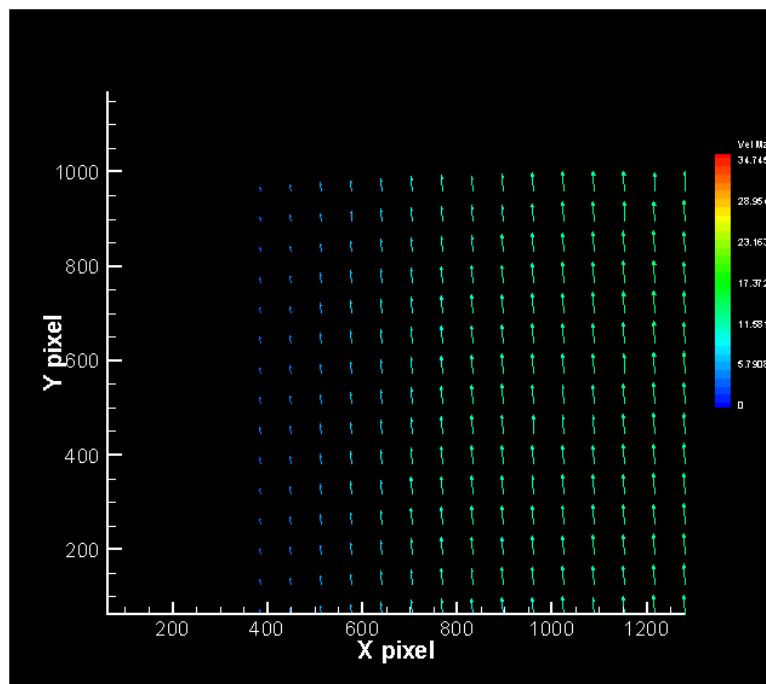
Εικόνα 5.2 super-hydrophilic 80microns



Εικόνα 5.3 super-hydrophilic 60microns



Εικόνα 5.4 super-hydrophilic 40microns



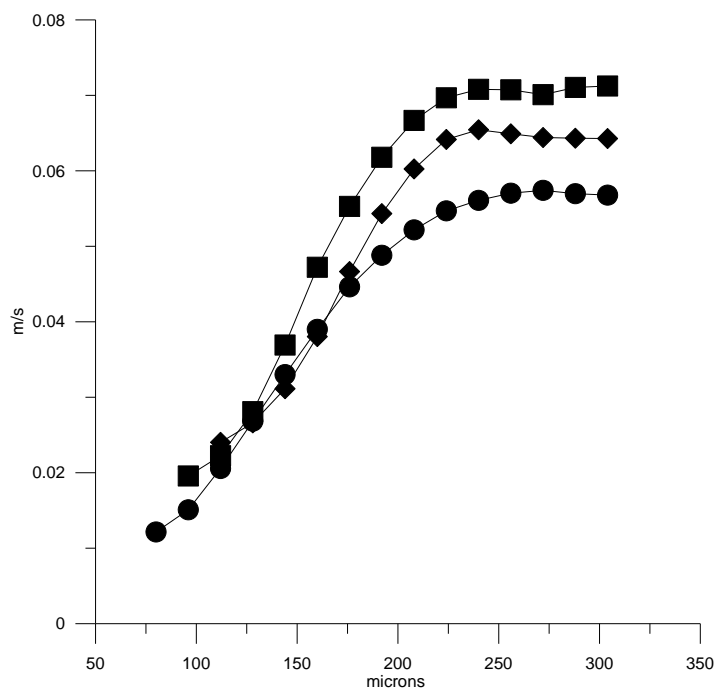
Εικόνα 5.5 super-hydrophilic 30microns

Το Techplot δίνει επίσης μία τάξη μεγέθους των ταχυτήτων που προκύπτουν, αναπαριστώντας τα διανύσματα της ταχύτητας με διαφορετικό χρώμα. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι διαβαθμίσεις των μεγεθών είναι διαφορετικές για κάθε εικόνα. Για την κάθε θέση 0microns, 80microns, 60microns, 40microns και 30microns



προκύπτουν προσεγγιστικά οι τιμές: ~6, 28,0173 , 30,39892 , 18,44526 και 12,73988 αντίστοιχα. Πράγματι δηλαδή διαπιστώνουμε μία αύξηση της τάξης ταχύτητας από την επιφάνεια προς το μέσον του καναλιού, και στη συνέχεια μία πτωτική τάση μέχρι τον πυθμένα όπου έχουμε το υλικό σφράγισης του καναλιού.

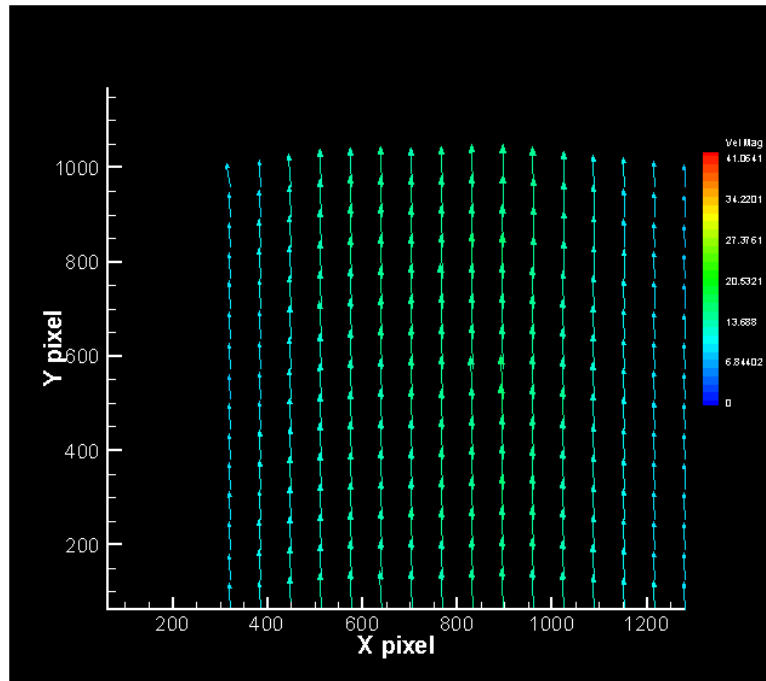
Στη συνέχεια από το Graph βγάλαμε τα ακόλουθα προφίλ για τα ακόλουθα βάθη μέτρησης: 60microns, 80microns και 40microns (βλ. **Εικόνα 5.6**).



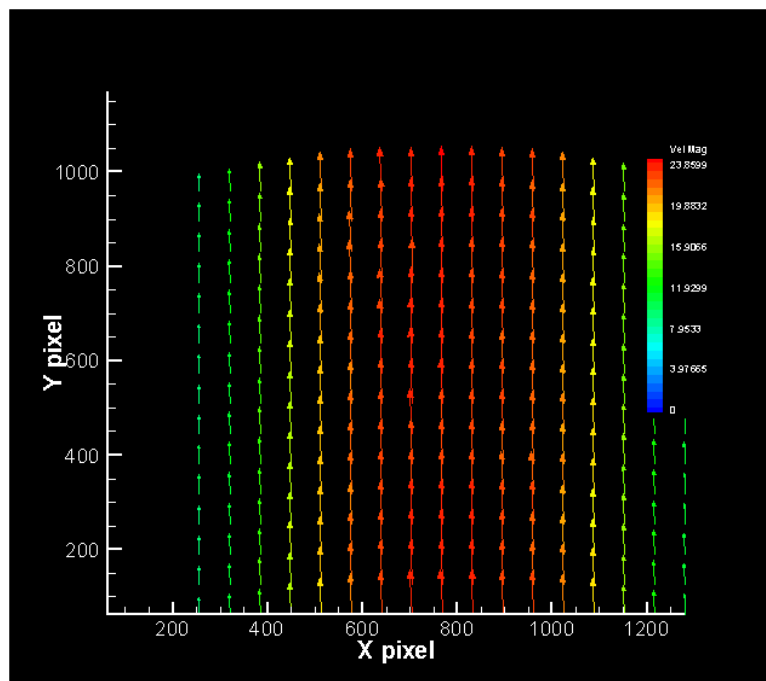
**Εικόνα 5. 6 Υπέρ-Υδρόφιλα: 60microns, 40microns, 80microns**

Από την εικόνα 5.6 παρατηρούμε την τάση των υδρόφιλων καναλιών να σχηματίζουν ένα επίπεδο προφίλ (flat), ενώ η ταχύτητα δεν τείνει στο μηδέν καθώς πλησιάζει τα τοιχώματα όπως θα ήταν αναμενόμενο. Επίσης η μέγιστη ταχύτητα που σημειώνεται στο κανάλι ακριβώς στο μέσον είναι της τάξης των 0,07m/sec, ενώ η μέση ταχύτητα της ροής προκύπτει από την διαίρεση της παροχής με τη διατομή και είναι ίση με 0,0992m/sec.

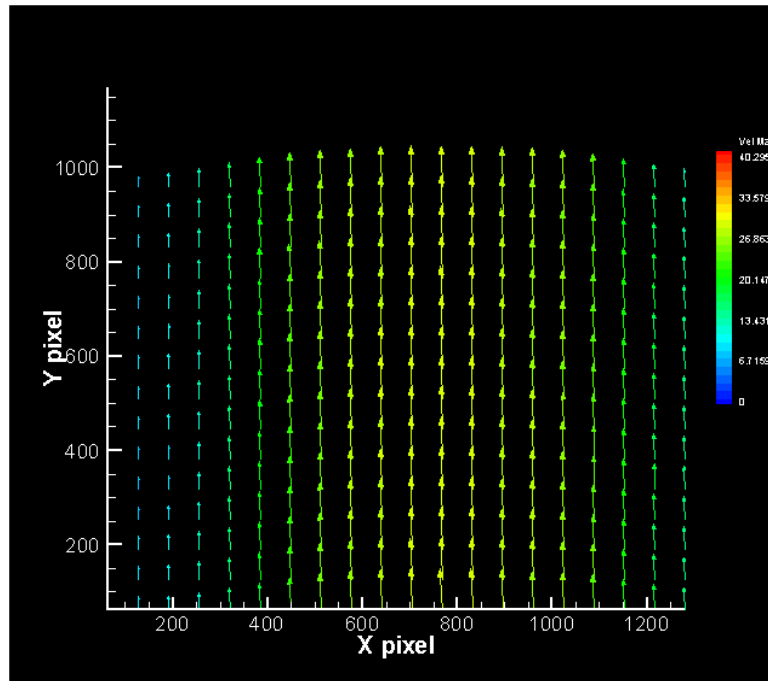
Στη συνέχεια παρατίθενται τα προφίλ για τη υπέρ-υδρόφοβα μικροκανάλια.



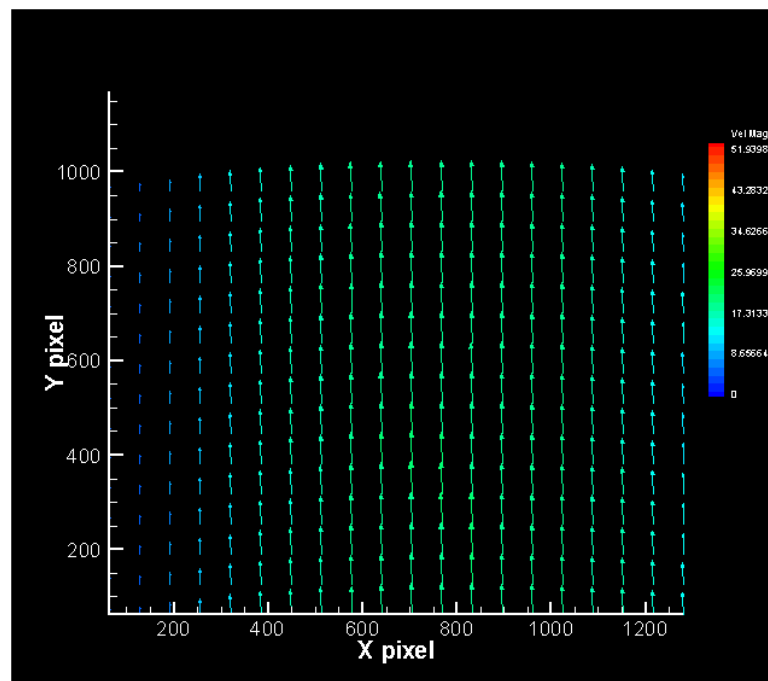
Εικόνα 5.7 super-hydrophobic 30microns



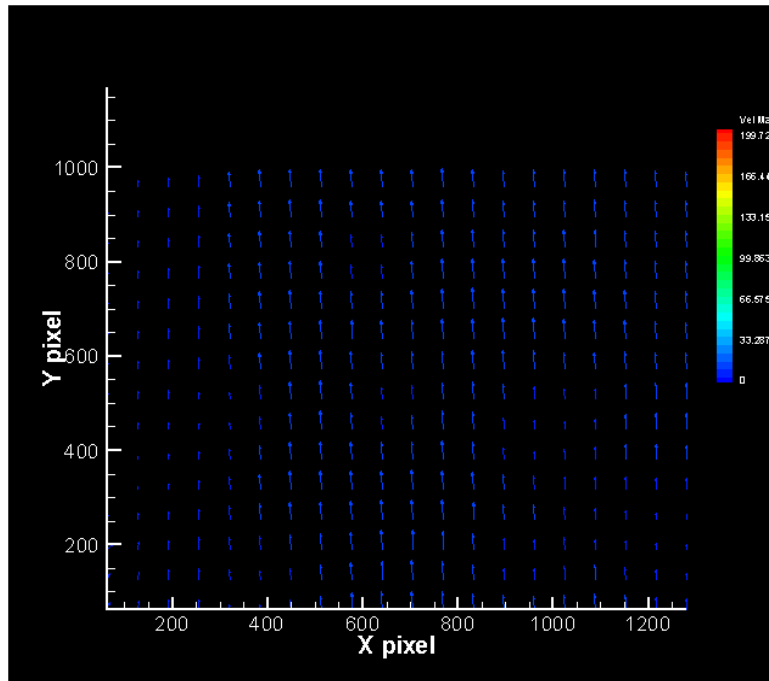
Εικόνα 5.8 super-hydrophobic 10microns



Εικόνα 5.9 super-hydrophobic 90microns



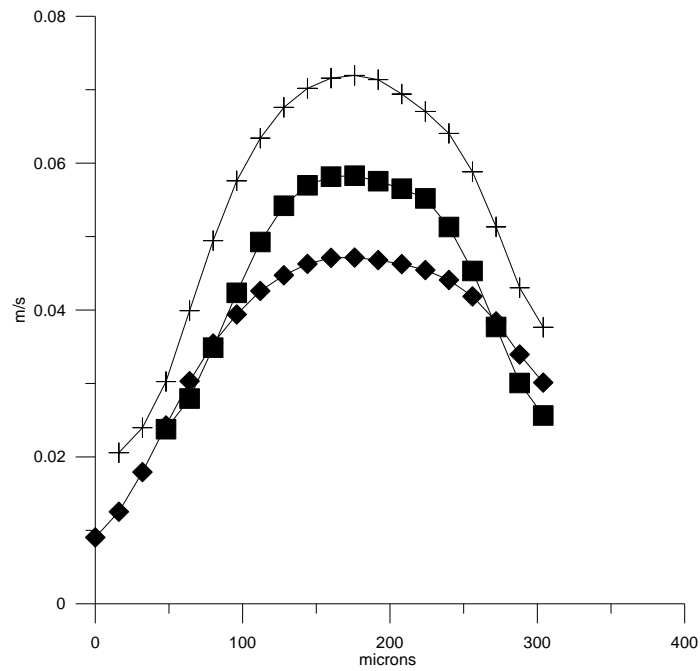
Εικόνα 5.10 super-hydrophobic 70microns



**Εικόνα 5.11 super-hydrophobic 50microns**

Η τάξη μεγέθους της μέγιστης ταχύτητας για κάθε ένα από τα μετρούμενα βάθη: 30microns, 10microns, 90microns, 70microns, 50microns, η σύμφωνα με τις ενδείξεις του είναι 16,425 , 23,8599 , 26,5426 , 20,7759, και 18,07274 αντίστοιχα. Δηλαδή πράγματι από την επιφάνεια μέχρι το μέσο του καναλιού έχουμε μία αύξηση του μεγέθους της ταχύτητας, μέχρι το μέσον όπου και παρουσιάζει το μέγιστο, ενώ από το μέσον και μετά η τάση είναι πτωτική μέχρι και τον πυθμένα, χωρίς όμως τείνει στο μηδέν, όπως είναι αναμενόμενα για τα υπέρ-υδρόφοβα.

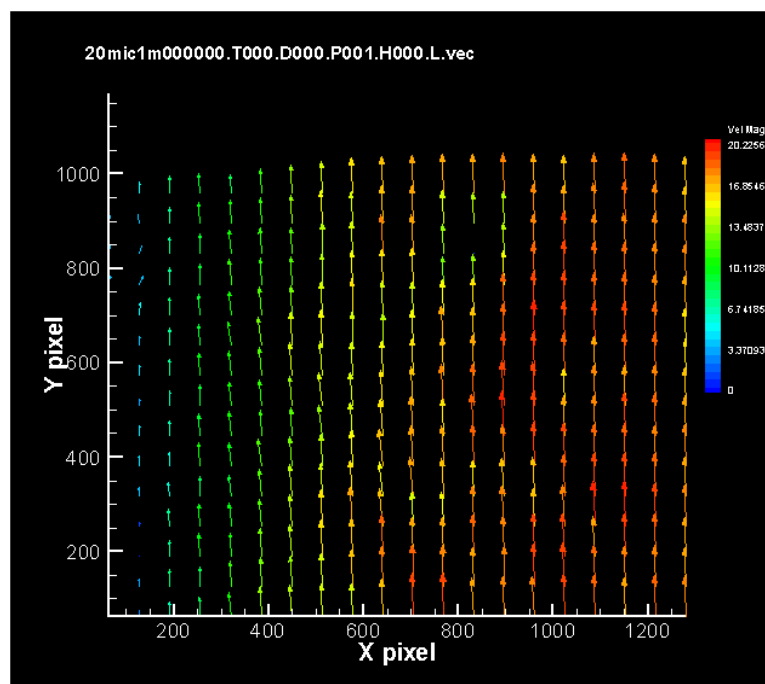
Από εισαγωγή των δεδομένων στο Graph προκύπτουν τα ακόλουθα προφίλ για τα βάθη μέτρησης 10microns, 90microns, 60microns (**Εικόνα 5.12**). Διαπιστώνεται μία παραβολική μορφή του προφίλ της ταχύτητας, αντίθετο με την αναμενόμενη επίπεδη εικόνα που θα έπρεπε να παρουσιάζεται. Επίσης η μέγιστη ταχύτητα στο μέσον του μικροκαναλιού είναι ίση με 0,07m/sec, όπως και προηγουμένως για τα υπέρ-υδρόφιλα. Η παρατήρηση αυτή αποτελεί ένα ακόμα ερωτηματικό, εφόσον στα υπέρ-υδρόφιλα η μέγιστη ταχύτητα θα έπρεπε να είναι μεγαλύτερη από ότι η αντίστοιχη στα υπέρ-υδρόφοβα. Αυτό μπορεί να γίνει εύκολα κατανοητό, αν αναλογιστεί κανείς το γεγονός ότι στα υπέρ-υδρόφοβα έχουμε πεπερασμένη ταχύτητα στα τοιχώματα, οπότε εφόσον η παροχή που εξετάζουμε είναι και στα δύο μικροκάναλια ίδια, όπως επίσης και οι διαστάσεις τους, θα έπρεπε το υπέρ-υδρόφοβο να ‘‘συνεισφέρει’’ λιγότερο ως προς τη μέγιστη ταχύτητα.



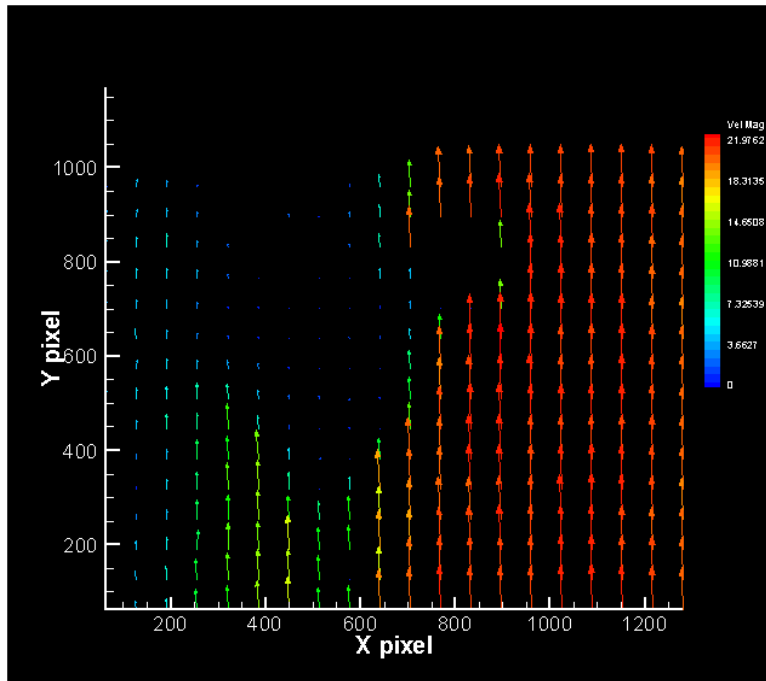
Εικόνα 5.12 super-hydrophobic 90microns, 70microns, 10microns

## 5.2 Υδρόφιλο μικροκανάλι

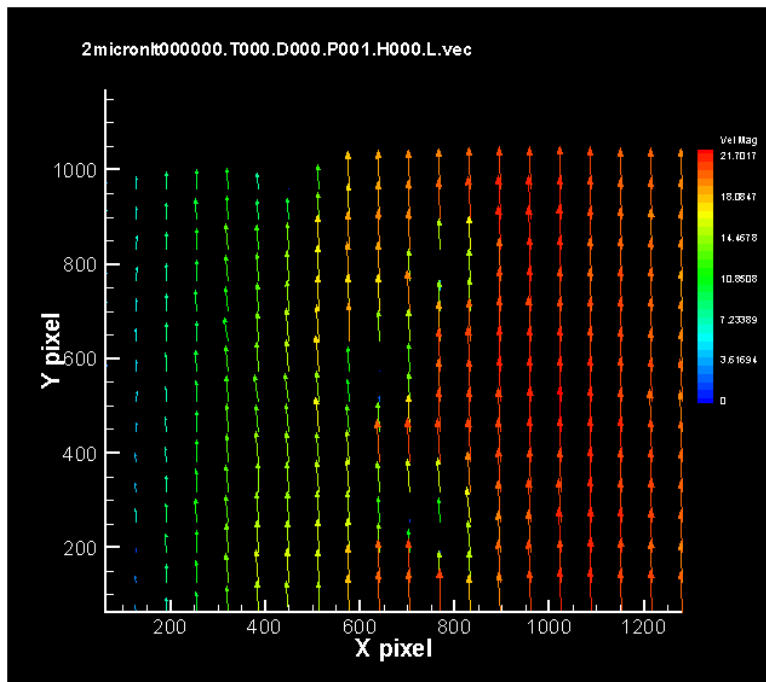
Τα προφίλ που προέκυψαν από το Techplot για τις διάφορες παροχές που παρήχθησαν στο υδρόφιλο μικροκανάλι φαίνονται ακολούθως.



Εικόνα 5.13 hydrophilic 200μl-πρώτη δοκιμή

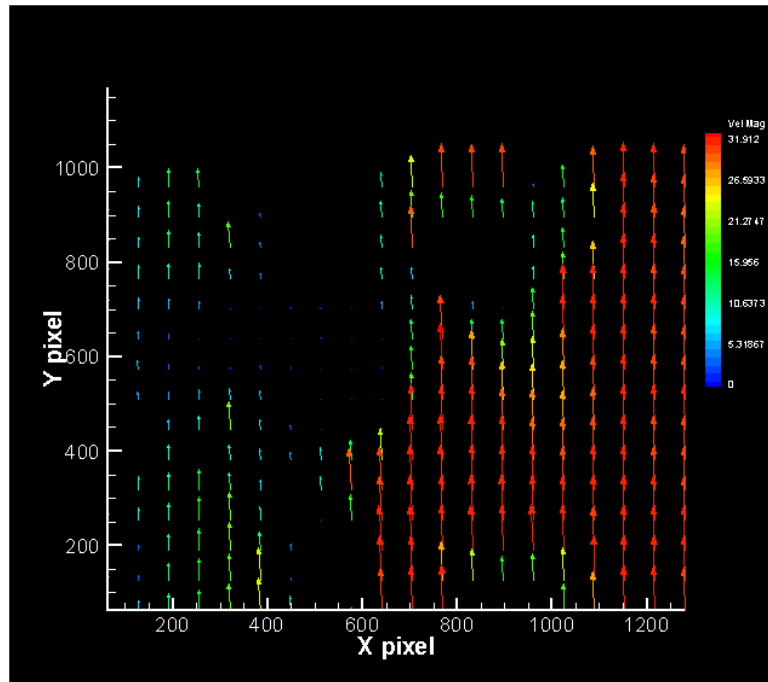


Εικόνα 5.13 200μl/min-δεύτερη δοκιμή

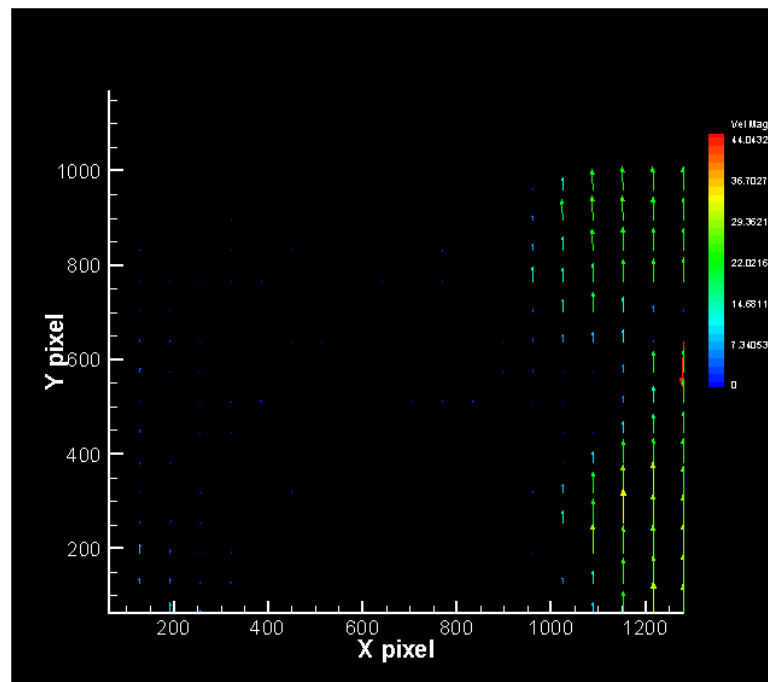


Εικόνα 5.14 400μl/min

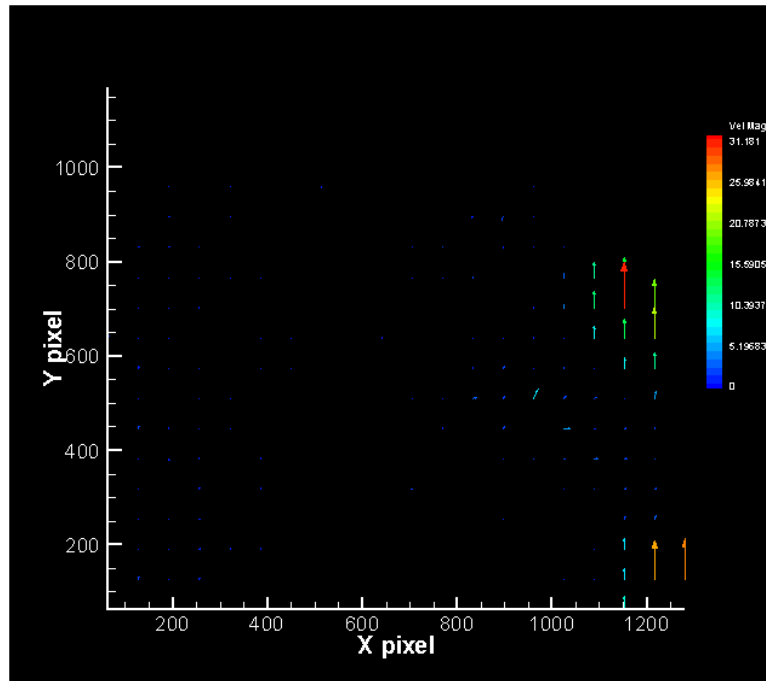
:



Εικόνα 5.15 600μl/min



Εικόνα 5.16 800μl/min



Εικόνα 5.17 1000μl/min

Από την παρατήρηση των εικόνων διαπιστώθηκε η μεγάλη επίδραση του χρόνου στα αποτελέσματα. Το πρώτο βασικό στοιχείο είναι η διαφορά ανάμεσα στα προφίλ για την χορήγηση της ίδιας παροχής 200μl/min σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές. Πιο συγκεκριμένα η δεύτερη δοκιμή πραγματοποιήθηκε αργότερα (μετά τα 400μl/min). Βλέπουμε επομένως ότι με το πέρασ της ώρας τα προφίλ προκύπτουν χειρότερα ακόμα και για μετρήσεις με τις ίδιες ακριβώς παραμέτρους, και με παράλληλη χρήση του ensemble PIV που δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα. Ο λόγος για τον οποίο λαμβάνει χώρα αυτή η φθίνουσα πορεία της ποιότητας, είναι πιθανόν η αλλοίωση των ιδιοτήτων του καναλιού με το χρόνο, καθώς επίσης και η συσσώρευση όλων και περισσότερων σωματιδίων με αποτέλεσμα να μην μπορούν να μετατοπιστούν.

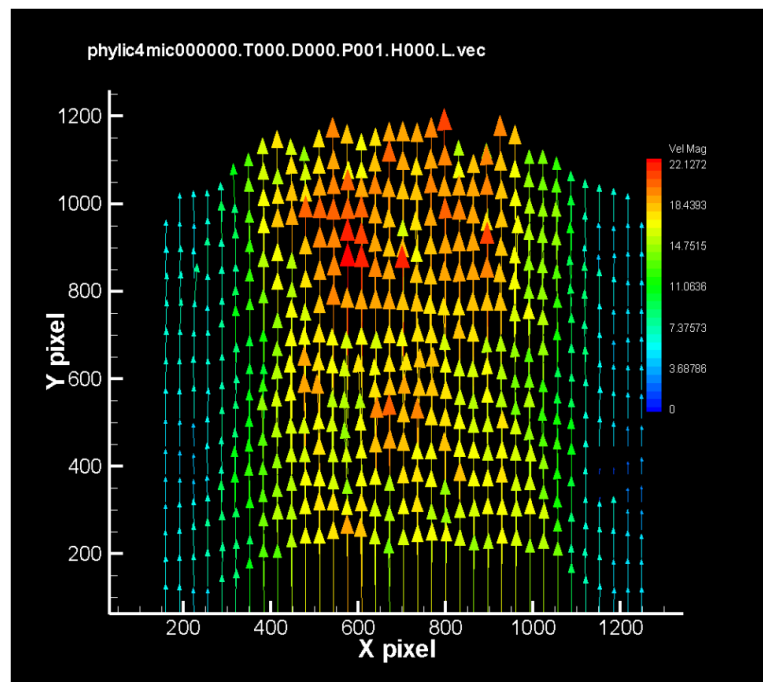
### 5.3 Υδρόφιλα-Υδρόφοβα μικροκανάλια

Για τις διαφορετικές παροχές που χρησιμοποιήσαμε και για τα αντίστοιχα διαφορετικά χρονικά διαστήματα, εντοπίσαμε τις μέγιστες μετατοπίσεις που προέκυψαν από τις μετρήσεις, και ακολούθως με χρήση της αντιστοιχία 4pixels/μm τις μέγιστες ταχύτητες που προκύπτουν (βλ. Πίνακας 4). Στον ίδιο πίνακα φαίνεται και η μέση ταχύτητα της ροής για κάθε παροχή. Ακολούθως φαίνονται και τα προφίλ από το Techplot.

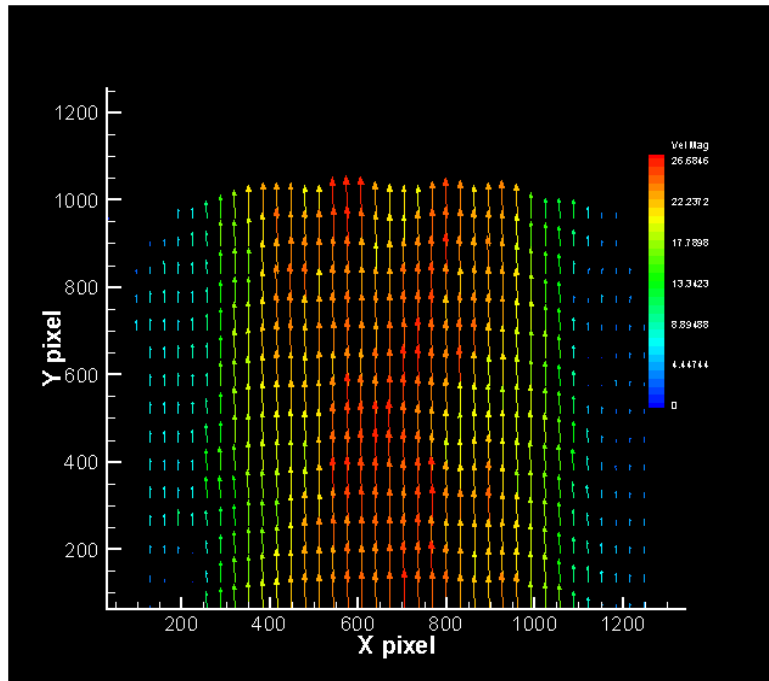


Παροχή	$\Delta t$	ΥΔΡΟΦΟΒΑ		ΥΔΡΟΦΙΛΑ		um(m/sec)
		$\Delta y_{max}$	$u(m/sec)$	$\Delta y_{max}$	$u(m/sec)$	
800 $\mu l/min$	10 $\mu sec$	26,67535	0,67	22,94842	0,57	1,33
600 $\mu l/min$	15 $\mu sec$	29,92282	0,5	24,46716	0,41	0,997
400 $\mu l/min$	20 $\mu sec$	25,42561	0,32	25,42561	0,32	0,66
200 $\mu l/min$	30 $\mu sec$	19,19681	0,16	17,31837	0,14	0,33
160 $\mu l/min$	35 $\mu sec$	17,33141	0,12	12,70922	0,1	0,27
120 $\mu l/min$	40 $\mu sec$	13,87911	0,09	9,10749	0,07	0,14
80 $\mu l/min$	45 $\mu sec$	9,931086	0,06	8,98911	0,05	0,07

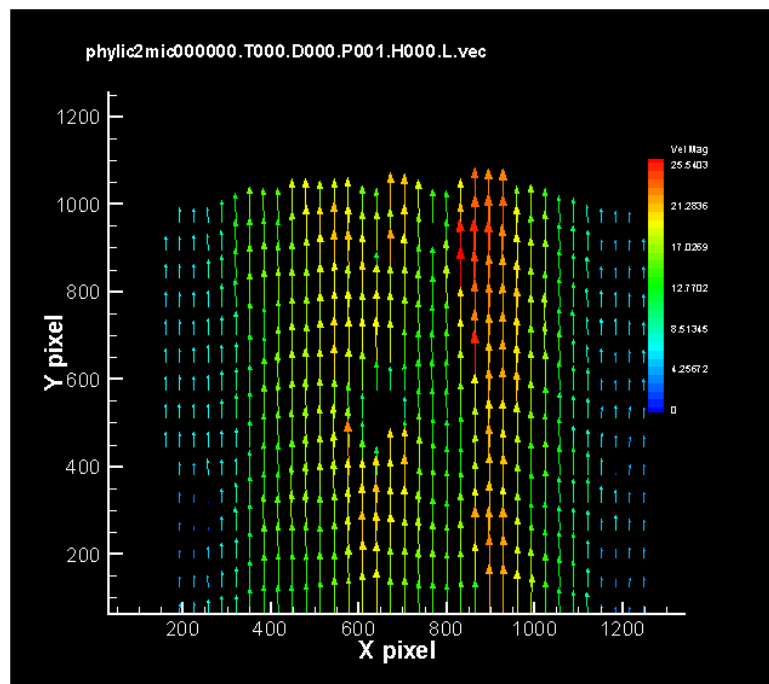
Πίνακας 4



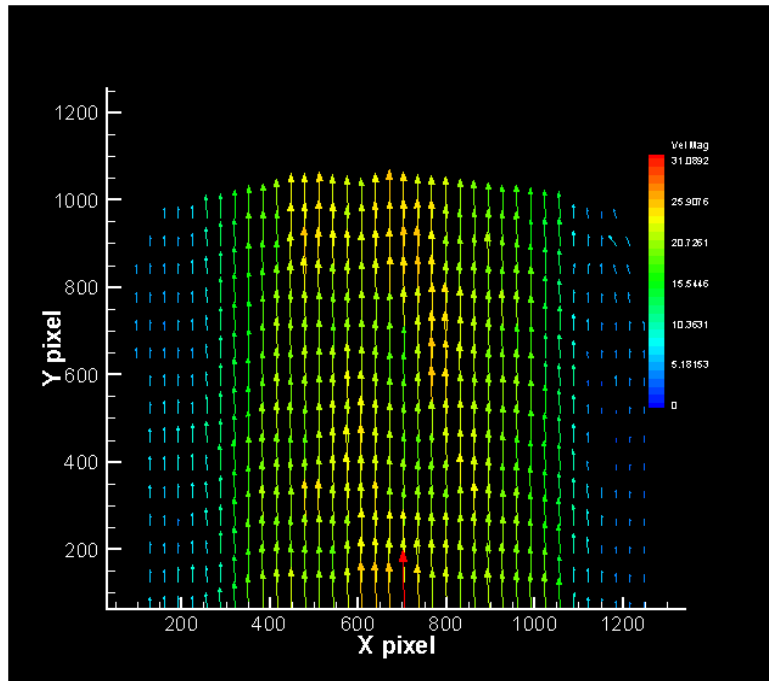
Εικόνα 5.18 hydrophilic 800 $\mu l/min$



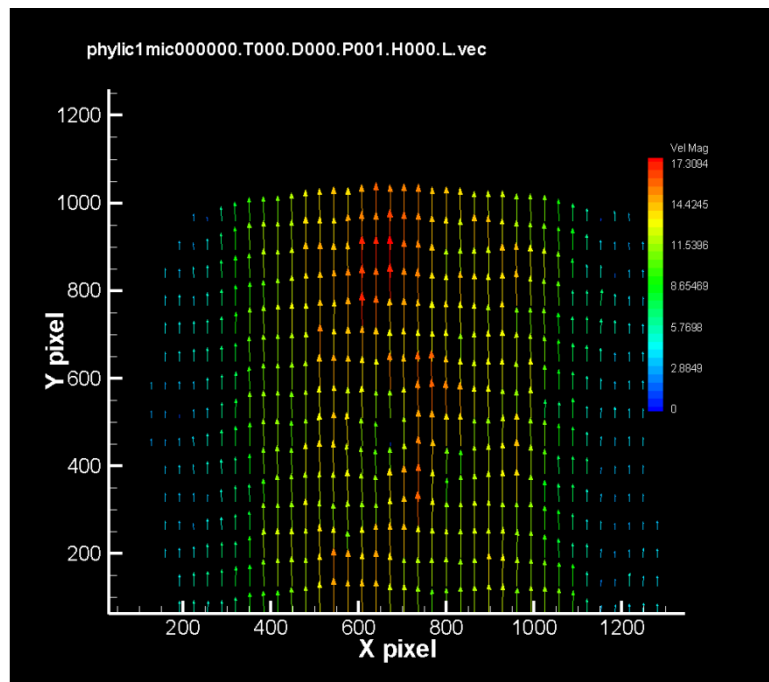
Εικόνα 5.19 hydrophilic 800μl/min



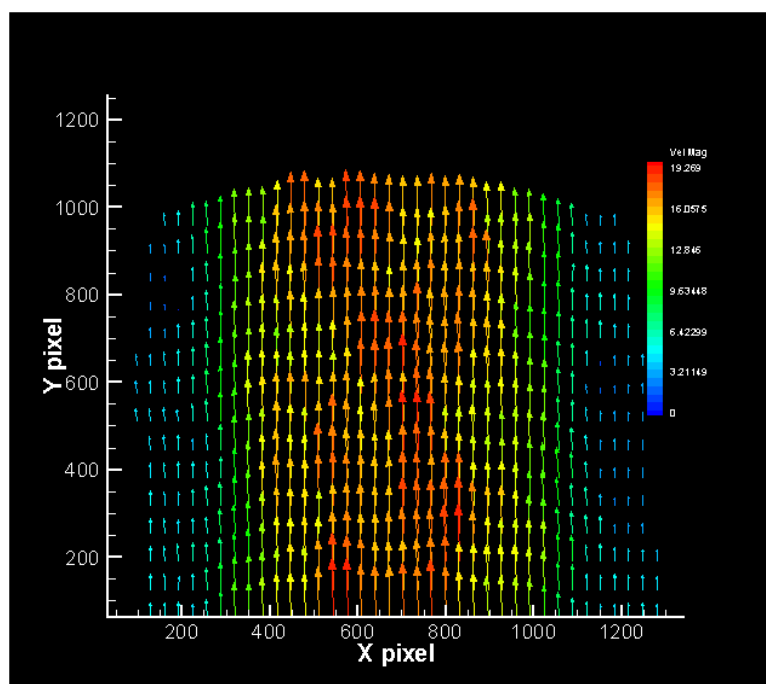
Εικόνα 5.20 hydrophilic 400μl/min



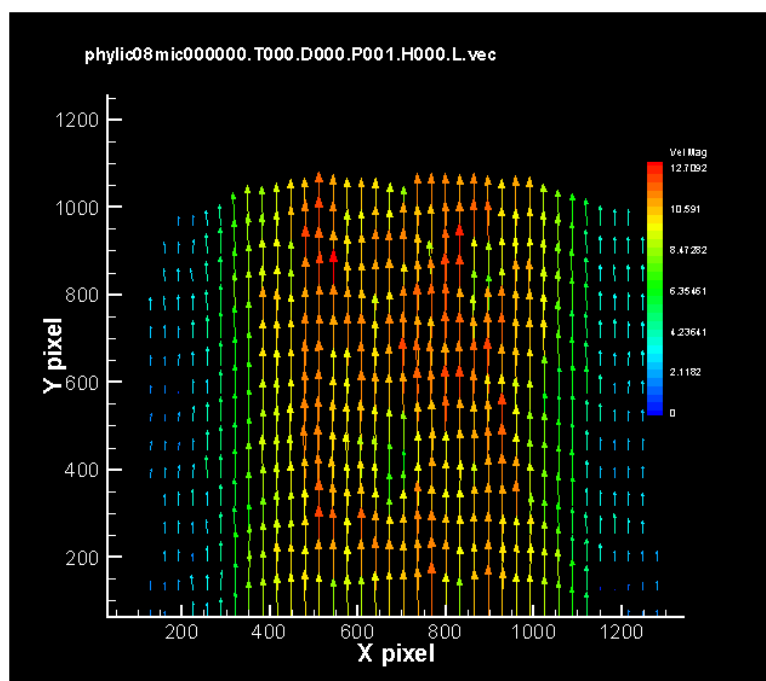
Εικόνα 5.21 hydrophobic 400 $\mu\text{l}/\text{min}$



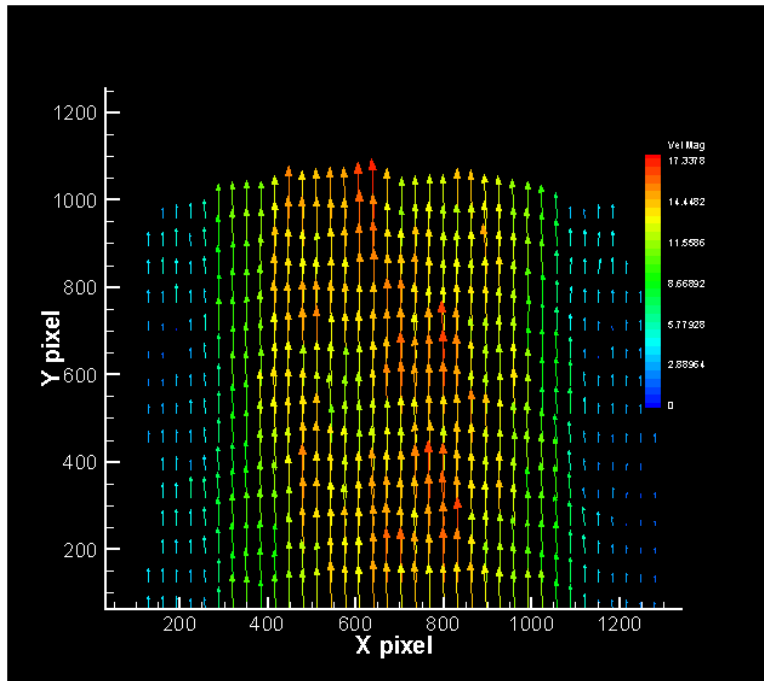
Εικόνα 5.22 hydrophilic 200 $\mu\text{l}/\text{min}$



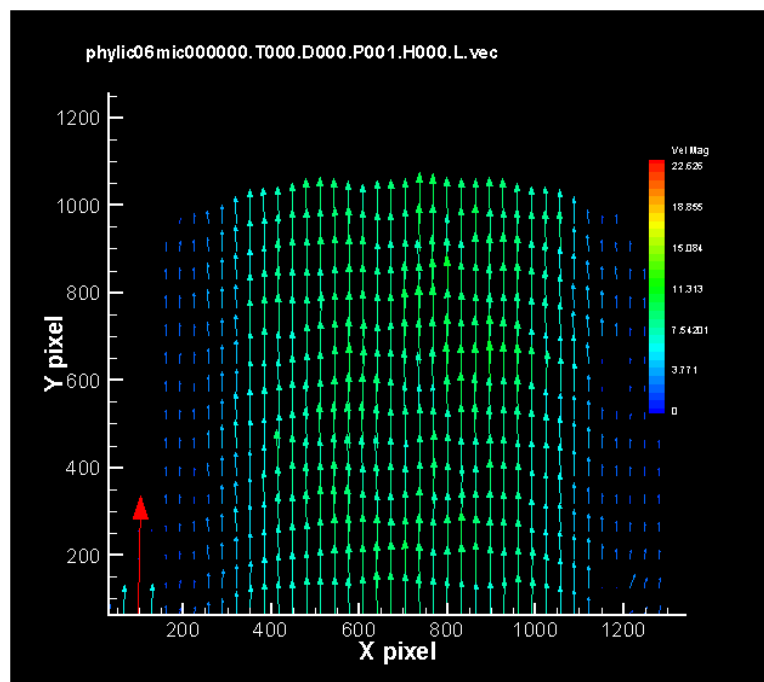
Εικόνα 5.23 hydrophobic 200 $\mu$ l/min



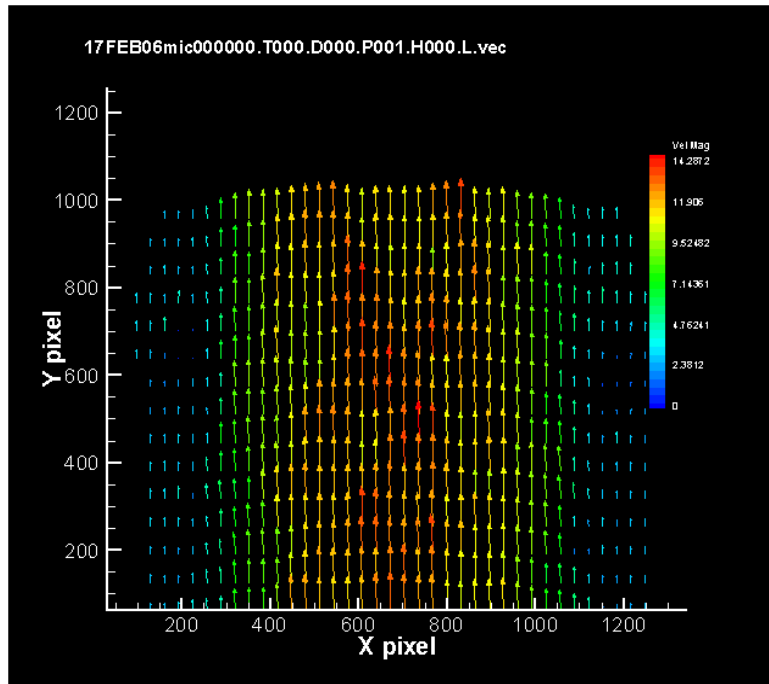
Εικόνα 5.24 hydrophilic 160 $\mu$ l/min



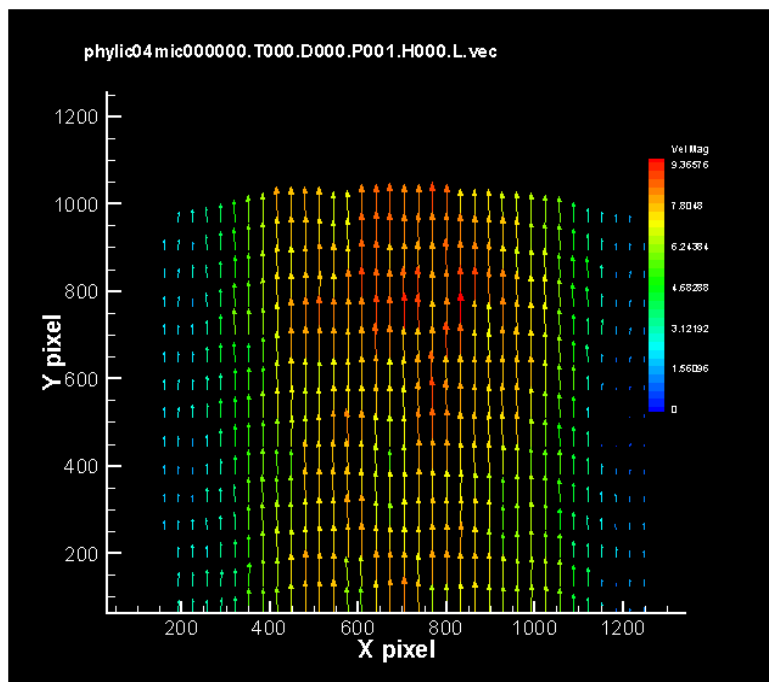
Εικόνα 5.25 hydrophobic 160 $\mu$ l/min



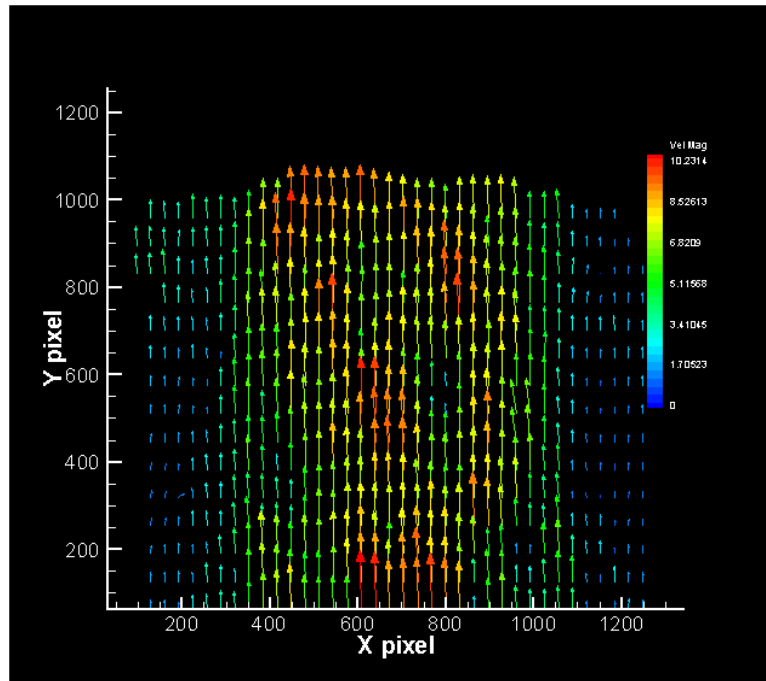
Εικόνα 5.26 hydrophilic 120 $\mu$ l/min



Εικόνα 5.27 hydrophobic 120 $\mu$ l/min

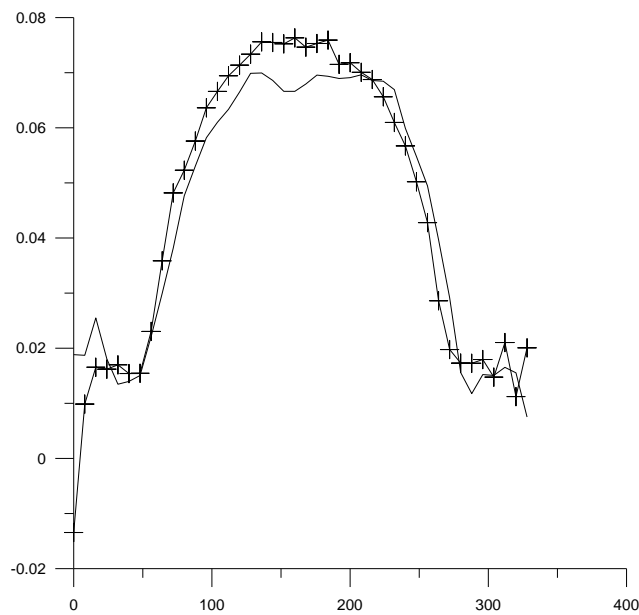


Εικόνα 5.28 hydrophilic 80 $\mu$ l/min

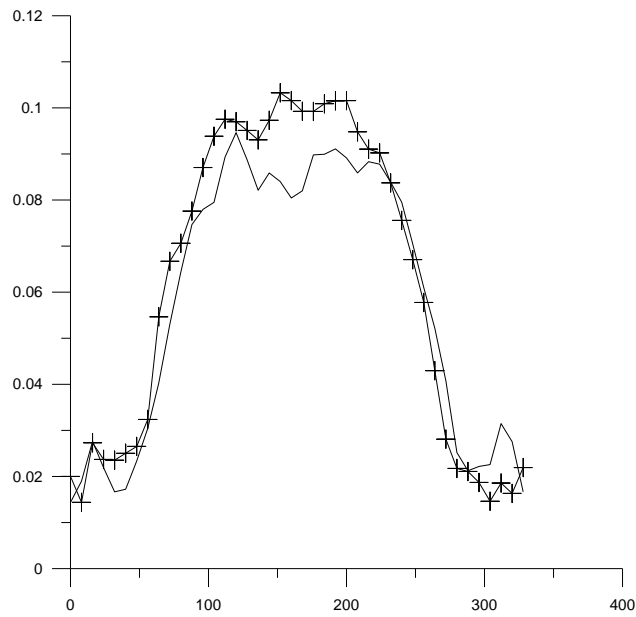


Εικόνα 5.29 hydrophobic 80μl/min

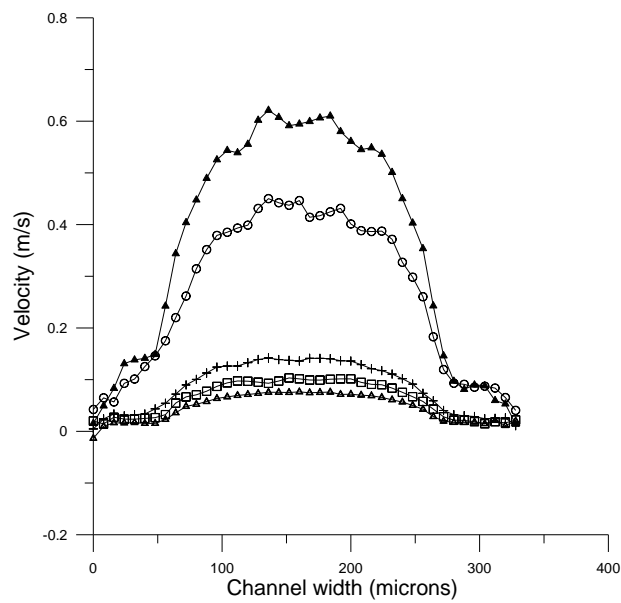
Από το Graph προέκυψαν τα εξής προφίλ στα οποία πραγματοποιείται σύγκριση των διαφορών μεταξύ υδρόφοβων και υδρόφιλων για τις παροχές 120μl/min και 160μl/min (βλ. Εικόνα 5.30, 5.31), καθώς επίσης και των προφίλ που προκύπτουν για τα υδρόφοβα για όλες τις παροχές (βλ. Εικόνα 5.32).



Εικόνα 5.30



**Εικόνα 5.31**



**Εικόνα 5.32**

Τα αποτελέσματα δεν είναι και πάλι τα αναμενόμενα, καθώς τα υδρόφιλα κανάλια παρουσιάζουν είτε έντονες διακυμάνσεις στα προφίλ τους είτε μία πιο επίπεδη μορφή σε σχέση με αυτή θα έπρεπε να έχει. Επίσης και πάλι η μέγιστη ταχύτητα για την κάθε περίπτωση είναι μεγαλύτερη στα υδρόφοβα, ενώ η εικόνα θα έπρεπε να είναι αντίστροφη.



## 5.4 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων δεν ήταν τα αναμενόμενα. Τα προφίλ των ταχυτήτων που προέκυψαν είχαν μεγάλου βαθμού αποκλίσεις από τα προβλεπόμενα και συνοψίζονται ως εξής:

- Τα υδρόφιλα μικροκανάλια παρουσίασαν επίπεδη μορφή του προφίλ τους, σε σχέση με τα υδρόφοβα που εμφάνισαν σχεδόν παραβολική μορφή. Η συγκεκριμένη παρατήρηση είναι αρκετά παράδοξη, αφού λόγω της πεπερασμένης τιμής ταχύτητας που σημειώνεται στα τοιχώματα για τη ροή σε υδρόφοβες επιφάνειες, τα προφίλ στις υδρόφοβες θα έπρεπε να εμφανίζουν σαφώς πιο επίπεδες τάσεις.
- Δεν μπορέσαμε να εξάγουμε κάποιο συμπέρασμα σχετικά με την ολίσθηση της ροής στα τοιχώματα, πιθανώς λόγω της μικρής διακριτικής ικανότητας του μετρητικού συστήματος.
- Η μέγιστη ταχύτητα της ροής στα υδρόφοβα μικροκανάλια ήταν ίση ή μεγαλύτερη από την αντίστοιχη των υδρόφιλων, ενώ θα έπρεπε να είναι μικρότερη, για λόγους που εξηγήθηκαν προηγουμένως.

Τα αποτελέσματα μπορούν να αποδοθούν ενδεχομένως στις χημικές ιδιότητες των επιφανειών. Όπως αναφέρθηκε και στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο, η επεξεργασία του PMMA με μέθοδο εγχάραξης πλάσματος οξυγόνου καθιστά την επιφάνεια ιδιαίτερα υδροφιλική στην αρχή, ενώ με το πέρασ του χρόνου η συμπεριφορά της γίνεται υδροφοβική.

Επιπλέον με την επίδραση στη διαβρεκτική συμπεριφορά, ο χρόνος συνέβαλε και στην συμπεριφορά των σωματιδίων, εφόσον παρατηρήσαμε ότι για διεξαγωγή μέτρησης στο ίδιο κανάλι με τις ίδιες ακριβώς παραμέτρους, αλλά σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, τα προφίλ ήταν σαφώς χειρότερα, λόγω του ότι τα σωματίδια συσσωρεύονταν και "κάθονταν" στο κανάλι. Γενικά το φαινόμενο αυτό ήταν ένας παράγοντας που επέβαλε την ταχύτερη διεξαγωγή των πειραμάτων.

Όσο αφορά το φαινόμενο της ολίσθησης της ροής πάνω σε υδροφιλικές επιφάνειες, παρά το γεγονός ότι η πλειοψηφία των αναφορών στη βιβλιογραφία έχει δείξει την συμφωνία τους με τη συνθήκη μη-ολίσθησης, υπάρχουν και αμφιβολίες για το πόσο όντως ισχύει, λόγω της ευαισθησίας των επιφανειών στις διαμορφώσεις που μπορεί να υπάρχουν.

Μία πιθανή προσπάθεια για ακριβέστερη διερεύνηση του φαινομένου θα ήταν η διεξαγωγή πειραμάτων αρχικά σε υδρόφιλο μικροκανάλι, στο οποίο θα προσδοθούν αργότερα υδροφοβικές επιφάνειες και θα συντελεστεί δεύτερη σειρά πειραμάτων, με ακριβώς τις ίδιες παραμέτρους, όπως για παράδειγμα ίδια παροχή. Έτσι θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί μία ακριβέστερη σύγκριση, εφόσον τα μικροκανάλια θα ήταν ακριβώς τα ίδια, ενώ θα άλλαζαν μόνο οι διαβρεκτικές τους ικανότητες.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

### ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΥΔΡΟΦΙΛΕΣ ΚΑΙ ΥΔΡΟΦΟΒΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΜΙΚΡΟΚΑΝΑΛΙΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ *micro-PIV*

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήσαμε με τη μέθοδο *micro-PIV* τη ροή σε υδρόφοβες, υδρόφιλες, υπέρ-υδρόφοβες και υπέρ-υδρόφιλες επιφάνειες μικροκαναλιών, βάθους 100μm, με σκοπό την ανάδειξη των διαφορών τους. Το *micro-PIV* αποτελεί ένα ιδιαίτερα χρήσιμο “εργαλείο”, και αυτό λόγω της ιδιαίτερα μικρής διακριτικής ανάλυσης που αποδίδει μέσω της χρήσης του μικροσκοπίου.

Ο πειραματικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε συνίσταται από τους εξής συντελεστές: ανεστραμμένο μικροσκόπιο φθορισμού Olympus IX71, μικροαντλία syringe pump, φθορίζοντα σωματίδια για τον προσδιορισμό της ταχύτητας της ροής, τα οποία διεγείρονται με απορρόφηση ακτινοβολίας 540nm (πράσινο) και εκπέμπουν στα 560nm (κόκκινο), laser ND-Yag που εκπέμπει στα 532nm, κάμερα CMOS 1,4MP για τη λήψη εικόνων, μικροκανάλια κατασκευασμένα από PMMA που υπέστησαν επεξεργασία με εγχάραξη πλάσματος οξυγόνου, και το πρόγραμμα Insight 3G για επεξεργασία των δεδομένων.

Οι παροχές νερού που χρησιμοποιήθηκαν ήταν σχετικά υψηλές (η μικρότερη ήταν 60ml/min). Για την κάθε επεξεργασία λήφθηκε επαρκής αριθμός εικόνων με σκοπό τον περιορισμό “θορύβου” από τα σωματίδια, καθώς επίσης και την επαρκή συγκέντρωσή τους στα interrogation windows. Χρησιμοποιήθηκε το ensemble PIV για “φιλτράρισμα” μετατοπίσεων που δεν συνεισέφεραν ποιοτικά στα αποτελέσματα.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είχαν μεγάλες αποκλίσεις από τα αναμενόμενα, καθώς δεν μπορέσαμε να διακρίνουμε κάποια διαφορά ως προς την ολίσθηση, ενώ τα υδρόφιλα εμφάνιζαν τάσεις μάλλον υδρόφοβων μικροκαναλιών. Πιο συγκεκριμένα τα υδρόφιλα προφίλ είχαν επίπεδα προφίλ σε σχέση με τα υδρόφοβα που είχαν πιο παραβολικά. Επίσης η μέγιστη ταχύτητα της ροής στα υδρόφοβα ήταν ίδια με αυτήν στα υδρόφιλα, ενώ θα έπρεπε να είναι μικρότερη, λόγω της συνεισφοράς της ταχύτητας ολίσθησης στα τοιχώματα. Συνεπώς δεν είχαμε κάποια ένδειξη που να μαρτυράει το φαινόμενο της ολίσθησης. Τα αποτελέσματα μπορούν να αποδοθούν είτε σε ανεπαρκή διακριτική ανάλυση, είτε σε υποχώρηση των ιδιοτήτων των επιφανειών.

**Λέξεις-κλειδιά:** υδροφιλικότητα, υδροφοβικότητα, ολίσθηση της ροής, *micro-PIV*

## **ABSTRACT**

### **EXPERIMENTAL STUDY FLOW OVER HYDROPHILIC AND HYDROPHOBIC MICROCHANNELS' SURFACES APPLYING *micro-PIV***

The subject of this diploma thesis is the study flow over hydrophobic, hydrophilic, super-hydrophobic and super-hydrophobic microchannels' surfaces, in order to highlight their differences. Micro-PIV is an extremely useful measurement technique, due to the spatial resolution given by the microscope.

The experimental equipment that was used consists of: an inverted fluorescent IX71 Olympus microscope, a syringe pump, fluorescent microspheres that absorb green light (540nm) and emit red (560nm), a pulsed Nd-YAG laser (532nm), CMOS camera, microchannels made from PMMA, and Insight 3G software.

The flow rates were rather high (bigger than 60 $\mu$ l/min). The number of captured pictures was adequate enough, in order to limit the Signal-To-Noise ratio, as well as to ensure good particles concentration in each interrogation window. Ensemble PIV was used, in order to "cut down" particles that do not contribute sufficiently to the cross-correlation function.

The results do not meet the expected, since we were not able to ascertain the existence of fluid slip over hydrophobic and super-hydrophobic surfaces. More specifically, the hydrophilic profiles were "flatter" than hydrophobic, that were parabolic. Furthermore the maximum flow velocity in hydrophobic cases, is the same or higher than the maximum velocity in hydrophilic cases. The results can be attributed to insufficient spatial resolution and recovery of hydrophilic or hydrophobic behavior.

***Key-words: hydrophilicity, hydrophobicity, fluid slip, micro-PIV***



