



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΜΙΚΡΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΝΑΝΟΔΙΑΤΑΞΕΙΣ»

Πειραματική Μελέτη της Επίδρασης στη Ροή Κινούμενης Επιφάνειας με Υπερυδρόφοβα και Υδρόφιλα Χαρακτηριστικά

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ Ι. ΓΚΙΟΛΑ

Ακαδημαϊκός Επιβλέπων: Μαθιουλάκης Δ.	Ερευνητικός Επιβλέπων: Γογγολίδης Ε.
Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Δ/τής Ερευνών INN, ΕΚΕΦΕ 'Δ'

Αθήνα, Φεβρουάριος 2017



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

«Μικροσυστήματα και Νανοδιατάξεις»

Πειραματική Μελέτη της Επίδρασης στη Ροή Κινούμενης Επιφάνειας με Υπερυδρόφοβα και Υδρόφιλα Χαρακτηριστικά

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ Ι. ΓΚΙΟΛΑ

Ακαδημαϊκός Επιβλέπων: Μαθιουλάκης Δ. Ερευνητικός Επιβλέπων: Γογγολίδης Ε.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 24η Φεβρουαρίου 2017.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....

Δ.Μαθιουλάκης

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Ε.Γογγολίδης

Δ/τής Ερευνών,

INN, ΕΚΕΦΕ 'Δ'

.....

Α.Τσερέπη

Δ/τρια Ερευνών,

INN, ΕΚΕΦΕ 'Δ'

(Υπογραφή)

.....

ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΓΚΙΟΛΑΣ

Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

© 2017 – All rights reserved



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

«Μικροσυστήματα και Νανοδιατάξεις»

.....
Δημήτρης Γκιόλας

©(2017) Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. All rights reserved. Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σ' αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα καταρχήν να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ.Δ.Μαθιουλάκη για την επίβλεψη αυτής της διπλωματικής εργασίας και για την ευκαιρία που μου έδωσε να την εκπονήσω στο εργαστήριο Αεροδυναμικής. Επίσης ευχαριστώ ιδιαίτερα τους Διευθυντές Ερευνών INN του ΕΚΕΦΕ 'Δ' κ. Ε.Γογγολίδη και κ. Α.Τσερέπη καθώς επίσης και τον Μεταδιδακτορικό Ερευνητή κ. Κ.Έλληνα για την καθοδήγησή τους και την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την καθοδήγηση και την ηθική συμπαράσταση που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η ροή νερού κοντά στην επιφάνεια στρεφόμενου κυλίνδρου με υπερυδρόφοβα και υδρόφιλα χαρακτηριστικά. Διεξήχθησαν μετρήσεις της ταχύτητας του ρευστού με τη μέθοδο 2D-PIV κοντά στην επιφάνεια του κυλίνδρου, η οποία παρουσίαζε διάφορα χαρακτηριστικά σύμφωνα με την εκάστοτε μεμβράνη που προσκολλούνταν στην αλουμινένια επιφάνειά του. Εξετάστηκαν τέσσερις περιπτώσεις: α) υπερυδρόφοβη επιφάνεια με μέση τραχύτητα $1.5\mu m$ διπλής κλίμακας, β) λεία υδρόφιλη επιφάνεια, γ) επιφάνεια τραχύτητας $80\mu m$, δ) λεία επιφάνεια αλουμινίου. Η υπερυδρόφοβη επιφάνεια κατασκευάστηκε στο Εργαστήριο του Τομέα Μικροηλεκτρονικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. 'Δ' με διεργασία πλάσματος και εναπόθεση υμενίου τεφλόν. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε κατάλληλη πειραματική διάταξη δεξαμενής - κυλίνδρου - συστήματος μετάδοσης κίνησης με έλεγχο στροφών. Η καταγραφή του πεδίου ταχύτητας έγινε στο μέσο του ύψους της δεξαμενής για διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής (shear-rates) του κυλίνδρου. Έξετάστηκε επίσης η επίδραση της θερμοκρασίας του υγρού καθώς και η χρονική εξέλιξη του πεδίου ροής.

Λέξεις Κλειδιά

Υπερυδρόφοβες Επιφάνειες, Μήκος Ολίσθησης, Μείωση Οπισθέλκουσας

Abstract

In the present thesis, the flow of water was studied near the surface of a rotating cylinder with superhydrophobic and hydrophilic properties. Measurements of the fluid velocity were conducted via PIV (Particle Image Velocimetry) near the surface of the cylinder, which presented various characteristics in accordance to the individual film that was attached to the cylinder aluminum surface. Four cases were studied, namely: a) superhydrophobic surface with an average roughness of $1.5\mu m$ (double-scaled), b) smooth hydrophilic surface, c) surface with an average roughness of $80\mu m$, d) smooth aluminum surface. The superhydrophobic surfaces were made in the Laboratory of the Department of Microelectronics of the NCSR “Demokritos”, with plasma processing and Teflon deposition on COP substrate. In the context of this study, suitable experimental setup of water tank - cylinder - speed controllable drive system was designed and manufactured. The velocity field was measured at half height of the tank for different rotational speeds (shear-rates) of the cylinder. The velocity field was also examined with respect to its time evolution as well as the effect of the fluid temperature.

Keywords

Superhydrophobic surface, Slip length, Drag reduction

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	1
Περίληψη	3
Abstract	5
Περιεχόμενα	9
1 Εισαγωγή	11
1.1 Οργάνωση του τόμου	12
2 Θεωρητικό Υπόβαθρο	13
2.1 Υδροφοβικότητα - Υδροφιλικότητα	13
2.2 Γωνία επαφής	13
2.2.1 Λεία Επιφάνεια	14
2.2.2 Επιφάνειες με Τραχύτητα	14
2.3 Γωνία υστέρησης	16
2.4 Μήκος ολίσθησης	16
2.5 Ροή ανάμεσα σε ομόκεντρους κυλίνδρους μεγάλου μήκους	17
3 Βιβλιογραφική Επισκόπηση	21
3.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την ολίσθηση	22
3.1.1 Ολίσθηση σε λείες επιφάνειες	22
3.1.2 Μήκος ολίσθησης, χαρακτηριστικό μέγεθος και μείωση αντίστασης	22
3.1.3 Μεγάλο ενεργό μήκος ολίσθησης σε υπερυδροφικές επιφάνειες	23
3.1.4 Συσχέτιση της γωνίας επαφής με το μήκος ολίσθησης	24
3.1.5 Η υψηλή γωνία επαφής δεν εξασφαλίζει μεγάλο μήκος ολίσθησης	25

3.2	Ολίσθηση σε υπερυδρόφοβες επιφάνειες: θεωρητικές προσεγγίσεις	25
3.2.1	Επίδραση των κατασκευαστικών παραμέτρων της επιφάνειας στο μήκος ολίσθησης	26
3.2.2	Δευτερεύοντες παράγοντες του μήκους ολίσθησης	28
3.3	Ακανόνιστες (τυχαίες) δομές	32
3.3.1	Μέτρηση του μήκους ολίσθησης σε τυχαία δομημένες ΥΦΒ επιφάνειες	32
3.3.2	Μέτρηση παροχής με μεταβολή της πτώσης πίεσης	33
3.3.3	Μέτρηση διατμητικών τάσεων	35
3.3.4	Συμπερασματικά	36
3.4	Τι εμποδίζει την επιτυχία	37
4	Πειραματική Διάταξη και Εξοπλισμός	39
4.1	Πειραματική Διάταξη	39
4.2	Διεργασία Πλάσματος για την Κατασκευή Υπερυδρόφωτων Επιφανειών σε Πολυμερή κυκλο-ολεφίνης (COP)	40
4.3	Εξοπλισμός	42
4.3.1	Δεξαμενή - Κύλινδρος	42
4.3.2	Σύστημα Μετάδοσης Κίνησης	44
4.4	Particle Image Velocimetry System	46
4.5	Μεθοδολογία Εκτέλεσης Πειραμάτων	52
5	Ανάλυση Πειραματικών Δεδομένων	53
5.1	Κώδικας MATLAB	53
5.2	Μελέτη Περιπτώσεων	53
5.2.1	Ποσοστό Κάλυψης του Κυλίνδρου	53
5.2.2	Επίδραση της θερμοκρασίας του ρευστού	54
5.2.3	Σύγκριση της ροής στις 3 επιφάνειες (λεία επιφάνεια αλουμινίου - aluminum, λεία υδρόφιλη επιφάνεια - untreated COP, υπερυδρόφοβη επιφάνεια - SH) για διαφορετικούς ρυθμούς διάτμησης	55
5.2.4	Χρονική εξέλιξη του φαινομένου	62
5.2.5	Ανάπτυξη «μεγάλων» φυσαλίδων στην επιφάνεια με τεχνητό τρόπο	67
5.2.6	Μηνίσκος	69
5.2.7	Υπολογιστική προσομοίωση για την εκτίμηση της επίδρασης της 3ης διάστασης στο πεδίο ροής	70

5.2.8 Χρήση Riblet film	72
6 Επίλογος	77
6.1 Συμπεράσματα	77
6.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις	78
Α' Κώδικας	79
Bibliography	94

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Ο όρος «βιομιμητική», όπως επινοήθηκε από τον Otto Schmitt το 1957, αναφέρεται στον τεχνολογικό τομέα που σχετίζεται με την ανάπτυξη λειτουργικών συσκευών και επιφανειών, οι οποίες μιμούνται τη συμπεριφορά των βιολογικών επιφανειών και συγκεκριμένες φυσικές διεργασίες, που συναντώνται σε διάφορα είδη φυτών και ζώων. Ο ακρογωνιαίος λίθος της βιομιμητικής είναι η ανάγκη αναπαραγωγής της αλληλεπίδρασης δομικών, φυσικών και χημικών ιδιοτήτων, που εντοπίζονται στη φύση, ώστε να μιμηθεί χαρακτηριστικά της, όπως ορισμένα είναι η υπευδροφοβικότητα, η ελεγχόμενη πρόσφυση, η μείωση της οπισθέλκουσας σε συνδυασμό με άλλες αεροδυναμικές ιδιότητες και ο ιριδισμός. Είναι, λοιπόν, αυτονόητο ότι τέτοιες επιφάνειες με τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά, δύνανται να αποκτήσουν σημαντικές εφαρμογές σε ένα ευρύ φάσμα της μηχανικής, με στόχο ενδεικτικά τη μείωση της οπισθέλκουσας σε υδροδυναμικά συστήματα, την ανάπτυξη επιχρισμάτων αυτοκαθαρισμού, την κατασκευή αντιρρύπαντικών επιφανειών, αντιθαμβωτικών και αντιανακλαστικών μεμβρανών, την ανάπτυξη έξυπνων κολλητικών ταινιών, καθώς και οπτικών συσκευών για φωτοβολταϊκά συστήματα. Ωστόσο, αναμφισβήτητα ένα από τα πλέον λειτουργικά και ταυτόχρονα εντυπωσιακά φαινόμενα είναι η υπερευδροφοβικότητα συγκεκριμένων επιφανειών («φαινόμενο του λωτού»), οι οποίες παρουσιάζουν ακραία αδιαβροχοποίηση και ιδιότητες αυτοκαθαρισμού. Φυσικά, τα φύλλα του λωτού (*Nelumbo nucifera*) οφείλουν τις ιδιότητές τους στις πολύπλοκες ιεραρχικές μικρο- και νανο-δομές, που αποτελούνται από κυρτές μικρο-προεξοχές, οι οποίες καλύπτονται από υδρόφοβους νανο-κρυστάλλους.

1.1 Οργάνωση του τόμου

Η εργασία αυτή είναι οργανωμένη σε έξι κεφάλαια: Στο Κεφάλαιο 2 δίνεται το θεωρητικό υπόβαθρο για τη ροή γύρω από περιστρεφόμενο κύλινδρο και οι μαθηματικές εξισώσεις που περιγράφουν το φαινόμενο της ολίσθησης και της υπερυδροφοβικότητας. Στο Κεφάλαιο 3 δίνεται η βιβλιογραφική επισκόπηση της υπάρχουσας έρευνας, πειραματικής και υπολογιστικής, αναφορικά με τον προσδιορισμό του μήκους ολίσθησης σε υπερυδρόφοβες επιφάνειες και τη μείωση της οπισθέλκουσας δύναμης. Αρχικά περιγράφονται οι εφαρμογές του φαινομένου και στη συνέχεια η μορφολογία της ροής και οι παράγοντες που επιδρούν σε αυτή. Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη εργασία, ενώ η ανάλυση των πειραματικών δεδομένων και της υπολογιστικής προσομοίωσης γίνεται στο Κεφάλαιο 5. Τέλος στο Κεφάλαιο 6 δίνεται η συνεισφορά αυτής της διπλωματικής εργασίας, καθώς και μελλοντικές επεκτάσεις.

Κεφάλαιο 2

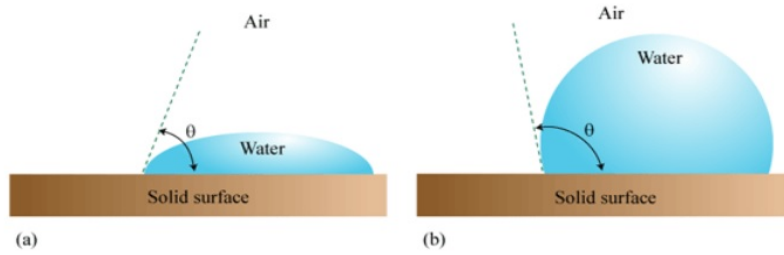
Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1 Υδροφοβικότητα - Υδροφιλικότητα

Οι όροι υδροφοβικότητα και υδροφιλικότητα χρησιμοποιούνται συχνά για να προσδιορίσουν μια επιφάνεια (Σχήμα 2.1). Πιο συγκεκριμένα, η υδροφοβικότητα εκφράζει την τάση μιας επιφάνειας να μην απορροφά το νερό ή να μην διαβρέχεται από αυτό. Αντίθετα ο όρος της υδροφιλικότητας εκφράζει την τάση της επιφάνειας να επιδεικνύει «φιλική» συμπεριφορά προς το νερό, το οποίο εξαπλώνεται πάνω σε αυτήν, μεγιστοποιώντας την επαφή. Μια επιφάνεια θεωρείται ότι διαβρέχεται από ένα υγρό όταν αυτό διασκορπίζεται ομοιόμορφα πάνω σε αυτή χωρίς το σχηματισμό σταγονιδίων. Στην περίπτωση αυτή αν το υγρό είναι νερό τότε η επιφάνεια θεωρείται υδρόφιλη. Με βάση τα παραπάνω, γίνεται σαφές ότι στην περίπτωση της υδρόφιλης επιφάνειας οι δυνάμεις που σχετίζονται με την αλληλεπίδραση του νερού με την επιφάνεια είναι μεγαλύτερες από τις συνεκτικές δυνάμεις που σχετίζονται με τον όγκο του νερού. Αντίθετα, στις υδρόφοβες επιφάνειες σχηματίζονται σταγονίδια νερού. Άρα, στις υδρόφοβες επιφάνειες οι συνεκτικές δυνάμεις που σχετίζονται με τον όγκο του νερού είναι μεγαλύτερες από αυτές που σχετίζονται με την αλληλεπίδραση του νερού με την επιφάνεια.

2.2 Γωνία επαφής

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



Σχήμα 2.1: (a) Διαβροχή νερού σε υδρόφιλη επιφάνεια. (b) Διαβροχή νερού σε υδρόφοβη επιφάνεια.

2.2.1 Λεία Επιφάνεια

Είναι γνωστό ότι η υδρόφιλη ή η υδρόφοβη συμπεριφορά μιας επιφάνειας καθορίζεται τόσο από τη χημεία της όσο και από την επιφανειακή της τοπογραφία. Σε μια απόλυτα επίπεδη επιφάνεια, η γωνία επαφής καθορίζεται από τις διεπιφανειακές τάσεις στερεού-υγρού (γ_{SL}), στερεού-αερίου (γ_{SV}) και υγρού-αερίου (γ_{LV}) και δίνεται από την εξίσωση του Young:

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \quad (2.1)$$

2.2.2 Επιφάνειες με Τραχύτητα

Μοντέλο Wenzel

Το μοντέλο Wenzel που αναφέρεται στην ομοιογενή - πλήρη διαβροχή, αναπτύχθηκε το 1936 και βασίζεται στην εξίσωση Young λαμβάνοντας υπόψη την τραχύτητα της επιφάνειας ως εξής:

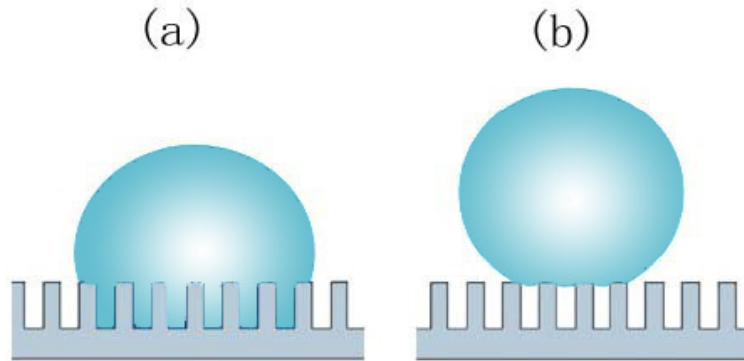
$$\gamma_{LV} \cos \theta_w = r(\gamma_{SV} - \gamma_{SL}) \quad (2.2)$$

όπου θ_w είναι η γωνία επαφής κατά Wenzel, δηλαδή η προκύπτουσα γωνία επαφής του υλικού συναρτήσει της τραχύτητας στην επιφάνεια.

Η παράμετρος r αποτελεί τον παράγοντα τραχύτητας, ο οποίος αναφέρεται και ως αναλογία της τραχύτητας της περιοχής σε σχέση με την προβαλλόμενη επιφάνεια ($r > 1$). Επομένως η εξίσωση Wenzel μπορεί να γραφτεί και ως:

$$\cos \theta_w = r \cos \theta \quad (2.3)$$

όπου θ_w η γωνία επαφής στην επιφάνεια με τραχύτητα, θ η γωνία επαφής σε λεία επιφάνεια και r ο παράγοντας τραχύτητας. Γενικά, με βάση τον Wenzel η αύξηση της τραχύτητας σε υδρόφοβες επιφάνειες προκαλεί αύξηση της γωνίας επαφής, ενώ σε υδρόφιλες επιφάνειες προκαλεί αντίστοιχα μείωσή της.



Σχήμα 2.2: (a) Κατάσταση Wenzel. (b) Κατάσταση Cassie.

Μοντέλο Cassie

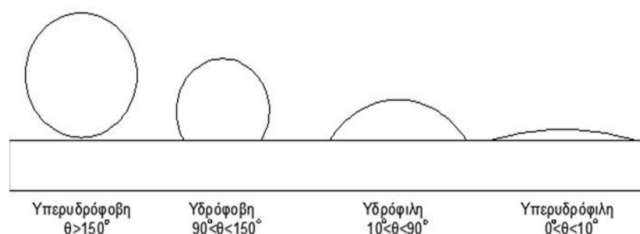
Για τις περιπτώσεις μερικής διαβροχής αναπτύχθηκε το μοντέλο Cassie-Baxter (1944), σύμφωνα με το οποίο υπολογίζεται η γωνία επαφής σε περιπτώσεις στις οποίες η σταγόνα επικαθεται στις κορυφές της τραχύτητας και αιωρείται στο αέριο στρώμα που έχει παγιδευτεί στις κοιλιάδες της τραχύτητας. Η εξίσωση που περιγράφει την παραπάνω κατάσταση είναι:

$$\cos \theta_{C-B} = \phi_s (\cos \theta + 1) - 1 \quad (2.4)$$

όπου θ_{C-B} η προκύπτουσα γωνία επαφής στην τραχεία επιφάνεια και ϕ_s ο λόγος της συνολικής διεπιφάνειας στερεού-υγρού σε σχέση με την προβαλλόμενη επιφάνεια. Για $\phi_s \rightarrow 1$, δηλαδή $\theta_{C-B} \rightarrow 0^\circ$ η εξίσωση Cassie-Baxter ταυτίζεται με την εξίσωση Wenzel. Αντίθετα όταν $\phi_s \rightarrow 0$ τότε η γωνία επαφής είναι $\theta_{C-B} \rightarrow 180^\circ$.

Αν η γωνία επαφής του νερού είναι μικρότερη από 90° , η επιφάνεια θεωρείται υδρόφιλη από τη στιγμή που οι δυνάμεις αλληλεπίδρασης του νερού με την επιφάνεια είναι σχεδόν ίσες με τις συνεκτικές δυνάμεις του όγκου του νερού και το νερό δεν στραγγίζει εντελώς από την επιφάνεια. Αν η γωνία επαφής του νερού είναι μικρότερη από 10° τότε η επιφάνεια θεωρείται υπερυδρόφιλη. Σ' αυτή την περίπτωση, η επιφάνεια δεν απορροφά νερό, δεν διαλύεται σε νερό ή δεν αντιδρά με νερό. Σε μια υδρόφοβη επιφάνεια το νερό σχηματίζει ευδιάκριτα σταγονίδια. Όσο αυξάνει η γωνία επαφής του νερού με την επιφάνεια τόσο αυξάνει και η υδροφοβικότητα

της επιφάνειας. Μια επιφάνεια μπορεί να θεωρηθεί υδρόφοβη αν η γωνία επαφής του νερού είναι μεγαλύτερη από 90° . Η θεωρητικά μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει η γωνία επαφής του νερού σε μια ομαλή επιφάνεια είναι 120° . Όμως, σε υδρόφοβες επιφάνειες που φέρουν τραχύτητα η γωνία επαφής του νερού με την επιφάνεια μπορεί να ξεπεράσει τις 150° . Σε αυτή την περίπτωση έχουμε να κάνουμε με υπερυδρόφοβη επιφάνεια.



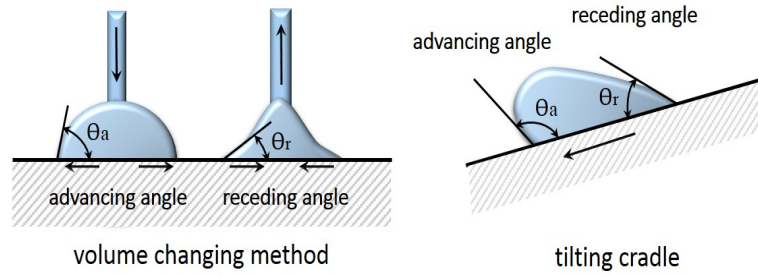
Σχήμα 2.3: Ενδεικτική μορφολογία σταγόνας για τις διάφορες κατηγορίες διαβροχής.

2.3 Γωνία υστέρησης

Σημαντικό μέγεθος στη θεωρία διαβροχής αποτελεί και η γωνία υστέρησης (Σχ. 2.4). Η γωνία υστέρησης ορίζεται ως η διαφορά της γωνίας επαφής που μετράμε όταν προσθέσουμε τον μέγιστο δυνατό όγκο στη σταγόνα, χωρίς να μεταβληθεί η διεπιφάνεια επαφής (Advancing contact angle) και της γωνίας που προκύπτει όταν αφαιρέσουμε το μέγιστο δυνατό όγκο από τη σταγόνα χωρίς και πάλι να μεταβάλλουμε τη διεπιφάνεια (Receding contact angle). Οι δύο παραπάνω γωνίες προκύπτουν και κατά την τοποθέτηση της επιφάνειας υπό κλίση προς τη μια κατεύθυνση. Μια μεγάλη γωνία επαφής επιτυγχάνεται με το συνδυασμό επιφανειακής χημείας και μορφολογίας, ενώ η γωνία κύλισης εξαρτάται από το μέγεθος της σταγόνας και τη γωνία υστέρησης.

2.4 Μήκος ολίσθησης

Ένα άμεσο αποτέλεσμα της υδροφοβικότητας στη ρευστομηχανική είναι ότι το υγρό μπορεί να «ολισθαίνει» σε ροή πάνω σε υδρόφοβη επιφάνεια. Το μήκος ολίσθησης είναι ένα μέγεθος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ποσοτικοποίηση της υδροφοβικότητας. Είναι επίσης ένας δείκτης της μείωσης της αντίστασης. Ωστόσο, μέχρι σήμερα, ήταν πολύ δύσκολο να μετρηθεί το μήκος ολίσθησης πειραματικά, όπως και η αναλυτική του πρόβλεψη. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το εμπόδιο, υιοθετήθηκε η οριακή συνθήκη «μη ολίσθησης». Αυτή η κατάσταση σημαίνει



Σχήμα 2.4: Προωθούμενη και υποχωρούσα γωνία επαφής με (a) αυξομείωση του όγκου της σταγόνας και (b) τοποθέτηση της επιφάνειας υπό κλίση.

ότι το ρευστό στην άμεση επιφάνεια με το στερεό κινείται με ακριβώς την ίδια ταχύτητα όπως της επιφάνειας. Ενώ η οριακή συνθήκη μη ολίσθησης έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι είναι ακριβής για αρκετές μακροσκοπικές ροές, παραμένει μια υπόθεση που δεν βασίζεται στις αρχές της φυσικής και οδηγεί σε μη ρεαλιστική συμπεριφορά σε περιπτώσεις υγρής επίστρωσης σε στερεό υπόστρωμα, ροή σε γωνία, και ροή πολυμερούς που τήκεται σε τριχοειδή σωλήνα. Πριν από 200 περίπου χρόνια, ο Navier πρότεινε μια γενική οριακή συνθήκη που ενσωμάτωσε την δυνατότητα ολίσθησης υγρού σε στερεό όριο. Η προτεινόμενη οριακή συνθήκη περιγράφει ότι η ταχύτητα σε μια στερεή επιφάνεια είναι ανάλογη προς την διατμητική τάση στην επιφάνεια.

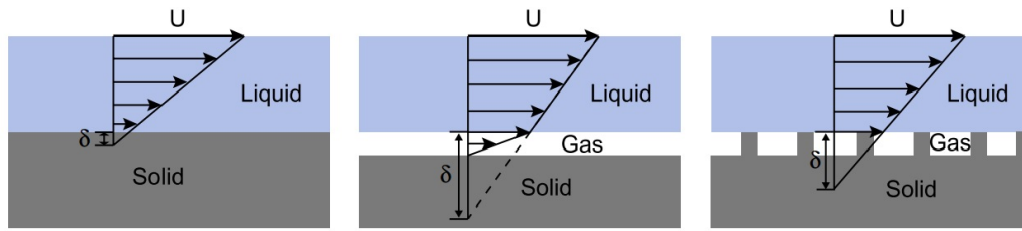
Σε στρωτή ροή, το μήκος ολίσθησης ορίζεται ως η απόσταση μέσα στο τοίχωμα κατά την οποία η ταχύτητα του ρευστού προεκτεινόμενη θα ισούται με την ταχύτητα του τοιχώματος (ή θα μηδενίζεται σε ακίνητο τοίχωμα). Η κατάσταση απεικονίζεται στο Σχήμα 2.5, για την περίπτωση όπου το τοίχωμα παραμένει ακίνητο. Ενώ η μαθηματική διατύπωση θα είναι:

$$u - u_{wall} = \delta \frac{\partial u}{\partial n} \quad (2.5)$$

όπου n το κάθετο στην επιφάνεια διάνυσμα και δ το μήκος ολίσθησης.

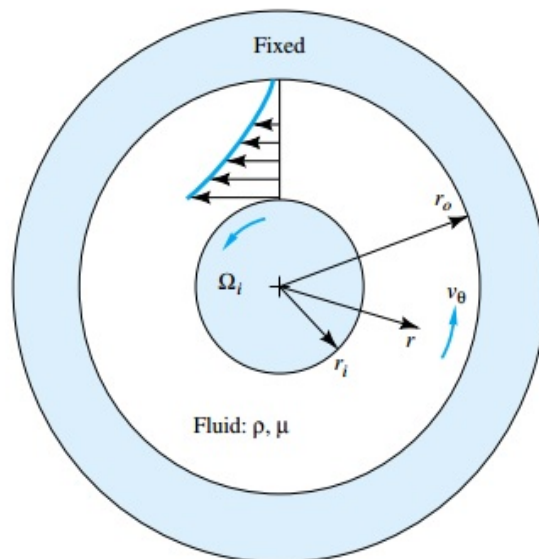
2.5 Ροή ανάμεσα σε ομόκεντρους κυλίνδρους μεγάλου μήκους

Θεωρούμε ροή ρευστού με σταθερές (ρ, μ) ανάμεσα σε ομόκεντρους κυλίνδρους, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6. Θεωρούμε ακόμη ότι δεν υπάρχει ροή κατά την αξονική κατεύθυνση ($v_z = \frac{\partial}{\partial z} = 0$) και ο εσωτερικός κύλινδρος περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα Ω_i , ενώ ο εξωτερικός παραμένει ακίνητος. Στη συγκεκριμένη γεωμετρία έχουμε κυκλική συμμετρία,



Σχήμα 2.5: Μήκος ολίσθησης υγρού στο στερεό όριο. **Αριστερά:** Ροή υγρού πάνω σε λεία υδρόφοβη επιφάνεια με αμελητέο (ορισμένα νανόμετρα) μήκος ολίσθησης. **Μέση:** Εάν υποθετικά υπήρχε ένα στρώμα αέρα ανάμεσα στο στερεό και το υγρό, τότε το υγρό θα έφερε με μεγάλο μήκος ολίσθησης, εφόσον το αέριο έχει πολύ μικρότερο ιξώδες από το υγρό. **Δεξιά:** Ενεργό μήκος ολίσθησης σε ΥΦΒ επιφάνεια με τραχύτητα

επομένως η ταχύτητα δεν μεταβάλλεται συναρτήσει της γωνίας θ παρά μόνο συναρτήσει της ακτίνας r .



Σχήμα 2.6: Σύστημα συντεταγμένων για ασυμπίεστη ροή ανάμεσα σε σταθερό εξωτερικό κύλινδρο και περιστρεφόμενο εσωτερικό.

Η εξίσωση συνέχειας με βάση το πρόβλημα για κυλινδρικές συντεταγμένες γράφεται:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} = 0 = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (rv_r) \quad (2.6)$$

Η εξίσωση ορμής κατά την θ κατεύθυνση γράφεται:

$$\rho(\mathbf{V} \cdot \nabla)v_\theta + \frac{\rho v_r v_\theta}{r} = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \rho g_\theta + \mu(\nabla^2 v_\theta - \frac{v_\theta}{r^2}) \quad (2.7)$$

Στο παρόν πρόβλημα όλοι οι όροι εκτός του τελευταίου είναι μηδέν. Επομένως η τελική δ.ε. που περιγράφει το πρόβλημα είναι:

$$\nabla^2 v_\theta = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dv_\theta}{dr} \right) = \frac{v_\theta}{r^2} \quad (2.8)$$

Όπου τελικά η λύση της γραμμικής δ.ε. δεύτερης τάξης είναι:

$$v_\theta = \Omega_i r_i \frac{r_o/r - r/r_o}{r_o/r_i - r_i/r_o} \quad (2.9)$$

Κεφάλαιο 3

Βιβλιογραφική Επισκόπηση

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται αναλυτικά ένα μεγάλο μέρος της έρευνας που έχει διεξαχθεί μέχρι σήμερα σχετικά με την χρήση υπερυδροφобων επιφανειών για την μετατροπή της μακροσκοπικής οριακής συνθήκης του ρευστού στο στερεό όριο σε ολισθαίνουσα. Αν το μήκος της ολίσθησης είναι αρκετά μεγάλο, μπορεί να συνεπάγεται μια αξιοσημείωτη μείωση των διατμητικών τάσεων και κατ' επέκταση της οπισθέλκουσας δύναμης σε ρευστομηχανικές εφαρμογές. Παράλληλα με την επισκόπηση της υπάρχουσας πειραματικής και υπολογιστικής έρευνας γίνεται και μια προσπάθεια αξιολόγησης των παραμέτρων που επηρεάζουν το φαινόμενο.

Ένα στρώμα αερίου ανάμεσα στις μικρο- ή νανο- δομές μιας υπερυδροφобης επιφάνειας επιτρέπει στο υπερκείμενο υγρό να ρέει κατά τόπους ολισθαίνοντας. Νανο-φουσαλίδες έχουν επίσης παρατηρηθεί πειραματικά ακόμη και σε λείες υδροφобες επιφάνειες: οι ρωγμές στην επιφάνεια μπορεί να δημιουργήσουν μια περισσότερο ευνοϊκή περιοχή για το σχηματισμό φουσαλίδων, προκαλώντας μερική διαβροχή. Επειδή αυτές οι φουσαλίδες δύνανται να δημιουργήσουν οριακές συνθήκες μηδενικής διατμητικής τάσης και να τροποποιήσουν σημαντικά την τριβή που δημιουργείται με το στερεό όριο, έχει ποσοτικοποιηθεί η επίδρασή τους σε ροή λόγω διαφοράς πίεσης. Ωστόσο, οι μεγάλες διαφορές μεταξύ των επιπέδων ολίσθησης που αναφέρονται στη βιβλιογραφία έχουν οδηγήσει σε παρανοήσεις σχετικά με τη δυνατότητα μείωσης της αντίστασης των υπερυδροφобων επιφανειών. Σήμερα γνωρίζουμε ότι το ποσοστό της ολίσθησης, το οποίο εν γένει ποσοτικοποιείται με το μήκος ολίσθησης, καθορίζεται κυρίως από τα δομικά χαρακτηριστικά της υπευδροφобης επιφάνειας, όπως το βήμα, το ποσοστό επαφής υγρού-στερεού και τη μορφολογία των δομών, και δευτερευόντως επηρεάζεται από παράγοντες, όπως η μορφή της διεπιφάνειας υγρού-αερίου. Επανεξετάζοντας τα πειραματικά

δεδομένα σε στρωτές ροές στη βιβλιογραφία περιεκτικά και συγκρίνοντάς τα με τις θεωρητικές προβλέψεις, προκύπτει μια συνολική εικόνα της ολίσθησης σε δομημένες επιφάνειες για να συμβάλλουν στον ορθολογικό σχεδιασμό υπερυδρόφοβων επιφανειών για τη μείωση της οπισθέλκουσας. Ωστόσο το παγιδευμένο αέριο, που συναντάται συχνά στη βιβλιογραφία και ως *plastron*, εξαφανίζεται στις περισσότερες εφαρμογές, με αποτέλεσμα να χάνεται η «υπερυδρόφοβη» συμπεριφορά. Η εν λόγω ανασκόπηση περιορίζεται σε στρωτές ροές, για τις οποίες η μείωση της οπισθέλκουσας είναι περισσότερο κατανοητή.

3.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την ολίσθηση

3.1.1 Ολίσθηση σε λείες επιφάνειες

Η ταχεία ανάπτυξη των μικρο- και νανο-ρευστονικών συστημάτων ανανέωσε την προσοχή γύρω από την οριακή συνθήκη στερεού-υγρού κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας (Neto et al. 2005 [28], Bocquet & Barrat 2006 [3]). Αν τα κανάλια έχουν διάμετρο ορισμένα νανόμετρα ή μικρόμετρα, ακόμη και ένα μικρό ποσοστό ολίσθησης στην εσωτερική τους επιφάνεια αναμενόταν να διευκολύνει αισθητά την μεταφορά του ρευστού. Η ολίσθηση ποσοτικοποιείται χρησιμοποιώντας την έννοια του μήκους ολίσθησης, το οποίο ορίζεται ως ο ρυθμός διάτμησης της ταχύτητας ολίσθησης στη στερεή επιφάνεια ή ως η εικονική απόσταση μέσα στο τοίχωμα στην οποία η ταχύτητα του ρευστού μηδενίζεται, όταν προεκταθεί γραμμικά (βλ. Σχήμα 2.1). Είναι κοινώς αποδεκτό ότι το μήκος ολίσθησης σε λείες υδρόφοβες επιφάνειες είναι λιγότερο από ορισμένες δεκάδες νανόμετρα, ενώ στις υδρόφιλες επιφάνειες είναι ουσιαστικά μηδέν ή μη-ανιχνεύσιμο (Neto et al. 2005 [28]).

3.1.2 Μήκος ολίσθησης, χαρακτηριστικό μέγεθος και μείωση αντίστασης

Για να παίζει η ολίσθηση καταλυτικό ρόλο στη μείωση της οπισθέλκουσας δύναμης σε ρευστομηχανικές εφαρμογές, το μήκος ολίσθησης δ χρειάζεται να είναι συγκρίσιμο με το χαρακτηριστικό μήκος της ροής. Για παράδειγμα, η μείωση της οπισθέλκουσας υγρού σε ροή Couette υπολογίζεται από τη σχέση $DR = \frac{1}{(1+H/\delta)}$, όπου H είναι το διάκενο μεταξύ της περιοχής ολίσθησης και της ακόλουθης περιοχής μη ολίσθησης (Choi & Kim 2006[7]). Μια παρόμοια έκφραση στη μορφή $DR = \frac{3}{(3+H/\delta)}$ έχει προκύψει για ροή Poiseuille (Ou et al. 2004[29]). Σύμφωνα με αυτές τις εκφράσεις, ως γενικός κανόνας, μια μείωση της οπισθέλκουσας του 10% αναμένεται όταν το μήκος ολίσθησης είναι το 10% του χαρακτηριστικού

μήκους του συστήματος της ροής, π.χ., το ύψος του καναλιού για τη ροή σε κανάλι. Για ένα δεδομένο μήκος ολίσθησης, δηλαδή, για μία συγκεκριμένη επιφάνεια, η μείωση της οπισθέλκουσας θα αυξηθεί εάν το κανάλι γίνει μικρότερο. Ακόμη και ορισμένες δεκάδες νανόμετρα μήκους ολίσθησης σε λείες υδρόφοβες επιφάνειες θα είχαν νόημα σε νανορευσιμικά συστήματα των οποίων το χαρακτηριστικό μήκος (π.χ. διάμετρος του καναλιού) είναι ορισμένα νανόμετρα (Holt et al. 2006[16]). Ωστόσο, σε ρευστομηχανικές εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, όπως σκάφη, στα οποία το πάχος του οριακού στρώματος είναι της τάξης του ενός χιλιοστού, μια πρώτη εκτίμηση υποδεικνύει πως ένα μήκος ολίσθησης της τάξης των 100 μm θα ήταν απαραίτητο για να ληφθεί μια αισθητή (>10%) μείωση της οπισθέλκουσας. Αυτό το επίπεδο μήκους ολίσθησης (της τάξης των 100 μm) είναι αρκετές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο από ό,τι είναι εφικτό σε λείες υδρόφοβες επιφάνειες (10 nm), εξηγώντας γιατί δεν έχει φανεί μέχρι στιγμής χρήσιμο στη μείωση της οπισθέλκουσας των οχημάτων νερού ή στην πτώση πίεσης σε σωλήνες. Ενώ το ενδιαφέρον εντοπίζεται γενικά στη μείωση της οπισθέλκουσας, αυτή η επισκόπηση επικεντρώνεται στο μήκος ολίσθησης, έτσι ώστε να αποφευχθεί η επίδραση του ίδιου του συστήματος της ροής και να εξασφαλιστεί η ομοιογενής σύγκριση μεταξύ διαφορετικών επιφανειών.

3.1.3 Μεγάλο ενεργό μήκος ολίσθησης σε υπερυδρόφοβες επιφάνειες

Στο σχήμα 2.1 (μέση) εικονίζεται υγρό που ρέει σε στερεή επιφάνεια καλυμμένη με ένα ομοιόμορφο στρώμα αέρα. Εάν το πάχος του στρώματος αέρα είναι h και τα ιξώδη υγρού και αερίου η_{liquid} και η_{gas} , το ενεργό μήκος ολίσθησης δ μπορεί να υπολογιστεί θεωρώντας τη συνέχεια της διατμητικής τάσης στη διεπιφάνεια: $\delta = h(\eta_{\text{liquid}}/\eta_{\text{gas}} - 1)$. Ένα μήκος ολίσθησης 50 μm αναμένεται αν το στρώμα αέρα είναι πάχους 1 μm σε θερμοκρασία δωματίου. Ωστόσο, αυτή η διάταξη είναι μόνο ιδανική, αφού ένα ομοιόμορφο στρώμα αέρα είναι θερμοδυναμικά ασταθές και δεν μπορεί να διατηρηθεί. Από την άλλη πλευρά, θύλακες αερίου μπορούν να διατηρηθούν ανάμεσα σε επιφανειακές δομές που κατασκευάζονται από μη-διαβρέξιμο υλικό, όπως φαίνεται σχηματικά στο Σχ. 2.1 (δεξιά). Καθώς η διεπιφάνεια υγρού-στερεού στην κορυφή των δομών θα προσδώσει μια επιφανειακή τριβή μη ολίσθησης, το ενεργό μήκος ολίσθησης δεν μπορεί να είναι τόσο μεγάλο όσο αυτό σε ομοιόμορφο στρώμα αέρα με το ίδιο πάχος. Παρ' όλα αυτά, η βελτίωση της ολίσθησης βρέθηκε σημαντική σε σύγκριση με λείες επιφάνειες (Watanabe et al. 1999[41], Kim et al. 2002[21], Ou et al. 2004[29], Choi & Kim 2006[7]). Στον αντίποδα αυτής της τάσης υπέρ της ΥΦΒ επιφάνειας, τα συχνά ασυμ-

βίβαστα ποσοτικά αποτελέσματα στη βιβλιογραφία έχουν οδηγήσει σε ορισμένες θεμελιώδεις παρανοήσεις και λανθασμένες προσδοκίες.

3.1.4 Συσχέτιση της γωνίας επαφής με το μήκος ολίσθησης

Μια ΥΦΒ επιφάνεια συνήθως ορίζεται ως μια επιφάνεια στην οποία το νερό σχηματίζει γωνία επαφής πάνω από 150° και κυλά εύκολα. Αντίθετα, σε μια λεία επιφάνεια οποιουδήποτε υδρόφοβου υλικού, η γωνία επαφής του νερού δεν έχει βρεθεί ποτέ μεγαλύτερη από 120° . Είναι πλέον αντιληπτό ότι μια τόσο έντονη ιδιότητα απώθησης του νερού μπορεί να επιτευχθεί εάν η επιφάνεια υποστεί τόσο χημική επεξεργασία καθώς επίσης αποκτήσει και επιφανειακή τραχύτητα, είτε βρίσκεται στη φύση (Barthlott & Neinhuis 1997 [1]) είτε έχει κατασκευαστεί τεχνητά (Kim & Kim 2002 [21]). Το φαινόμενο της διαβροχής υγρού σε τραχείες επιφάνειες συνήθως προσεγγίζεται, όπως διατυπώθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, από δύο κλασικά μοντέλα - το μοντέλο Wenzel (Wenzel 1936 [42]) και το μοντέλο Cassie (Cassie & Baxter 1944 [5]). Το μοντέλο Wenzel περιγράφει την κατάσταση στην οποία ένα υγρό διαβρέχει παντού την τραχύτητα της επιφάνειας για να σχηματίσει μια ομοιογενή διεπιφάνεια στερεού-υγρού, ενώ το μοντέλο Cassie περιγράφει την κατάσταση στην οποία το υγρό διαβρέχει μόνο τις άνω επιφάνειες της τραχύτητας για να σχηματίσει ετερογενείς διεπιφάνειες στερεού-υγρού και υγρού-αερίου. Στο μοντέλο Wenzel, η φαινόμενη γωνία επαφής δίνεται από τη σχέση: $\cos \theta_{\text{apparent}} = r \cos \theta$, όπου r είναι ο λόγος της πραγματικής επιφάνειας επαφής υγρού-στερεού προς την προβαλλόμενη επιφάνεια και θ είναι η ενδογενής γωνία επαφής σε μια λεία επιφάνεια. Σύμφωνα με το μοντέλο Wenzel, η τραχύτητα ($r > 1$) ενισχύει την διαβροχή: δηλαδή, η τραχύτητα κάνει μια υδρόφιλη επιφάνεια πιο υδρόφιλη και μια υδρόφοβη επιφάνεια περισσότερο υδρόφοβη. Στο μοντέλο Cassie, από την άλλη πλευρά, η φαινόμενη γωνία επαφής εκφράζεται ως $\cos \theta_{\text{apparent}} = \phi_s \cos \theta - \phi_g$, όπου ϕ_s , είναι ο λόγος της επιφάνειας επαφής υγρού-στερεού προς την προβαλλόμενη επιφάνεια και ϕ_g ο λόγος της επιφάνειας επαφής υγρού-αερίου προς την προβαλλόμενη επιφάνεια. Σύμφωνα με το μοντέλο Cassie, η τραχύτητα αυξάνει πάντα την φαινόμενη γωνία επαφής και άρα η τραχύτητα κάνει οποιαδήποτε επιφάνεια λιγότερο υδρόφιλη (δηλαδή, πιο υδρόφοβη).

Παρά το γεγονός ότι και τα δύο μοντέλα Wenzel και Cassie προβλέπουν ότι η φαινόμενη γωνία επαφής γίνεται μεγαλύτερη από την πραγματική γωνία επαφής αν μια υδρόφοβη επιφάνεια έχει εκτραχυνθεί, τα αποτελέσματα ολίσθησης που αναμένονται από τα δύο μοντέλα είναι σημαντικά διαφορετικά. Η κατάσταση Cassie (ή μερικής διαβροχής) μπορεί να παράσχει σημαντική επίδραση της ολίσθησης λόγω του εγκλωβισμένου αερίου μεταξύ των δομών της

επιφάνειας. Το πολύ χαμηλότερο ιξώδες ενός αερίου σε σύγκριση με ένα υγρό (τυπικά 2-3 τάξεις μεγέθους, π.χ., ο αντίστοιχος λόγος νερού-αέρα 50, σε θερμοκρασία δωματίου) προκαλεί την ενεργό ολίσθηση ακόμη και με τη συμβατική υπόθεση της μη ολίσθησης. Σε αντίθεση, η κατάσταση Wenzel, με το υγρό να διαβρέχει συνολικά τη δομή, παρέχει μια αμελητέα ενεργό ολίσθηση, παρά τη μεγάλη φαινόμενη γωνία επαφής. Για να έχουμε μεγάλο μήκος ολίσθησης, δεν απαιτείται μόνο η ΥΦΒ επιφάνεια αλλά πρέπει επίσης η κατάσταση διαβροχής στη ροή να είναι ΥΦΒ (δηλαδή, Cassie). Ωστόσο, πρέπει να γίνει κατανοητό ότι η κατάσταση Cassie είναι απλώς μια αναγκαία προϋπόθεση για την εμφάνιση ενεργού μήκους ολίσθησης.

3.1.5 Η υψηλή γωνία επαφής δεν εξασφαλίζει μεγάλο μήκος ολίσθησης

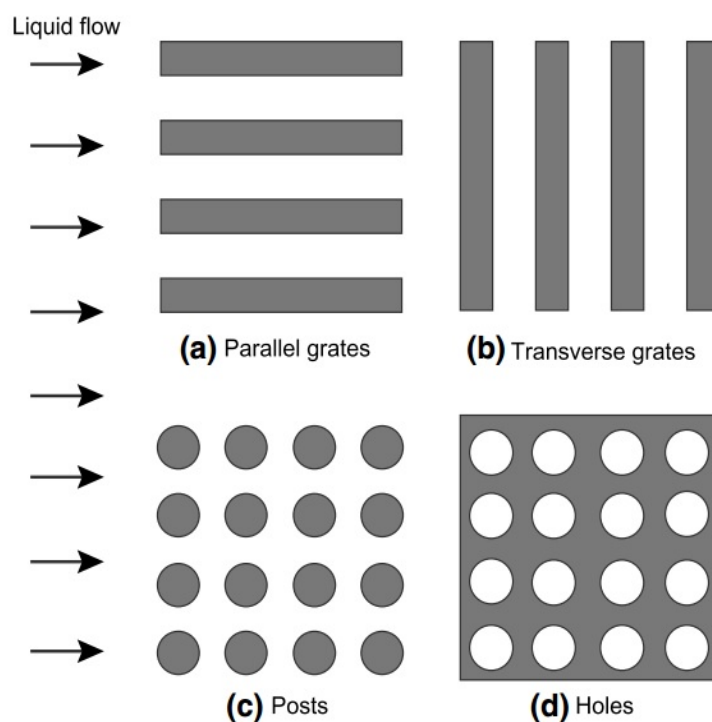
Στο σημείο αυτό πρέπει να τονισθεί ότι η φαινόμενη γωνία επαφής, η οποία είναι το πιο κοινό γνώρισμα που χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει μια ΥΦΒ επιφάνεια, δεν θα πρέπει να εκληφθεί ως το μέτρο της ολίσθησης ή μείωσης της οπισθέλκουσας. Είναι ατυχές το γεγονός ότι πολλές δημοσιεύσεις σχετικά με ΥΦΒ επιφάνειες ισχυρίζονται επιτόλαιο τη συμβολή τους στη μείωση της οπισθέλκουσας απλώς και μόνο επειδή παρουσιάζουν μεγάλη γωνία επαφής. Για παράδειγμα, σε μια ορισμένη δομή, το νερό σε κατάσταση Cassie μπορεί να έχει μια φαινόμενη γωνία επαφής περίπου 180° , αλλά μόνο ένα αμελητέο μήκος ολίσθησης. Όπως διατυπώθηκε στην προηγούμενη ενότητα, ακόμη και το νερό σε μια κατάσταση Wenzel (δηλαδή, αμελητέας ολίσθησης) μπορεί να έχει μια φαινόμενη γωνία επαφής πάνω από 150° . Αποδεικνύεται ότι η γωνία επαφής, η οποία μπορεί να μετρηθεί εύκολα και υπολογίζεται από το λόγο επαφής με το στερεό όριο σε μια επιφάνεια Cassie, είναι απλά μία από τις παραμέτρους που επηρεάζουν το μήκος ολίσθησης. Οι πρόσφατες εξελίξεις στον τομέα έχουν καταστήσει δυνατόν να προβλεφθεί ποσοτικά το μήκος ολίσθησης από τη γεωμετρία των επιφανειακών δομών, όπως θα περιγραφεί παρακάτω. Εάν είναι γνωστό, το μήκος ολίσθησης μπορεί να προβλέφθει και το ποσοστό μείωσης της οπισθέλκουσας σε ένα σύστημα με στρωτή ροή με βάση την γεωμετρία του.

3.2 Ολίσθηση σε υπερυδρόφοβες επιφάνειες: θεωρητικές προσεγγίσεις

Τα αναλυτικά μοντέλα και οι αριθμητικές προσομοιώσεις είναι χρήσιμα εργαλεία για την κατανόηση του μήκους ολίσθησης σε στρωτή ροή σε ορισμένες απλές δομές στην επιφάνεια,

όπως προεξοχές ή αυλακώσεις (Philip 1972 [30], Lauga & Stone 2003[22], πυλώνες (Ybert et al. 2007[43], Davis & Lauga 2009[9]) και οπές, (Ybert et al. 2007[43]), όπως φαίνεται στο Σχ. 3.1. Επίσης, το ύψος των δομών θεωρείται ομοιόμορφο. Σε αυτά τα μοντέλα, γενικά υποτίθεται μη ολίσθηση επί του υγρού-στερεού και συνθήκες μηδενικής διάτμησης (δηλαδή, άπειρο μήκος ολίσθησης) στην διεπιφάνεια υγρού-αέρα. Σύμφωνα με αυτές τις μελέτες, για ένα δεδομένο μοτίβο, το γεωμετρικό βήμα (δηλαδή, η περιοδικότητα των δομών επιφάνειας) και το ποσοστό επαφής με το αέριο (ή αντίστοιχα με το στερεό) είναι οι δύο σημαντικότερες παράμετροι στον καθορισμό του μήκους ολίσθησης.

3.2.1 Επίδραση των κατασκευαστικών παραμέτρων της επιφάνειας στο μήκος ολίσθησης



Σχήμα 3.1: Θεωρητικές προσεγγίσεις διαφορετικών γεωμετρικών προτύπων στην επιφάνεια. **(a)**: Αυλακώσεις παράλληλες στη ροή. **(b)**: Αυλακώσεις κάθετες στη ροή. **(c)**: Πυλώνες. **(d)**: Οπές.

Οι Lauga & Stone 2003[22] ερεύνησαν δύο απλές διαμορφώσεις μόνιμης ροής Στοκας λόγω διαφοράς πίεσης σε σωλήνα κυκλικής διατομής, του οποίου η επιφάνεια αποτελείται από περιοχές μηδενικής διατμητικής τάσης, περιοδικής τοπογραφίας. Το ενεργό μήκος ολίσθησης

της ροής εκτιμήθηκε ως συνάρτηση των βαθμών ελευθερίας που χαρακτηρίζουν την επιφάνεια, δηλαδή της σχετικής απόστασης των περιοχών ολίσθησης-μη ολίσθησης και της κατανομής τους κατά μήκος του σωλήνα. Έκαναν επίσης σύγκριση του μοντέλου με πειραματικές μελέτες σε τριχοειδή ροή και μικροκανάλια, που αναφέρουν ολίσθηση και έδωσαν μια πιθανή ερμηνεία των πειραματικών αποτελεσμάτων η οποία σχετίζεται με ένα μεγάλο αριθμό κατανεμημένων πεδίων ολίσθησης σε μικρο- και νανο-κλίμακα, όπου σχεδόν επίπεδες φυσαλίδες επικάθονται στην στερεή επιφάνεια.

Έτσι σε προεξοχές ή αυλακώσεις παράλληλες στη ροή το μήκος ολίσθησης εκφράζεται σαν συνάρτηση του ποσοστού επαφής με το αέριο και του γεωμετρικού βήματος ως εξής:

$$\frac{\delta}{L} = \frac{\ln [\sec (\pi \phi_g / 2)]}{\pi} \quad (3.1)$$

Όπου L είναι το γεωμετρικό βήμα των δομών (απόσταση από τα κέντρα δύο διαδοχικών). Σε προεξοχές κάθετες στη ροή το μήκος ολίσθησης προκύπτει να είναι το μισό σε σχέση με την παράλληλη διάταξη:

$$\frac{\delta}{L} = \frac{\ln [\sec (\pi \phi_g / 2)]}{2\pi} \quad (3.2)$$

Αναλυτικές λύσεις του μήκους ολίσθησης σε «στύλους» για μεγάλο ποσοστό διεπιφάνειας με το αέριο (π.χ. $\phi_g > 0.3$) εξήχθησαν από τους Davis & Lauga 2010 [11]:

$$\frac{\delta}{L} = \frac{3}{16} \sqrt{\frac{\pi}{(1-\phi_g)}} - \frac{3 \ln (1+\sqrt{2})}{2\pi} \quad (3.3)$$

Σε περίπτωση οπών στην επιφάνεια προκύπτει αναλυτικά μια λογαριθμική εξάρτηση του μήκους ολίσθησης από το ποσοστό διεπιφάνειας:

$$\frac{\delta}{L} = -A \ln (1-\phi_g) + B \quad (3.4)$$

Οι εκφράσεις του μήκους ολίσθησης για τις απλές δομές στην επιφάνεια του σχήματος 3.1 προβλέπουν ότι το μήκος ολίσθησης εξαρτάται αναλογικά από το γεωμετρικό βήμα και λογαριθμικά (για αυλάκια και οπές) ή αλγεβρικά (για στύλους) από το ποσοστό διεπιφάνειας με το αέριο. Ως αποτέλεσμα, το μήκος ολίσθησης σε στύλους αυξάνει πολύ πιο έντονα σε υψηλό κλάσμα αερίου σε σύγκριση με αυλακώσεις και οπές. Σε συμφωνία με τα παραπάνω οι Joseph et al. 2006 [18] παρουσίασαν πειραματική μελέτη για τον χαρακτηρισμό της ολίσθησης υγρού σε ροή πάνω σε υπερυδροφώβες επιφάνειες κατασκευασμένες από νανοσωλήνες άνθρακα, που

ενσωματώνονται σε μικροκανάλια. Χρησιμοποιήθηκε τεχνική οπτικοποίησης της ροής με διακριτική ικανότητα μικρότερη του μικρομέτρου (μ -PIV) για το πεδίο ταχυτήτων, απαραίτητη για την ακριβή μέτρηση των υδροδυναμικών ιδιοτήτων στην επιφάνεια. Παρατηρήθηκε συνθήκη ολίσθησης στην υπερυδροφόβη κατάσταση (Cassie state), που σχετίζεται με μήκη ολίσθησης μερικών μικρομέτρων, ενώ το μήκος ολίσθησης μηδενίζεται σε κατάσταση Wenzel, όταν το ρευστό διαβρέχει όλη την επιφάνεια. Μεταβάλλοντας την πλευρική τραχύτητα μεγέθους L των υπερυδροφόβων επιφανειών της επαναλαμβανόμενης τοπογραφίας νανοσωλήνων, αποδείχθηκε ότι το μήκος ολίσθησης μεταβάλλεται γραμμικά με το χαρακτηριστικό μήκος L σύμφωνα με τις θεωρητικές προβλέψεις. Ισχυρίστηκαν, επίσης, ότι η επίδραση της τραχύτητας δεν μπορεί να αγνοηθεί για τον προσδιορισμό του μήκους ολίσθησης σε τέτοιες επιφάνειες, και ως εκ τούτου, το μοντέλο κοιλότητας αερίου, παραμελώντας την συγκεκριμένη δομή και μοντελοποιώντας την διεπιφάνεια σαν ευθύγραμμο στρώμα καθαρού αερίου στο στερεό, αποτυγχάνει να ερμηνεύσει την ολίσθηση σε νανο-δομημένες επιφάνειες.

3.2.2 Δευτερεύοντες παράγοντες του μήκους ολίσθησης

Εξάρτηση του μήκους ολίσθησης από τις διατμητικές τάσεις

Οι Lauga & Stone 2003 πρότειναν τη θεώρηση εξάρτησης του ενεργού μήκους ολίσθησης από τις διατμητικές τάσεις. Σε υψηλούς βαθμούς διάτμησης και εάν το μετρούμενο μήκος ολίσθησης στο τοίχωμα οφείλεται πράγματι σε προσκολλημένες φυσαλίδες αέρα στην επιφάνεια, υποστηρίζουν ότι αυτό θα πρέπει να αναμένεται εξαρτώμενο από τον ρυθμό διάτμησης. Αυτή η εξάρτηση, ωστόσο, δεν έχει σαφώς αναφερθεί σε πειράματα ροής λόγω διαφοράς πίεσης και μόνο οι Churaev et al. 1984 αναφέρουν συνοπτικά αποτελέσματα που συμφωνούν με αυτή την ιδέα. Ωστόσο, η εξάρτηση του μήκους ολίσθησης από το ιξώδες του ρευστού που αναφέρουν οι Watanabe et al. 1999[41] και οι Cheng & Giordano 2002 [6] υποδηλώνει την πιθανή σημασία των επιφανειακών τάσεων. Για πολλές περιπτώσεις, ο αδιάστατος αριθμός τριχοειδών δυνάμεων (capillary forces) της φυσαλίδας, που ορίζεται ως $Ca = \frac{\mu \dot{\gamma} h}{\sigma}$, λαμβάνει πολύ μικρές τιμές (10^{-10} έως 10^{-4}): όπου μ είναι το ιξώδες του ρευστού, σ η επιφανειακή τάση ισορροπίας αερίου-υγρού, h το τυπικό μέγεθος των περιοχών ολίσθησης που λαμβάνονται από το μοντέλο, και $\dot{\gamma}$ ο ρυθμός διάτμησης στο τοίχωμα. Κατά συνέπεια, οι φυσαλίδες δεν θα παραμορφωθούν σημαντικά και το χαρακτηριστικό τους μέγεθος θα παραμένει σταθερό κατά μήκος της ροής. Για υψηλότερους ρυθμούς διάτμησης, ωστόσο, μόλις ο αδιάστατος αριθμός των τριχοειδών δυνάμεων αυξηθεί αρκετά $O(10^{-2})$ οι φυσαλίδες θα επιμηκυνθούν

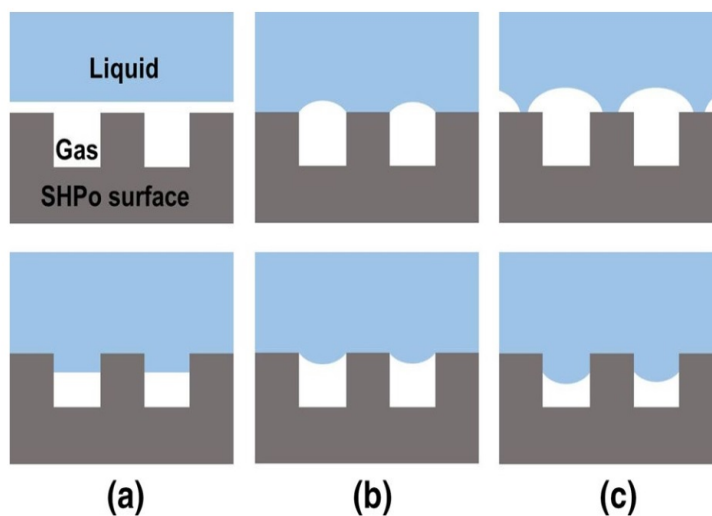
στην κατεύθυνση της ροής. Εξαιτίας αυτής της παραμόρφωσης, η περιοχή επαφής της φυσαλίδας με το τοίχωμα θα επεκταθεί (η σχετική μεταβολή της επιφάνειας εξαρτάται κυρίως και αναλογικά από τον αριθμό Ca) και ως εκ τούτου το ποσοστό δ της επιφάνειας επί της οποίας το ρευστό ολισθαίνει θα αναμενόταν να αυξηθεί. Κατά συνέπεια, το μήκος ολίσθησης, το οποίο είναι μια αύξουσα συνάρτηση του δ , θα αυξηθεί με την διάτμηση. Ένα μήκος ολίσθησης ανεξάρτητο της διάτμησης συνεπώς μπορεί να θεωρηθεί ως το όριο μηδενικής διάτμησης μιας γενικότερης συμπεριφοράς ολίσθησης, που προκύπτει σε υψηλούς ρυθμούς διάτμησης. Μια παρόμοια ιδέα έχει παλαιότερα προταθεί στο πλαίσιο προσομοιώσεων μοριακής δυναμικής από τους Thompson & Troian 1997 [37].

Σε αντιπαράθεση με την παραπάνω θεώρηση, υπάρχει και ο ισχυρισμός ότι το μήκος ολίσθησης μειώνεται καθώς ο ρυθμός διάτμησης ή η πίεση του υγρού αυξάνεται. Οι Truesdell et al. 2006 [38] παρουσίασαν πειραματική μελέτη ροής σε χαμηλούς αριθμούς Reynolds μεταξύ δύο επιφανειών, μία από τις οποίες έχει αυλακώσεις επαναλαμβανόμενης τοπογραφίας επικαλυμμένες με υπερυδροφόβο υμένιο. Μέτρησαν ταυτόχρονα τη δύναμη και το πεδίο ταχυτήτων σε άμεση γειτνίαση με την επιφάνεια (και κατά συνέπεια τις διατμητικές τάσεις στο τοίχωμα). Κατ' αυτόν τον τρόπο έγινε εφικτή η άμεση εκτίμηση του ενεργού μήκους ολίσθησης που σχετίζεται με τη μείωση της οπισθέλκουσας. Συμπεράναν ότι εντός του πειραματικού σφάλματος, το μήκος ολίσθησης δεν εξαρτάται από τις διατμητικές τάσεις. Σε άλλες περιπτώσεις η διερευνόμενη εξάρτηση μπορεί να αποδοθεί στην αυξημένη πιθανότητα μετάβασης της κατάστασης διαβροχής σε τυχαίες δομές σε υψηλότερους ρυθμούς διάτμησης και υψηλότερη πίεση του υγρού. Αρκετές μελέτες που αφορούν στην μετάβαση της κατάστασης διαβροχής σε ΥΦΒ επιφάνειες έδειξαν ότι υπάρχει πράγματι μια αυξημένη απώλεια αερίου σε υψηλούς ρυθμούς διάτμησης (Sakai et al. 2010 [32]) και πίεσης του υγρού (Poetes et al. 2010[31]).

Απόκλιση από την απλή κατάσταση Cassie

Σύμφωνα με την παραπάνω πρόβλεψη, το μήκος ολίσθησης μπορεί να θεωρηθεί ως μία ιδιότητα μίας δεδομένης επιφάνειας, με το γεωμετρικό βήμα και το κλάσμα αερίου να είναι οι μόνο καθοριστικοί παράγοντες για ένα δεδομένο μοτίβο. Αν και η συνεισφορά τους στο σχεδιασμό των ΥΦΒ επιφανειών είναι πολύ σημαντική, οι παραπάνω αναλύσεις βασίστηκαν στην παραδοχή μιας απλής (ευθυγραμμισμένης) Cassie κατάστασης (δηλαδή, $\phi_s + \phi_g = 1$) και μηνίσκο χωρίς διάτμηση. Στην πραγματικότητα, μια ΥΦΒ επιφάνεια μπορεί να μην έχει επίπεδα τμήματα προεξοχών του στερεού, η διεπιφάνεια υγρού αέρα να μην είναι επίπεδη και εντελώς μηδενικής διάτμησης. Αυτές οι αποκλίσεις επηρεάζουν περαιτέρω το μήκος ολίσθησης.

Μία διαφορά πίεσης μεταξύ του παγιδευμένου αερίου και του περιβάλλοντος υγρού θα προκαλούσε την απόκλιση της διεπιφάνειας μεταξύ υγρού αέρα από την απλή κατάσταση Cassie, όπως απεικονίζεται στο Σχ. 3.2. Η απόκλιση από την απλή κατάσταση μπορεί να θεωρηθεί ως ένας συνδυασμός (Εικ. 3c) της μετατόπισης των μηνίσκων από την κορυφή των δομών (Εικ. 3a) και της παραμόρφωσης (καμπύλωσης) των μηνίσκων από το επίπεδο σχήμα (Εικ. 3b). Αναφορικά με την κατάσταση Cassie, η μετατόπιση στις δομές σημαίνει ότι το υγρό έρχεται σε περισσότερη επαφή με το στερεό (δηλαδή, $\phi_s > 1 - \phi_g$ ακόμη και αν δεν υπάρχει παραμόρφωση), και παραμόρφωση σημαίνει ότι ο μηνίσκος έχει μεγαλύτερο εμβαδόν από το flat σχήμα (δηλαδή, $\phi_g > 1 - \phi_s$ ακόμη και αν δεν υπάρχει μετατόπιση).



Σχήμα 3.2: Πιθανές αποκλίσεις από την απλή Cassie κατάσταση. **(a)** Επίπεδος μηνίσκος μετατοπισμένος εκτός των δομών (πάνω) ή εντός των δομών (κάτω). **(b)** Μηνίσκος προσκολλημένος στην κορυφή των δομών με καμπύλη που προεξέχει των δομών (πάνω) ή εισχωρεί εντός (κάτω). **(c)**: Υπέρθωση των προηγούμενων περιπτώσεων άνω (πάνω) και κάτω (κάτω) των δομών.

Μετατόπιση μηνίσκου

Ξεκινώντας με την απόκλιση από την επίπεδη κατάσταση κατά τη μετατόπιση του μηνίσκου, όπως απεικονίζεται στο Σχ. 3.2 a, επειδή τείνει να επηρεάσει το μήκος ολίσθησης πιο σημαντικά. Εδώ, μετατόπιση σημαίνει ότι η γραμμική επαφής της διεπιφάνειας αποκολλάται από την ακμή των δομών και μετατοπίζεται μακριά από αυτήν. Αν ο μηνίσκος διεισδύει στο κενό μεταξύ των δομών (Σχήμα 3.2 a-κάτω.), το μήκος ολίσθησης θα μειωθεί σύμφωνα με τις

θεωρητικές μελέτες (Biben & Joly 2008 [2]). Αριθμητικές μελέτες δείχνουν ότι ακόμη και μια πολύ μικρή διείσδυση μπορεί να οδηγήσει σε μια μη αμελητέα μείωση του μήκους ολίσθησης. Από την άλλη πλευρά, αν ο μηνίσκος αποσπάται από τις δομές της επιφάνειας, όπως φαίνεται στο σχ. 3.2 a-πάνω, ένα ομοιόμορφο στρώμα αερίου θα παρείχε ένα πολύ μεγάλο μήκος ολίσθησης. Παρά το γεγονός ότι παρατίθεται για λόγους πληρότητας, ένα τέτοιο ομοιόμορφο στρώμα αερίου υπάρχει μόνο υποθετικά.

Παραμόρφωση μηνίσκου

Η απόκλιση από την επίπεδη κατάσταση λόγω παραμόρφωσης του μηνίσκου, όπως απεικονίζεται στο Σχ. 3.2 b, προσεγγίζεται αναλυτικά στο (Davis & Lauga 2009b [10]), όπου αποδεικνύεται ότι η παραμόρφωση μειώνει γενικά το μήκος ολίσθησης. Όταν ο μηνίσκος παραμορφώνεται προς τα κάτω, ενώ είναι προσκολλημένος στην κορυφή των δομών, οδηγεί στη μείωση του μήκους ολίσθησης (Davis & Lauga 2009b [10]). Ωστόσο, εάν ο μηνίσκος παραμορφώνεται προς τα πάνω μέσα στο υγρό παραμένοντας στην κορυφή των δομών, το μήκος ολίσθησης μπορεί να αυξηθεί ελαφρώς από αυτό της επίπεδης μορφής. Σύμφωνα με το αναλυτικό μοντέλο, η αύξηση μεγιστοποιείται σε γωνία περίπου 10° . Ωστόσο, περαιτέρω ($> 30^\circ$), η ανοδική παραμόρφωση μειώνει δραστικά το μήκος ολίσθησης, και για γωνία προεξοχής μεγαλύτερη από 60° το μήκος ολίσθησης γίνεται ακόμα και αρνητικό (δηλαδή, η αντίσταση τριβής είναι μεγαλύτερη από ότι για τη λεία επιφάνεια).

Μετατόπιση & Παραμόρφωση Μηνίσκου

Το σχήμα 3.2 c απεικονίζει την περίπτωση μετατοπισμένου και παραμορφωμένου μηνίσκου. Δεδομένου ότι ο μηνίσκος προσχωρεί στο κενό και μετατοπίζεται προς τα κάτω πιθανότατα λόγω πίεσης του υγρού, στην πραγματικότητα είναι πιθανό ταυτόχρονα να παραμορφωθεί προς τα κάτω, όπως φαίνεται στο κάτω σχήμα. Σε αυτήν την περίπτωση το σχήμα μηνίσκου αναμένεται να οδηγήσει σε μειωμένο μήκος ολίσθησης σε σχέση με την επίπεδη κατάσταση. Από την άλλη πλευρά, εάν η αποκλίνουσα γραμμή επαφής απλώνεται πάνω από την επιφάνεια των δομών (3.2 c-πάνω), για παράδειγμα, λόγω διάτμησης, όπως φαίνεται στην αριθμητική μελέτη των Gao & Feng (2009)[13], οι διογκούμενοι θύλακες αερίου μπορεί να ενισχύσουν την ολίσθηση. Επιπλέον, οι γειτονικοί θύλακες του αερίου μπορεί να συγχωνεύονται για να σχηματίσουν μεγαλύτερους και να αυξήσουν περαιτέρω την ολίσθηση, με την υποθετική περίπτωση του (a)-πάνω να είναι η ιδανική. Ενώ η συγχώνευση του αερίου δύναται να δώσει ένα πολύ μεγάλο μήκος ολίσθησης, όταν υπάρχει, είναι ασταθής και αναμένεται να υπάρχει

μόνο προσωρινά. Αυτά τα επαυξημένα στρώματα αερίου είναι πιο συχνά σε ακανόνιστες δομές.

3.3 Ακανόνιστες (τυχαίες) δομές

Παρόλο που δύσκολα ποσοτικοποιούνται, πολλές πρόσφατες θεωρητικές και αριθμητικές μελέτες έχουν διερευνήσει το μήκος ολίσθησης σε ακανόνιστα σχέδια (Feuillebois et al. 2009 [12], Vinogradova & Belyaev 2011 [39], Cottin-Bizonne et al. 2012 [8]). Οι Samaha et al. 2011 [33] έδειξαν ότι σε στύλους με τυχαία διάταξη παρατηρείται ελαφρώς πιο αυξημένη ολίσθηση σε σύγκριση με τους τακτικά τοποθετημένους για το ίδιο κλάσμα στερεού. Ωστόσο, ταυτόχρονα εμφανίζουν χαμηλότερη σταθερότητα ως προς τη μετάβαση διαβροχής, που οδηγεί σε μικρότερα μήκη ολίσθησης σε δεδομένη πίεση. Οι Cottin-Bizonne et al. [8] μελέτησαν το μήκος ολίσθησης σε μονοδιάστατες και διδιάστατες μορφοκλασματικές (fractals) δομές (με ομοιόμορφο ύψος) τόσο αναλυτικά όσο και αριθμητικά, και απέδειξαν ότι οι ιεραρχικές δομές υποαποδίδουν σε σχέση με το μήκος ολίσθησης σε σύγκριση με στύλους μιας κλίμακας για το ίδιο κλάσμα αερίου. Επίσης, σε αντίθεση με τους στύλους, το μήκος ολίσθησης δεν αυξάνει ασυμπτωτικά στις ιεραρχικές δομές ακόμα και σε απείρωσ υψηλό κλάσμα αερίου. Θα πρέπει να σημειωθεί, ωστόσο, ότι οι ιεραρχικές δομές φράκταλ είναι πιθανό να έχουν αρνητικές επιδόσεις, όταν πρόκειται για τη σταθερότητα των φυλάκων αέρα. Οι θεωρητικές μελέτες σε ακανόνιστες δομές έχουν περιοριστεί σε δομές ομοιόμορφου ύψους, ενώ στην πραγματικότητα το ύψος των δομών παίζει σημαντικό ρόλο.

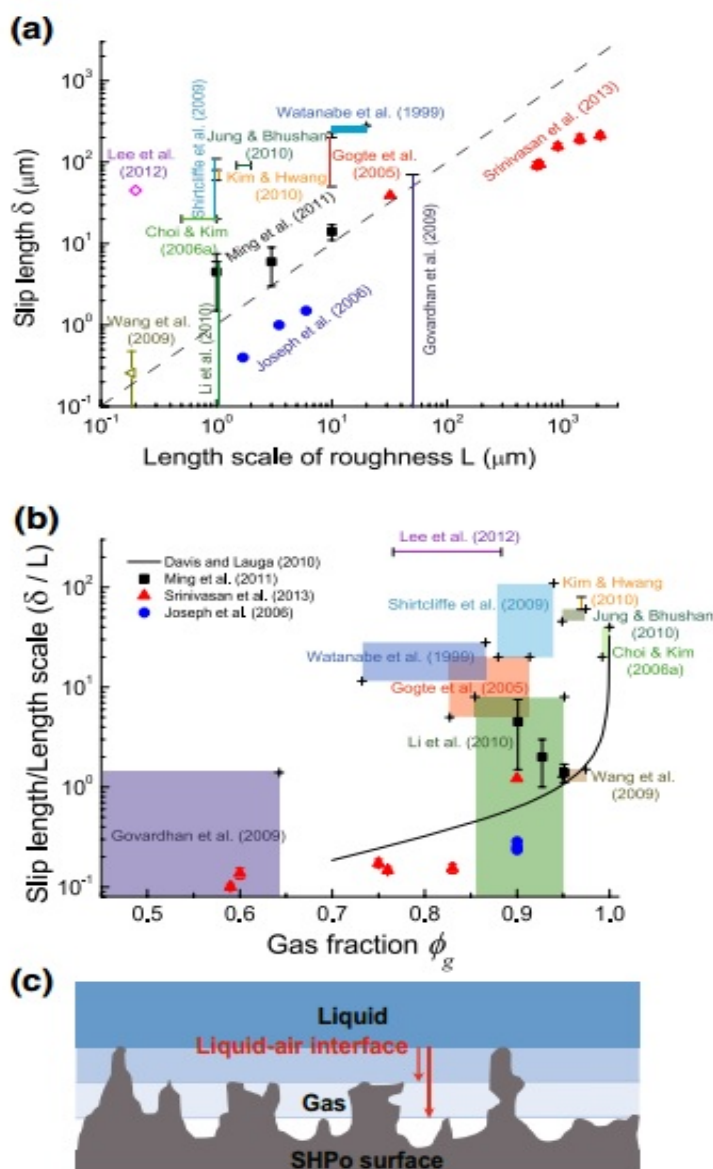
3.3.1 Μέτρηση του μήκους ολίσθησης σε τυχαία δομημένες ΥΦΒ επιφάνειες

Πολλές πειραματικές μελέτες χρησιμοποίησαν τυχαία δομημένες υδρόφοβες επιφάνειες λόγω της ευκολίας στην κατασκευή και της ιδιαίτερης σημασίας σε πρακτικές εφαρμογές. Οι επιφάνειες που μελετήθηκαν πειραματικά περιλαμβάνουν διαφορετικές διεργασίες κατασκευής, όπως εγχάραξη πυριτίου, οξείδωση μετάλλων, καλλιέργεια νανοσωλήνων - ινών και επίστρωση με ψεκασμό σωματιδίων. Παρά τη σαφή επίδραση στη μείωση της οπισθέλκουσας στις τυχαία δομημένες ΥΦΒ επιφάνειες, η μη κανονικότητα των δομών καθιστά δύσκολη την εξαγωγή των γεωμετρικών πληροφοριών, όπως το κλάσμα αέρα και το γεωμετρικό βήμα: τα δύο γεωμετρικά δεδομένα που απαιτούνται για την θεωρητική πρόβλεψη του μήκους ολίσθησης. Παρ' όλα αυτά, χρησιμοποιώντας μια πιο διερυμμένη προσέγγιση είναι εφικτό να σχηματισθεί ένα ενιαίο τοπίο (Σχ. 3.3), η οποία καλύπτει σχεδόν όλα τα αποτελέσματα στρωτής ροής στη βι-

βλιογραφία (Watanabe et al. 1999[41], Gogte et al. 2005 [14], Choi & Kim 2006[7], Joseph et al. 2006[18], Govardhan et al. 2009[15], Shirtcliffe et al. 2009[34], Wang et al. 2009[40], Jung & Bhushan 2010[19], Kim & Hwang 2010[20], Srinivasan et al. 2013[35]). Για σύγκριση με τις θεωρητικές προβλέψεις, στο Σχ. 3.3a αξιολογούνται τα πειραματικά δεδομένα σε σχέση με την διαπιστωμένη τάση ότι το μήκος ολίσθησης πρέπει να είναι ανάλογο προς το γεωμετρικό βήμα ή, για την περίπτωση των τυχαίων δομών, όπως εδώ, με το χαρακτηριστικό μήκος της τραχύτητας, δηλ. $\delta \propto O(L)$. Στη συνέχεια, στο Σχ. 3.3b συγκρίνεται το αδιάστατο μήκος ολίσθησης (δ / L) με την πρόβλεψη για στύλους σε συνάρτηση με το κλάσμα αερίου. Στις περιπτώσεις που η κλίμακα της τραχύτητας και το κλάσμα του αερίου δεν ήταν διαθέσιμα, εκτιμήθηκαν αντίστοιχα από τις εικόνες της επιφάνειας στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) και το κλάσμα αερίου από την φαινόμενη γωνία επαφής με τη χρήση της εξίσωσης Cassie-Baxter. Όταν η ενδογενής γωνία επαφής δεν ήταν διαθέσιμη, υποτέθηκε ότι λαμβάνει τιμή μεταξύ 90° και 120° . Η εκτίμηση των δεδομένων ήταν αναγκαία σε ορισμένες επιπλέον περιπτώσεις, οι οποίες ανέφεραν μόνο το ποσοστό μείωσης της οπισθέλκουσας (Gogte et al. 2005 [14], Kim & Hwang 2010 [20]). Δεδομένου ότι η μείωση δεν εξαρτάται αποκλειστικά από το μήκος ολίσθησης της επιφάνειας αλλά και από τη χαρακτηριστική κλίμακα μήκους του συστήματος της ροής ήταν αναγκαίο να συνεκτιμηθούν οι γεωμετρικές πληροφορίες της επιφάνειας. Παρά την παραπάνω αβεβαιότητα, κρίνεται ότι η ουσία του διαγράμματος αντιστοιχίζει την πιθανότητα κάποιων ελαττωματικών εκτιμήσεων.

3.3.2 Μέτρηση παροχής με μεταβολή της πτώσης πίεσης

Σε πολλές μελέτες μετράται η αύξηση της παροχής σε μια δεδομένη πτώση πίεσης μέσω ενός καναλιού, όπου τα εσωτερικά τοιχώματα είναι επιχρισμένα ή τροποποιημένα με τυχαία δομημένες ΥΦΒ επιφάνειες. Οι Watanabe et al. (1999, 2003) ανέφεραν μείωση της οπισθέλκουσας 14% χρησιμοποιώντας ένα σωλήνα επικαλυμμένο με ΥΦΒ επιφάνεια, επιβεβαιώνοντάς τη μέτρηση της ταχύτητας με την τεχνική του θερμού νήματος. Ανέφεραν μεγαλύτερη μείωση της οπισθέλκουσας σε σωλήνα με μεγαλύτερη διάμετρο (12 έναντι 6mm), πράγμα το οποίο έρχεται σε αντίθεση με την θεωρητική εκτίμηση. Επίσης, μείωση της οπισθέλκουσας παρατηρήθηκε μόνο σε στρωτή ροή και όχι όταν η ροή γίνεται τυρβώδης. Οι Shirtcliffe et al. 2009 [34] μελέτησαν τη μείωση της οπισθέλκουσας, χρησιμοποιώντας ένα σωλήνα χαλκού του οποίου το εσωτερικό είχε υποστεί οξειδωση και υδρόφοβη επικάλυψη, και ανέφεραν μείωση ολίσθησης 10 – 100μm των οποίων το μέτρο μειώνονταν με την αύξηση της παροχής. Απέδωσαν την μείωση της ολίσθησης στην εξασθενημένη σταθερότητα του στρώματος αερίου



Σχήμα 3.3: Εκτιμώμενα ή μετρηθέντα μήκη ολίσθησης σε ΥΦΒ επιφάνειες με τυχαίες δομές. (a) Το μήκος ολίσθησης συναρτήσεϊ του γεωμετρικού βήματος. Η διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στη γενική τάση $\delta = L$ (b) Αδιάστατο μήκος ολίσθησης (δ/L) ως συνάρτηση του κλάσματος αερίου. Η συνεχής γραμμή αντιστοιχεί στη θεωρητική προσέγγιση για στύλους. (c) Σχηματική απεικόνιση της σύνθετης διεπιφάνειας υγρού-αέρα σε τυχαίες δομές.

σε μεγάλες πιέσεις (δηλαδή, υψηλές παροχές). Οι Kim και Hwang 2010 [20] κατασκεύασαν σωλήνα PTFE των οποίων το εσωτερικό καλύφθηκε με νανο-ίνες και μετρήθηκε 50-65% ταχύτερης παροχής κατά μήκος του ΥΦΒ σωλήνα που αντιστοιχεί σε 60 – 80 μm μήκος ολίσθησης. Ωστόσο, απέδωσαν το ποσοστό αύξησης στη χαμηλή γωνία υστέρησης παρά στην

ολίσθηση λόγω παγιδευμένου αέρα. Οι Jung και Bhushan 2010 [19] μέτρησαν το μήκος ολίσθησης σε διάφορες ΥΦΒ επιφάνειες, συμπεριλαμβανομένων τυχαίων νανοδομών. Ανέφεραν μήκος ολίσθησης περί τα $90\mu\text{m}$ σε νανοδομές που ομοιάζουν με τα αυτοοργανωμένα φύλλα λωτού. Ωστόσο, ανέφεραν επίσης περισσότερο από $20\mu\text{m}$ μήκος ολίσθησης σε λεία επιφάνεια, γεγονός που υποδηλώνει ένα πιθανό συστηματικό σφάλμα μέτρησης.

3.3.3 Μέτρηση διατμητικών τάσεων

Σε αρκετές μελέτες μετράται άμεσα η αντίσταση τριβής ή η διατμητική τάση που ασκείται επάνω στην ΥΦΒ επιφάνεια. Οι Gogte et al. 2005 [14] ανέφεραν μείωση της αντίστασης της τάξης του 10% σε υδροτομή επικαλυμμένη με ΥΦΒ επιφάνεια. Το ποσοστό μείωσης της οπισθέλκουσας έδειξε να μειώνεται με τον αριθμό Reynolds. Οι Choi & Kim 2006 [7] χρησιμοποίησαν ένα εμπορικό ροόμετρο για τη μέτρηση του μήκους ολίσθησης σε οξείες νανο-βελόνες με κλάσμα αέρα κοντά στο 1. Ανέφεραν μήκος ολίσθησης $20\mu\text{m}$ στο νερό, γεγονός που υποδηλώνει ότι ένα μεγαλύτερο μήκος ολίσθησης σε σύγκριση με το χαρακτηριστικό γεωμετρικό βήμα των δομών θα ήταν εφικτό στην ακραία περίπτωση που το κλάσμα αέρα είναι περίπου 1, το οποίο προβλέπεται και θεωρητικά. Ακόμη, έδειξαν ότι το μήκος ολίσθησης αυξάνεται γραμμικά με το ιξώδες του υγρού, συμφωνώντας με τη θεωρητική πρόβλεψη. Περαιτέρω, οι Li et al. 2010 [26] μέτρησαν το μήκος ολίσθησης σε πυλώνες νανοσωλήνων άνθρακα χρησιμοποιώντας ένα παρόμοιο σύστημα ροομετρίας και ανέφεραν έως $6\mu\text{m}$ μήκος ολίσθησης σε χαμηλό ρυθμό διάτμησης με επίπεδο αβεβαιότητας $\pm 2\mu\text{m}$. Σε υψηλό ρυθμό διάτμησης, η επίδραση της ολίσθησης παρατηρήθηκε να εξαφανίζεται καθώς υπάρχει μετάβαση της κατάστασης διαβροχής. Σε μια άλλη μελέτη από την ίδια ομάδα (Ming et al. 2011 [27]), αποδείχθηκε ότι το μήκος ολίσθησης αυξάνει καθώς η απόσταση μεταξύ των πυλώνων γειτονικών νανοσωλήνων άνθρακα αυξάνεται, σε συμφωνία με την θεωρητική πρόβλεψη. Οι Lee et al. 2012 [25] μέτρησαν τα μήκη ολίσθησης σε νανοδομημένες επιφάνειες ZnO χρησιμοποιώντας ροομετρία παράλληλης πλάκας. Μήκη ολίσθησης περίπου $45\mu\text{m}$ μετρήθηκαν στις ΥΦΒ επιφάνειες ZnO, αλλά $20 - 30\mu\text{m}$ μήκη ολίσθησης επίσης μετρήθηκαν σε υδρόφοβες επιφάνειες, γεγονός που υποδηλώνει την πιθανότητα μιας συστηματικής πειραματικής απόκλισης. Οι Srinivasan et al. 2013 [35] μέτρησαν τα μήκη ολίσθησης σε ΥΦΒ επιφάνειες διπλής κλίμακας επικαλυμμένες με ψευκασμό χρησιμοποιώντας ροομετρία παράλληλης πλάκας ενώ παρακολουθούνταν η θέση της διεπιφανείας υγρού-αέρα σε δεδομένη πίεση. Τα αναφερόμενα μήκη ολίσθησης κυμαίνονταν μεταξύ 100 και $200\mu\text{m}$, τα οποία ήταν συγκρίσιμα με την απόσταση του πλέγματος. Οι Govardhan et al. 2009 [15] μέτρησαν την παροχή ενώ ταυτόχρονα κατέγραφαν τη διατμητική

τάση που εφαρμόζεται στο τοίχωμα και ανέφεραν υψηλότερη παροχή στην ΥΦΒ επιφάνεια από ό, τι σε υδρόφιλη για την ίδια διατμητική τάση. Το μέγιστο μήκος ολίσθησης στη μελέτη τους ήταν περίπου $50 \mu m$, παρόμοιο με την κλίμακα της τραχύτητας στην επιφάνεια. Βρήκαν επίσης ότι το μήκος ολίσθησης μειώνεται εκθετικά με το χρόνο με χαρακτηριστικό χρόνο περίπου 1 ώρα. Απέδωσαν την μείωση του μήκους ολίσθησης σε σταδιακή απώλεια του αερίου από την επιφάνεια. Πρόσφατα, ο Bhushan και οι συνεργάτες του χρησιμοποίησαν την τεχνική AFM για τη μέτρηση του μήκους ολίσθησης σε υδρόφιλες, υδρόφοβες, και ΥΦΒ επιφάνειες, και ανέφεραν περίπου $250 nm$ μήκος ολίσθησης για τις τελευταίες, το οποίο είναι συγκρίσιμο με την κλίμακα μήκους της τραχύτητάς τους.

3.3.4 Συμπερασματικά

Τα αποτελέσματα περιοδικών συστοιχιών από στύλους επιβεβαιωμένα τόσο θεωρητικά (Davis & Lauga 2010) όσο και πειραματικά (Lee et al. 2008[23]) υποδεικνύουν ότι το μήκος ολίσθησης είναι μικρότερο από το γεωμετρικό βήμα και γίνεται συγκρίσιμο με αυτό, δηλαδή, $\delta/L \rightarrow 1$, μόνο με μεγάλο κλάσμα αερίου (π.χ., $\delta > 0.9$). Παρά το γεγονός ότι είναι αποδεδειγμένο για τακτικές δομές, είναι πολύ πιθανό η ίδια τάση να ισχύει και για τυχαίες δομές. Ωστόσο, τα αποτελέσματα με τυχαίες δομές δείχνουν ότι πολλά από τα υπάρχοντα στοιχεία βρίσκονται πολύ πάνω από την αναφερόμενη (διακεκομμένη) γραμμή $\delta = L$ (Εικ. 3.3 a) ή το προβλεπόμενο μήκος ολίσθησης για δεδομένο ποσοστό αερίου (Σχήμα β). Τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να αποδοθούν εν μέρει στην πιθανότητα ενός διογκούμενου *plastron*, όπου το υγρό έρχεται σε επαφή μόνο με τις ψηλότερες δομές της επιφάνειας, όπως απεικονίζεται στο Σχ.γ, καθιστώντας το προκύπτον γεωμετρικό βήμα πολύ μεγαλύτερο σε σχέση με το εκτιμώμενο από τις εικόνες SEM. Ωστόσο, κάτι τέτοιο θα είναι μόνο προσωρινό, καθώς η πίεση του υγρού θα αυξήσει σύντομα την επιφάνεια επαφής (δηλαδή, μειώνεται το κλάσμα αερίου) και αντίστοιχα το βήμα για την εξισορρόπηση της πίεσης. Αυτή η τάση επιδείνωσης της μείωσης της αντίστασης με την πάροδο του χρόνου ή σε υψηλές ταχύτητες ροής αναφέρεται συστηματικά σε πολλά πειράματα που χρησιμοποιούν τυχαία δομημένες επιφάνειες.

Όταν υπάρχει μεγάλη απόκλιση μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και της θεωρητικής πρόβλεψης, υπάρχει η υποψία συστηματικού σφάλματος ή απόκλισης στα πειράματα, ιδιαίτερα όταν μια αισθητή επίδραση της ολίσθησης μετριέται επίσης σε λείες επιφάνειες. Στην περίπτωση των μετρήσεων ολίσθησης χρησιμοποιώντας μικροκανάλια με τυχαίες δομές, θα ήταν δύσκολο να προσδιορίσει κανείς με ακρίβεια την εσωτερική διάμετρο ή το ύψος του καναλιού λόγω του στοχαστικού χαρακτήρα των δομών της επιφάνειας. Επιπλέον, η παραμόρφωση του

καναλιού κάτω από την πίεση του υγρού ενδέχεται να επηρεάζει τις μετρήσεις των ταχυτήτων. Ακόμη και μια μικρή παραμόρφωση μπορεί να επηρεάζει την τιμή του μήκους ολίσθησης λόγω του μικρού μεγέθους της εγκατάστασης και των μικρών παροχών.

3.4 Τι εμποδίζει την επιτυχία

Οι αδιαμφισβήτητα μεγάλες αποκλίσεις που βρέθηκαν σε πολλές ΥΦΒ επιφάνειες τα τελευταία χρόνια έχουν αυξήσει την προσδοκία ότι μπορεί τελικά να επιτευχθεί μείωση της οπισθέλκουσας σε ρευστομηχανικές εφαρμογές, π.χ., στις θαλάσσιες μεταφορές. Δυστυχώς, κάτι τέτοιο μέχρι στιγμής δεν έχει γίνει για διάφορους λόγους (Lee et al. 2016[24]). Φεύγοντας από την κατασκευή των επιφανειών και την οικονομία της εφαρμογής τους στο μέλλον, από την μέχρι στιγμής εμπειρία εντοπίζεται ένα ουσιαστικό ζήτημα: οι ΥΦΒ επιφάνειες χάνουν το παγιδευμένο αέριο, στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές.

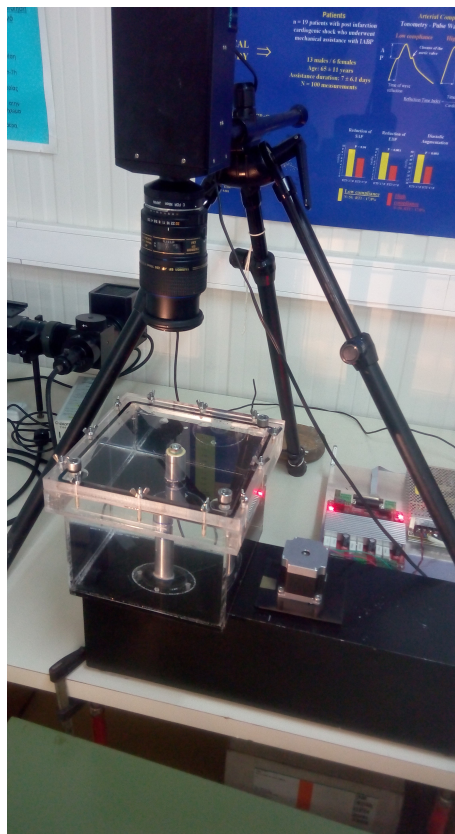
Για την αισθητή μείωση της οπισθέλκουσας σε ρευστομηχανικά συστήματα μεγάλης κλίμακας (π.χ. πλοία), η επιφάνεια πρέπει να είναι σε θέση όχι μόνο να παρέχει ένα αρκετά μεγάλο μήκος ολίσθησης, αλλά να διατηρεί ταυτόχρονα και τον εγκλωβισμένο αέρα κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της. Ένα μήκος ολίσθησης της τάξης των $10 - 100\mu\text{m}$ είναι απαραίτητο για τις περισσότερες εφαρμογές σε μακρο-κλίμακα, θεωρώντας ένα τυπικό πάχος οριακού στρώματος της τάξης του ενός χιλιοστού. Παραπάνω συζητήθηκαν οι πρόσφατες εξελίξεις στη βιβλιογραφία, που είναι ιδιαίτερα κατατοπιστικές σε σχέση με τον σχεδιασμό ΥΦΒ επιφανειών μεγάλης ολίσθησης. Ως γενικός κανόνας, απαιτείται γεωμετρικό βήμα συγκρίσιμο με το επιθυμητό μήκος ολίσθησης, πράγμα που σημαίνει ότι δομές μικρο (όχι νανο-κλίμακας), είτε τακτικές είτε τυχαίες, είναι αναγκαίες για μήκος ολίσθησης στην περιοχή των $10 - 100\mu\text{m}$.

Κεφάλαιο 4

Πειραματική Διάταξη και Εξοπλισμός

4.1 Πειραματική Διάταξη

Διεξήχθησαν μετρήσεις της ταχύτητας της ροής νερού κοντά σε στρεφόμενο κύλινδρο διαμέτρου 25mm σε κλειστή δεξαμενή τετραγωνικής διατομής με τη μέθοδο PIV (Particle Image Velocimetry), ο οποίος είχε καλυφθεί με διάφορες μεμβράνες διαφορετικής τραχύτητας, υδροφοβικότητας και υδροφιλικότητας. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε κατάλληλη πειραματική διάταξη δεξαμενής - κυλίνδρου - συστήματος μετάδοσης κίνησης με έλεγχο στροφών. Η καταγραφή του πεδίου ταχύτητας έγινε στο μέσο του ύψους της δεξαμενής για διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής (shear-rates) του κυλίνδρου. Στην επόμενη ενότητα περιγράφονται αναλυτικά ο εξοπλισμός του πειράματος, η διαδικασία κατασκευής των επιφανειών καθώς και οι συνιστώσες του συστήματος PIV (παλλόμενο Laser, αερόψυκτη CCD κάμερα, ηλεκτρονικός συγχρονιστής). Η τελική διάταξη των επιμέρους συνιστωσών κατά τη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων που αναφέρονται σε αυτήν την εργασία φαίνεται στο Σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1: Πειραματική Διάταξη

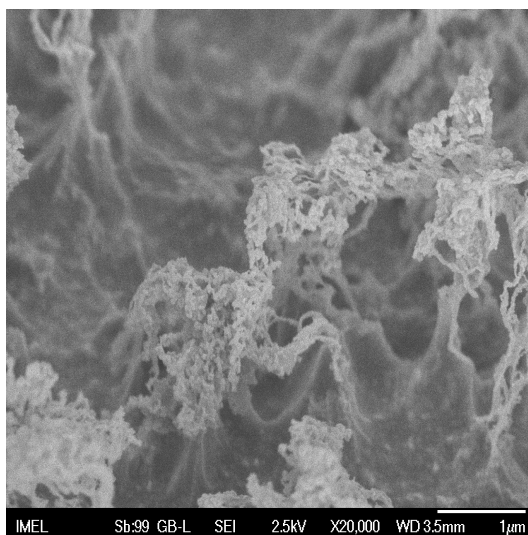
4.2 Διεργασία Πλάσματος για την Κατασκευή Υπερδρόφροβων Επιφανειών σε Πολυμερή κυκλο-ολεφίνης (COP)

Οι βασικές κατηγορίες των κατεργασιών τις οποίες μπορεί να επιτελέσει μια ηλεκτρική εκκένωση πλάσματος είναι: (α) εγχάραξη (plasma etching), απομάχρυνση δηλαδή κάποιας ποσότητας υλικού, (β) απόθεση (plasma deposition), δημιουργία δηλαδή ενός υμενίου υλικού πάνω σε ένα άλλο υλικό και (γ) τροποποίηση (plasma treatment), μεταβολή δηλαδή των επιφανειακών χαρακτηριστικών (π.χ. της χημείας) ενός υλικού. Τελευταία έχει προστεθεί και μια ακόμη κατηγορία, (δ) νανοδόμηση (nanotexturing), δημιουργία δηλαδή νάνο-δομών στην επιφάνεια είτε με εγχάραξη είτε με απόθεση.

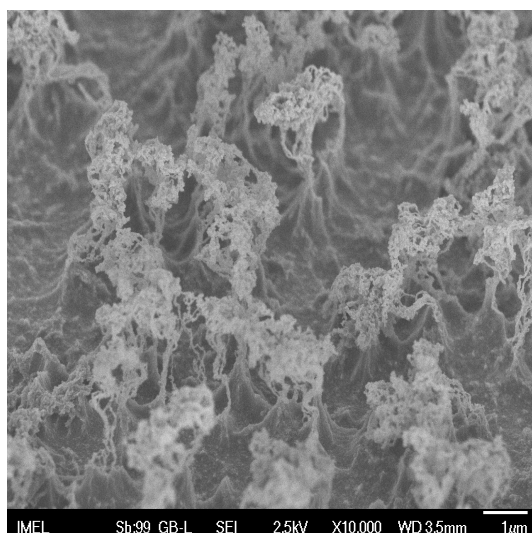
Για την εγχάραξη πολυμερών χρησιμοποιούνται συνήθως αντιδραστήρες RIE (Reactive Ion Etching), εξ ου και η ονομασία RIE etching, στα 13.56MHz ή αντιδραστήρες ECR (Electron-Cyclotron-Resonance) στα 2.45GHz ή ICP (Inductively Coupled Plasma) ή και Helicon στα 13.56MHz . Στις τρεις τελευταίες περιπτώσεις η ενέργεια βομβαρδισμού μπορεί να

ρυθμίζεται ανεξάρτητα από την ισχύ του πλάσματος με μια χωρητικά συζευγμένη rf γεννήτρια (π.χ. στα 13.56MHz). Τα συστατικά της αέριας φάσης που οδηγούν σε εγχάραξη είναι: (α) τα ιόντα και (β) τα ενεργά ουδέτερα συστατικά. Τα ενεργά ουδέτερα συστατικά -ελεύθερες ρίζες ως επί τω πλείστον- είναι υπεύθυνα για τη χημική συνιστώσα μιας διεργασίας εγχάραξης (chemical etching), ενώ τα ιόντα είναι υπεύθυνα για τη φυσική συνιστώσα (physical etching, sputtering). Τα συστατικά από κάθε κατηγορία μπορούν και δρουν ανεξάρτητα το ένα από το άλλο ή και συνεργιστικά. Όταν τα ουδέτερα συστατικά δρουν μόνα τους τότε η εγχάραξη καλείται χημική εγχάραξη, αντιθέτως όταν τα ιόντα δρουν μόνα τους καλείται φυσική εγχάραξη ή ιονοβολή ενώ όταν ιόντα και ουδέτερα δρουν συνεργιστικά τότε καλείται υποβοηθούμενη από ιόντα εγχάραξη.

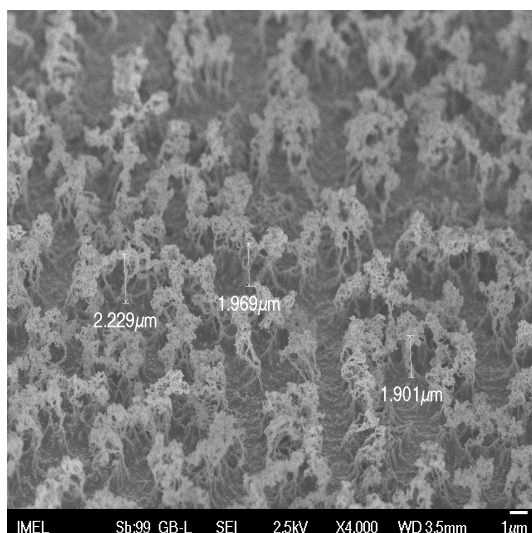
Η κατασκευή της SH επιφάνειας πραγματοποιείται σε δυο βήματα στα Εργαστήρια του Τομέα Μικροηλεκτρονικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. 'Δ'. Το πρώτο αποσκοπεί στη δημιουργία κατασκευής επιφανειακής τοπογραφίας High Aspect Ratio και το δεύτερο στην απόθεση πολυμερικού φθοροανθρακικού (fluorocarbon, FC, Teflon-like) υμενίου χαμηλής επιφανειακής ενέργειας. Για το στάδιο της κατασκευής της επιφανειακής μορφολογίας το ζητούμενο είναι η κατασκευή επιφανειακής τραχύτητας με μεγάλο RMS και υψηλό δείκτη HAR με πλάσμα Οξυγόνου. Το δεύτερο βήμα εκτελείται με χρήση spin coating για την απόθεση υμενίου Teflon πολυμερούς με πάχος < 10nm. Η επιφάνεια του COP μετά από 20min κατεργασίας εμφανίζει και χαρακτηριστικά τύπου βελόνας - δυο κλίμακες τραχύτητας (Σχ.4.2,4.3,4.4), όπως προκύπτει και από την κατανομή των υψών.



Σχήμα 4.2: Εικόνα SEM α



Σχήμα 4.3: Εικόνα SEM β

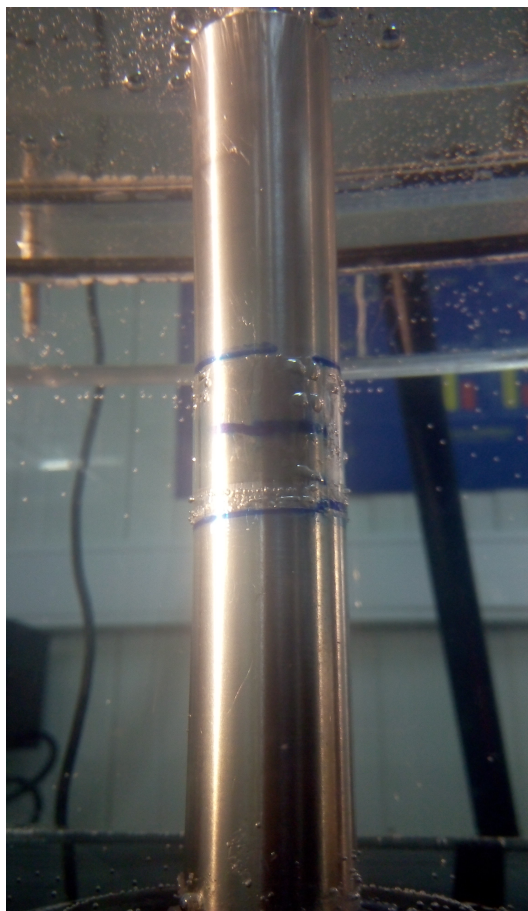


Σχήμα 4.4: Εικόνα SEM γ

4.3 Εξοπλισμός

4.3.1 Δεξαμενή - Κύλινδρος

Αρχικά κατασκευάστηκε κύλινδρος από αλουμίνιο (Σχήμα 4.5) διαμέτρου $D = 15mm$. Στη συνέχεια η διάμετρος του κυλίνδρου επιλέχθηκε να αυξηθεί σε $D = 25mm$, ώστε η επαφή των επιφανειών (untreated COP ή SH) να γίνεται σε μεγαλύτερη ακτίνα καμπυλότητας και να αποφευχθούν ανομοιομορφίες κατά την κόλλησή τους στην επιφάνεια του κυλίνδρου. Το μήκος του κυλίνδρου είναι $15cm$.

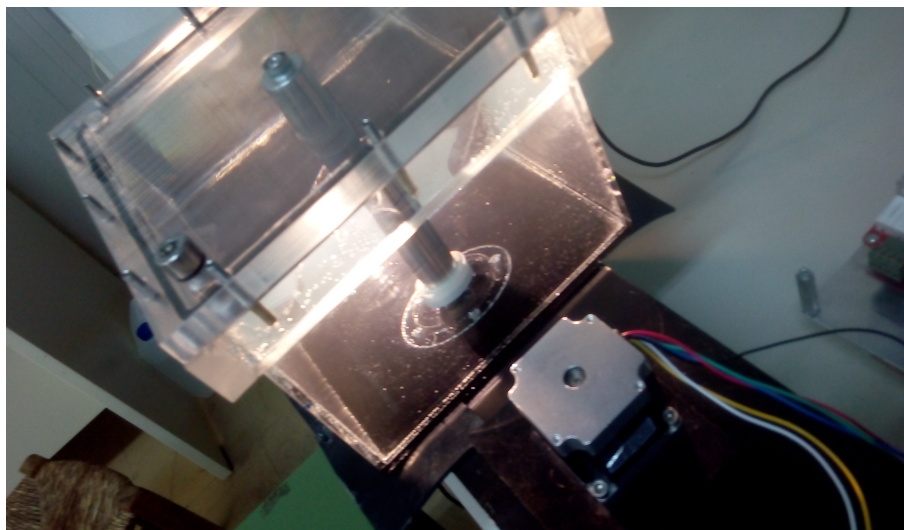


Σχήμα 4.5: Ο κύλινδρος τοποθετημένος εντός της δεξαμενής

Κατασκευάστηκε, επίσης, μικρή **δεξαμενή από plexiglass** τετραγωνικής διατομής αρχικά $10 \times 10\text{cm}$ και ύψους 15cm . Παράλληλα όμως με την επιλογή μεγαλύτερης διαμέτρου για τον κύλινδρο επιλέχθηκε και η χρήση δεξαμενής μεγαλύτερης διατομής (Σχήμα 4.6) με τελικές διαστάσεις $15 \times 15\text{cm}$ και διατηρώντας το ίδιο ύψος.

Στην πρώτη φάση του πειράματος η δεξαμενή ήταν ανοικτή και η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας του νερού σε κάθε μέτρηση στα 8cm , ενώ το άνω άκρο του κυλίνδρου παρέμενε ελεύθερο. Σε αυτήν την περίπτωση και ιδιαίτερα σε υψηλές στροφές παρατηρήθηκε κυματισμός της ελεύθερης επιφάνειας, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται φαινόμενα ανάκλασης του φωτός που επηρεάζουν την καλή λειτουργία της τεχνικής PIV. Ένα ακόμη ζήτημα που αντιμετωπίστηκε ήταν η περιοδική μετατόπιση του ελεύθερου άκρου του κυλίνδρου ($< 1\text{mm}$), λόγω εκκεντρότητας του άξονα, η οποία ενδεχομένως να προκαλούσε διαταραχές στη ροή και τη μετατόπιση του σταθερού σημείου αναφοράς της εικόνας.

Με βάση τα παραπάνω κρίθηκε αναγκαία η προσθήκη καλύμματος Plexiglass στη δεξαμενή



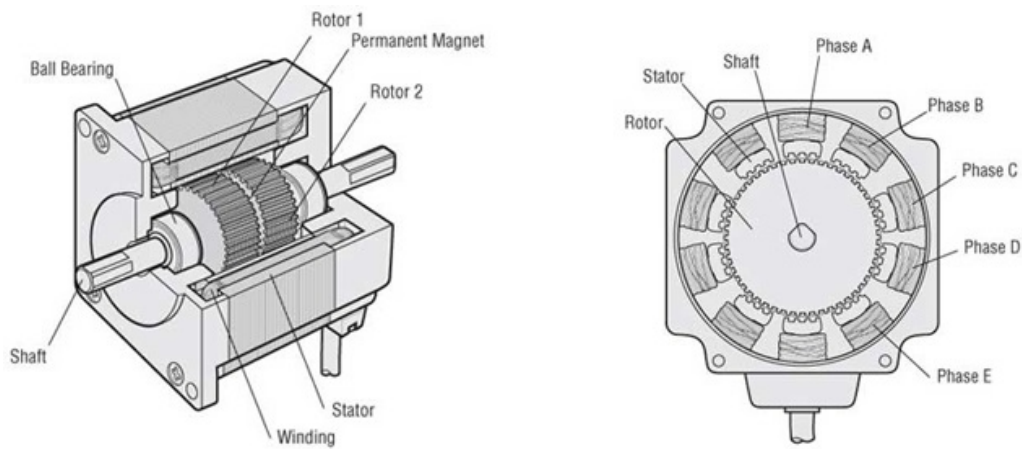
Σχήμα 4.6: Η τελική διαμόρφωση της δεξαμενής

με ενσωματωμένο ρουλεμάν για την έδραση του άνω άκρου του κυλίνδρου, το οποίο επέτρεπε την πλήρωση ολόκληρης της δεξαμενής με νερό και την αποφυγή της έκκεντρης κίνησης. Το κάλυμμα της δεξαμενής κλείνει με μια σειρά σπειρωμάτων και περικοχλίων για την αεροστεγή σφράγιση, καθώς επίσης φέρει και βαλβίδες για την εξισορρόπηση της πίεσης με την ατμοσφαιρική, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.6.

4.3.2 Σύστημα Μετάδοσης Κίνησης

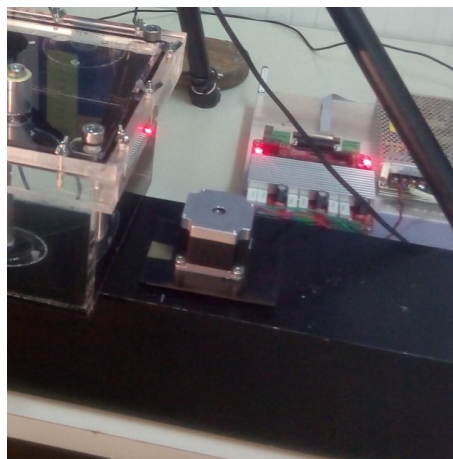
Στη συγκεκριμένη διάταξη για την περιστροφή του κυλίνδρου επιλέξαμε βηματικό κινητήρα (Σχήμα 4.8) για τη διεξαγωγή του πειράματος. Οι **βηματικοί κινητήρες** είναι κινητήρες (Σχήμα 4.7) αρκετά διαφορετικοί από τους υπόλοιπους (συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος). Η οδήγησή τους μετατρέπει ψηφιακές εντολές σε διακριτούς παλμούς τάσης συνεχούς ρεύματος. Οι κινητήρες με τη σειρά τους μετατρέπουν τους παλμούς τάσης συνεχούς ρεύματος σε διακριτή γωνιακή μετατόπιση του δρομέα ή **γωνιακό βήμα (step)**. Αυτό επιτυγχάνεται με τη διέγερση των κατάλληλων τυλιγμάτων του στάτη. Είναι κυρίως κινητήρες γωνιακής θέσης και όχι στροφών και η ταχύτητα του δρομέα μπορεί να ρυθμισθεί αυξάνοντας τη συχνότητα των παλμών τάσης. Ανάλογα με το συνδυασμό γωνιακού βήματος και αριθμού παλμών προκύπτει η γωνιακή ταχύτητα. Χρησιμοποιούν συνήθως 50 έως 100 πόλους, ενώ χαρακτηριστικοί σερβοκινητήρες έχουν μόνο 4 έως 12 πόλους. Ένας μαγνητικός πόλος παράγεται είτε από μόνιμο μαγνήτη ή με τη διέλευση ρεύματος μέσω των τυλιγμάτων των πηνίων. Οι βηματικοί κινητήρες δεν απαιτούν κωδικοποιητές, δεδομένου ότι μπορούν να κινούνται με ακρίβεια

μεταξύ των πόλων, σε σχέση με τους σερβοκινητήρες που απαιτούν έναν κωδικοποιητή για να παρακολουθείτε τη θέση τους.



Σχήμα 4.7: Δομικό διάγραμμα βηματικού κινητήρα

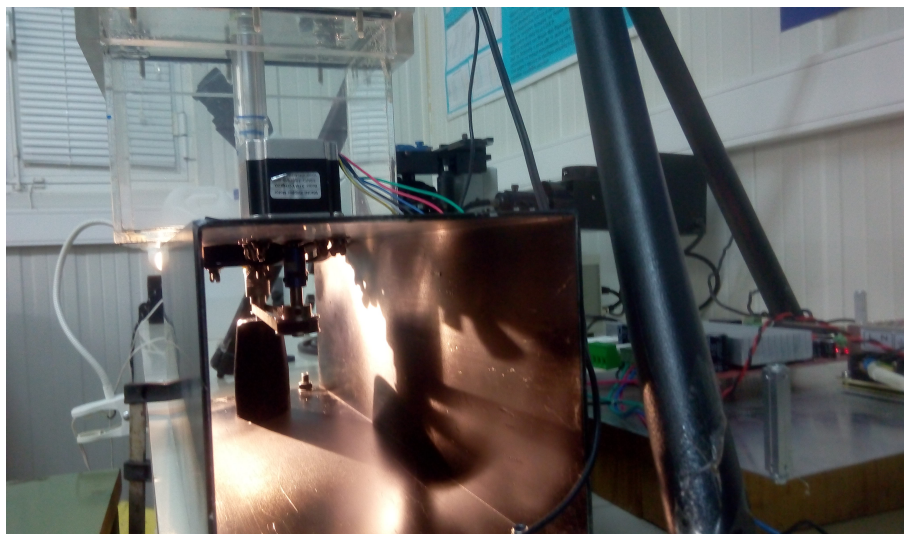
Αρχικά ο άξονας του κινητήρα ήταν απευθείας συζευγμένος με τον κύλινδρο και τοποθετημένος κάτω από την δεξαμενή ($60 - 300RPM$). Για την πληρέστερη μελέτη του πειράματος σε μεγαλύτερο εύρος γωνιακών ταχυτήτων ($10 - 600RPM$), κατασκευάστηκε σύστημα αύξησης στροφών (Σχήμα 4.9) με συνδυασμό τροχαλιών και ιμάντα το οποίο τοποθετήθηκε μέσα σε μεταλλικό πλαίσιο κάτω από την δεξαμενή. Το συγκεκριμένο σύστημα αυξάνει 2.5 φορές τις στροφές του βηματικού κινητήρα.



Σχήμα 4.8: Βηματικός κινητήρας & Driver

Στο σημείο σύνδεσης του κυλίνδρου με το σύστημα κίνησης τοποθετήθηκε δακτύλιος στεγανότητας (o-ring) για την αποφυγή εισχώρησης φυσαλίδων αέρα και τη διαρροή του ρευστού. Ακόμη προστέθηκαν ελαστικά φύλλα στα σημεία επαφής της δεξαμενής και του

βηματικού κινητήρα με το μεταλλικό πλαίσιο για την απορρόφηση των κραδασμών, καθώς επίσης και σφιγκτήρες για την ακλόνητη συγκράτηση της κατασκευής.



Σχήμα 4.9: Σύστημα αύξησης στροφών

4.4 Particle Image Velocimetry System

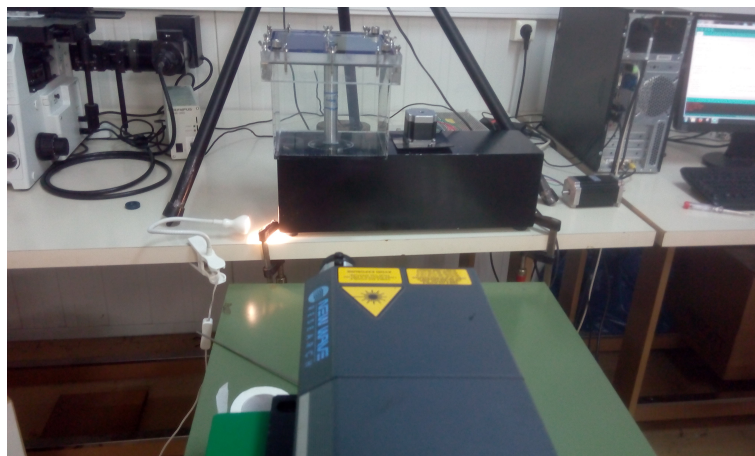
Ένα σύστημα PIV συνήθως αποτελείται από πολλά επιμέρους συστήματα [4]. Στις περισσότερες εφαρμογές πρέπει να προστεθούν στη ροή σωματίδια ιχνηθέτησης. Η ακτινοβολία που εκπέμπει το **Laser** (Σχήμα 4.10) σε ένα οριζόντιο επίπεδο της ροής προσπίπτει σε κάθε σωματίδιο δύο φορές μέσα σε σύντομο χρονικό διάστημα, το οποίο στην παρούσα πειραματική μελέτη μεταβάλλεται προκειμένου η μέγιστη μετατόπιση των σωματιδίων της ροής (πολύ κοντά στον κύλινδρο) να μην ξεπερνάει το 1/4 του μήκους του παραθύρου ολοκλήρωσης (interrogation window: 64×64 pixel). Παρακάτω (Πίνακας 4.1) παρατίθενται η περιφερειακή ταχύτητα του κυλίνδρου στο στερεό όριο καθώς επίσης και η χρονική απόσταση ακτινοβολίας του Laser μεταξύ δύο διαδοχικών παλμών για τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν.

Το φως (Nd: YAG Laser) που σκεδάζεται από τα σωματίδια (γυάλινα σφαιρίδια διαμέτρου $10\mu m$ πυκνότητας $1.1kg/L$) καταγράφεται σε δύο διαδοχικά στιγμιότυπα (frames) και η μετατόπιση των εικόνων των σωματιδίων μεταξύ των δύο παλμών φωτός υπολογίζεται με την τεχνική της ετεροσυσχέτισης (cross-correlation) [17]. Το Σχήμα 4.11 δείχνει μια τυπική πειραματική διάταξη ενός συστήματος PIV.

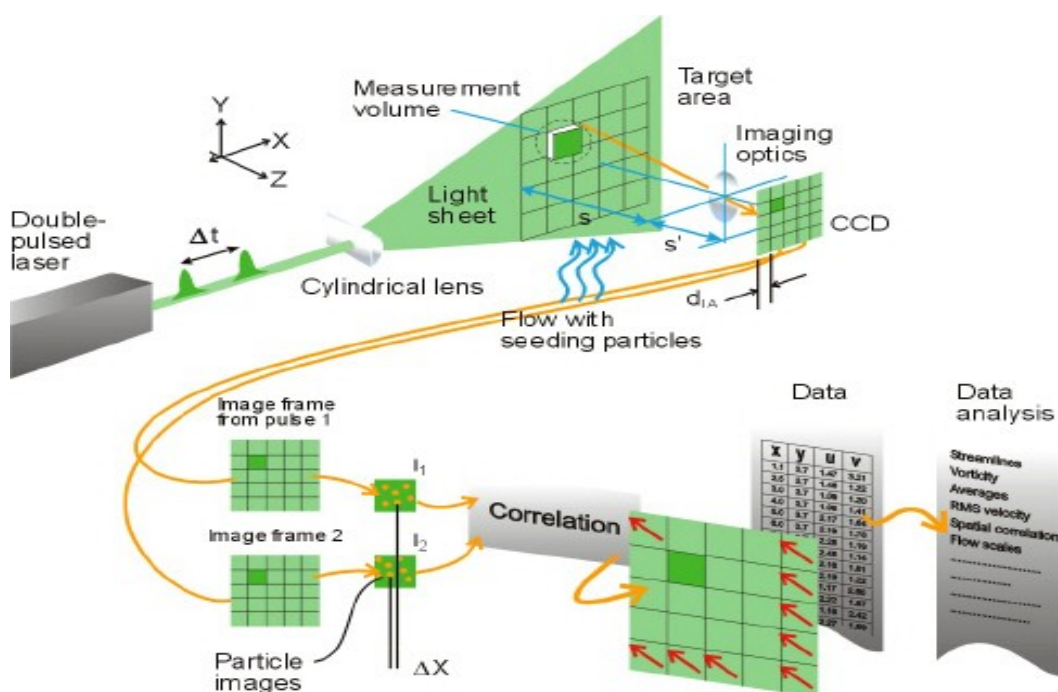
Το σύστημα PIV περιλαμβάνει επίσης ένα Laser Nd:YAG (neodymium-doped yttrium aluminium garnet; $Nd:Y_3Al_5O_{12}$, NewWave Research) με μήκος κύματος $\lambda = 532nm$ και

RPM	$\omega R(\text{mm/sec})$	Laser Pulse $dT(\mu\text{sec})$
10	13.27	8000
20	26.55	4000
30	39.82	3000
40	53.09	2200
60	79.64	2000
100	132.73	1200
150	199.10	1200
200	265.46	1200
250	331.83	1200
300	398.20	1200
350	464.56	1000
400	530.93	1000
450	597.30	500
500	663.66	500
550	730.03	300
600	796.39	300

Πίνακας 4.1: Κατηγοριοποίηση περιπτώσεων πειραματικών μελετών



Σχήμα 4.10: Τοποθέτηση Laser στην παρούσα διάταξη



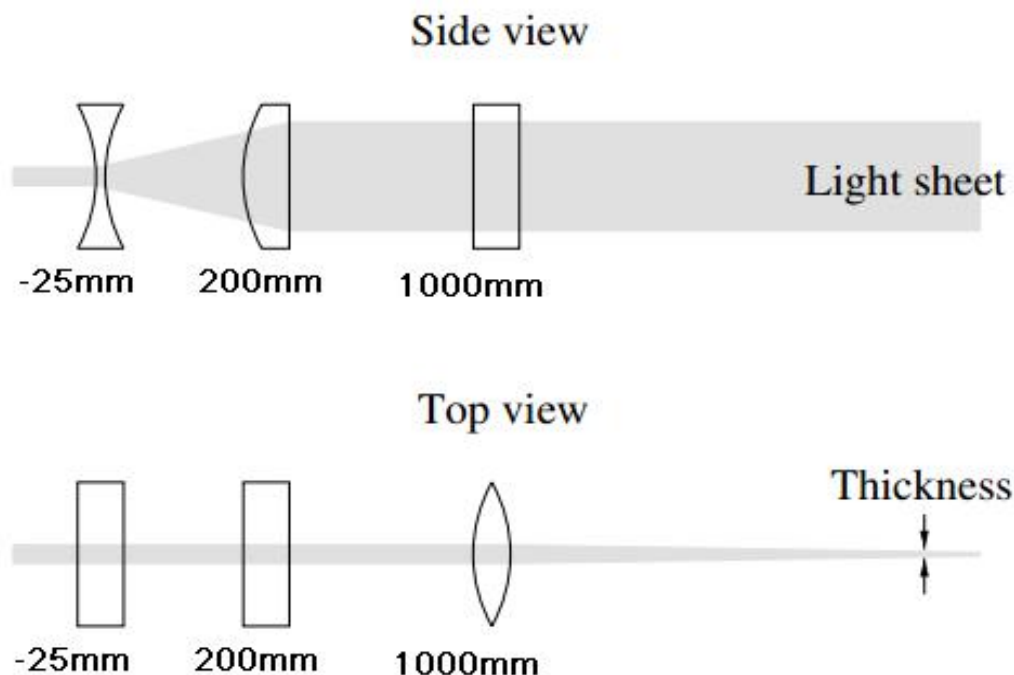
Σχήμα 4.11: Τυπική Πειραματική Διάταξη Συστήματος PIV

ενέργεια $30mJ/\text{παλμός}$. Αυτοί οι τύποι Laser είναι από τα πιο συνηθισμένα Laser στερεάς κατάστασης για PIV, στα οποία η δέσμη δημιουργείται από ιόντα Nd^{3+} . Τα Nd:YAG Laser έχουν υψηλή ενίσχυση και καλές μηχανικές και θερμικές ιδιότητες. Η διέγερση επιτυγχάνεται με τη μέθοδο οπτικής άντλησης (optical pumping) σε ευρείες ζώνες ενέργειας και μη-ακτινοβόλουσα μεταβάση στο ανώτερο επίπεδο. Τα σωματίδια καταγράφηκαν από αερόψυκτη κάμερα CCD (PowerView 1.4MP, 1376×1040 pixels). Η κάμερα και το Laser βρισκόνταν σε συγχρονισμό μέσω του συγχρονιστή (TSI model 610036).

Για την **οπτική** του προσπίπτοντος φωτός στα σωματίδια του ρευστού χρησιμοποιούνται φακοί που μετατρέπουν την εξερχόμενη δέσμη σε λεπτά “φύλλα” φωτός [4] (βλέπε Σχήμα 4.12). Υψηλότερες ενέργειες παλμού μπορεί να επιτευχθούν με τη χρήση καθρέφτη σε αρθρωτό βραχίονα που επιτρέπει ελεγχόμενο φωτισμό της ανακλώμενης δέσμης. Ο συγκεκριμένος τρόπος εκπομπής της δέσμης είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός ώστε η συσκευή του Laser να τοποθετείται μακριά από το πείραμα και να μην παρεμβαίνει στην τοπολογία και τη διαμόρφωση του πεδίου ροής. Η προσθήκη του παραπάνω συστήματος οπτικής συμβάλει σε ένα ευέλικτο και αυτόνομο σύστημα φωτισμού που μπορεί να προσφέρει με ασφάλεια παλμούς υψηλής ισχύος. Στις περισσότερες περιπτώσεις αυτό προσδίδει στο διερχόμενο “φύλλο” φωτός έξι βαθμούς ελευθερία. Το ουσιώδες στοιχείο για την παραγωγή ενός λεπτού φύλλου είναι ο κυλινδρικός φακός. Κατά τη χρήση λέιζερ με αρκετά μικρή διάμετρο δέσμης και απόκλιση - όπως για παράδειγμα λέιζερ ιόντων αργού - ένας κυλινδρικός φακός μπορεί να είναι επαρκής για να δημιουργήσει ένα λεπτό φύλλο κατάλληλου σχήματος. Για άλλες πηγές φωτός - όπως για παράδειγμα Nd:YAG Laser - ένας συνδυασμός διαφορετικών φακών απαιτείται συνήθως για να δημιουργήσει λεπτά φύλλα υψηλής έντασης. Τουλάχιστον ένας επιπρόσθετος φακός χρησιμοποιείται στη συνέχεια για την εστίαση του φωτός σε κατάλληλο πάχος. Μια τέτοια διαμόρφωση παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.12, όπου έχει ακόμη προστεθεί ένας τρίτος κυλινδρικός φακός, προκειμένου να δημιουργήσει το φύλλο σταθερού ύψους.

Η θέση του ελάχιστου πάχους προκύπτει από την απόκλιση της δέσμης της πηγής και το εστιακό μήκος του κυλινδρικού φακού στο μέσο του. Η προσαρμογή του ύψους της εξερχόμενης ακτίνας πρέπει να γίνει αλλάζοντας κυλινδρικό φακό, ενώ ρύθμιση του πάχους μπορεί να προκύψει με τη σχετική μετατόπιση των σφαιρικών φακών. Τέλος η γωνία κλίσης των φακών ρυθμίζεται έτσι ώστε να αποφευχθούν οι ανακλάσεις σε άλλα λέιζερ ή προς το λέιζερ.

Ένας ενεργός **αισθητήρας εικονοστοιχείων** pixel είναι ένας αισθητήρας εικόνας που αποτελείται από ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα. Το κύκλωμα αυτό περιέχει μία συστοιχία αισθητήρων pixel, όπου κάθε εικονοστοιχείο αποτελείται από έναν φωτογραφικό ανιχνευτή και έναν ενεργό ενισχυτή. Υπάρχουν πολλοί τύποι ενεργών αισθητήρων pixel, συμπεριλαμβανομένου του CMOS APS που χρησιμοποιείται πιο συχνά σε κάμερες κινητών τηλεφώνων, web cameras, και στις περισσότερες ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές. Τέτοιου τύπου αισθητήρες παράγονται με τη διαδικασία CMOS (και ως εκ τούτου είναι επίσης γνωστοί ως αισθητήρες CMOS), που έχει αναδειχθεί ως εναλλακτική λύση των αισθητήρων εικόνας συζευγμένου φορτίου (CCD), δεδομένου της εξέλιξης της αγοράς αισθητήρων υψηλής ταχύτητας με την

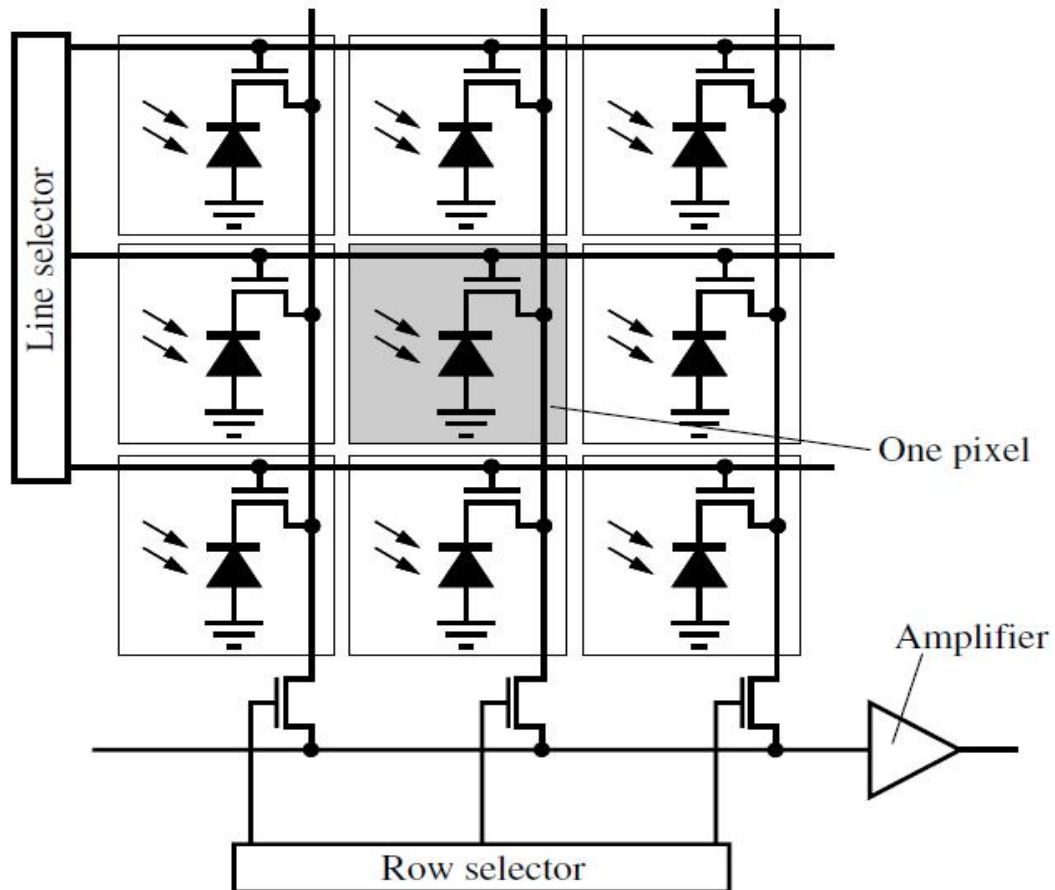


Σχήμα 4.12: Οπτική της δέσμης με τη χρήση τριών κυλινδρικών φακών

πρόοδο στη λιθογραφία, η οποία επέτρεψε την εφαρμογή της τεχνικής ολοκλήρωσης μεγάλης κλίμακας στους αισθητήρες CMOS.

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα ενός αισθητήρα CMOS αποτελεί το ότι είναι συνήθως φθηνότερος από έναν αισθητήρα CCD και οι φωτοδιόδοι αισθητήρων CMOS μπορούν να ελέγχονται χωριστά από τρανζίστορ MOS-FET. Μια κάμερα CMOS είναι ανθεκτική σε υπερφωτισμό (blooming effect), όταν μια πηγή φωτός υπερβαίνει την ευαισθησία του αισθητήρα, προκαλώντας την αλλοίωση άλλων εικονοστοιχείων. Η βασική αρχή λειτουργίας ενός αισθητήρα CMOS φαίνεται στο Σχήμα 4.13

Ο **συγχρονιστής** δρα ως εξωτερικός ενεργοποιητής της λειτουργίας τόσο της κάμερα όσο και του Laser. Ενώ τα αναλογικά συστήματα, με τη συνήθη διάταξη (φωτοαισθητήρας, περιστρεφόμενο διάφραγμα, πηγή φωτός) έχουν χρησιμοποιηθεί κατά κόρον στο παρελθόν, τα περισσότερα συστήματα που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι ψηφιακά. Ελεγχόμενος από έναν υπολογιστή, ο συγχρονιστής υπαγορεύει το χρονισμό σύλληψης της αλληλουχίας στιγμιότυπων (frame) της CCD κάμερα σε συνδυασμό με την εκπομπή δέσμης από το Laser με ακρίβεια $1ns$. Έτσι, ο χρόνος μεταξύ κάθε παλμού και η ακτινοβολήση του λέιζερ σε σχέση με το χρονισμό της κάμερα μπορεί να ελέγχεται με ακρίβεια. Η γνώση της συγκεκριμένης χρονι-



Σχήμα 4.13: Απλοποιημένο μοντέλο αισθητήρα CMOS

κής στιγμής είναι κρίσιμη, δεδομένου ότι είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό της ταχύτητας του ρευστού στην ανάλυση με την τεχνική PIV. Αυτόνομοι ηλεκτρονικοί συγχρονιστές, που ονομάζονται και digital delay generators, παρέχουν μεταβλητή ανάλυση χρονισμού από μόλις 250ps μέχρι και αρκετά ms. Με έως και οκτώ κανάλια συγχρονισμού, προσφέρουν τα μέσα για τον έλεγχο πολλών λαμπτήρων και διακοπών καθώς επίσης και για πολλαπλές κάμερες.

Τα **σωματίδια διασποράς** είναι ένα ιδιαίτερα κρίσιμο συστατικό του συστήματος PIV. Ανάλογα με το υπό έρευνα ρευστό, τα σωματίδια θα πρέπει να είναι σε θέση να ταιριάζουν ικανοποιητικά με τις ιδιότητες του ρευστού. Διαφορετικά δεν θα ακολουθούν τη ροή (ολίσθηση) με αποτέλεσμα η ανάλυση με την μέθοδο PIV να μη θεωρείται ακριβής. Ενώ η επιλογή των σωματιδίων εξαρτάται από την φύση του ρευστού, γενικά για macro PIV έρευνες επιλέγονται υάλινα σφαιρίδια, πολυστυρένιο, “ νιφάδες ” αργιλίου ή σταγονίδια ελαίου (εάν το ρευστό είναι αέριο). Ο δείκτης διάθλασης για τα σωματίδια διασποράς θα πρέπει να είναι διαφορετικός από του ρευστού, έτσι ώστε το λεπτό “φύλλο” της δέσμης του Laser να ανακλά τα διασκορπισμένα

σωματίδια προς την κάμερα.

4.5 Μεθοδολογία Εκτέλεσης Πειραμάτων

- Δοκιμή της επιφάνειας με σταγόνες μέσω πιπέτας
- Κόλληση των επιφανειών
- Δοκιμή της επιφάνειας με σταγόνες μέσω πιπέτας
- Τοποθέτηση, μοντάρισμα και λίπανση του κυλίνδρου στη δεξαμενή
- Θέρμανση του νερού στην επιθυμητή θερμοκρασία
- Ρύθμιση της διάταξης του PIV (camera-εστίαση κεντράρισμα, laser κλπ)
- Πλήρωση της δεξαμενής με απιονισμένο νερό και σωματίδια ιχνηθέτησης: α) ρίχνοντας με προσοχή απευθείας από εξωτερικό δοχείο, ή β) γεμίζοντας με σωλήνα από εξωτερικό δοχείο υψηλότερης πίεσης για την αποφυγή συσσώρευσης φυσαλίδων
- Καταγραφή της θερμοκρασίας
- Μέτρηση του πεδίου ροής με PIV ξεκινώντας από την ακινησία
- Καταγραφή της θερμοκρασίας
- Δοκιμή της επιφάνειας με σταγόνες μέσω πιπέτας

Κεφάλαιο 5

Ανάλυση Πειραματικών Δεδομένων

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η ανάλυση των δεδομένων του πειράματος, με βάση την πειραματική διάταξη που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αρχικά παρουσιάζονται τα προγραμματιστικά εργαλεία και ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκαν. Στη συνέχεια γίνεται λεπτομερής ανάλυση των δεδομένων και των περιπτώσεων του πειράματος και παρατίθενται διαγράμματα που σχετίζονται με την ταχύτητα του ρευστού πολύ κοντά στον κύλινδρο (ΥΦΒ επιφάνεια).

5.1 Κώδικας MATLAB

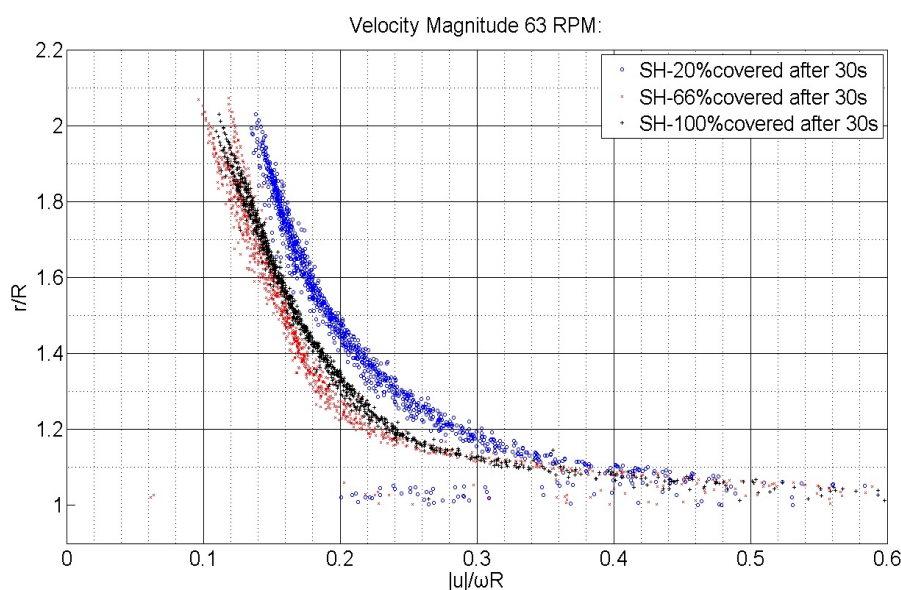
Στο Παράρτημα Α της μελέτης αυτής παρουσιάζεται ο κώδικας που δημιουργήθηκε για την ανάλυση του συγκεκριμένου πειράματος σε υπολογιστικό περιβάλλον MATLAB (R2010a), το οποίο αποτελεί ταυτόχρονα και γλώσσα προγραμματισμού τέταρτης γενιάς (4GL).

5.2 Μελέτη Περιπτώσεων

5.2.1 Ποσοστό Κάλυψης του Κυλίνδρου

Για την μελέτη της επίδρασης του ποσοστού κάλυψης του κυλίνδρου με SH επιφάνειες έγιναν μετρήσεις σε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις. Ο κύλινδρος καλύφθηκε σε ποσοστό α) 20%, β) 66%, γ) 100% της επιφάνειάς του με SH και διεξήχθησαν μετρήσεις σε θερμοκρασία 20.5°C σε ύψος 7.5cm από τον πυθμένα της δεξαμενής και μετά την πάροδο 30s ώστε η ροή

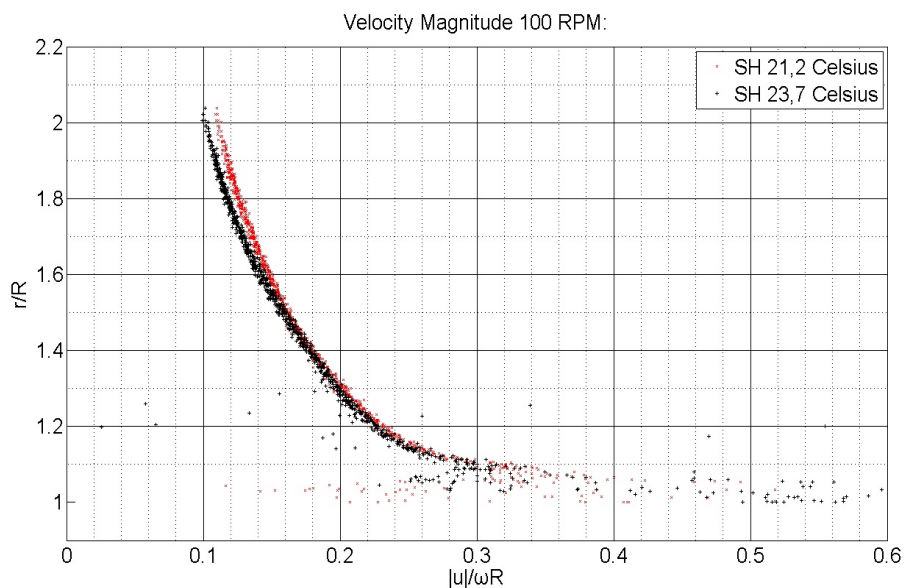
να έχει διαμορφωθεί πλήρως. Εξήχθησαν οι μέσες τιμές του μέτρου της ταχύτητας σε σύνολο 400 captures (84 seconds) για διαφορετικά shear rates. Παρακάτω (Σχήμα 5.1) φαίνεται η περίπτωση των $63RPM$, όπου στον οριζόντιο άξονα δείχνεται το μέτρο της ταχύτητας του ρευστού ανηγμένο στην περιφερειακή ταχύτητα ωR της επιφάνειας του κυλίνδρου. Συμπεραίνει κανείς τη σημασία κάλυψης του κυλίνδρου τουλάχιστον κατά τα $2/3$ με SH, εφόσον εντοπίζονται διαφορές στις ταχύτητες έως και 10% σε σύγκριση με την περίπτωση κάλυψης του $1/5$ του κυλίνδρου.



Σχήμα 5.1: Επίδραση του ποσοστού κάλυψης του κυλίνδρου με SH επιφάνειες στο αδιάστατο μέτρο ταχύτητας

5.2.2 Επίδραση της θερμοκρασίας του ρευστού

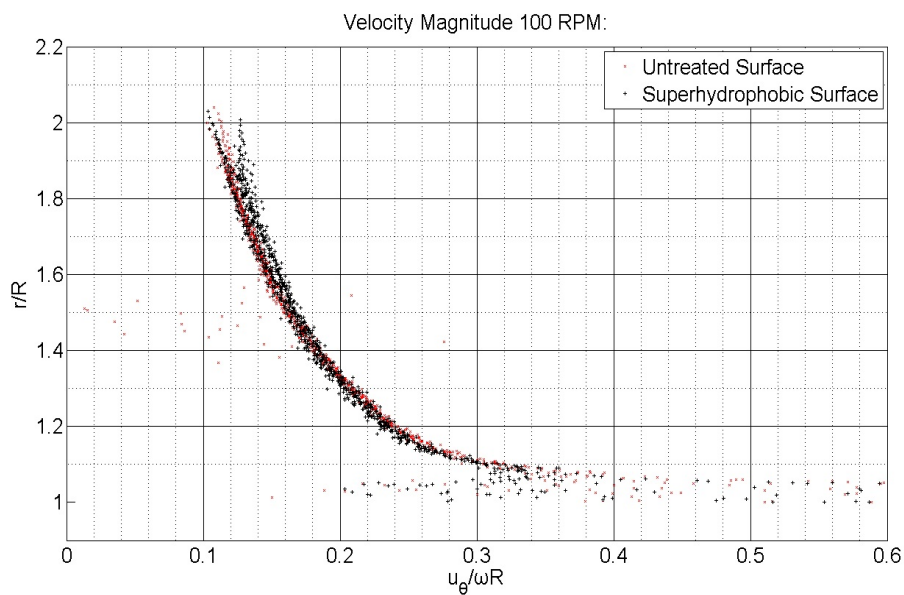
Για την μελέτη της επίδρασης της θερμοκρασίας έγινε πείραμα σε SH(υπερυδρόφοβη) επιφάνεια στις $100RPM$ και πάλι σε ύψος $7.5cm$ από τον πυθμένα της δεξαμενής και μετά την πάροδο $30s$ ώστε η ροή να έχει διαμορφωθεί πλήρως. Στην πρώτη περίπτωση η θερμοκρασία του ρευστού ήταν $21.2^{\circ}C$ ενώ στη δεύτερη $23.7^{\circ}C$. Εξήχθησαν οι μέσες τιμές του μέτρου της ταχύτητας σε σύνολο 1000 captures (208 seconds). Στη συνέχεια παρατίθεται το διάγραμμα (Σχήμα 5.2), όπου παρατηρείται ότι οι μέγιστες διαφορές των 2 περιπτώσεων είναι περίπου 1% της αδιάστατης ταχύτητας και εντοπίζονται σε απόσταση $> 1.8R$ από το κέντρο του κυλίνδρου. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η μεταβολή της θερμοκρασίας έχει **αμελητέα επίδραση**, ιδιαίτερα όσο προσεγγίζουμε την SH επιφάνεια.



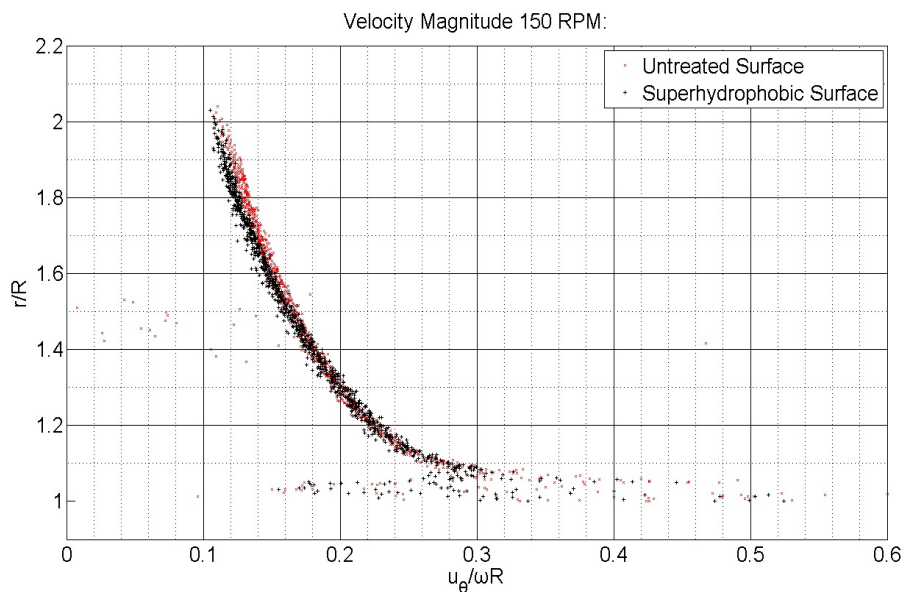
Σχήμα 5.2: Επίδραση της θερμοκρασίας του ρευστού στο αδιάστατο μέτρο ταχύτητας

5.2.3 Σύγκριση της ροής στις 3 επιφάνειες (λεία επιφάνεια αλουμινίου - aluminum, λεία υδρόφιλη επιφάνεια - untreated COP, υπερυδρόφοβη επιφάνεια - SH) για διαφορετικούς ρυθμούς διάτμησης

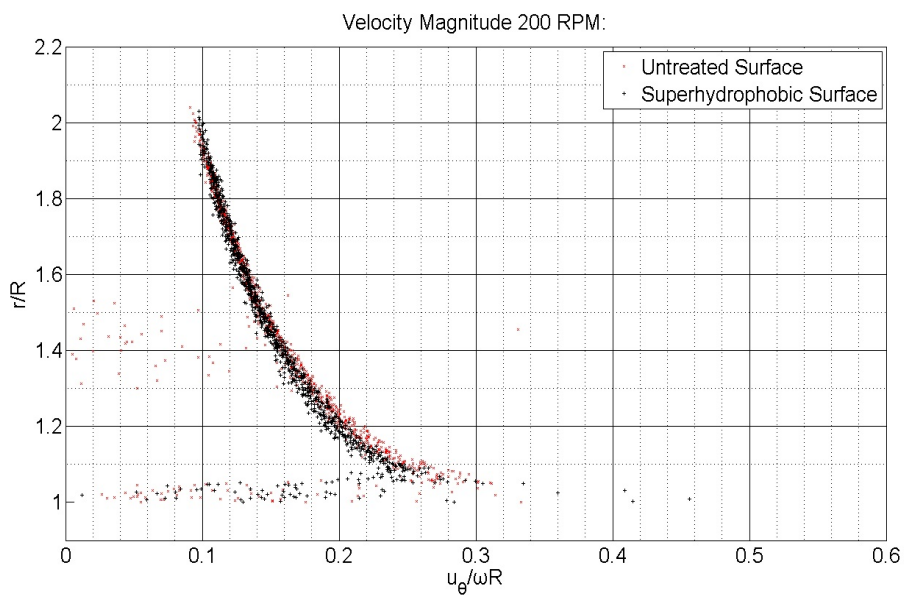
Η πειραματική μελέτη σε υψηλότερες στροφές $100 - 300RPM$ (Σχήματα 5.3 - 5.7) του κυλίνδρου δεν έδειξε κάποια συστηματική και επαναλήψιμη τάση μείωσης των ταχυτήτων (διαφορές $< 0.02 * \omega R$) στην υπερυδρόφοβη επιφάνεια σε σχέση με την αντίστοιχη untreated, όπως θα αναμενόταν εξαιτίας της ολίσθησης.



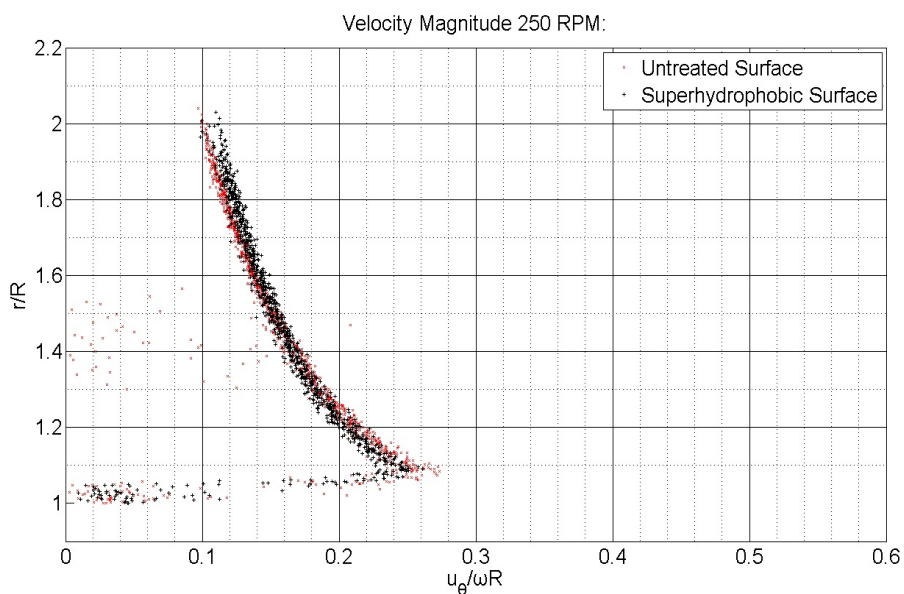
Σχήμα 5.3: Συγκριτικό διάγραμμα αδιάστατου μέτρου ταχύτητας για τις επιφάνειες (aluminum, untreated COP, SH) 100RPM



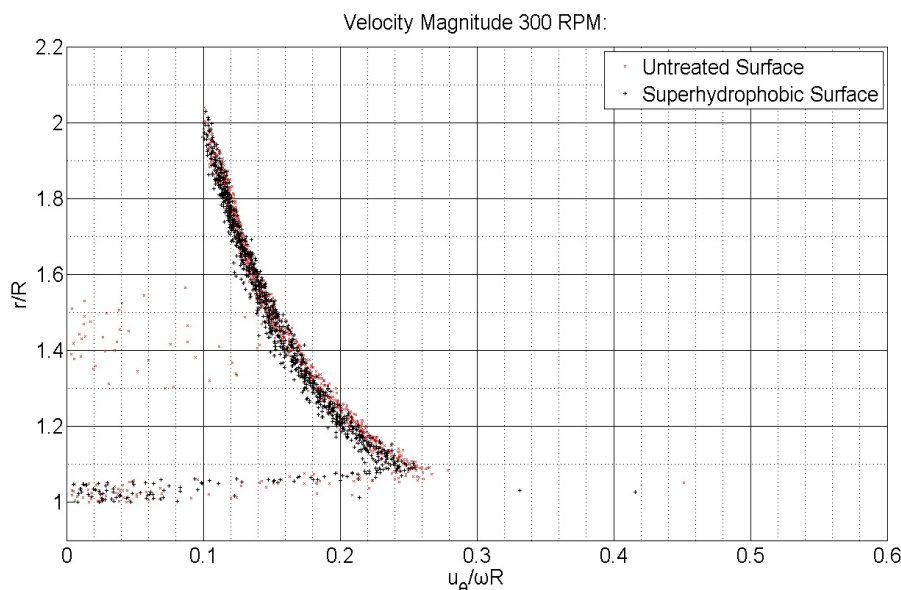
Σχήμα 5.4: Συγκριτικό διάγραμμα αδιάστατου μέτρου ταχύτητας για τις επιφάνειες (aluminum, untreated COP, SH) 150RPM



Σχήμα 5.5: Συγκριτικό διάγραμμα αδιάστατου μέτρου ταχύτητας για τις επιφάνειες (aluminum, untreated COP, SH) 200RPM

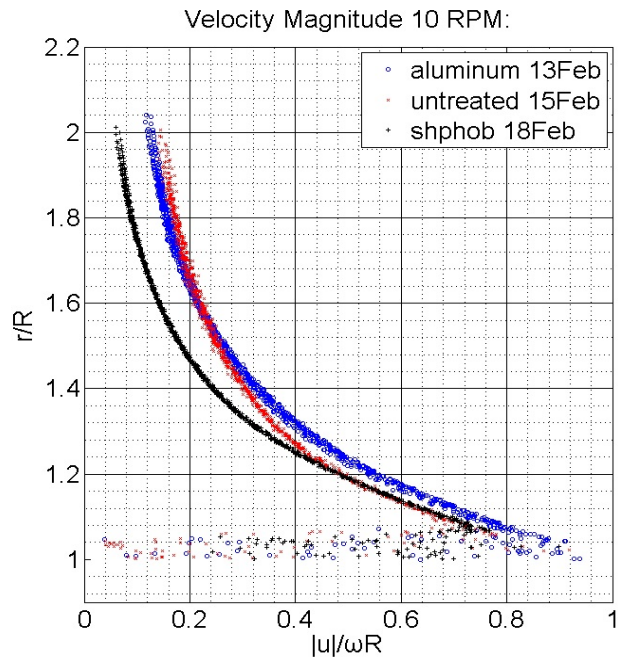


Σχήμα 5.6: Συγκριτικό διάγραμμα αδιάστατου μέτρου ταχύτητας για τις επιφάνειες (aluminum, untreated COP, SH) 250RPM

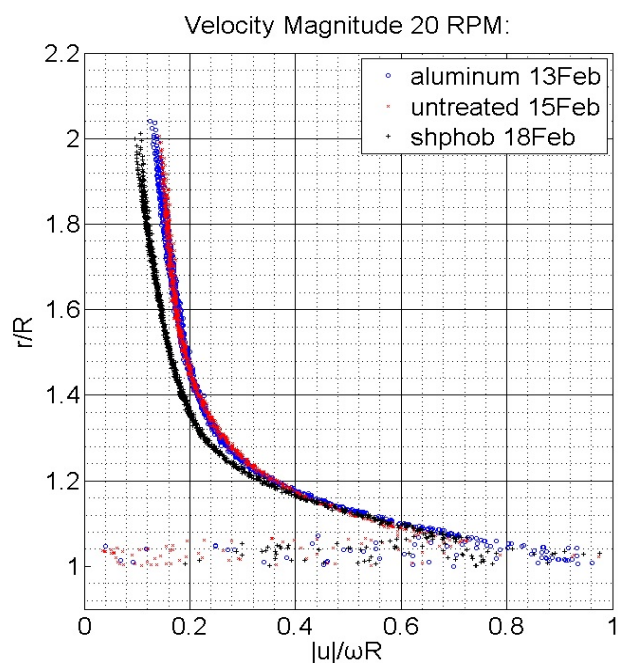


Σχήμα 5.7: Συγκριτικό διάγραμμα αδιάστατου μέτρου ταχύτητας για τις επιφάνειες (aluminum, untreated COP, SH) 300RPM

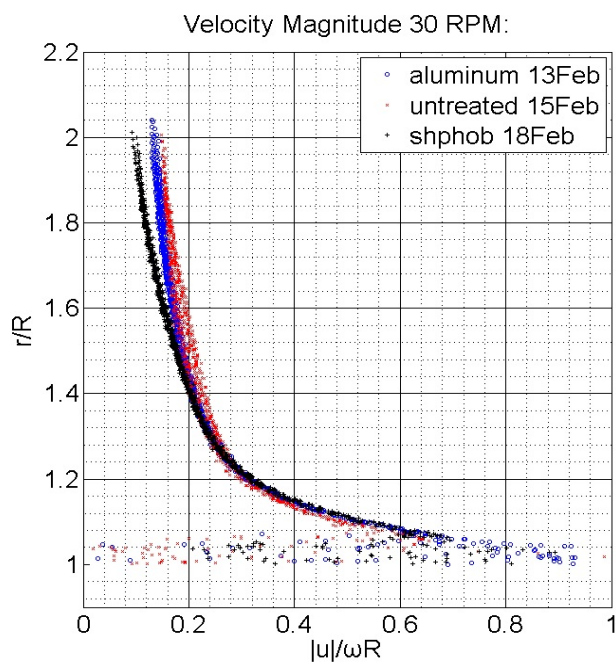
Έτσι, στο σημείο αυτό έγινε προσπάθεια να μελετηθεί το φαινόμενο σε μικρότερα shear rate 10 – 60RPM (Σχήματα 5.8 - 5.12), ώστε το ενδεχομένως εγκλωβισμένο στρώμα αέρα (plastron) να μην αποκολληθεί από το στερεό και να μην προκληθεί μετάβαση στην κατάσταση διαβροχής. Οι μετρήσεις έγιναν και για τις τρεις περιπτώσεις σε θερμοκρασία 21.2°C – 21.4°C, σε ύψος 7.5cm από τον πυθμένα και οι επιφάνειες (COP, SH) κάλυπταν το 66% του κυλίνδρου από το κάτω άκρο έως και 5cm από το άνω. Ταυτόχρονα σε αυτή τη σειρά μετρήσεων επιλέχθηκε το φαινόμενο να μελετηθεί από τη στιγμή που το ρευστό βρίσκεται σε ακινησία, απευθείας όταν ο κύλινδρος τίθεται σε κίνηση. Εξήχθησαν οι μέσες τιμές του μέτρου της ταχύτητας σε σύνολο 400 captures (84 seconds) για διαφορετικά shear rates. Παρατηρούμε και στις 5 αυτές περιπτώσεις ότι η ταχύτητα της ροής στην περιοχή που ενδιαφέρει περισσότερο ($r < 1.2R$), μεταξύ της SH και της untreated επιφάνειας παραμένει περίπου η ίδια, οπότε δεν μπορεί κανείς να ισχυρισθεί την ύπαρξη μεγάλου μήκους ολίσθησης που να επηρεάζει τη ροή, τουλάχιστον στο πεδίο που η οπτικοποίηση μπορεί να δώσει αξιόπιστα δεδομένα ($r > 1.08R$) και εντός του πειραματικού σφάλματος.



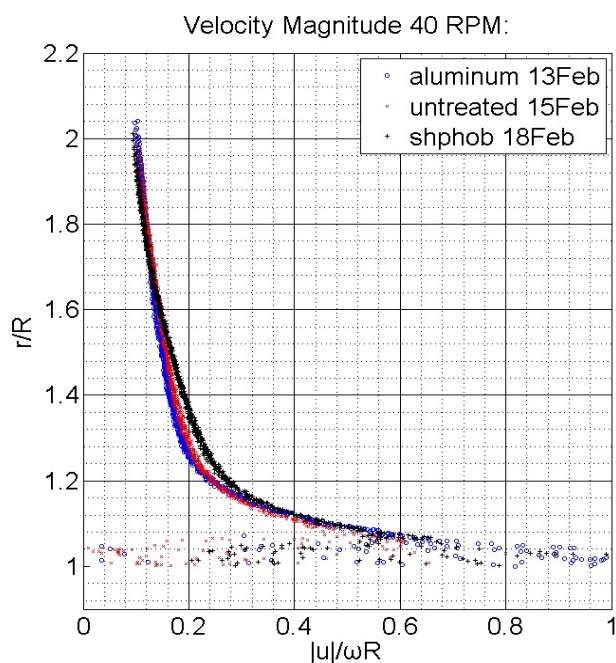
Σχήμα 5.8: Συγκριτικό διάγραμμα αδιάστατου μέτρου ταχύτητας για τις επιφάνειες (aluminum, untreated COP, SH) 10RPM



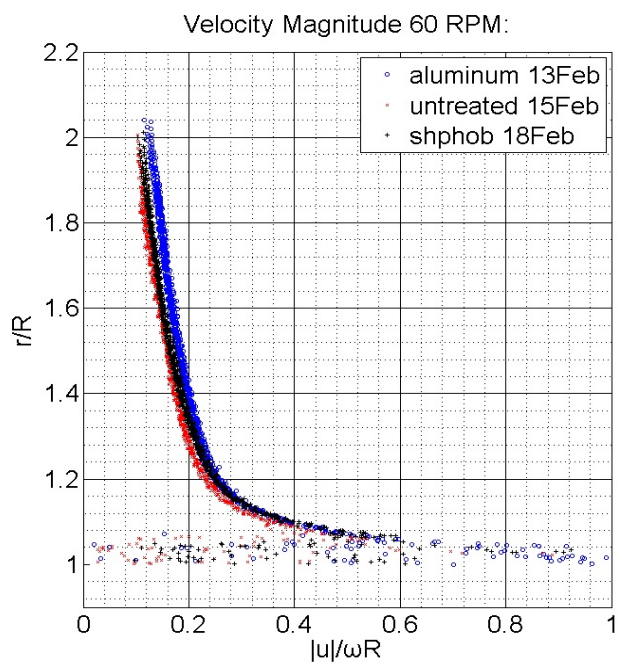
Σχήμα 5.9: Συγκριτικό διάγραμμα αδιάστατου μέτρου ταχύτητας για τις επιφάνειες (aluminum, untreated COP, SH) 20RPM



Σχήμα 5.10: Συγκριτικό διάγραμμα αδιάστατου μέτρου ταχύτητας για τις επιφάνειες (aluminum, untreated COP, SH) 30RPM



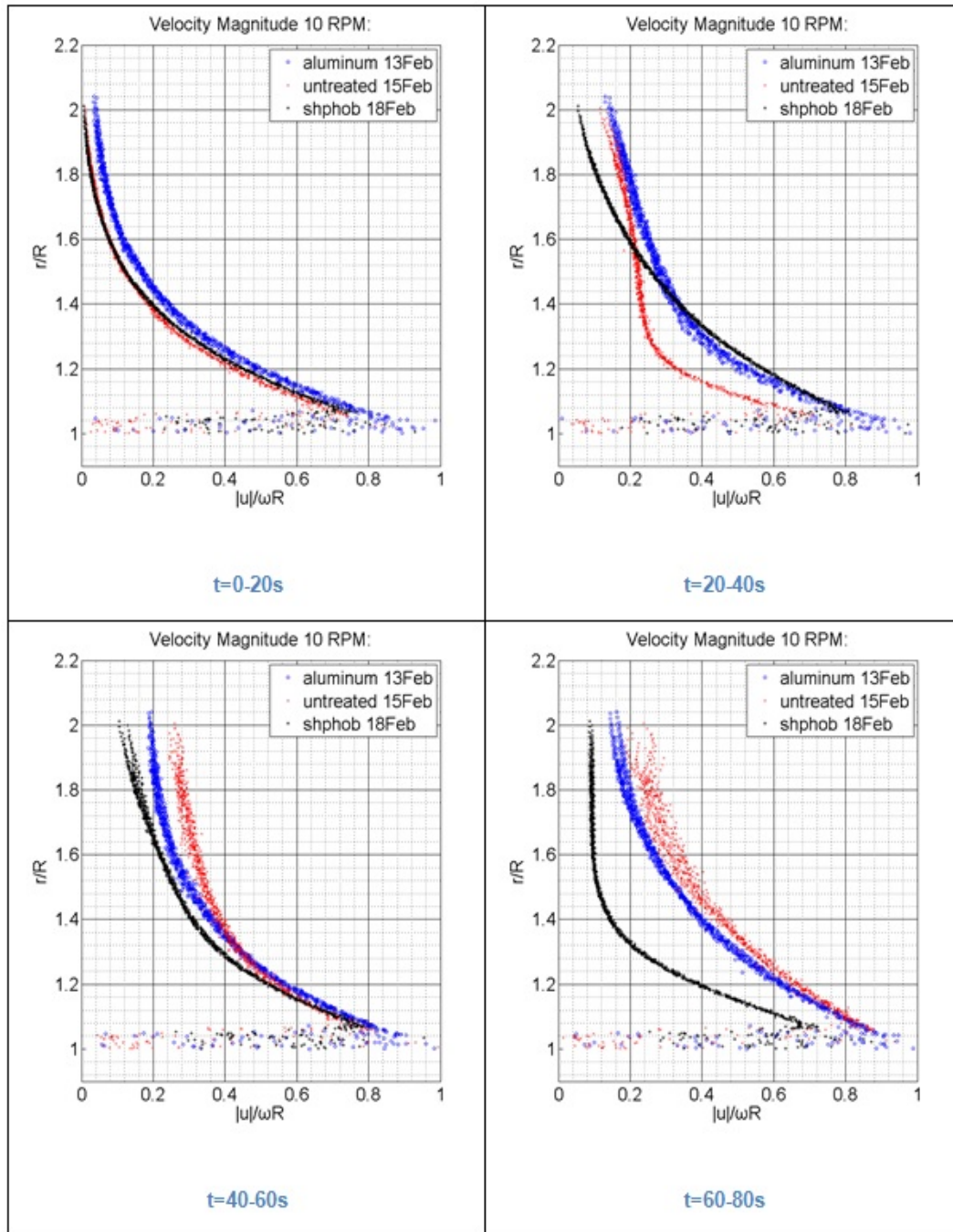
Σχήμα 5.11: Συγκριτικό διάγραμμα αδιάστατου μέτρου ταχύτητας για τις επιφάνειες (aluminum, untreated COP, SH) 40RPM



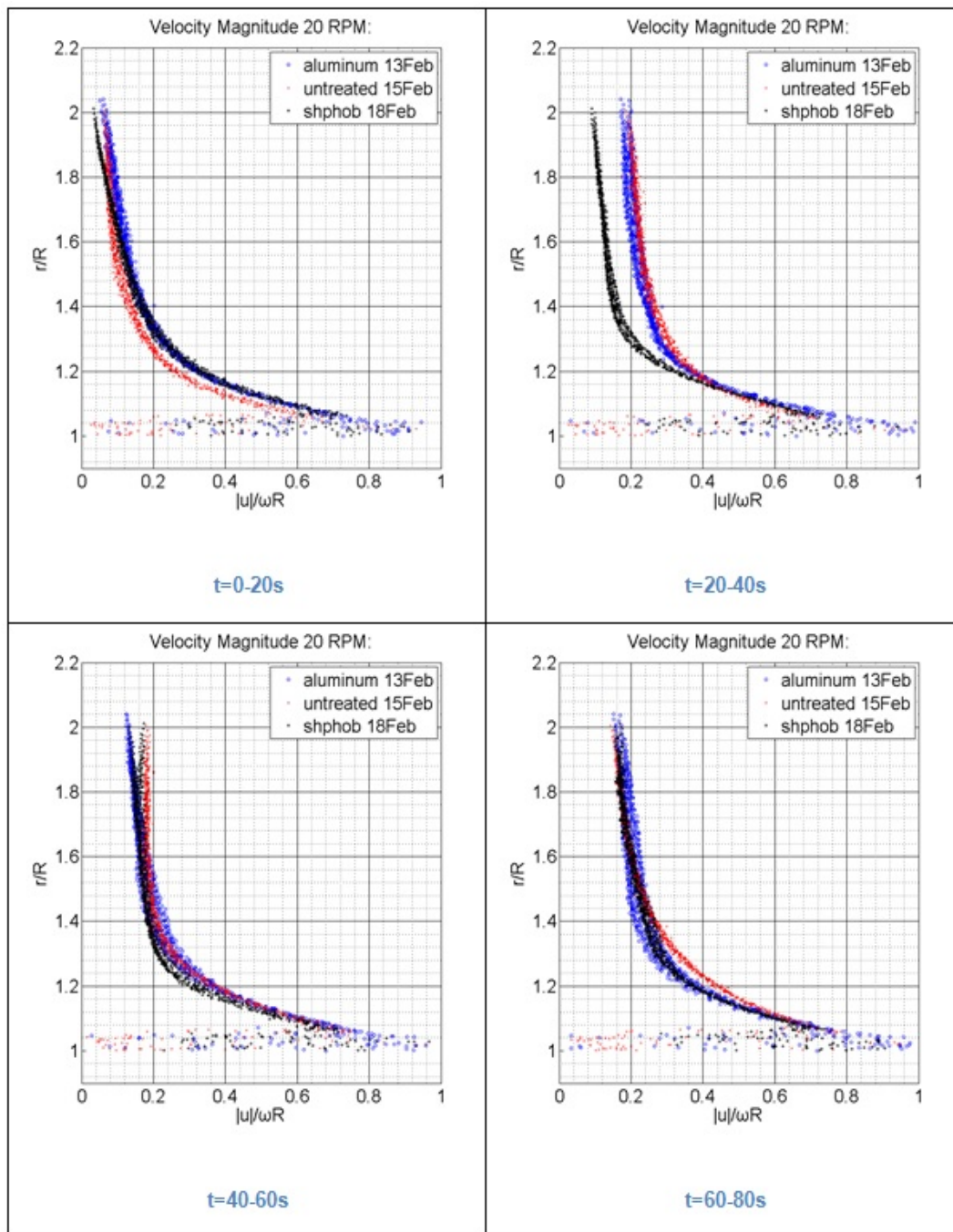
Σχήμα 5.12: Συγκριτικό διάγραμμα αδιάστατου μέτρου ταχύτητας για τις επιφάνειες (aluminum, untreated COP, SH) 60RPM

5.2.4 Χρονική εξέλιξη του φαινομένου

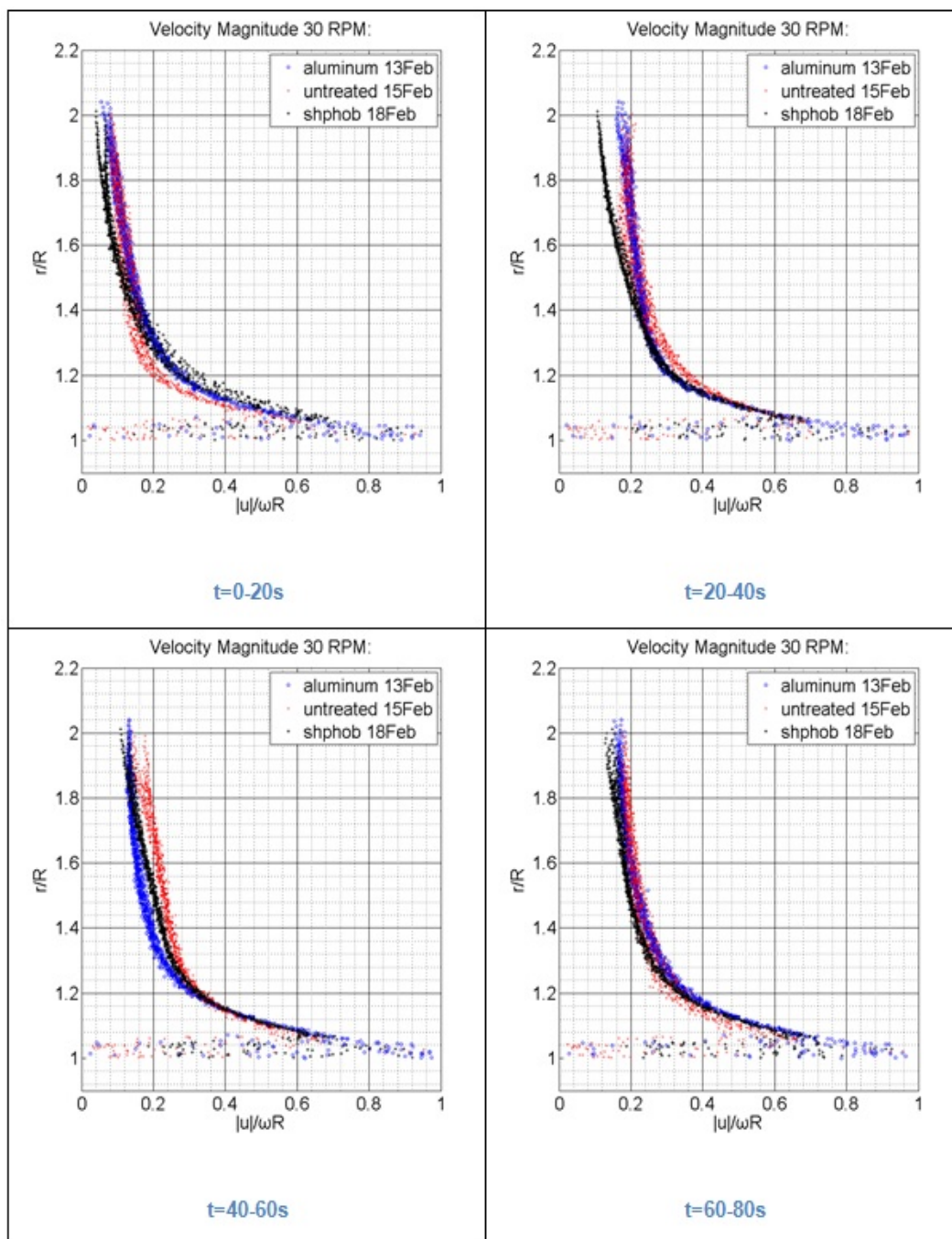
Με βάση τη βιβλιογραφία μια τάση μείωσης του μήκους ολίσθησης και επιδείνωσης στη μείωση της οπισθέλκουσας με την πάροδο του χρόνου αναφέρεται συστηματικά σε πολλά πειράματα ιδιαίτερα σε τυχαία δομημένες επιφάνειες. Θα πρέπει λοιπόν να λάβει κανείς υπόψη την παράμετρο του χρόνου σε σχέση με το φαινόμενο. Για τη μελέτη της χρονικής εξέλιξης έγινε τμηματική ανάλυση των παραπάνω μετρήσεων, εξάγοντας την μέση τιμή του μέτρου της ταχύτητας ανά πεπερασμένα χρονικά διαστήματα κάθε 20s-100 captures (Σχήματα 5.13 - 5.17). Στην παρούσα μέτρηση της SH επιφάνειας πρέπει να αναφερθεί ότι η δεξαμενή πληρώθηκε γεμίζοντας με σωλήνα από εξωτερικό δοχείο υψηλότερης πίεσης με χαμηλή παροχή, ώστε να μην προκληθούν αναταραχές κοντά στην SH, που ενδεχομένως απομάκρυναν το *plastron*. Ωστόσο, για να ολοκληρωθεί η πλήρωση ολόκληρης της δεξαμενής με το ρυθμό αυτό απαιτείται να παρέλθει χρόνος περίπου 20min πριν την μέτρηση, πράγμα το οποίο θεωρείται να επιδρά αρνητικά. Σημειώνεται ακόμη ότι οι μετρήσεις διεξήχθησαν με τη σειρά 10RPM – 20RPM – 30RPM – 40RPM – 60RPM και επομένως η πιο «ευνοϊκή» περίπτωση ολίσθησης, ενδέχεται να εντοπίζεται στα πρώτα δευτερόλεπτα της πρώτης μέτρησης (10RPM). Όπως φαίνεται παρακάτω, στις 10RPM εμφανίζονται μεγαλύτερες διαταραχές στα προφίλ ταχυτήτων για την *untreated* και την SH επιφάνεια συγκριτικά με τις υπόλοιπες περιπτώσεις καθώς επίσης και μια περίπτωση 10RPM ($t = 60 - 80s$), που ενδεχομένως «υπονοεί» έντονη ολίσθηση. Το γεγονός όμως ότι η περίπτωση εντοπίζεται στο τέλος της μέτρησης καθώς και η ταυτόχρονη όχι τόσο ομαλή εξέλιξη του προφίλ της *untreated* επιφάνειας εγείρουν υποψίες ως προς την απόδειξη του ισχυρισμού. Μικρές διαφορές εμφανίζονται επίσης και στην περίπτωση 20RPM ($t = 60 - 80s$), ωστόσο καθώς οι στροφές αυξάνονται, οι καμπύλες συμπίπτουν τουλάχιστον στην περιοχή ενδιαφέροντος ($1.08R < r < 1.2R$).



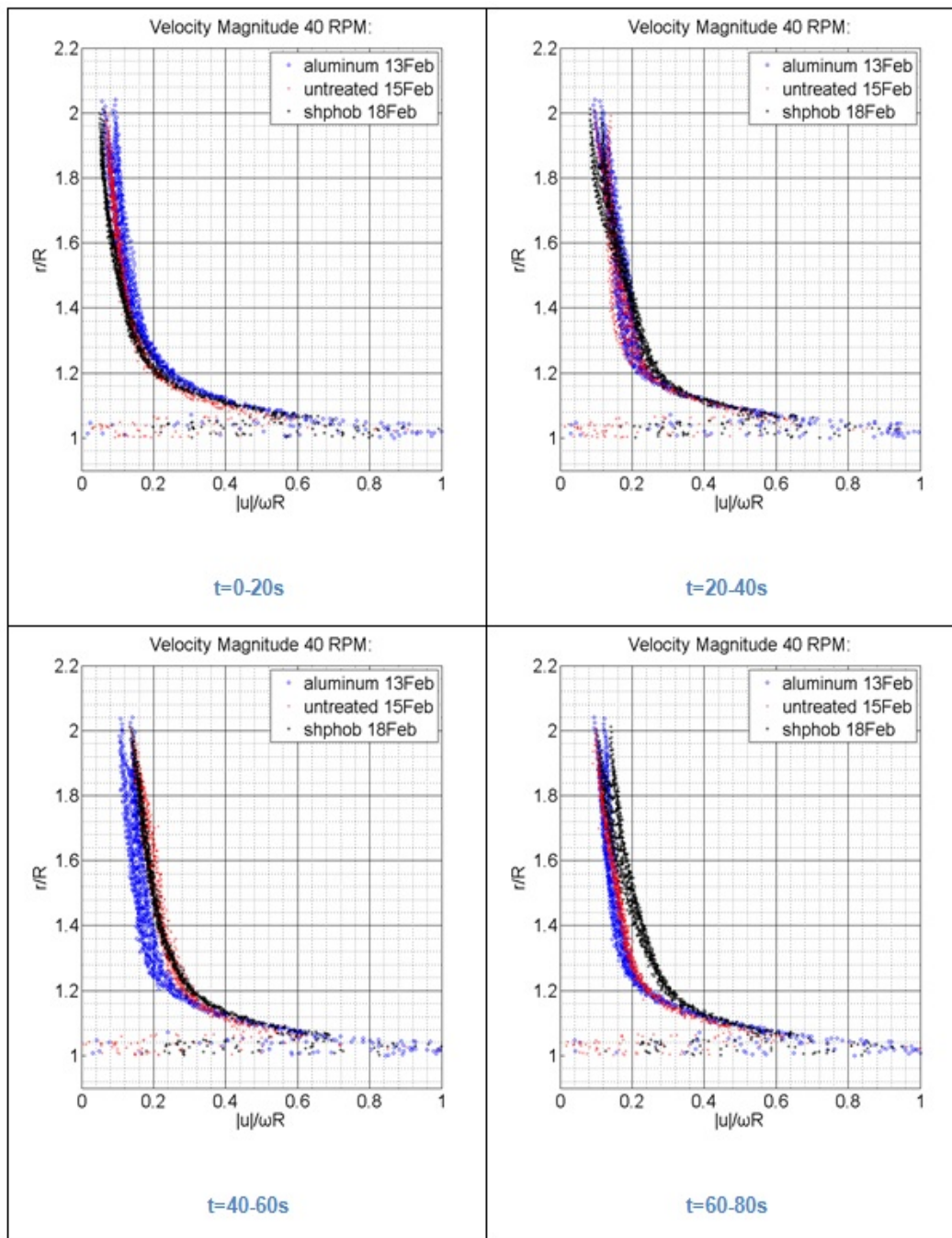
Σχήμα 5.13: Χρονική εξέλιξη συγκριτικών προφίλ ταχυτήτων για τις 3 επιφάνειες 10RPM



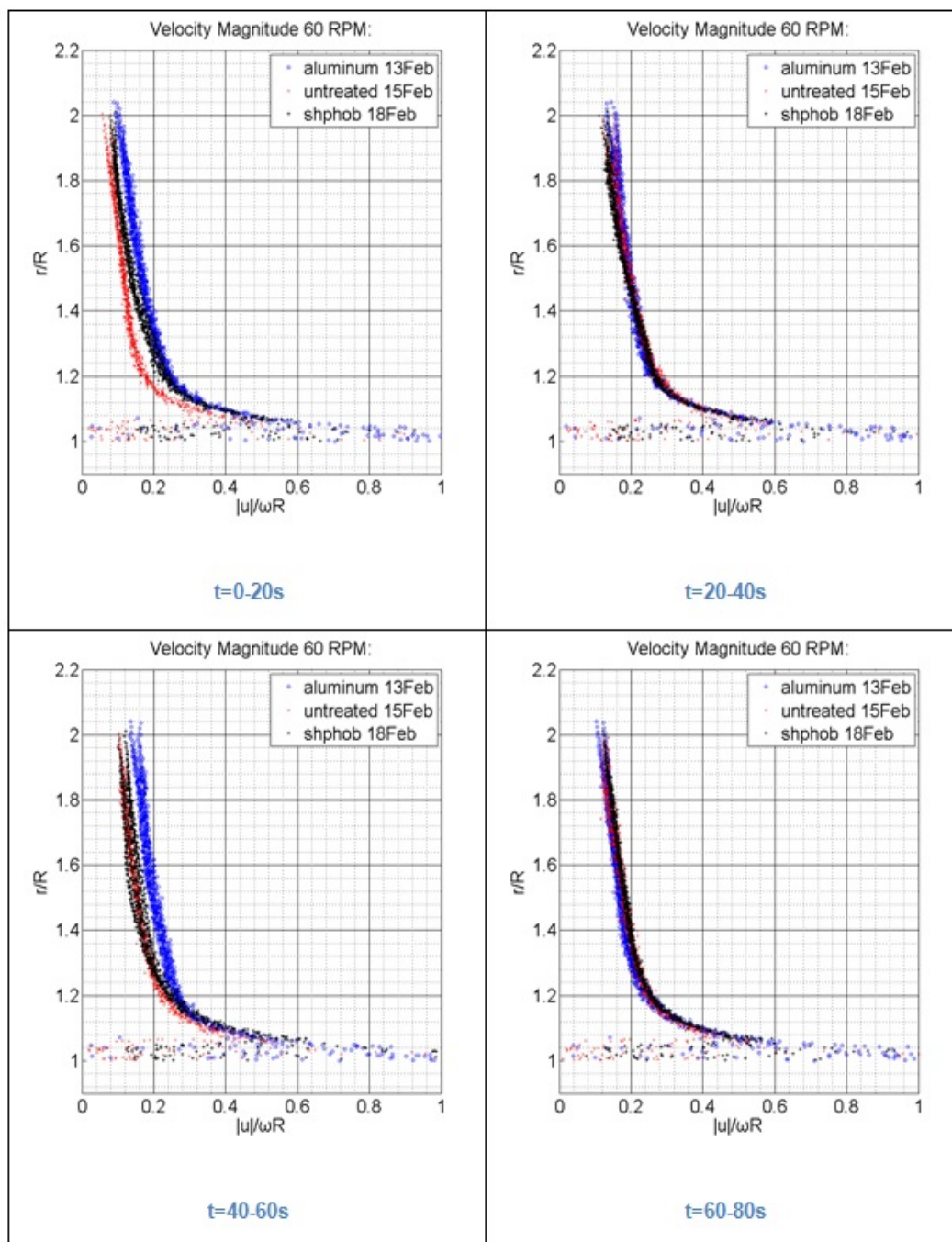
Σχήμα 5.14: Χρονική εξέλιξη συγκριτικών προφίλ ταχυτήτων για τις 3 επιφάνειες 20RPM



Σχήμα 5.15: Χρονική εξέλιξη συγκριτικών προφίλ ταχυτήτων για τις 3 επιφάνειες 30RPM



Σχήμα 5.16: Χρονική εξέλιξη συγκριτικών προφίλ ταχυτήτων για τις 3 επιφάνειες 40RPM

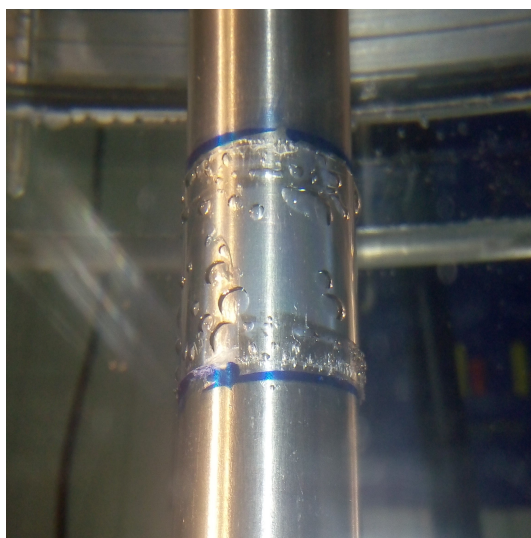


Σχήμα 5.17: Χρονική εξέλιξη συγκριτικών προφίλ ταχυτήτων για τις 3 επιφάνειες 60RPM

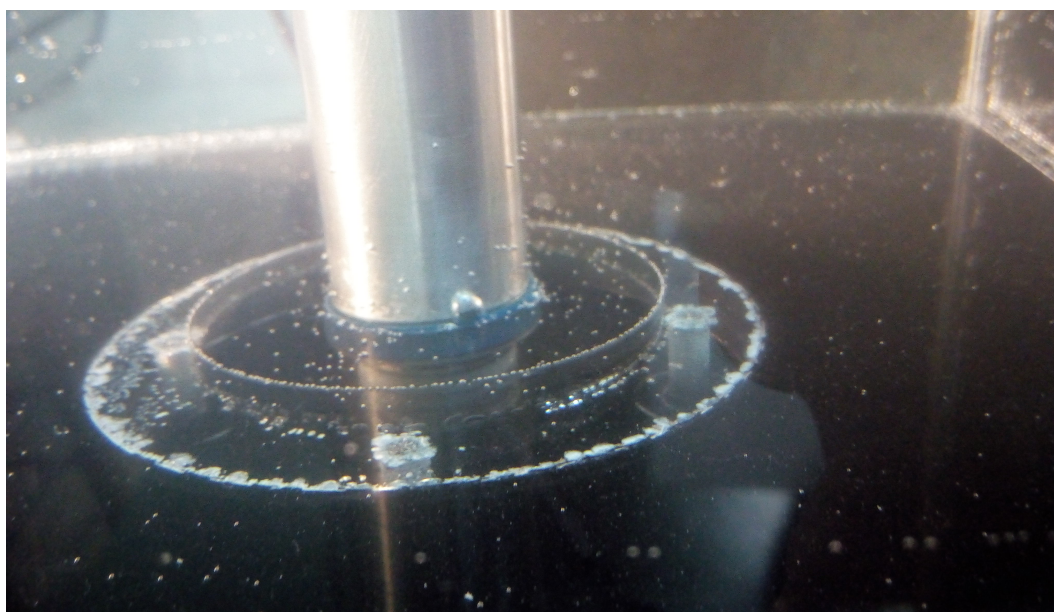
5.2.5 Ανάπτυξη «μεγάλων» φουσαλίδων στην επιφάνεια με τεχνητό τρόπο

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων και εξαιτίας της έντονης περιστροφής του κυλίνδρου για μεγάλο χρονικό διάστημα επήλθε φθορά στον δακτύλιο στεγανότητας (o-ring), από όπου

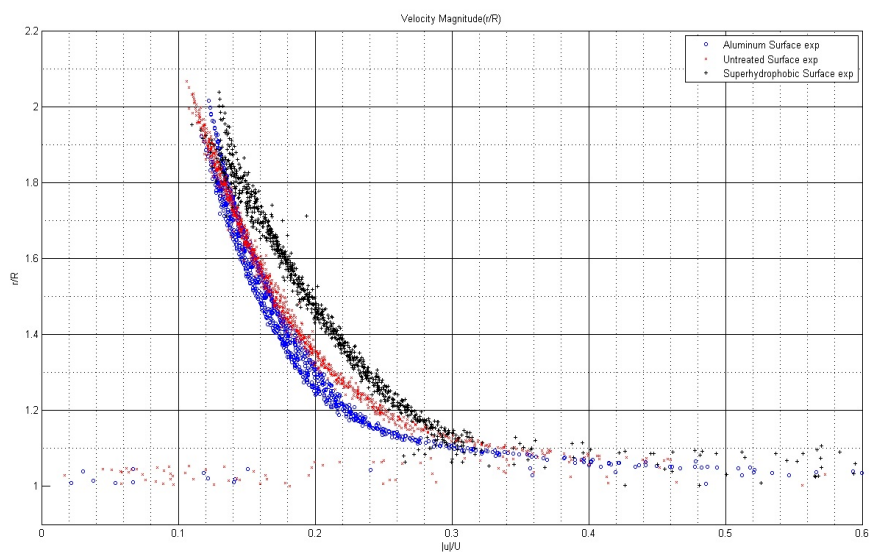
εισχωρούσαν φυσαλίδες αέρα, όπως φαίνεται στις φωτογραφίες (Εικ.5.18, Εικ.5.19), και μετά από την πάροδο ορισμένου χρόνου προσκολλούνταν στην SH επιφάνεια. Στην περίπτωση αυτή πριν αντικατασταθεί ο δακτύλιος πάρθηκαν μετρήσεις για τη μελέτη της επίδρασης των ορατών με το μάτι φυσαλίδων στα προφίλ ταχυτήτων. Ενδεικτικά παρατίθενται παρακάτω (Σχήματα 5.20,5.21) για $100RPM$ και $150RPM$ αντίστοιχα, όπου συμπεραίνει κανείς ότι οι φυσαλίδες τόσο μεγάλου μεγέθους λειτουργούν σαν «εξογκώματα», τα οποία επιταχύνουν τη ροή και προκαλούν μεγαλύτερες διατμητικές τάσεις.



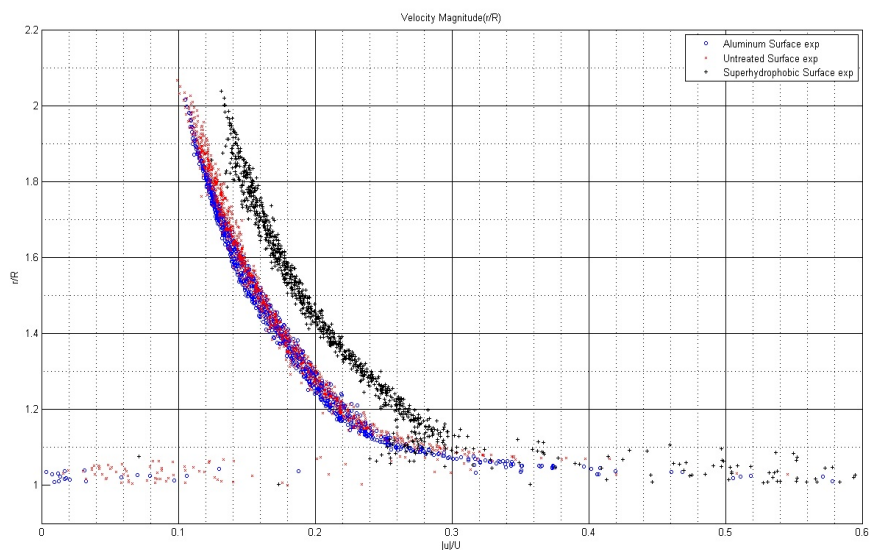
Σχήμα 5.18: Προσκολλημένες φυσαλίδες στην SH επιφάνεια



Σχήμα 5.19: Εισχώρηση φυσαλίδων από τον δακτύλιο στεγανότητας



Σχήμα 5.20: Συγκριτικό διάγραμμα αδιάστατου μέτρου ταχύτητας για τις επιφάνειες (aluminum, untreated COP, SH) 100RPM με φυσαλίδες



Σχήμα 5.21: Συγκριτικό διάγραμμα αδιάστατου μέτρου ταχύτητας για τις επιφάνειες (aluminum, untreated COP, SH) 150RPM με φυσαλίδες

5.2.6 Μηγίσκος

Τελευταία και μόνο ενδεικτικά παρατίθεται η κατάσταση σχηματισμού μηγίσκου (Εικ.5.22, Εικ.5.23) μεταξύ της SH επιφάνειας και του νερού, αφού στην περίπτωση αυτή δεν ήταν εφικτές

οι μετρήσεις οπτικοποίησης. Ο μηνίσκος λειτουργεί ως κατοπτρική επιφάνεια, πράγμα το οποίο καθιστά αδύνατη την επεξεργασία της εικόνας.



Σχήμα 5.22: Σχηματισμός Μηνίσκου α

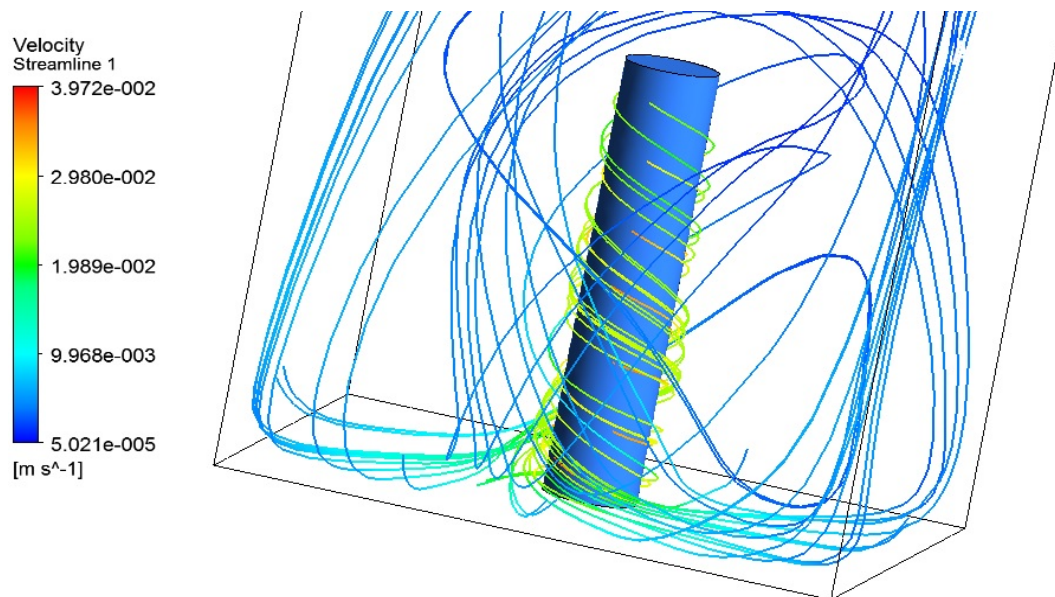


Σχήμα 5.23: Σχηματισμός Μηνίσκου β

5.2.7 Υπολογιστική προσομοίωση για την εκτίμηση της επίδρασης της 3ης διάστασης στο πεδίο ροής

Δεδομένου ότι η γεωμετρία του πειράματος διαφέρει από την θεωρητική προσέγγιση του φαινομένου, επειδή το τοίχωμα της δεξαμενής είναι τετραγωνικό αλλά κυρίως επειδή το διάκενο από το κινούμενο στο ακίνητο τοίχωμα είναι μεγάλο, ήδη από την πρώτη κατασκευα-

στική προσέγγιση του προβλήματος (κύλινδρος διαμέτρου $D = 15mm$, δεξαμενή διατομής $10 \times 10cm$), έγινε εκτίμηση της παραπάνω επίδρασης με χρήση του εμπορικού υπολογιστικού πακέτου ANSYS CFX. Στην Εικόνα 5.24 φαίνονται ενδεικτικά οι γραμμές ροής για τη γεωμετρία του 1ου κυλίνδρου με ταχύτητα περιστροφής $120RPM$ και προσομοιώνοντας την διάταξη με ελεύθερη επιφάνεια του νερού σε στάθμη $15cm$.



Σχήμα 5.24: Γραμμές Ροής της υπολογιστικής προσομοίωσης με το πακέτο ANSYS CFX

Είναι σαφές ότι υπάρχουν συνιστώσες της ταχύτητας κατά τον άξονα του βάρους, μικρότερες όμως από 30% της ωR , καθώς επίσης η προσομοίωση δείχνει, ότι τα σωματίδια του ρευστου κινούνται σε ελικοειδείς σπείρες εισάγοντας μια ασυμμετρία στο πεδίο ροής. Η αστάθεια αυτή έχει παρατηρηθεί στο παρελθόν από τον Taylor 1923 [36] να συμβαίνει ήδη σε σχετικά χαμηλές ταχύτητες περιστροφής. Ο κρίσιμος αριθμός Taylor πέρα από τον οποίο προκύπτει η τρισδιάστη αστάθεια είναι:

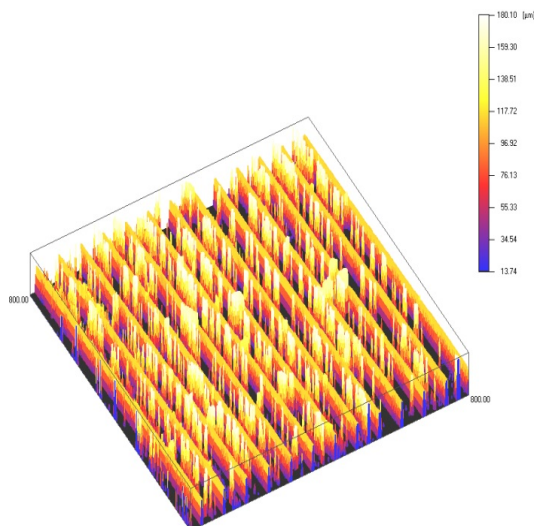
$$Ta_{crit} = \frac{r_i(r_o - r_i)^3 \Omega_i^2}{\nu^2} \approx 1700 \quad (5.1)$$

Ωστόσο, η συγκεκριμένη επίδραση δεν παίζει σημαντικό ρόλο, υπό την έννοια ότι οι μετρήσεις διεξάγονται με τον ίδιο τρόπο και στο ίδιο ύψος της δεξαμενής, καθώς επίσης και τα τελικά διαγράμματα σύγκρισης των επιφανειών προκύπτουν από τη μέση τιμή του μέτρου των ταχυτήτων για ένα αρκετά ικανό χρόνο μέτρησης και ένα πλήθος captures. Επιπλέον η υπό μέτρηση ΥΦΒ επιφάνεια αποτελείται από ένα τυχαίο pattern μικρο- και νανο- δομών διπλής

κλίμακας χωρίς ορισμένη διάταξη σε σχέση με τη ροή, πράγμα το οποίο θεωρητικά επιτρέπει την ολίσθηση του νερού σε οποιοδήποτε σημείο της και προς οποιαδήποτε κατεύθυνση.

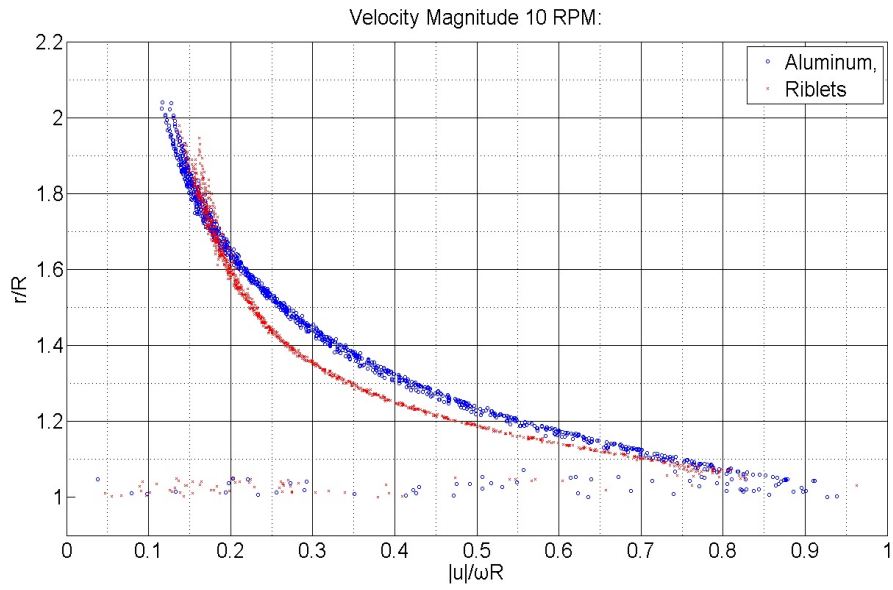
5.2.8 Χρήση Riblet film

Η μεμβράνη που χρησιμοποιήθηκε έχει διατομή με περιοδικά ισαπέχοντα ισοσκελή τρίγωνα με διαστάσεις (ύψος τριγώνου: $80\mu m$, βάση τριγώνου $15\mu m$) και μεταξύ τους απόσταση $70\mu m$, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.25. Η κόλληση της επιφάνειας στον κύλινδρο έγινε με τον ίδιο τρόπο όπως και με τις υπερυδρόφοβες, όμως τοποθετήθηκαν έτσι ώστε οι αυλακώσεις που σχηματίζονται μεταξύ των δομών να είναι παράλληλες προς τη ροή. Ο κύλινδρος καλύφθηκε σε ποσοστό 66% και η μέτρηση διεξάχθηκε στις ίδιες συνθήκες, όπως και στις ΥΦΒ επιφάνειες, προκειμένου τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα.

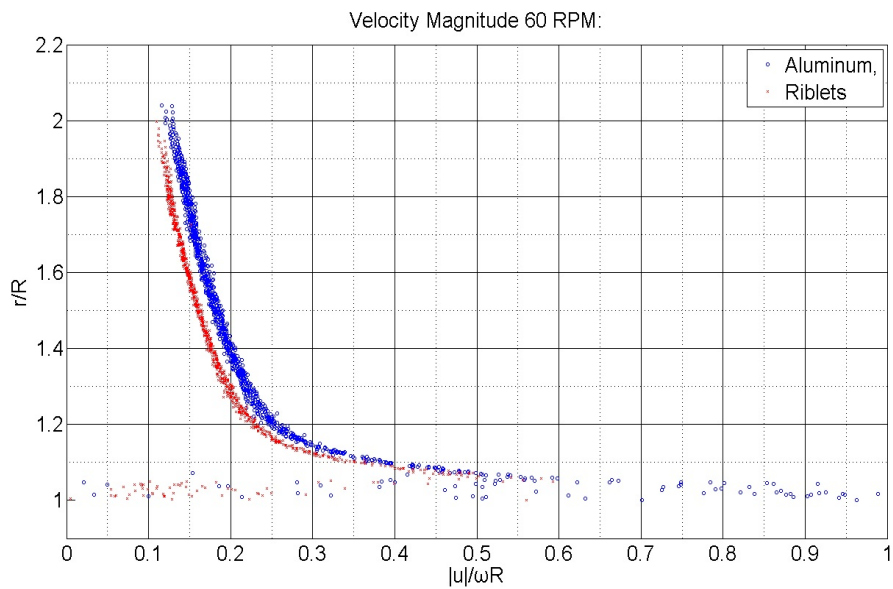


Σχήμα 5.25: 3D όψη της γεωμετρίας του Riblet film

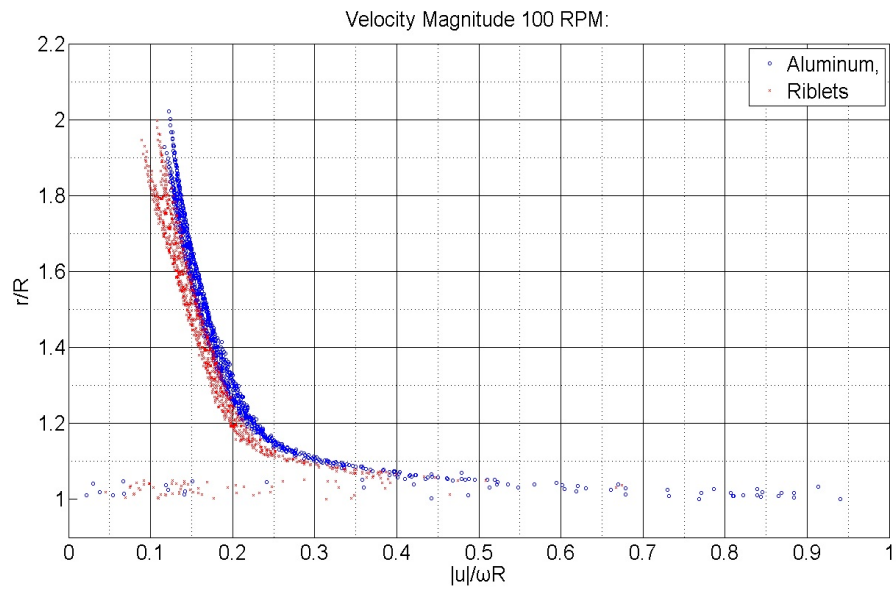
Στα παρακάτω Σχήματα (5.26 - 5.32) παρατηρεί κανείς μια «προοδευτικά» εξελισσόμενη συμπεριφορά των προφίλ ταχυτήτων με το Riblet film. Αρχικά στις $10RPM$, οι ταχύτητες μέχρι περίπου το $1.6R$ εμφανίζονται μικρότερες κατά 5-6% σε σχέση με το αλουμίνιο (κύλινδρος χωρίς μεμβράνη). Η διαφορά αυτή εξακολουθεί να υπάρχει και στις $60RPM$ πιο κοντά όμως στη στερεή επιφάνεια ($1.2R$). Στις $100RPM$ και $150RPM$ οι διαφορές ελατώνονται περίπου στο 2%, ενώ σε μεγαλύτερες ταχύτητες και πολύ κοντά στον κύλινδρο τα προφίλ ταχυτήτων πλέον συμπίπτουν. Συμπερασματικά, υπάρχει μια περιοχή στροφών ($10 - 150RPM$) όπου η χρήση του Riblet film συντελεί σε μικρότερες ταχύτητες κοντά στην επιφάνεια και επομένως μικρότερες διατμητικές τάσεις.



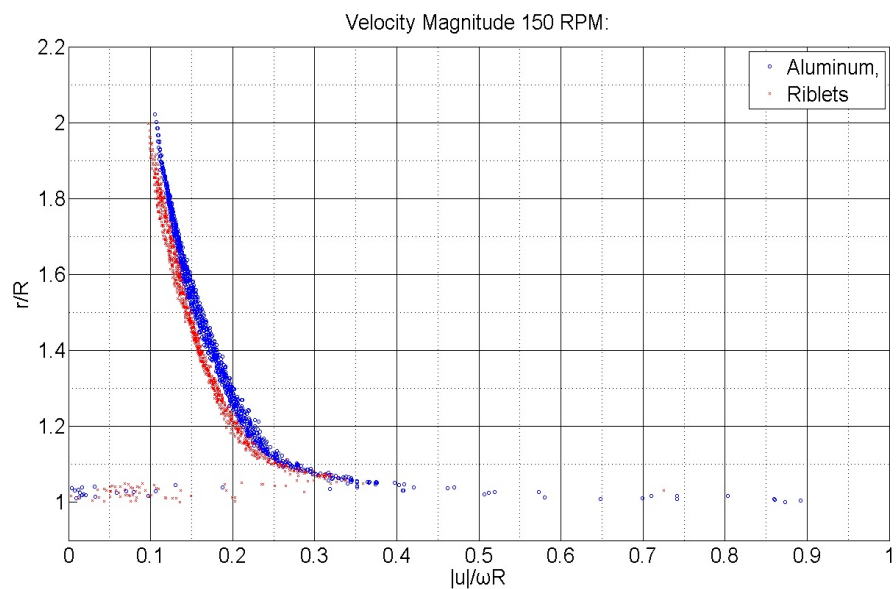
Σχήμα 5.26: Συγκριτικό διάγραμμα αδιάστατου μέτρου ταχύτητας για τις επιφάνειες (aluminum, riblet) στις $10RPM$



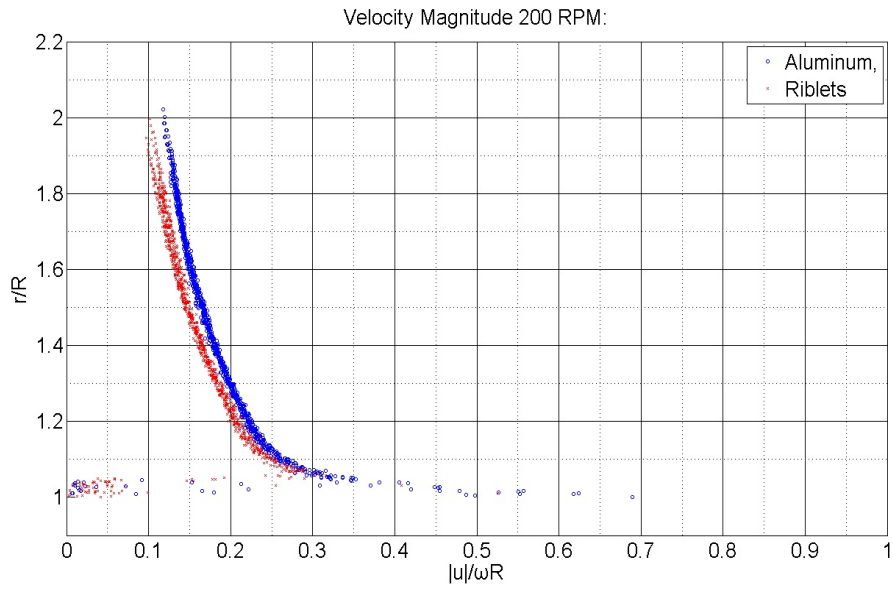
Σχήμα 5.27: Συγκριτικό διάγραμμα αδιάστατου μέτρου ταχύτητας για τις επιφάνειες (aluminum, riblet) στις $60RPM$



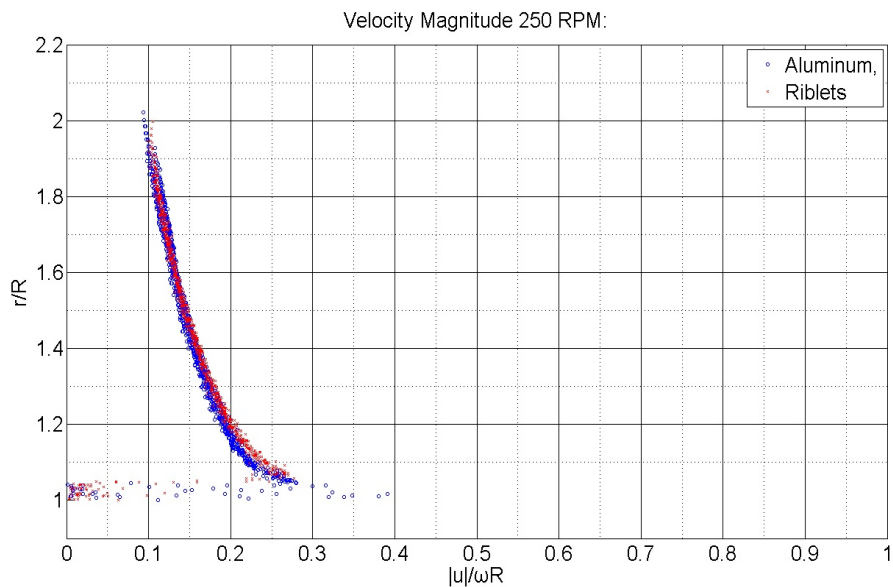
Σχήμα 5.28: Συγκριτικό διάγραμμα αδιάστατου μέτρου ταχύτητας για τις επιφάνειες (aluminum, riblet) στις $100RPM$



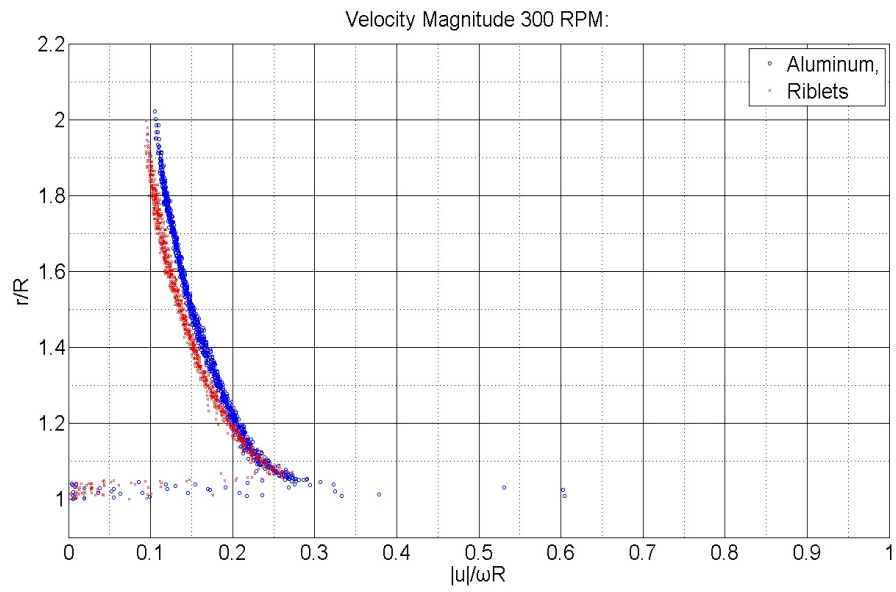
Σχήμα 5.29: Συγκριτικό διάγραμμα αδιάστατου μέτρου ταχύτητας για τις επιφάνειες (aluminum, riblet) στις $150RPM$



Σχήμα 5.30: Συγκριτικό διάγραμμα αδιάστατου μέτρου ταχύτητας για τις επιφάνειες (aluminum, riblet) στις $200RPM$



Σχήμα 5.31: Συγκριτικό διάγραμμα αδιάστατου μέτρου ταχύτητας για τις επιφάνειες (aluminum, riblet) στις $250RPM$



Σχήμα 5.32: Συγκριτικό διάγραμμα αδιάστατου μέτρου ταχύτητας για τις επιφάνειες (aluminum, riblet) στις $300RPM$

Κεφάλαιο 6

Επίλογος

6.1 Συμπεράσματα

Η ανάπτυξη υπερυδροφобων επιφανειών για τη μείωση της οπισθέλκουσας δύναμης σε ρευστομηχανικά συστήματα μεγάλης κλίμακας έχει αποτελέσει αντικείμενο πολλαπλών ερευνών από αρκετούς ερευνητές.

Στην παρούσα εργασία μελετάται η ροή του νερού σε γεινίαση με την επιφάνεια στρεφόμενου κυλίνδρου με διάφορα χαρακτηριστικά τραχύτητας, υπερυδροφοβικότητας και υδροφιλικότητας χρησιμοποιώντας την τεχνική PIV.

Το πείραμα διεξάχθηκε σε ένα σύνολο ρυθμών διάτμησης (10 – 600RPM) και μελετήθηκε τόσο ως προς την επίδραση της θερμοκρασίας, όσο και της χρονικής του εξέλιξης. Το πείραμα επαναλήφθηκε με χρήση μιας ακόμη εμπορικά διαθέσιμης μεμβράνης για τη μείωση της υδροδυναμικής αντίστασης.

Αυτή είναι μια πρώτη προσπάθεια για τη μελέτη του συγκεκριμένου, ιδιαίτερα περίπλοκου και μέχρι στιγμής όχι απόλυτα κατανοητού ως προς τη φυσική του συμπεριφορά φαινομένου.

Παρακάτω παρατίθενται ορισμένα από τα συμπεράσματα:

- Με την υπερυδροφобη επιφάνεια δεν παρατηρήθηκε η ύπαρξη (μεγάλου) μήκους ολίσθησης που να επηρεάζει τη ροή, τουλάχιστον στο πεδίο που η οπτικοποίηση δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα και εντός του πειραματικού σφάλματος.
- Σε σχέση με τη χρονική εξέλιξη του φαινομένου, οι αυξημένες διαταραχές των ταχυτήτων στην αρχή φαίνεται να μην έχουν κάποια συσχέτιση με την υπερυδροφобη επιφάνεια (ή το *plastron*), αφού παρόμοιες διαταραχές εντοπίζονται και στην *untreated* επιφάνεια. Οι διαταραχές αυτές μπορεί να οφείλονται στην μη μονιμότητα της ροής ή/και σε

ατέλειες που προκύπτουν κατά την κόλληση των επιφανειών.

- Με τη χρήση του Riblet film εντοπίζεται μια περιοχή στροφών (10 – 150RPM), όπου το μέτρο της ταχύτητας κοντά στον κύλινδρο εμφανίζεται μικρότερο (από 5% έως 2%, αντίστοιχα) και άρα συνεπάγεται μικρότερες διατμητικές τάσεις στην επιφάνεια.
- Τόσο το γεγονός της επίδρασης στην ταχύτητα του ποσοστού κάλυψης του κυλίνδρου με ΥΦΒ επιφάνεια, όσο και η υπολογιστική προσομοίωση δείχνουν την ύπαρξη ροής παράλληλα προς τον διαμήκη άξονα του κυλίνδρου.

6.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις

Το σύστημα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας θα μπορούσε να βελτιωθεί και να επεκταθεί περαιτέρω, τουλάχιστον ως προς τρεις κατευθύνσεις. Συγκεκριμένα, αναφέρονται τα ακόλουθα:

- Κατάλληλη προσαρμογή της γεωμετρίας της δεξαμενής με κατασκευή εξωτερικού ακίνητου του κυλίνδρου από υλικό, που να μην δημιουργεί ζητήματα διάθλασης με το ρευστό. Οι διαστάσεις θα πρέπει να καθορισθούν έτσι ώστε να μην ξεπερνάται ο κρίσιμος αριθμός Taylor και να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση της 3ης διάστασης.
- Μέτρηση των ταχυτήτων ακόμη πιο κοντά στην επιφάνεια και εγκατάσταση συστήματος μέτρησης των ροπών στον εσωτερικό κύλινδρο ώστε να γίνει επιβεβαίωση της ενδεχόμενης μείωσης της αντίστασης.
- Κατάλληλη τροποποίηση της ΥΦΒ επιφάνειας, όπως υποδεικνύεται σε μεγάλο μέρος της βιβλιογραφίας, για την επίτευξη μεγάλου μήκους ολίσθησης (μεγαλύτερο γεωμετρικό βήμα-απόσταση μεταξύ των δομών) καθώς επίσης και για την αντοχή τους σε μετάβαση διαβροχής.

Παράρτημα Α'

Κώδικας

```
1  clc
2  close all
3  clear
4
5  N=450;%rpm
6  R1=12.65;%mm
7  R2=12.9;
8  R3=12.875;
9
10 %index 1: aluminum surface
11 %index 2: untreated surface
12 %index 3: superhydrophobic surface
13
14 r1=62;           %conversion ratio 1
15 r2=62;
16 r3=62;
17
18 dT1=500*10(-6);   %laser pulse delta t
19 dT2=500*10(-6);
20 dT3=1200*10(-6);
21
22 %cylinder center
```

```
23 xc1=601/r1;
24 yc1=-409.25/r1;
25
26 xc2=737/r2;
27 yc2=-441.8/r2;
28
29 xc3=673/r3;
30 yc3=-490.25/r3;
31
32 %%%% Load files %%%%
33 %1
34 cd('C:\Users\dimg9\Desktop\Master thesis\My_Cylinder\
    experiments\Jan9Cylinder\450rpm_aluminum\Analysis')
35 fnames1 = dir('*.vec');
36 start1=1;
37 end1=400;
38 sel1=start1:1:end1;
39 numfiles1 = length(sel1);
40 val1 = cell(numfiles1,1);
41 j=0;
42 for K = start1:end1
43     j=j+1;
44     val1{j} = importdata(fnames1(K).name);
45 end
46
47 %2
48 cd('C:\Users\dimg9\Desktop\Master thesis\My_Cylinder\
    experiments\Feb24Riblets\450rpm_riblets\Analysis')
49 fnames2 = dir('*.vec');
50 start2=1;
51 end2=400;
52 sel2=start2:1:end2;
53 numfiles2 = length(sel2);
```

```
54 val2 = cell(numfiles2,1);
55 j=0;
56 for K = start2:end2
57     j=j+1;
58     val2{j} = importdata(fnames2(K).name);
59 end
60
61 %3
62 cd('C:\Users\dimg9\Desktop\Master thesis\My_Cylinder\
    experiments\TemperatureCase\testB\Analysis')
63 fnames3 = dir('*.vec');
64 start3=1;
65 end3=2;
66 sel3=start3:1:end3;
67 numfiles3 = length(sel3);
68 val3 = cell(numfiles3,1);
69 j=0;
70 for K = start3:end3
71     j=j+1;
72     val3{j} = importdata(fnames3(K).name);
73 end
74
75
76 %%%% Remove invalid vectors - conversion(mm/sec) %%%%
77
78 n1=zeros(1,1302);
79 for i=1:1302;
80     for K = 1:numfiles1
81         if val1{K}.data(i,5)==-1;
82             val1{K}.data(i,3)=0; val1{K}.data(i,4)=0;
83         else n1(i)=n1(i)+1;
84         end
85
```

```
86     vec1{K}(i,1)=val1{K}.data(i,1)/r1;
87     vec1{K}(i,2)=val1{K}.data(i,2)/r1;
88     vec1{K}(i,3)=val1{K}.data(i,3)/(r1*dT1);
89     vec1{K}(i,4)=val1{K}.data(i,4)/(r1*dT1);
90     end
91 end
92
93 n2=zeros(1,1302);
94 for i=1:1302;
95     for K = 1:numfiles2
96         if val2{K}.data(i,5)==-1;
97             val2{K}.data(i,3)=0; val2{K}.data(i,4)=0;
98         else n2(i)=n2(i)+1;
99         end
100
101     vec2{K}(i,1)=val2{K}.data(i,1)/r2;
102     vec2{K}(i,2)=val2{K}.data(i,2)/r2;
103     vec2{K}(i,3)=val2{K}.data(i,3)/(r2*dT2);
104     vec2{K}(i,4)=val2{K}.data(i,4)/(r2*dT2);
105     end
106 end
107
108 n3=zeros(1,1302);
109 for i=1:1302;
110     for K = 1:numfiles3
111         if val3{K}.data(i,5)==-1;
112             val3{K}.data(i,3)=0; val3{K}.data(i,4)=0;
113         else n3(i)=n3(i)+1;
114         end
115
116     vec3{K}(i,1)=val3{K}.data(i,1)/r3;
117     vec3{K}(i,2)=val3{K}.data(i,2)/r3;
118     vec3{K}(i,3)=val3{K}.data(i,3)/(r3*dT3);
```



```
119     vec3{K}(i,4)=val3{K}.data(i,4)/(r3*dT3);
120     end
121 end
122
123 %%%% Averaging %%%%
124
125 avg1=zeros(1302,4);
126 avg1(:,1)=vec1{1}(:,1);
127 avg1(:,2)=vec1{1}(:,2);
128
129 for i=1:1302;
130     for K=1:numfiles1
131
132         avg1(i,3)=avg1(i,3)+vec1{K}(i,3);
133         avg1(i,4)=avg1(i,4)+vec1{K}(i,4);
134     end
135
136     avg1(i,3)=avg1(i,3)/n1(i);
137     avg1(i,4)=avg1(i,4)/n1(i);
138 end
139
140 avg2=zeros(1302,4);
141 avg2(:,1)=vec2{1}(:,1);
142 avg2(:,2)=vec2{1}(:,2);
143
144 for i=1:1302;
145     for K=1:numfiles2
146
147         avg2(i,3)=avg2(i,3)+vec2{K}(i,3);
148         avg2(i,4)=avg2(i,4)+vec2{K}(i,4);
149     end
150
151     avg2(i,3)=avg2(i,3)/n2(i);
```

```
152     avg2(i,4)=avg2(i,4)/n2(i);
153 end
154
155 avg3=zeros(1302,4);
156 avg3(:,1)=vec3{1}(:,1);
157 avg3(:,2)=vec3{1}(:,2);
158
159 for i=1:1302;
160     for K=1:numfiles3
161
162         avg3(i,3)=avg3(i,3)+vec3{K}(i,3);
163         avg3(i,4)=avg3(i,4)+vec3{K}(i,4);
164     end
165
166     avg3(i,3)=avg3(i,3)/n3(i);
167     avg3(i,4)=avg3(i,4)/n3(i);
168 end
169
170 x1=vec2mat(avg1(:,1),42);
171 y1=vec2mat(avg1(:,2),42);
172 u1=vec2mat(avg1(:,3),42);
173 v1=vec2mat(avg1(:,4),42);
174
175 x2=vec2mat(avg2(:,1),42);
176 y2=vec2mat(avg2(:,2),42);
177 u2=vec2mat(avg2(:,3),42);
178 v2=vec2mat(avg2(:,4),42);
179
180 x3=vec2mat(avg3(:,1),42);
181 y3=vec2mat(avg3(:,2),42);
182 u3=vec2mat(avg3(:,3),42);
183 v3=vec2mat(avg3(:,4),42);
184
```

```
185 for k=1:31;
186     for i=1:42
187         if sqrt((x1(k,i)-xc1)^2+(y1(k,i)-yc1)^2)<R1;
188             u1(k,i)=0; v1(k,i)=0;
189         end
190     end
191 end
192
193 for k=1:31;
194     for i=1:42
195         if sqrt((x2(k,i)-xc2)^2+(y2(k,i)-yc2)^2)<R2;
196             u2(k,i)=0; v2(k,i)=0;
197         end
198     end
199 end
200
201 for k=1:31;
202     for i=1:42
203         if sqrt((x3(k,i)-xc3)^2+(y3(k,i)-yc3)^2)<R3;
204             u3(k,i)=0; v3(k,i)=0;
205         end
206     end
207 end
208
209 %%%% Vector Field %%%%
210
211 omega=2*pi*N/60;
212 U1=omega*R1;
213 U2=omega*R2;
214 U3=omega*R3;
215
216 figure(1)
217 quiver((x1-xc1)/R1,(y1-yc1)/R1,u1/U1,v1/U1,0)
```

```

218 title('Vector Field Aluminum Surface');
219 xlabel('x/R')
220 ylabel('y/R')
221 axis equal
222 ylim([min(min((y1-yc1)/R1)) max(max((y1-yc1)/R1))])
223 xlim([min(min((x1-xc1)/R1)) max(max((x1-xc1)/R1))])
224
225 figure(2)
226 quiver((x2-xc2)/R2,(y2-yc2)/R2,u2/U2,v2/U2,0)
227 title('Vector Field Untreated Surface');
228 xlabel('x/R')
229 ylabel('y/R')
230 axis equal
231 ylim([ min(min(min((y3-yc3)/R2,(y2-yc2)/R2))) max(max(max((
        y3-yc3)/R2,(y2-yc2)/R2)))]])
232 xlim([ min(min(min((x3-xc3)/R2,(x2-xc2)/R2))) max(max(max((
        x3-xc3)/R2,(x2-xc2)/R2)))]])
233
234 figure(3)
235 quiver((x3-xc3)/R3,(y3-yc3)/R3,u3/U3,v3/U3,0)
236 title('Vector Field Superhydrophobic Surface');
237 xlabel('x/R')
238 ylabel('y/R')
239 axis equal
240 ylim([ min(min(min((y3-yc3)/R3,(y2-yc2)/R3))) max(max(max((
        y3-yc3)/R3,(y2-yc2)/R3)))]])
241 xlim([ min(min(min((x3-xc3)/R3,(x2-xc2)/R3))) max(max(max((
        x3-xc3)/R3,(x2-xc2)/R3)))]])
242
243 % %
244 % % %%% Vorticity Calculation %%%
245 %
246 % [curl1,cav1]= curl(x1,y1,u1,v1);

```

```
247 % vort1=curl1/omega;
248 % for k=1:31;
249 %     for i=1:42
250 %         if sqrt((x1(k,i)-xc1)^2+(y1(k,i)-yc1)^2)<R;
251 %             vort1(k,i)=NaN;
252 %         end
253 %     end
254 % end
255 %
256 %
257 % % % % %   Vorticity field   % % % % %
258 %
259 % figure(2)
260 % contourf((x1-xc1)/R,(y1-yc1)/R,vort1,[-1.5 -1.25 -1 -0.75
    -0.5 -0.25 -0 0.25 0.5 0.75 1 1.25 1.5]);
261 % %ylim([min(min(y)) max(max(y))])
262 % xlabel('x/R')
263 % ylabel('y/R')
264 % axis equal tight
265 % title('Vorticity Field Aluminum Surface');
266 % colorbar
267 % colormap jet
268 % caxis([-1.5,1.5]);
269 % %
270 % % % % %   Velocity Magnitude   % % % % %
271
272 for i=1:31
273     for j=1:42
274         mag1(i,j)=sqrt(u1(i,j)^2+v1(i,j)^2);
275         mag2(i,j)=sqrt(u2(i,j)^2+v2(i,j)^2);
276         mag3(i,j)=sqrt(u3(i,j)^2+v3(i,j)^2);
277
278         CA1x(i,j)=x1(i,j)-xc1;
```

```
279     CA1y(i,j)=y1(i,j)-yc1;
280     UA1x(i,j)=x1(i,j)+u1(i,j);
281     UA1y(i,j)=y1(i,j)+v1(i,j);
282     theta1(i,j)=acosd(dot([CA1x(i,j) CA1y(i,j)], [UA1x(i,j)
        ) UA1y(i,j)])/(norm([CA1x(i,j) CA1y(i,j)])*norm([
        UA1x(i,j) UA1y(i,j)]))));
283     utheta1(i,j)=u1(i,j)*sind(theta1(i,j));
284
285     CA2x(i,j)=x2(i,j)-xc2;
286     CA2y(i,j)=y2(i,j)-yc2;
287     UA2x(i,j)=x2(i,j)+u2(i,j);
288     UA2y(i,j)=y2(i,j)+v2(i,j);
289     theta2(i,j)=acosd(dot([CA2x(i,j) CA2y(i,j)], [UA2x(i,j)
        ) UA2y(i,j)])/(norm([CA2x(i,j) CA2y(i,j)])*norm([
        UA2x(i,j) UA2y(i,j)]))));
290     utheta2(i,j)=u2(i,j)*sind(theta2(i,j));
291
292     CA3x(i,j)=x3(i,j)-xc3;
293     CA3y(i,j)=y3(i,j)-yc3;
294     UA3x(i,j)=x3(i,j)+u3(i,j);
295     UA3y(i,j)=y3(i,j)+v3(i,j);
296     theta3(i,j)=acosd(dot([CA3x(i,j) CA3y(i,j)], [UA3x(i,j)
        ) UA3y(i,j)])/(norm([CA3x(i,j) CA3y(i,j)])*norm([
        UA3x(i,j) UA3y(i,j)]))));
297     utheta3(i,j)=u3(i,j)*sind(theta3(i,j));
298     end
299 end
300
301 figure(4)
302 contourf((x1-xc1)/R1,(y1-yc1)/R1,mag1/U1,[0.1 0.15 0.2 0.25
        0.3 0.35 0.4]);
303 title('Magnitude Contour Aluminum Surface')
304 xlabel('x/R')
```

```
305 ylabel('y/R')
306 colorbar
307 colormap jet
308 axis equal tight
309 caxis([0.1 0.4])
310 ylim([ min(min(min((y3-yc3)/R3,(y2-yc2)/R2))) max(max(max((
    y3-yc3)/R3,(y2-yc2)/R2))))])
311 xlim([ min(min(min((x3-xc3)/R3,(x2-xc2)/R2))) max(max(max((
    x3-xc3)/R3,(x2-xc2)/R2))))])
312
313 figure(5)
314 contourf((x2-xc2)/R2,(y2-yc2)/R2,mag2/U2,[0.1 0.15 0.2 0.25
    0.3 0.35 0.4]);
315 title('Magnitude Contour Untreated Surface')
316 xlabel('x/R')
317 ylabel('y/R')
318 colorbar
319 colormap jet
320 axis equal tight
321 caxis([0.1 0.4])
322 ylim([ min(min(min((y3-yc3)/R3,(y2-yc2)/R2))) max(max(max((
    y3-yc3)/R3,(y2-yc2)/R2))))])
323 xlim([ min(min(min((x3-xc3)/R3,(x2-xc2)/R2))) max(max(max((
    x3-xc3)/R3,(x2-xc2)/R2))))])
324
325 figure(6)
326 contourf((x3-xc3)/R3,(y3-yc3)/R3,mag3/U3,[0.1 0.15 0.2 0.25
    0.3 0.35 0.4]);
327 title('Magnitude Contour Superhydrophobic Surface')
328 xlabel('x/R')
329 ylabel('y/R')
330 colorbar
331 colormap jet
```

```

332 axis equal tight
333 caxis([0.1 0.4])
334 ylim([ min(min(min((y3-yc3)/R3,(y2-yc2)/R2))) max(max(max((
        y3-yc3)/R3,(y2-yc2)/R2))))])
335 xlim([ min(min(min((x3-xc3)/R3,(x2-xc2)/R2))) max(max(max((
        x3-xc3)/R3,(x2-xc2)/R2))))])
336
337
338 for k=1:31;
339     for i=1:42
340         if sqrt((x1(k,i)-xc1)^2+(y1(k,i)-yc1)^2)<R1;
341             vel1(k,i)=NaN;
342             utheta1(k,i)=NaN;
343             theta1(k,i)=NaN;
344
345         else r1(k,i)=sqrt((x1(k,i)-xc1)^2+(y1(k,i)-yc1)^2)/R1
            ; vel1(k,i)=sqrt(u1(k,i)^2+v1(k,i)^2)/U1;
346         end
347     end
348 end
349
350 for k=1:31;
351     for i=1:42
352         if sqrt((x2(k,i)-xc2)^2+(y2(k,i)-yc2)^2)<R2;
353             vel2(k,i)=NaN;
354             utheta2(k,i)=NaN;
355             theta2(k,i)=NaN;
356
357         else r2(k,i)=sqrt((x2(k,i)-xc2)^2+(y2(k,i)-yc2)^2)/R2
            ; vel2(k,i)=sqrt(u2(k,i)^2+v2(k,i)^2)/U2;
358         end
359     end
360 end

```



```
361
362 for k=1:31;
363     for i=1:42
364         if sqrt((x3(k,i)-xc3)^2+(y3(k,i)-yc3)^2)<R3;
365             vel3(k,i)=NaN;
366             utheta3(k,i)=NaN;
367             theta3(k,i)=NaN;
368
369         else r3(k,i)=sqrt((x3(k,i)-xc3)^2+(y3(k,i)-yc3)^2)/R3
370             ; vel3(k,i)=sqrt(u3(k,i)^2+v3(k,i)^2)/U3;
371         end
372     end
373
374 figure(7)
375 hold on
376 set(gca,'fontsize',20)
377 g1=plot(vel1,r1,'ob','MarkerSize',3);
378 g2=plot(vel2,r2,'xr','MarkerSize',3);
379 %g3=plot(vel3,r3,'+k','MarkerSize',3);
380 legend([g1(1),g2(1)],'Aluminum','Riblets')
381 grid minor
382 xlabel('|u|/wR')
383 ylabel('r/R')
384 str=sprintf('Velocity Magnitude %d RPM:',N);
385 title(str)
386 ylim([0.9 2.2])
387 xlim([0 1])
388
389 figure(8)
390 hold on
391 set(gca,'fontsize',20)
392 H1=plot(utheta1/U1,r1,'ob','MarkerSize',3);
```

```
393 H2=plot(utheta2/U2,r2,'or','MarkerSize',3);
394 %H3=plot(utheta3/U3,r3,'+k','MarkerSize',3);
395 legend([H1(1),H2(1)],'aluminum 13Feb','Riblets')
396 title(str)
397 grid minor
398 xlabel('u_{j}/wR')
399 ylabel('r/R')
400 str=sprintf('u_{j}- %d RPM:',N);
401 title(str)
402 ylim([0.9 2.2])
403 xlim([0 1])
404
405 figure(9)
406 contourf((x1-xc1)/R1,(y1-yc1)/R1,utheta1/U1,[0.1 0.15 0.2
    0.25 0.3 0.35 0.4]);
407 title('u_j Aluminum Surface')
408 xlabel('x/R')
409 ylabel('y/R')
410 colorbar
411 colormap jet
412 axis equal tight
413 caxis([0.1 0.4])
414 ylim([ min(min(min((y3-yc3)/R3,(y2-yc2)/R2))) max(max(max((
    y3-yc3)/R3,(y2-yc2)/R2))))])
415 xlim([ min(min(min((x3-xc3)/R3,(x2-xc2)/R2))) max(max(max((
    x3-xc3)/R3,(x2-xc2)/R2))))])
416
417 figure(10)
418 contourf((x2-xc2)/R2,(y2-yc2)/R2,utheta2/U2,[0.1 0.15 0.2
    0.25 0.3 0.35 0.4]);
419 title('u_j Riblets Surface')
420 xlabel('x/R')
421 ylabel('y/R')
```

```
422 colorbar
423 colormap jet
424 axis equal tight
425 caxis([0.1 0.4])
426 ylim([ min(min(min((y3-yc3)/R3,(y2-yc2)/R2))) max(max(max((
    y3-yc3)/R3,(y2-yc2)/R2))))])
427 xlim([ min(min(min((x3-xc3)/R3,(x2-xc2)/R2))) max(max(max((
    x3-xc3)/R3,(x2-xc2)/R2))))])
428
429 figure(11)
430 contourf((x3-xc3)/R1,(y3-yc3)/R1,utheta3/U3,[0.1 0.15 0.2
    0.25 0.3 0.35 0.4]);
431 title('u_j Superhydrophobic Surface')
432 xlabel('x/R')
433 ylabel('y/R')
434 colorbar
435 colormap jet
436 axis equal tight
437 caxis([0.1 0.4])
438 ylim([ min(min(min((y3-yc3)/R3,(y2-yc2)/R2))) max(max(max((
    y3-yc3)/R3,(y2-yc2)/R2))))])
439 xlim([ min(min(min((x3-xc3)/R3,(x2-xc2)/R2))) max(max(max((
    x3-xc3)/R3,(x2-xc2)/R2))))])
```


Bibliography

- [1] Barthlott, W. and Neinhuis, C. (1997). Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces. *Planta*, 202(1):1–8.
- [2] Biben, T. and Joly, L. (2008). Wetting on nanorough surfaces. *Physical review letters*, 100(18):186103.
- [3] Bocquet, L., Tabeling, P., and Manneville, S. (2006). Comment on” large slip of aqueous liquid flow over a nanoengineered superhydrophobic surface”. *Physical review letters*, 97(10):109601.
- [4] Buchhave, P. (1992). Particle image velocimetry–”status and trends. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 5(5):586 – 604. Special Issue on Experimental Methods in Thermal and Fluid Science.
- [5] Cassie, A. and Baxter, S. (1944). Wettability of porous surfaces. *Transactions of the Faraday society*, 40:546–551.
- [6] Cheng, J.-T. and Giordano, N. (2002). Fluid flow through nanometer-scale channels. *Physical review E*, 65(3):031206.
- [7] Choi, C.-H. and Kim, C.-J. (2006). Large slip of aqueous liquid flow over a nanoengineered superhydrophobic surface. *Physical review letters*, 96(6):066001.
- [8] Cottin-Bizonne, C., Barentin, C., and Bocquet, L. (2012). Scaling laws for slippage on superhydrophobic fractal surfaces. *Physics of fluids*, 24(1):012001.
- [9] Davis, A. M. and Lauga, E. (2009a). The friction of a mesh-like super-hydrophobic surface. *Physics of Fluids*, 21(11):015103.
- [10] Davis, A. M. and Lauga, E. (2009b). Geometric transition in friction for flow over a bubble mattress. *Physics of Fluids*, 21(1):011701.

-
- [11] Davis, A. M. and Lauga, E. (2010). Hydrodynamic friction of fakir-like superhydrophobic surfaces. *Journal of Fluid Mechanics*, 661:402–411.
- [12] Feuillebois, F., Bazant, M. Z., and Vinogradova, O. I. (2009). Effective slip over superhydrophobic surfaces in thin channels. *Physical review letters*, 102(2):026001.
- [13] Gao, P. and Feng, J. J. (2009). Enhanced slip on a patterned substrate due to depinning of contact line. *Physics of Fluids*, 21(10):102102.
- [14] Gogte, S., Vorobieff, P., Truesdell, R., Mammoli, A., van Swol, F., Shah, P., and Brinker, C. J. (2005). Effective slip on textured superhydrophobic surfaces. *Physics of fluids*, 17(5):051701.
- [15] Govardhan, R., Srinivas, G., Asthana, A., and Bobji, M. (2009). Time dependence of effective slip on textured hydrophobic surfaces. *Physics of Fluids*, 21(5):052001.
- [16] Holt, J. K., Park, H. G., Wang, Y., Stadermann, M., Artyukhin, A. B., Grigoropoulos, C. P., Noy, A., and Bakajin, O. (2006). Fast mass transport through sub-2-nanometer carbon nanotubes. *Science*, 312(5776):1034–1037.
- [17] Jahanmiri, M. (2011). Particle image velocimetry: Fundamentals and its applications. Technical report. 58.
- [18] Joseph, P., Cottin-Bizonne, C., Benoît, J.-M., Ybert, C., Journet, C., Tabeling, P., and Bocquet, L. (2006). Slippage of water past superhydrophobic carbon nanotube forests in microchannels. *Physical review letters*, 97(15):156104.
- [19] Jung, Y. C. and Bhushan, B. (2009). Biomimetic structures for fluid drag reduction in laminar and turbulent flows. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 22(3):035104.
- [20] Kim, D. and Hwang, W. (2010). A template-based superhydrophobic tube structure with nanofiber forests and its mass flow characteristic. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 20(2):027002.
- [21] Kim, J. and Kim, C.-J. (2002). Nanostructured surfaces for dramatic reduction of flow resistance in droplet-based microfluidics. In *Micro Electro Mechanical Systems, 2002. The Fifteenth IEEE International Conference on*, pages 479–482. IEEE.
- [22] Lauga, E. and Stone, H. A. (2003). Effective slip in pressure-driven stokes flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 489:55.

- [23] Lee, C., Choi, C.-H., et al. (2008). Structured surfaces for a giant liquid slip. *Physical review letters*, 101(6):064501.
- [24] Lee, C., Choi, C.-H., and Kim, C.-J. (2016). Superhydrophobic drag reduction in laminar flows: a critical review. *Experiments in Fluids*, 57(12):176.
- [25] Lee, C. and Kim, C.-J. (2012). Wetting and active dewetting processes of hierarchically constructed superhydrophobic surfaces fully immersed in water. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 21(3):712–720.
- [26] Li, J., Zhou, M., Ye, X., and Cai, L. (2010). Self-comparison measurement for slippage on superhydrophobic surfaces based on the wetting transition. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 20(11):115022.
- [27] Ming, Z., Jian, L., Chunxia, W., Xiaokang, Z., and Lan, C. (2011). Fluid drag reduction on superhydrophobic surfaces coated with carbon nanotube forests (cnts). *Soft Matter*, 7(9):4391–4396.
- [28] Neto, C., Evans, D. R., Bonaccorso, E., Butt, H.-J., and Craig, V. S. J. (2005). Boundary slip in newtonian liquids: a review of experimental studies. *Reports on Progress in Physics*, 68(12):2859.
- [29] Ou, J., Perot, B., and Rothstein, J. P. (2004). Laminar drag reduction in microchannels using ultrahydrophobic surfaces. *Physics of fluids*, 16(12):4635–4643.
- [30] Philip, J. R. (1972). Flows satisfying mixed no-slip and no-shear conditions. *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik ZAMP*, 23(3):353–372.
- [31] Poetes, R., Holtzmann, K., Franze, K., and Steiner, U. (2010). Metastable underwater superhydrophobicity. *Physical review letters*, 105(16):166104.
- [32] Sakai, M., Nakajima, A., and Fujishima, A. (2010). Removing an air layer from a superhydrophobic surface in flowing water. *Chemistry letters*, 39(5):482–484.
- [33] Samaha, M. A., Vahedi Tafreshi, H., and Gad-el Hak, M. (2011). Modeling drag reduction and meniscus stability of superhydrophobic surfaces comprised of random roughness. *Physics of Fluids*, 23(1):012001.

- [34] Shirtcliffe, N. J., McHale, G., Newton, M. I., and Zhang, Y. (2009). Superhydrophobic copper tubes with possible flow enhancement and drag reduction. *ACS applied materials & interfaces*, 1(6):1316–1323.
- [35] Srinivasan, S., Choi, W., Park, K.-C., Chhatre, S. S., Cohen, R. E., and McKinley, G. H. (2013). Drag reduction for viscous laminar flow on spray-coated non-wetting surfaces. *Soft Matter*, 9(24):5691–5702.
- [36] Taylor, G. I. (1923). Stability of a viscous liquid contained between two rotating cylinders. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, 223:289–343.
- [37] Thompson, P. A. and Troian, S. M. (1997). A general boundary condition for liquid flow at solid surfaces. *Nature*, 389(6649):360–362.
- [38] Truesdell, R., Mammoli, A., Vorobieff, P., van Swol, F., and Brinker, C. J. (2006). Drag reduction on a patterned superhydrophobic surface. *Physical review letters*, 97(4):044504.
- [39] Vinogradova, O. I. and Belyaev, A. V. (2011). Wetting, roughness and flow boundary conditions. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 23(18):184104.
- [40] Wang, Y., Bhushan, B., and Maali, A. (2009). Atomic force microscopy measurement of boundary slip on hydrophilic, hydrophobic, and superhydrophobic surfaces. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 27(4):754–760.
- [41] Watanabe, K., Udagawa, Y., and Udagawa, H. (1999). Drag reduction of newtonian fluid in a circular pipe with a highly water-repellent wall. *Journal of Fluid Mechanics*, 381:225–238.
- [42] Wenzel, R. N. (1936). Resistance of solid surfaces to wetting by water. *Industrial & Engineering Chemistry*, 28(8):988–994.
- [43] Ybert, C., Barentin, C., Cottin-Bizonne, C., Joseph, P., and Bocquet, L. (2007). Achieving large slip with superhydrophobic surfaces: Scaling laws for generic geometries. *Physics of fluids*, 19(12):123601.

