



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

**Πειραματική μελέτη της επίδρασης στη Ροή Επιφάνειας
Περιστρεφόμενου Κυλίνδρου με Υπερυδρόφοβα και
Υδρόφιλα Χαρακτηριστικά**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΟΥ
ΓΕΩΡΓΙΟΥ ΜΠΕΝΕΚΟΥ

Ακαδημαϊκός επιβλέπων

Καθηγητής
Μαθιουλάκης Δημήτριος

Αθήνα, Μάρτιος 2018



**NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF
ATHENS
DEPT. OF MECHANICAL ENGINEERING
FLUID SECTION**

**Experimental Study of the Influence on Surface Flow of Rotating
Cylinder with Superhydrophobic and Hydrophilic Characteristics**

**DIPLOMA THESIS
of
GEORGIOS BENEKOS**

Supervisor

**Professor
Mathioulakis Demetri**

Athens, March 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΟΥ
ΓΕΩΡΓΙΟΥ ΜΠΕΝΕΚΟΥ

Ακαδημαϊκός επιβλέπων

Καθηγητής
Μαθιουλάκης Δημήτριος

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή:

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....

.....

.....

Βουτσινάς Σπυρίδων

Μπούρης Δημήτριος

Ριζιώτης Βασίλειος

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αναπληρωτής

Επίκουρος

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Ευχαριστίες

“I seem to have been only like a boy playing on the seashore, and diverting myself in now and then finding a smoother pebble or a prettier shell than ordinary, whilst the great ocean of truth lay all undiscovered before me.”

Isaak Newton, Memoirs of the Life, Writing, and Discoveries of Sir Isaac Newton

Ο επιστημονικός κλάδος της μηχανικής των ρευστών αποτελούσε πάντα ένα ιδιαίτερα απαιτητικό αλλά και συνάμα γοητευτικό κομμάτι στο ψηφιδωτό που συνθέτει την επιστήμη του μηχανικού αλλά και τη σύγχρονη τεχνολογία. Αποτελεί μια ιδιαίτερα συμπαγή και αυστηρή επιστήμη η οποία δίνει έμφαση τόσο στη πειραματική και τη τεχνική προσέγγιση όσο και στη θεωρητική υπόσταση.

Ιδιαίτερη συμβολή στο να γίνει κατανοητή αλλά πολύ περισσότερο ενδιαφέρουσα μια τόσο αυστηρή και σύνθετη επιστήμη διαδραμάτισαν οι καθηγητές και το επιστημονικό προσωπικό του τομέα των ρευστών. Η αγάπη και η γνώση τους για το αντικείμενο σε συνδυασμό με την ακούραστη τάση τους να εμβαθύνουν διαρκώς στο πυρήνα της επιστημονικής σκέψης αρκετά πιο πέρα από τον τυπικό καθηγητικό επαγγελματισμό αποτέλεσαν ανδιαμφισβήτητα πηγή εμπνεύσης και ενασχόλησης τόσο για μένα όσο και για πολλούς ακόμα φοιτητές.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου Δημήτρη Μαθιουλάκη για την βοήθεια αλλά και την υποστήριξη που μου παρείχε καθ' όλο το διάστημα εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Οι γνώσεις, οι συμβουλές και οι επισημάνσεις του υπήρξαν καθοριστικές τόσο στην ομαλή διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας όσο και στην εμβάθυνση σε νέες έννοιες του κλάδου της ρευστομηχανικής.

Ιδιαίτερη αναφορά και θερμές ευχαριστίες οφείλω και στο υποψήφιο διδάκτορα Δημήτρη Γκιόλα ο οποίος με αμέριστο ενδιαφέρον και καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας συνέβαλε στην επιτυχή ολοκλήρωση της. Ο χρόνος που διέθεσε, η μεθοδικότητα, η σοβαρότητα αλλά και η ανιδιοτελής αγάπη του για αυτό που μελετάει συνολικά η επιστήμη της ρευστομηχανικής αποτέλεσαν υπόδειγμα για εμένα προσωπικής εμπνεύσης και δουλειάς.

Τέλος, εκφράζω τις θερμές μου ευχαριστίες στους γονείς μου για την ηθική και υλική υποστήριξη που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια καθώς και σε όλους τους κοντινούς μου ανθρώπους για τη συμπαράστασή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου στο τμήμα των Μηχανολόγων Μηχανικών.

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασία αποτέλεσε η πειραματική μελέτη της επίδρασης στη ροή επιφάνειας περιστρεφόμενου κυλίνδρου με υπερυδροφόβα και υδρόφιλα χαρακτηριστικά. Διεξήχθησαν μετρήσεις με την τεχνική του PIV για την οπτικοποίηση του πεδίου ταχυτήτων κοντά στην επιφάνεια περιστρεφόμενου κυλίνδρου και εξετάστηκαν οι περιπτώσεις i) ο κύλινδρος από αλουμίνιο να περιστρέφεται φέροντας υδρόφιλη μεμβράνη COP ii) ο κύλινδρος να περιστρέφεται φέροντας επιφάνεια με υπερυδροφόβα χαρακτηριστικά iii) ο κύλινδρος να περιστρέφεται φέροντας επιφάνεια με riblet διαμόρφωση και τέλος iv) ο κύλινδρος να περιστρέφεται φέροντας επιφάνεια riblet υπερυδροφόβα επεξεργασμένη. Οι επιφάνειες που προσαρτήθηκαν για τη διεξαγωγή των πειραμάτων κατασκευάστηκαν στο Τομέα Μικροηλεκτρονικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε 'Δ' με διεργασία πλάσματος και εναπόθεση υμενίου τεφλόν. Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε κατάλληλη πειραματική διάταξη τετραγωνικής δεξαμενής 15x15 cm από Plexiglas, πληρωμένης μέχρι τη μέση με απιονισμένο νερό το οποίο και περιβάλλει περιστρεφόμενο κύλινδρο από αλουμίνιου διαμέτρου 25mm ο οποίος και συνδέθηκε με βηματικό κινητήρα για τη μετάδοση των στροφών. Η καταγραφή του πεδίου της ταχύτητας έγινε στο μέσο της δεξαμενής με το κύλινδρο τοποθετημένο στο οριζόντιο επίπεδο για διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής.

Λέξεις κλειδιά

Υπερυδροφόβες επιφάνειες, Μήκος Ολίσθησης, Μείωση Οπισθέλκουσας, PIV

Abstract

The aim of this diploma thesis was the experimental study of the effect on the surface flow of a rotating cylinder with superhydrophobic and hydrophilic characteristics. PIV technique was employed to visualize the velocity field near the surface of the rotating cylinder and the cases that were examined are i) the aluminum cylinder rotating covered with an untreated superhydrophilic COP membrane (ii) the cylinder rotating with a membrane with super hydrophobic characteristics iii) a riblet film membrane and finally iv) a riblet film further processed to become superhydrophobic. The surfaces that were attached to the experiments were made in the Microelectronics Division of NCSR 'D' by plasma processing and teflon film deposition. In the context of this diploma thesis, a suitable experimental 15x15 cm Plexiglass tank, filled to the mid height with deionized water, was used and containing an 25mm diameter aluminum rotating cylinder which was coupled to a stepper motor to transmit the rotation. The speed range was recorded in the middle of the tank with the cylinder positioned in the horizontal plane for different rotational speeds.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες	4
Περίληψη	5
Abstract	5
1. Εισαγωγή	9
1.1 Οργάνωση του τόμου	9
2. Θεωρητικό υπόβαθρο	
Πειραματική μελέτη της επίδρασης στη Ροή Επιφάνειας Περιστρεφόμενου Κυλίνδρου με Υπερυδρόφοβα και Υδροφιλα Χαρακτηριστικά	1
2.1 Υδροφιλικότητα-Υδροφοβικότητα-Υπερυδροφοβικότητα	10
2.2 Γωνία Επαφής.....	10
2.2.1 Λεία Επιφάνεια.....	11
2.2.2 Επιφάνειες με Τραχύτητα	11
2.2.2.1 Μοντέλο Wenzel.....	11
2.2.2.2 Μοντέλο Cassie-Baxter	12
2.3 Γωνία Υστέρησης	13
2.4 Μήκος Ολίσθησης	14
2.5 Διάτμηση και ολίσθηση.....	16
2.6 Υδροστατική-Αεροστατική	17
2.7 Ροή ρευστού γύρω από περιστρεφόμενο κύλινδρο	18
2.7.1 Ροή Ρευστού ανάμεσα σε περιστρεφόμενους ομόκεντρους κυλίνδρους.....	19
2.9 Κίνηση στερεού σώματος μέσα σε ιξώδες ρευστό για κανονική και υπερυδροφόβη επιφάνεια	20
2.10 Επιφάνειες riblet	21
2.11 Το παράδειγμα του καρχαρία (riblet)	22
3. Βιβλιογραφική επισκόπηση	
3.1 Παράγοντες που επιδρούν στη μείωση της οπισθέλκουσας σε riblet επιφάνειες	23
3.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την ολίσθηση σε υδροφόβες επιφάνειες	25
3.3 Νανοφουσαλίδες και ολίσθηση	26
3.4 Συσχέτιση του μήκους ολίσθησης με τη μείωση της οπισθέλκουσας δύναμης.....	27
3.5 Ολίσθηση σε υπερυδόφοβες επιφάνειες. Θεωρητικές προσεγγίσεις.....	28
3.6 Διεργασίες κατασκευής υπερυδροφόβης επιφάνειας	29

3.7	Θεωρητικές προσεγγίσεις για το μήκος ολίσθησης σε διαφορετικά μοτίβα επιφανειών	30
3.8	Ανηγμένο μήκος ολίσθησης σε υπερυδροφώβες επιφάνειες.....	31
3.9	Σταθεροτητα της υπερυδροφοβικότητας κάτω απο το νερο	32
3.10	Μετάβαση της διαβροχής για κοιλότητες αέρα ανοιχτής κατάστασης.....	33
3.11	Μετάβαση της διαβροχής για κοιλότητες αέρα κλειστής κατάστασης.....	34
3.12	Σχεδιασμός και συνθήκες διατήρησης των υπερυδροφώβων επιφανειών.....	40
3.13	Δυνατότητες και εφαρμογές υπερυδροφώβων επιφανειών	43
3.13.1	Απώθηση του νερού (water repellency).....	43
3.13.2	Μείωση της οπισθέλκουσας δύναμης (drag reduction)	43
3.13.3	Εμπόδιση επικάλυψης πάγου (anti-icing)	44
3.13.4	Δυνατότητα αυτοκαθαρισμού (self cleaning)	44
3.13.5	Δυνατότητα αντιρρύπανσης (anti-biofouling).....	44
3.13.6	Εμπόδιση δημιουργίας φαινόμενης ομίχλωσης (anti-fogging)	44
3.13.7	Αντιανακλαστικές επιφάνειες (Anti reflective)	44
3.14	Έλεγχος της σπηλαίωσης.....	45
3.15	Παρεμφερείς πειραματικές μελέτες	45
3.16	Τι είναι αυτό που εμποδίζει την εξάπλωση υπερυδροφώβων επιφανειών	48
3.17	Αρχική πειραματική διάταξη.....	48

4. Πειραματική διάταξη και εξοπλισμος

4.1	Δεξαμενή-κυλινδρος.....	50
4.2	Σύστημα μετάδοσης της κίνησης	50
4.3	Μέθοδος Particle Image Velocimetry.	51
4.4	Επιφάνειες που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη πειραματική διαδικασία.....	55

5. Ανάλυση Πειραματικών Δεδομένων

5.1	Κώδικας Matlab.....	57
5.2	Μεθοδολογία διεξαγωγής πειράματος. Παραδοχές και παράμετροι για τη ροή.....	57
5.3	Μελέτη περιπτώσεων.	58
5.4	Προσδιορισμός κέντρου του κυλίνδρου για τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν	59
5.5	Σχηματική αναπαράσταση και εύρεση της κάθετης στην ακτίνα ταχύτητας.....	62
5.6	Περίπτωση 1 ^η : Περιστροφή κυλίνδρου με untreated COP επιφάνεια	64
5.7	Περίπτωση 2 ^η :Περιστροφή κυλίνδρου με Υπερυδροφώβη επιφάνεια.....	69
5.8	Περίπτωση 3 ^η : Περιστροφή κυλίνδρου με επιφάνεια riblet.....	71
5.9	Περίπτωση 4 ^η :Περιστρεφόμενος κύλινδρος με υπερυδροφώβα επεξεργασμένη riblet επιφάνεια.....	75
5.10	Συγκριτικές τιμές της αδιάστατης οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας συναρτήση της απόστασης από τον κύλινδρο ανά ταχύτητα περιστροφής για όλες τις επιφάνειες.....	78
5.11	Συγκριτικές τιμές της αδιάστατης κατακόρυφης συνιστώσας της ταχύτητας συναρτήση της απόστασης από τον κύλινδρο για τις 10 RPM για όλες τις επιφάνειες	84

5.12	Σύγκριση της κάθετης στην ακτίνα συνιστώσα της ταχύτητας της Untreated με SH για το εύρος στροφών του κυλίνδρου	86
5.13	Σύγκριση της κάθετης στην ακτίνα συνιστώσα της ταχύτητας της Untreated επιφάνεια με riblet 3M ...	91
5.14	Σύγκριση της κάθετης στην ακτίνα συνιστώσα της ταχύτητας της Untreated με επιφάνεια riblet υπερυδροφόβα επεξεργασμένη	95

6. Επίλογος

6.1	Συμπεράσματα	101
-----	--------------	-----

6.2	Μελλοντικές επεκτάσεις	102
-----	------------------------	-----

Παράρτημα Α'		103
---------------------	--	-----

References		105
-------------------	--	-----

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Η φύση αποτελούσε ανέκαθεν για τον άνθρωπο τον καμβά παρατήρησης για την κατανόηση του περιβάλλοντός του, αλλά ταυτόχρονα κι ένα εξαιρετικά υποδειγματικό σύστημα πολυπλοκότητας και σύνθετης διαδικασίας, την «ευφυΐα» του οποίου προσπάθησε αρχικά να αναλύσει και στη συνέχεια να μοντελοποιήσει με μηχανικό τρόπο. Η βιομιμητική αποτελεί λοιπόν τη διαδικασία μεταφοράς προτύπων από το βιολογικό στο μηχανικό ανάλογο. Ο συγκεκριμένος ορος περιγράφει κάθε επιστημονική προσέγγιση για την κατανόηση του τι συμβαίνει στον έμβιο κόσμο, με τη χρήση απλών πειραματικών διατάξεων ή προσομοιώσεων. Σημαντική παράμετρος της βιομιμητικής είναι η δυνατότητα αναπαραγωγής της αλληλεπίδρασης δομικών, φυσικών και χημικών ιδιοτήτων που εντοπίζονται στο φυσικό περιβάλλον, όπως είναι η υπερυδροφοβικότητα, η ελεγχόμενη πρόσφυση, η μείωση της οπισθέλκουσας σε συνδυασμό με άλλες υδροδυναμικές ιδιότητες.

Ωστόσο, μία από τις σημαντικότερες πτυχές της βιομιμητικής που μπορεί να μελετήσει ένας μηχανικός είναι η υπερυδροφοβικότητα ορισμένων επιφανειών («φαινόμενου του λωτού») οι οποίες παρουσιάζουν έντονη αδιαβροχοποίηση και ιδιότητες αυτοκαθαρισμού. Τα φύλλα του λωτού είναι γνωστά για την «υπερυδροφοβικότητα» τους, που συνεπάγεται την ικανότητα να παραμένουν καθαρά από σκόνες που παρασύρονται από τις σταγόνες που ολισθαίνουν ελεύθερα στην επιφάνειά τους. 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. Σε αρκετές πειραματικές μελέτες κατασκευάστηκαν τεχνητές επιφάνειες οι οποίες μιμούνται τις ιδιότητες του φύλλου του λωτού και τη δομή του δέρματος του καρχαρία και παρατηρήθηκε η επιρροή της δομής τους στη συμπεριφορά του ρευστού και στην μείωση της οπισθέλκουσας δύναμης.

Οργάνωση του Τόμου

Η παρούσα εργασία είναι οργανωμένη σε έξι κεφάλαια. Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο που διέπει το φαινόμενο της ροής γύρω από περιστρεφόμενο κύλινδρο καθώς και οι μαθηματικές εξισώσεις που περιγράφουν τη διαδικασία της ολίσθησης σε υπερυδροφοβική και riblet επιφάνεια. Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η βιβλιογραφική επισκόπηση της υπάρχουσας έρευνας, τόσο πειραματικής όσο και υπολογιστικής, αναφορικά με το μήκος της ολίσθησης, τη μείωση της οπισθέλκουσας δύναμης και τη συμπεριφορά των συγκεκριμένων επιφανειών σε σχέση με τη ροή του ρευστού. Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη καθώς και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε στο εν λόγω πείραμα ενώ στο Κεφάλαιο 5 γίνεται η ανάλυση των πειραματικών δεδομένων. Τέλος στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που διεξάγονται από την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων καθώς και ενδεχόμενες μελλοντικές προεκτάσεις.

Κεφάλαιο 2

Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1 Υδροφιλικότητα-Υδροφοβικότητα-Υπερυδροφοβικότητα

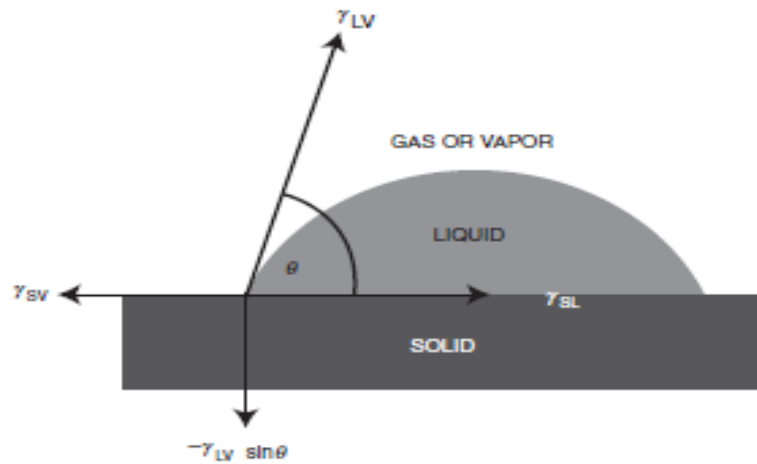
Μερικές φορές το νερο καθώς έρχεται σε επαφή με μία στερεή επιφάνεια διαχέεται ομοιόμορφα πανω της και κάποιες άλλες φορές σχηματίζει συμπαγή σταγονίδια. Το εύρος αυτής της 'συμπεριφοράς' του νερού στην επιστήμη της ρευστομηχανικής εκφράζεται με τους όρους υδροφιλικότητα και υδροφοβικότητα αντίστοιχα. Ο όρος της υδροφιλικότητας ουσιαστικά υποδηλώνει την ιδιότητα της επιφάνειας να απορροφά το νερό το οποίο διασκορπίζεται ομοιόμορφα πάνω της δίχως να σχηματίζει σταγονίδια. Ο ομοιόμορφος διασκορπισμός της σταγόνας πάνω στην επιφάνεια οφείλεται στο γεγονός ότι 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. Αντιθέτως η υδροφοβικότητα εκφράζει την ικανότητα μιας επιφάνειας να μην απορροφά νερό ή να μην διαβρέχεται από αυτό. Η ιδιότητα της επιφάνειας να μην απορροφά το νερό που τη διαβρέχει οφείλεται στο γεγονός ότι οι συνεκτικές δυνάμεις του νερού είναι μεγαλύτερες από τις δυνάμεις που αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια του ρευστού με το στερεό.

Ως διαβροχή ορίζεται η δυνατότητα που έχει η επιφάνεια ενός υγρού να παραμένει σε επαφή με την επιφάνεια ενός στερεού εξαιτίας των διαμοριακών αλληλεπιδράσεων που αναπτύσσονται μεταξύ αυτών των δύο επιφανειών. Σύμφωνα με την μελέτη των (Matin, Merah et al. 2016) υπάρχουν δύο σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη διαβροχή μιας στερεής επιφάνειας: η επιφανειακή χημική σύσταση και η επιφανειακή τοπολογία.

Τα τελευταία χρόνια επιφάνειες που εμποδίζουν τη διαβροχή τους από το νερό δημιουργώντας συνθήκες υψηλής ολίσθησης έχουν τραβήξει το ενδιαφέρον της παγκόσμιας επιστημονικής κοινότητας. Αυτές οι επιφάνειες ονομάζονται υπερυδρόφοβες. Τέτοιες υπευδρόφοβες επιφάνειες συνθέτονται από μικρομετρικές δομές ελαττώνοντας την διαβροχή του στερεού από το υγρό όσο το δυνατόν περισσότερο. Πολλές φορές, οι επιφάνειες έχουν και δεύτερη κλίμακα τραχύτητας (της τάξης των νανομέτρων) που ακολουθεί την πρώτη (της τάξης των μικρομέτρων) όπως στο φύλλο του λωτού. Ο όρος της υπερυδροφοβικότητας όταν η φαινόμενη γωνία επαφής της σταγόνας νερού φτάνει τιμές υψηλότερες από 150° , με αντίστοιχα πολύ μικρή υστέρηση γωνίας επαφής.

2.2 Γωνία Επαφής

Καθώς μία σταγόνα υγρού έρχεται σε επαφή με μία στερεή επιφάνεια το εν δυνάμει σχήμα που θα αναπτύξει η σταγόνα εξαρτάται από το σύνολο των δυνάμεων που ασκούνται πάνω της: τη δύναμη της βαρύτητας, τις συνεκτικές δυνάμεις μεταξύ των μορίων της σταγόνας καθώς και τις δυνάμεις μεταξύ της σταγόνας και της στερεής επιφάνειας. Η σχέση μεταξύ των συνεκτικών δυνάμεων των μορίων της σταγόνας και των δυνάμεων που αναπτύσσονται στην διεπιφάνεια μεταξύ στερεού και υγρού είναι αυτή που χαρακτηρίζει τη γωνία επαφής (θ). Επομένως η γωνία επαφής ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζεται στο σημείο επαφής της διεπιφάνειας υγρού-στερεού και της διεπιφάνειας υγρού-αέρα. Το συγκεκριμένο σημείο τομής αποτυπώνεται γεωμετρικά αν φέρουμε μια εφαπτομένη γραμμή στο προφίλ της σταγόνας από το σημείο επαφής κατα μήκος της διεπιφάνειας υγρού-αέρα όπως απεικονίζεται και στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1. Απεικόνιση της γωνίας επαφής (θ) που σχηματίζεται από την επαφή υγρής στατικής σταγόνας με στερεή επιφάνεια.

2.2.1 Λεία Επιφάνεια

Σε μία απόλυτα επίπεδη επιφάνεια η γωνία επαφής καθορίζεται από τις διεπιφανειακές τάσεις υγρού-στερεού (γ_{SL}) και υγρού-αερίου (γ_{LV}) και δίνεται από την εξίσωση του Young:

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \quad (1)$$

Η εξίσωση του Young ισχύει με τη προϋπόθεση ότι η επιφάνεια είναι ομαλή και ομοιογενής. Ο όρος $\cos \theta$ μεταβάλλεται από τη τιμή +1 (πλήρης διαβροχή) μέχρι την τιμή -1 (καθόλου διαβροχή).

2.2.2 Επιφάνειες με Τραχύτητα

2.2.2.1 Μοντέλο Wenzel

Σε σύγκριση με την λεία επιφάνεια, σε μια επιφάνεια με τραχύτητα η περιοχή διεπαφής είναι μικρότερη. Ο (Wenzel 1936) θεώρησε μια σταγόνα νερού σε μια επιφάνεια με τραχύτητα και ομοιογενή διεπαφή. Χρησιμοποιώντας την ισορροπία της επιφανειακής δύναμης και εμπειρικές εκτιμήσεις συνέδεσε τη γωνία επαφής μιας επιφάνειας με τραχύτητα με τη γωνία επαφής μιας λείας επιφάνειας. Συγκεκριμένα οδηγήθηκε στην εξής μαθηματική διατύπωση

$$\gamma_{LV} \cos \theta = r (\gamma_{SV} - \gamma_{SL}) \quad (2)$$

όπου θ_w είναι η προκύπτουσα γωνία επαφής του υλικού συναρτήσει της τραχύτητας της επιφάνειας κατά Wenzel και r είναι ο παράγοντας της τραχύτητας ο οποίος αναφέρεται και ως αναλογία της τραχύτητας της επιφάνειας επαφής (A_{SL}) σε σχέση με την προβαλλόμενη επιφάνεια (A_F).

$$r = \frac{A_{SL}}{A_F} > 1 \quad (3)$$

Σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση για υδρόφοβες επιφάνειες, όταν η επιφάνεια επαφής της σταγόνας με τη στερεή επιφάνεια είναι μεγάλη η γωνία επαφής αυξάνεται καθιστώντας την επιφάνεια περισσότερο υδρόφοβη ενώ αντιθέτως η αύξηση της τραχύτητας σε υδρόφιλες επιφάνειες επιφέρει μείωση της γωνίας επαφής.

2.2.2.2 Μοντέλο Cassie-Baxter

Οι Cassie-Baxter μελέτησαν επίπεδες επιφάνειες με χημική ετερογένεια αναπτύσσοντας ένα μοντέλο σύμφωνα με το οποίο υπολογίζεται η γωνία επαφής στις περιπτώσεις όπου η σταγόνα επικάθεται στις προεξοχές της τραχύτητας και αιωρείται στο αέριο στρώμα που έχει παγιδευτεί στις κοιλάδες της τραχύτητας.

Σύμφωνα με το μοντέλο Cassie-Baxter θεωρούμε μία ετερογενή επιφάνεια η οποία αποτελείται από δύο διαφορετικά υλικά κάθε ένα από τα οποία έχει διαφορετική επιφανειακή ενέργεια, χαρακτηριστική γωνία επαφής θ_1 και θ_2 και καταλαμβάνει διακριτό ποσοστό της επιφάνειας f_1 και f_2 .

Οι Cassie-Baxter πρότειναν την παρακάτω εξίσωση για να περιγράψουν την σχέση της γωνίας επαφής (θ_{C-B}) με μια ετερογενή επιφάνεια που αποτελείται από δύο υλικά:

$$\cos\theta_{C-B} = f_1\cos\theta_1 + f_2\cos\theta_2 \quad (4)$$

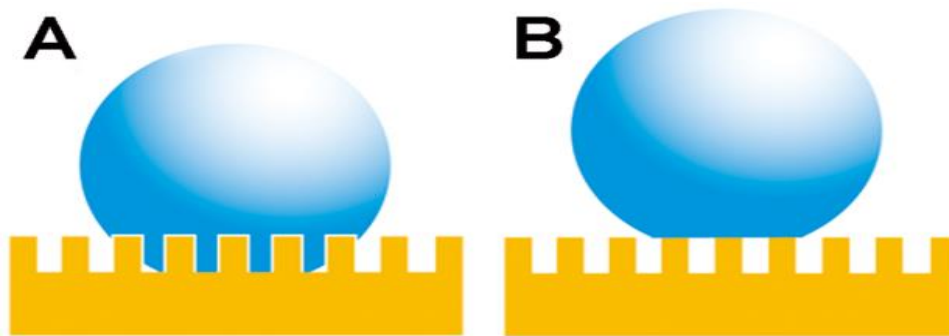
Εάν θεωρήσουμε ότι το ένα υλικό είναι υδρόφοβο και το άλλο υλικό αντικατασταθεί από αέρα τότε η σταγόνα που βρίσκεται σε επαφή με τις δύο φάσεις (στερεό και αέρας) σχηματίζει αντίστοιχες γωνίες επαφής θ_1 και $\cos\theta_2 = \cos 180^\circ = -1$, ενώ το αντίστοιχο ποσοστό κάλυψης της επιφάνειας του στερεού για το πρώτο υλικό είναι f_s και για το δεύτερο υλικό είναι $(1-f_s)$.

Συνεπώς η εξίσωση Cassie-Baxter διατυπώνεται ως

$$\cos\theta_{C-B} = f_s(\cos\theta_1 + 1) - 1 \quad (5)$$

Όπου θ_{C-B} είναι η προκύπτουσα γωνία επαφής στην τραχεία επιφάνεια και f_s είναι ο λόγος της συνολικής διεπιφάνειας στερεού και υγρού σε σχέση με την προβαλλόμενη επιφάνεια.

Στην Εικόνα 2 παρατηρούμε τα δύο μοντέλα Wenzel και Cassie-Baxter πλήρους και μερικής διαβροχής αντίστοιχα για ετερογενής επιφάνειες που εμφανίζουν τραχύτητα.

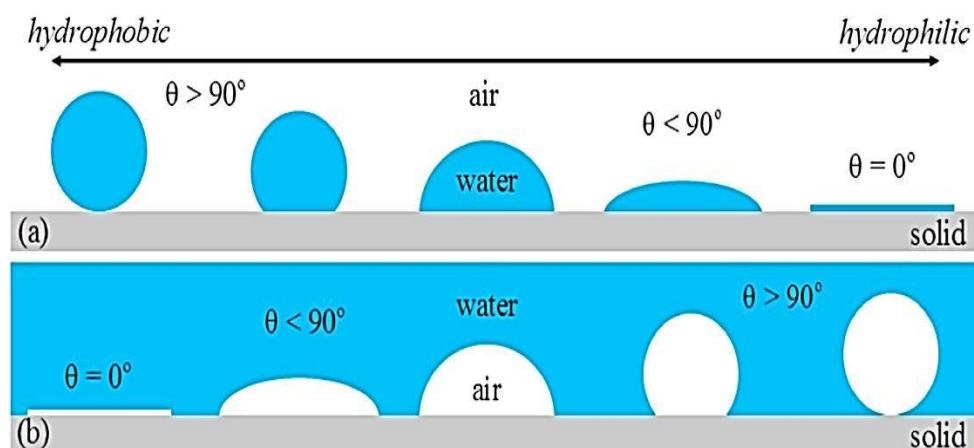


Εικόνα 2. Σχηματική αναπαράσταση σταγόνας στα δύο μοντέλα. Α) Κατάσταση Wenzel όπου η σταγόνα εισχωρεί στη τραχύτητα Β) Κατάσταση Cassie-Baxter όπου αέρας παγιδεύεται μεταξύ της σταγόνας και της επιφάνειας και η σταγόνα "αιωρείται" στις κορυφές της τραχύτητας.

Αν η γωνία επαφής της σταγόνας με την στερεή επιφάνεια είναι μικρότερη από τις 90° τότε η επιφάνεια χαρακτηρίζεται υδρόφιλη το οποίο σημαίνει ότι οι δυνάμεις αλληλεπίδρασης του νερού με την επιφάνεια είναι ίσες με τις συνεκτικές δυνάμεις των μορίων της σταγόνας και αυτό εμποδίζει μερικώς τη πλήρη διαβροχή της επιφάνειας. Ο όρος της υπερυδροφιλικότητας χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά από τον (FUJISHIMA 2011) και σύμφωνα με τους (Drelich and Chibowski 2010) μπορεί να αναφέρεται σε επιφάνειες με δομημένη υφή και υλικά (τραχείς ή/και πορώδεις) όπου εμφανίζουν παράγοντα τραχύτητας $r > 1$ και στις οποίες το υγρό εξαπλώνεται πλήρως. Στις υπερυδρόφιλες επιφάνειες το υγρό θα εξαπλωθεί περισσότερο σαν λεπτό φιλμ και λιγότερο σαν σχηματισμένη σταγόνα. Οι υπερυδρόφιλες επιφάνειες παρούσιάζουν γωνία επαφής μικρότερη των 10° . Καθώς

αυξάνει η γωνία επαφής του υγρού με την επιφάνεια αυξάνεται και η υδροφοβικότητα της επιφάνειας. Μία επιφάνεια χαρακτηρίζεται ως υδρόφοβη όταν η γωνία επαφής που σχηματίζει η σταγόνα με την στερεή επιφάνεια υπερβαίνει τις 90° . Σε αρκετές περιπτώσεις οι υδρόφοβες επιφάνειες φέρουν τραχύτητα με αποτέλεσμα η γωνία επαφής του νερού με την επιφάνεια να προσεγγίζει και να υπερβαίνει τις 150° . Σε αυτές τις περιπτώσεις η επιφάνεια χαρακτηρίζεται ως υπερυδρόφοβη. Οι υπερυδρόφοβες επιφάνειες αρχίσαν να μελετώνται από το 1996 όπου οι (Onda, Shibuichi et al. 1996) πέτυχαν γωνία επαφής για διμερές αλκυλοκετένιο 174° . Στην Εικόνα 3 παρατηρούμε πως μία στερεή επιφάνεια εμφανίζει από υδρόφιλα έως υπερυδρόφοβα χαρακτηριστικά ($\theta > 150^\circ$) για περίπτωση τη σταγόνας-στερεής επιφάνειας (α) και φυσαλίδας-στερεής επιφάνειας κάτω από το νερό (β). Υπάρχουν αρκετά υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να δημιουργηθεί μια υπερυδρόφοβη επιφάνεια περιλαμβάνοντας τόσο οργανική όσο και ανόργανη ύλη. Τα πολυμερή υλικά τα οποία εκ φύσεως παρουσιάζουν υδρόφοβες ιδιότητες ο πρωταρχικός στόχος είναι η δημιουργία επιφανειακής τραχύτητας. Για τα ανόργανα υλικά τα οποία γενικά είναι υδρόφιλα πρέπει η υδρόφοβη επεξεργασία της επιφάνειας να γίνει αφότου κατασκευαστούν πρώτα οι επιφανειακές δομές. Οι τεχνικές για να αποκτήσει κάποια επιφάνεια υπερυδρόφοβη συμπεριφορά μπορούν να τοποθετηθούν σε δύο κατηγορίες.

Η πρώτη κατηγορία αφορά τη δημιουργία τραχύτητας από υλικά χαμηλής επιφανειακής ενέργειας και η δεύτερη κατηγορία αφορά τη τροποποίηση της επιφανειακής τραχύτητας με ένα υλικό που παρουσιάζει χαμηλή επιφανειακή ενέργεια.



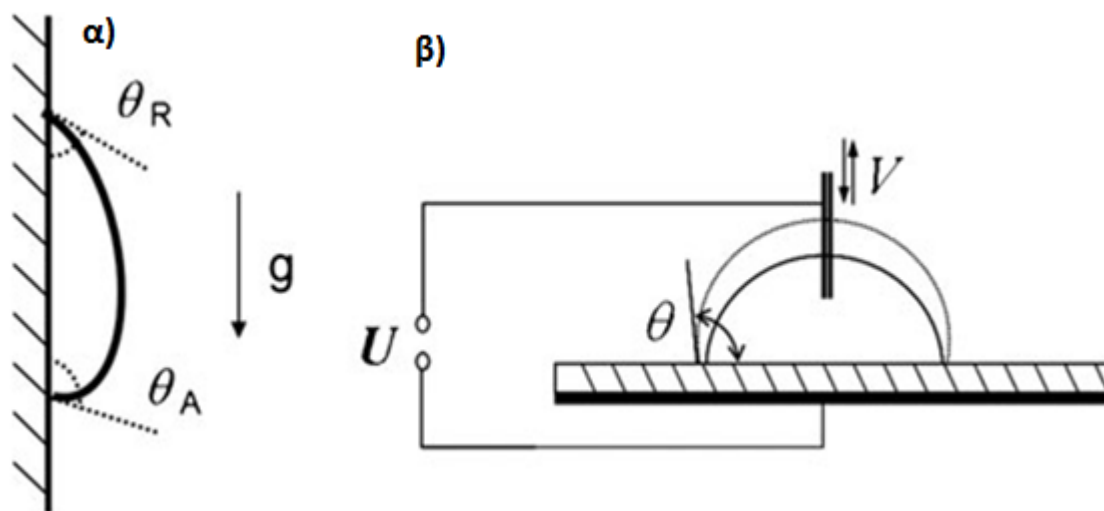
Εικόνα 3. Διαφορετικές γωνίες επαφής (θ) α) για σταγόνα σε επαφή με στερεή επιφάνεια β) για φυσαλίδα κάτω από το νερό σε επαφή με στερεή επιφάνεια (Du, Wen et al. 2017).

2.3 Γωνία Υστέρησης

Για να γίνει εφικτό να μετρηθεί πειραματικά η γωνία επαφής έχουν αναπτυχθεί χοντρικά δυο μεθολογίες. Η πρώτη μεθοδολογική προσέγγιση βασίζεται στη γωνιομετρία η οποία και ασχολείται με τις στατικές γωνίες επαφής και η δεύτερη μεθοδολογική προσέγγιση περιλαμβάνει τη μέτρηση των δυναμικών γωνιών επαφής. Όπως αναφέρουν και οι (Eggers and Stone 2004) η τιμή της στατικής γωνίας επαφής θα εξαρτηθεί σε μεγάλο βαθμό από το πως είχε αλληλεπιδράσει η σταγόνα με την επιφάνεια σε πρότερο χρόνο. Στη περίπτωση όπου η σταγόνα είχε πρόσφατα εξαπλωθεί στην επιφάνεια η γωνία επαφής ονομάζεται αναπτυσσόμενη (advanced contact angle) ενώ αν είχε πρόσφατα υποχωρήσει ονομάζεται υποχωρούμενη (receding contact angle). Η αιτία ύπαρξης της γωνίας υστέρησης είναι η τραχύτητα της επιφάνειας σε συνδυασμό με την ύπαρξη ανομοιογενειών και επικαθίμενων ρύπων. Επομένως η γωνία υστέρησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν δείκτης για το αν μια επιφάνεια είναι ετερογενής καθώς και στο κατά πόσο μια σταγόνα δύναται να κινηθεί σε μια τέτοια επιφάνεια.

Η γωνία υστέρησης είναι ένας από τους σημαντικότερους και κλασικότερους όρους στο πεδίο της διαβροχής από υγρές σταγόνες για συστήματα από κλίμακες εκατοστού μέχρι μικρόμετρο. Για να γίνει κατανοητός ο όρος της γωνίας υστέρησης θα χρησιμοποιήσουμε το παράδειγμα μίας σταγόνας που κείται σε μια οριζόντια επιφάνεια, ακριβώς όπως οι σταγόνες στο τζάμι μετά από μία βροχή.

Όπως απεικονίζεται και στην Εικόνα 4 η γωνία υστέρησης θα κρατήσει ακίνητη την ασύμμετρη σταγόνα παρά την επίδραση της βαρυτικής δύναμης. Η κορυφή της σταγόνας θα πάρει μια λεπτή ασύμμετρη μορφή σχηματίζοντας μικρότερη γωνία επαφής σε σύγκριση με το κάτω μέρος της σταγόνας όπου θα σχηματίσει μια παχύτερη μορφή με μεγαλύτερη γωνία επαφής. Όταν η σταγόνα σχηματίσει ένα ορισμένο σχήμα θα μετακινηθεί με μη συμμετρική μορφή και η διαφορά μεταξύ της μπροστινής (στη κατεύθυνση της κατευθυντήριας δύναμης που εν προκειμένω είναι η βαρύτητα) και της πίσω γωνία επαφής (στη κατεύθυνση αντίστροφη της κατευθυντήριας δύναμης) ονομάζεται γωνία υστέρησης.

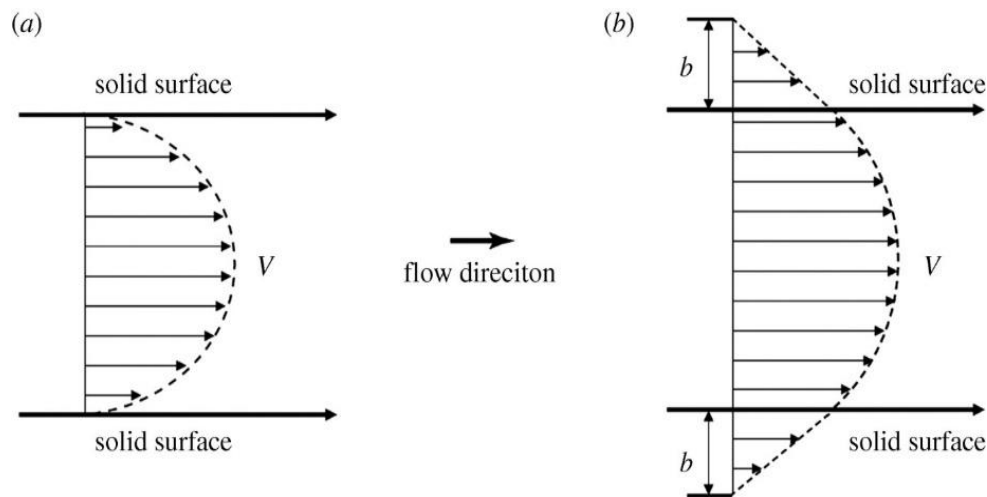


Εικόνα 4. α) Μία σταγόνα σε μία κατακόρυφη επιφάνεια ακινητοποιημένη μεταξύ της κρίσιμης ανηγμένης γωνίας θ_A και της κρίσιμης υποχωρούσας γωνίας θ_R β) με την σταδιακή και αργή άντληση υγρού μέσα ή έξω από μια σταγόνα μπορούν να μετρηθούν οι θ_A και θ_R .

2.4 Μήκος Ολίσθησης

Το μήκος ολίσθησης είναι ένα μέγεθος που χρησιμοποιείται ως δείκτης που αποτυπώνει την ένταση της υδροφοβικότητας μιας στερεής επιφάνειας καθώς αποτελεί δείκτη μείωσης της αντίστασης. Η πειραματική μέτρηση του μήκους ολίσθησης αποτελεί μία σύνθετη και δύσκολη διαδικασία καθώς και η αναλυτική του πρόβλεψη και για να καταφέρει η ακαδημαϊκή κοινότητα να υπερβεί αυτό το εμπόδιο υιοθέτησε και εισήγαγε την έννοια της οριακής συνθήκης μηδενικής ολίσθησης. Η οριακή συνθήκη μηδενικής ολίσθησης περιγράφει το φαινόμενο σύμφωνα με το οποίο η σχετική ταχύτητα μεταξύ ενός στερεού ορίου και ενός ρευστού είναι μηδενική στη διεπιφάνεια στερεού-ρευστού. Η Εικόνα 5 παρουσιάζει το προφίλ της ταχύτητας μεταξύ ενός ρέοντος ρευστού και δύο ακίνητων στερεών ορίων για τη συνθήκη της μηδενικής ολίσθησης (περίπτωση α).

Ωστόσο, στις υδρόφοβες επιφάνειες η επιφάνεια του ρευστού παρουσιάζει ένα φαινόμενο που ονομάζεται ολίσθηση, το οποίο συνεπάγεται ότι η ταχύτητα του ρευστού δίπλα στο στερεό όριο δεν είναι ίση με τη ταχύτητα πάνω στο στερεό τοίχωμα, δηλαδή δεν είναι μηδενική. Για να γίνει κατανοητό το φαινόμενο της ολίσθησης θα χρησιμοποιήσουμε την πιο απλή περίπτωση ροής ρευστού, τη ροή Couette. Στη συγκεκριμένη περίπτωση το ρευστό ρέει μεταξύ δύο ακίνητων πλακών. Όπως εμφανίζεται και στην Εικόνα 5 (περίπτωση β) για το προφίλ ταχύτητας ρευστού με ολίσθηση, ο βαθμός οριακής ολίσθησης στη διεπιφάνεια στερεού-ρευστού περιγράφεται από το μήκος ολίσθησης (b).



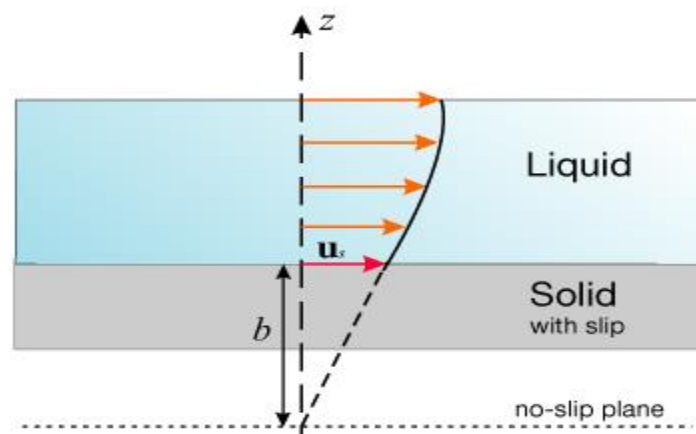
Εικόνα 5. α) Προφίλ ταχύτητας για ροή ρευστού χωρίς ολίσθηση β) Προφίλ ταχύτητας για ροή ρευστού σε υδρόφοβη επιφάνεια με ολίσθηση και δημιουργία μήκους ολίσθησης (b). Η ροή ακολουθεί τη κατεύθυνση του βέλους που εμφανίζεται στην εικόνα.

Θεωρητικές (Watts, Krim et al. 1990), (Lauga and Stone 2003), (Sbragaglia and Prosperetti 2007) και πειραματικές μελέτες (Zhu and Granick 2002), (Choi and Kim 2006), (Joseph, Cottin-Bizonne et al. 2006) απέδειξαν ότι η παρουσία νανοφυσαλλίδων στη διεπιφάνεια στερεού-ρευστού είναι η αιτία για την οριακή ολίσθηση της υδρόφοβες επιφάνειες.

Στη περίπτωση στρωτής ροής σε υδρόφοβες επιφάνειες ο Navier πρότεινε μια γενική οριακή συνθήκη που περιγράφει ότι η ταχύτητα σε μία στερεή επιφάνεια είναι ανάλογη προς τη διατμητική τάση στην επιφάνεια. Αυτή η θεώρηση περιγράφεται από τον εξής μαθηματικό τύπο

$$u_s = b \cdot \frac{du}{dz} \quad (6)$$

Όπου u_s είναι η εφαπτόμενη ταχύτητα του ρευστού πάνω στο στερεό όριο ο όρος du/dz υποδεικνύει τη τοπική διάτμηση και b το μήκος ολίσθησης όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6.

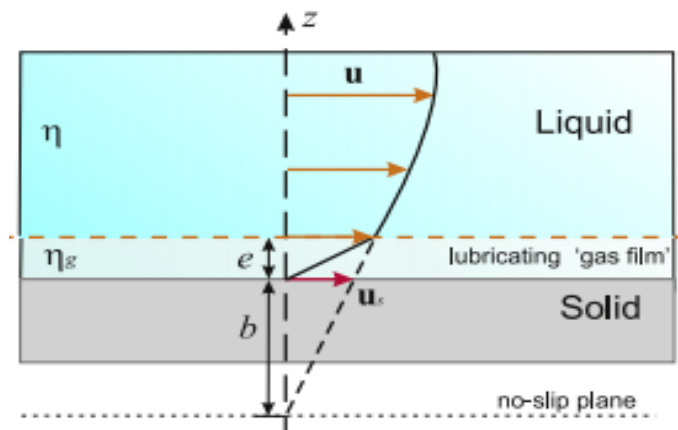


Εικόνα 6. Μήκος ολίσθησης (b) και ταχύτητα ολίσθησης u_s στη διεπιφάνεια υγρού-στερεού.

Το μήκος ολίσθησης ουσιαστικά υποδηλώνει μια απόσταση εσωτερικά του τοιχώματος στο τέλος της οποίας η ταχύτητα του ρευστού μηδενίζεται. Η τυπική συνθήκη μη οριακής ολίσθησης ουσιαστικά σημαίνει ότι $b=0$ ενώ για οριακή κατάσταση δίχως διάτμηση $b \rightarrow \infty$. Είναι αρκετά χρήσιμο να διαχωρίσουμε την οριακή ολίσθηση σε τρεις καταστάσεις από τη στιγμή που η δυναμική του ρευστού στη διεπιφάνεια εισάγει διάφορες κλίμακες μήκους ολίσθησης.

Η πρώτη κατάσταση της ολίσθησης είναι η ενδογενής ολίσθηση η οποία επιτρέπει στα μόρια του νερού να διεισδύσουν στην επιφάνεια του στερεού ορίου. Πρόσφατες προσομοιώσεις μοριακής δυναμικής παρατήρησαν μήκος ολίσθησης μικρότερο των 10nm για ρεαλιστικές τιμές της γωνίας επαφής αλλά είναι σχεδόν αδύνατο να επωφεληθούμε σε μεγάλες εφαρμογές από αυτή τη τάξη μεγέθους της οριακής ολίσθησης.

Η δεύτερη κατάσταση της ολίσθησης είναι η φαινόμενη ολίσθηση (apparent slip length) η οποία χρησιμοποιείται για τη περιοχή της διεπιφάνειας ως μια μεμβράνη αερίου πάχους e και συνεκτικότητας η_g διαφορετικής από του υγρού η . Η κατάσταση φαινόμενης ολίσθησης ουσιαστικά αναπαριστά ένα μοντέλο στρώματος αέρα υδρόφοβης ολίσθησης όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 7



Εικόνα 7. Φαινόμενη ολίσθηση για τη περίπτωση λεπτού φιλμ αέρα.

$$b = e \cdot \left(\frac{\eta}{\eta_g} - 1 \right) \cong e \cdot \frac{\eta}{\eta_g} \quad (7)$$

Η τρίτη κατάσταση της ολίσθησης είναι το ανηγμένο μήκος ολίσθησης (effective slip length), b_{eff} , το οποίο αναφέρεται στη περίπτωση όπου η ολίσθηση σε μια πολύπλοκη ετερογενή επιφάνεια εκτιμάται από τον υπολογισμό του μέσου όρου της ροής στη κλίμακα μήκους της πειραματικής διαμόρφωσης. Επομένως αντί να προσπαθούμε να λύσουμε την εξίσωση της κίνησης του ρευστού σε κλίμακα μεμονωμένης αυλάκωσης είναι αποτελεσματικότερο να θεωρήσουμε τη κίνηση του ρευστού σε επίπεδο μακροκλίμακας, κλίμακα δηλαδή μεγαλύτερη από το χαρακτηριστικό μήκος ενός επιφανειακού μοτίβου ή του πάχους ενός μικροκαναλιού, με τη χρησιμοποίηση αποτελεσματικών οριακών συνθηκών που μπορούν να εφαρμοστούν στη φανταστική λεία επιφάνεια.

2.5 Διάτμηση και ολίσθηση

Η συνεκτικότητα ή ιξώδες είναι μια χαρακτηριστική φυσική ιδιότητα των ρευστών και είναι το αίτιο της εμφάνισης της διατμητικής εντατικής κατάστασης στη μάζα τους. Η συνεκτικότητα είναι δηλαδή η ιδιότητα των ρευστών να ανθίστανται στη διάτμηση τους, δηλαδή στη κίνηση ενός στοιχείου ως προς το διπλανό του. Από φαινομενολογικής σκοπιάς η συνεκτικότητα προσομοιάζει με τη τριβή μεταξύ δυο στερεών σωμάτων που βρίσκονται σε επαφή και κινούνται σχετικά, γι αυτό το λόγο ονομάζεται και εσωτερική τριβή.

Εάν θεωρήσουμε δυο γειτονικά στοιχεία ρευστού που βρίσκονται σε σχετική κίνηση, τότε αναπτύσσεται μεταξύ τους μια επαπτομενική δύναμη η οποία ονομάζεται διατμητική δύναμη $d\vec{T}$.

Η διατμητική αυτή δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας ονομάζεται διατμητική τάση ή ακριβέστερα επαπτομενική διατμητική τάση

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

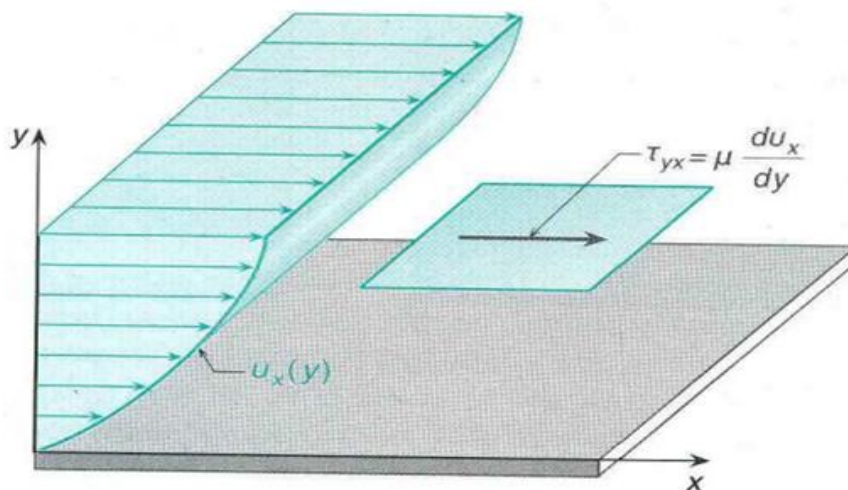
Ωστόσο ο Newton διατύπωσε ότι για ορισμένα ρευστά όπως το νερό και ο αέρας θα πρέπει να ισχύει ο υλικός νόμος για τη διατμητική δύναμη

$$d\vec{T} = \mu \cdot \frac{u_2 - u_1}{dy} dE = \mu \cdot \frac{\partial u}{\partial y} dE$$

όπου u_1, u_2 είναι οι ταχύτητες δυο στοιχείων του ρευστού ($u_2 > u_1$) και μ ο συντελεστής διατμητικής συνεκτικότητας ή αλλιώς ιξώδες του ρευστού. Η παραπάνω σχέση σύμφωνα με τον Newton δείχνει ότι η επιφανειακή δύναμη είναι ανάλογη της κλίσης της ταχύτητας κατά τη κάθετη κατεύθυνση στο στοιχείο ($\partial u / \partial y$) και ανάλογη του εμβαδού της επιφάνειας του στοιχείου dE .

Επομένως ο ορισμός της διατμητικής τάσης δίνεται από την υλική εξίσωση κατά Newton και σύμφωνα με την Εικόνα 8 είναι

$$\tau = \frac{d\vec{T}}{dE} = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (8)$$



Εικόνα 8. Εφαπτόμενη διατμητική τάση.

2.6 Υδροστατική-Αεροστατική

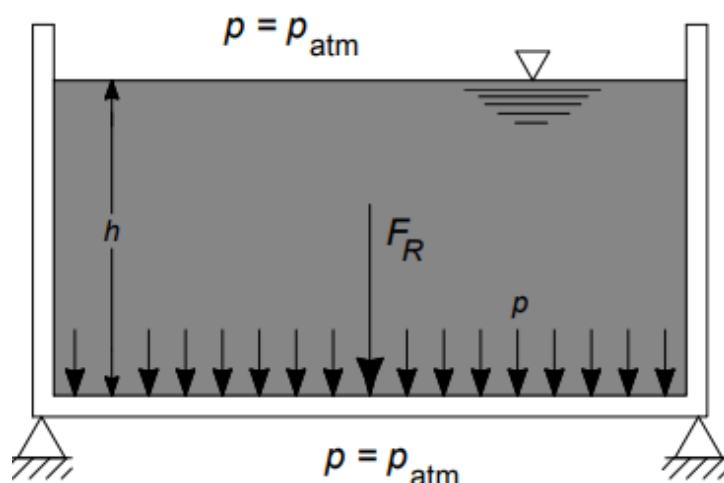
Η υδροστατική και η αεροστατική είναι εκείνες οι περιοχές της μηχανικής των ρευστών που εξετάζουν ρευστά (υγρά και αέρια) τα οποία δεν ρέουν ($\vec{v} = 0$). Για τη συγκεκριμένη περίπτωση οι γενικές εξισώσεις της μηχανικής των ρευστών συνοψίζονται σε μια διανυσματική εξίσωση που ονομάζεται εξίσωση της υδρο-αεροστατικής και έχει την εξής ολοκληρωματική μορφή

$$\vec{K} = - \int p \cdot \vec{n} dE + \int \rho \cdot \vec{g} Dv \quad (9)$$

Όταν ρ =σταθερό έχουμε τη περίπτωση της υδροστατικής ενώ όταν η πυκνότητα μεταβάλλεται έχουμε τη περίπτωση της αεροστατικής.

Για μια οριζόντια επιφάνεια, όπως ο πυθμένας μιας δεξαμενής, γεμάτη με νερό το μέτρο της συνισταμένης δύναμης είναι $F=p \cdot A$, όπου p είναι η ομοιόμορφη πίεση στο πυθμένα και A το εμβαδό

του πυθμένα. Για τη δεξαμενή της Εικόνα 9 ισχύει ότι η πίεση είναι $p = \rho \cdot g \cdot h$ και όσο προχωράμε προς το πυθμένα της δεξαμενής επομένως αυξάνεται.



Εικόνα 9. Υδροστατική πίεση σε δεξαμενή.

Η τοπική τιμή της διάτμησης για ένα ρευστό που ρέει πάνω από μια επιφάνεια εξαρτάται σημαντικά από τη τραχύτητα της επιφάνειας, καθώς μια πιθανή διακύμανση της μορφολογίας της επιφάνειας (πιθανό εξόγκωμα) μπορεί να μειώσει το χώρο στον οποίο ρέει το ρευστό αυξάνοντας έτσι τη διατμητική τάση ενώ στη περίπτωση που δημιουργηθεί κάποια ρωγμή η διατμητική τάση μειώνεται. Ωστόσο η επίδραση της διατμητικής τάσης στην ολίσθηση του υγρού μέσου επάνω στη στερεή επιφάνεια είναι άλλο ένα αμφιλεγόμενο ζήτημα στα ευρύτερα πλαίσια της συζήτησης για το ποιοί παράγοντες επηρεάζουν την ολίσθηση. Στο πρωταρχικό μοντέλο του Navier (1827) και στις μετέπειτα αναλύσεις της (Vinogradova 1995) το μήκος της ολίσθησης δεν εξαρτάται άμεσα από τη διατμητική τάση. Αρκετά πειράματα που διεξήχθησαν σχετικά πρόσφατα όπως αυτά των (Pit, Hervet et al. 2000), (Bonaccorso, Kappel et al. 2002), (Vinogradova and Yakubov 2003), (Pit, Hervet et al. 1999) και του (Cottin-Bizonne, Jurine et al. 2002) σύμφωνησαν με την εκτίμηση του ερευνητικού μοντέλου του Navier ότι η διατμητική τάση δεν επηρεάζει ρητά το μήκος της ολίσθησης.

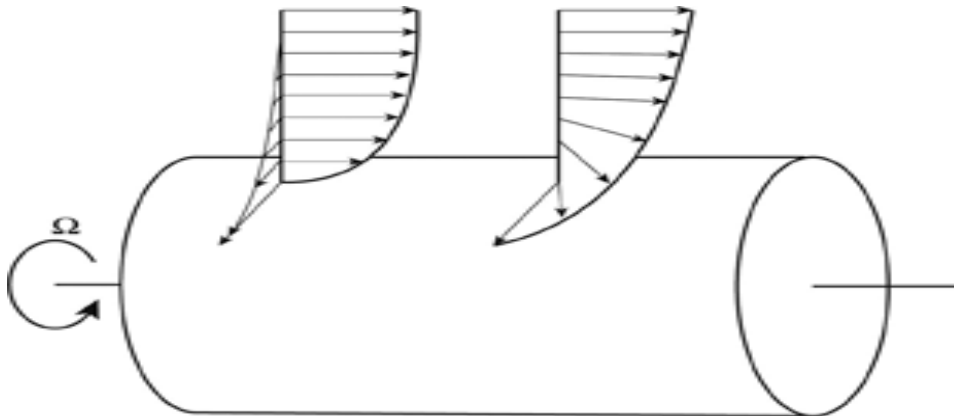
Ωστόσο αρκετά πειραματικά αποτελέσματα όπως αυτά των (Craig, Neto et al. 2001), (Zhu and Granick 2001), (Bonaccorso, Butt et al. 2003) και με προεξέχουσα την έρευνα του (Wenzel 1949) έρχονται σε αντιπαράθεση με τα πειραματικά ευρήματα που δεν βρίσκουν ευθεία συσχέτιση της ολίσθησης με τη διατμητική τάση.

Η πρωτοποριακή προσομοίωση που διεξήγαγαν οι (A. Thompson and M. Troian 1997) απέδειξε ότι το μοντέλο του Navier, από το οποίο δεν προέκυπτε άμεση συσχέτιση της ολίσθησης και της τιμής της διατμητικής τάσης, ισχύει μόνο για χαμηλές τιμές της διατμητικής τάσης ενώ για υψηλές τιμές της διάτμησης η ολίσθηση αρχίζει να αυξάνεται απότομα όσο αυξάνεται και η διατμητική τάση. Αύτη η κρίσιμη τιμή της διατμητικής τάσης η οποία θα κρίνει αν επηρεάζει ή όχι την ολίσθηση εξαρτάται από το εκάστοτε σύστημα και έχει βρεθεί αρκετά υψηλή για τα απλά υγρά όπως το νερό μπορώντας να επιτευχθεί μόνο πειραματικά σε μικρές συσκευές για μεγάλες ταχύτητες.

2.7 Ροή ρευστού γύρω από περιστρεφόμενο κύλινδρο

Η ροή γύρω από ένα κύλινδρο είναι ένα θεμελιακό ζήτημα στην επιστήμη της ρευστομηχανικής καθώς έχει απασχολήσει για πάνω από ένα αιώνα την ερευνητική κοινότητα ξεκινώντας με τον (Strouhal 1878) και συνεχίζοντας με τον (Benard 1908) και τον (Williamson 1996). Για υψηλούς αριθμούς Reynolds η εμφάνιση δινών συνοδεύεται από ανεπιθύμητες και πιθανών καταστροφικές συνέπειες όπως είναι η αύξηση της οπισθέλκουσας και οι δομικές δονήσεις επάνω στην επιφάνεια.

Στη περίπτωση ροής γύρω από περιστρεφόμενο κύλινδρο, ένα οριακό στρώμα θα σχηματιστεί πάνω στο περιστρεφόμενο σώμα εξαιτίας της κατάστασης μηδενικής ολίσθησης στην επιφάνεια αυτού όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 10. Το οριακό στρώμα σε περιστρεφόμενο κύλινδρο σε αξονική κατεύθυνση εμπεριέχει την αξονική και την περιφερειακή συνιστώσα της ταχύτητας εξαιτίας της κατάστασης μη ολίσθησης που επικρατεί στην επιφάνεια του σώματος.



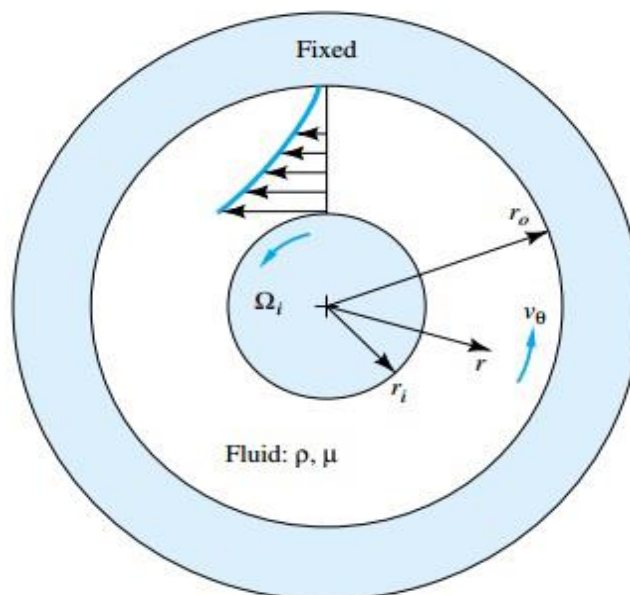
Εικόνα 10. Δημιουργία οριακού στρώματος της ροής γύρω από περιστρεφόμενο κύλινδρο.

2.7.1 Ροή Ρευστού ανάμεσα σε περιστρεφόμενους ομόκεντρους κυλίνδρους

Θεωρούμε ροή ρευστού σταθερής πυκνότητας (ρ) και ιξώδους (μ) ανάμεσα σε ομόκεντρους κυλίνδρους όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 11. Θεωρώντας αξονική κατεύθυνση τη z υποθέτουμε ότι

η ταχύτητα της ροής κατά αυτή τη κατεύθυνση είναι μηδενική ($u_z = \frac{\partial u}{\partial z} = 0$) και ακόμα ότι ο

εξωτερικός κύλινδρος είναι ακίνητος καθώς ο εσωτερικός περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω . Επειδή για τη συγκεκριμένη γεωμετρία εμφανίζεται κυκλική συμμετρία η ταχύτητα δε μεταβάλλεται συναρτήση της γωνίας θ αλλά συναρτήση της ακτίνας r , όπου $r_i < r < r_o$. Επομένως εάν το κενό ανάμεσα στους δύο κυλίνδρους είναι μικρό μπορεί να γίνει η υπόθεση ότι η αλλαγή στη ταχύτητα κατά μήκος του κενού μεταβάλλεται από u_θ σε μηδενική πάνω στο στερεό όριο σε συσχέτιση με τη γωνία r .



Εικόνα 11. Ροή ανάμεσα σε εξωτερικό σταθερό κύλινδρο και ομόκεντρα τοποθετημένο περιστρεφόμενο εσωτερικό κύλινδρο.

Η εξίσωση της συνέχειας χρησιμοποιώντας κυλινδρικές συντεταγμένες είναι

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot u_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} = 0 = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r \cdot u_r) \quad (10)$$

Η εξίσωση διατήρησης της ορμής

$$\rho \cdot (V \cdot \nabla) u_\theta + \frac{\rho \cdot u_r \cdot u_\theta}{r} = -\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial p}{\partial \theta} + \rho \cdot g_\theta + \mu \cdot (\nabla^2 \cdot u_\theta - \frac{u_\theta}{r^2}) \quad (11)$$

Έπειτα από το μηδενισμό όλων των όρων πλὴν του τελευταίου για τη συγκεκριμένη περίπτωση ροής προκύπτει η διαφορική εξίσωση δεύτερης τάξης που περιγράφει το πρόβλημα

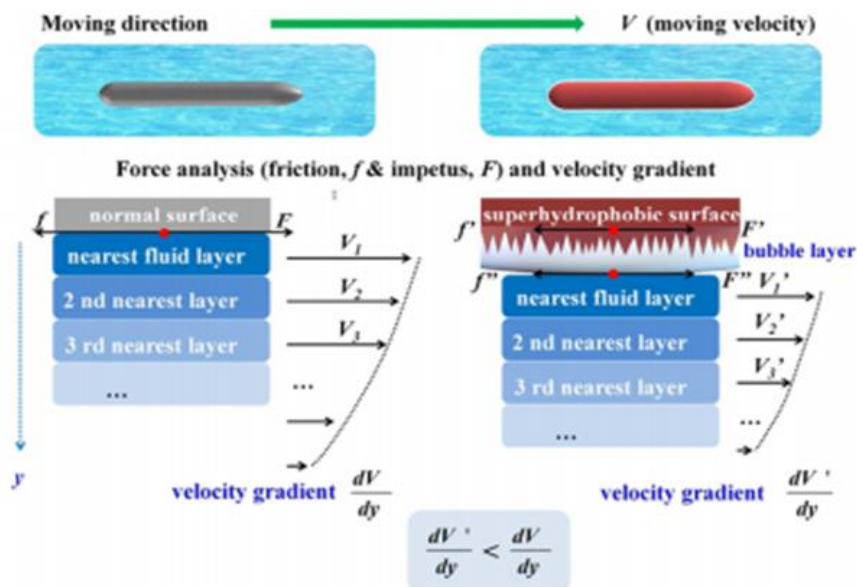
$$\nabla^2 \cdot u_\theta = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r \cdot \frac{du_\theta}{dr}) = \frac{u_\theta}{r^2} \quad (12)$$

Όπου τελικά η λύση της παραπάνω διαφορικής εξίσωσης δεύτερης τάξης είναι

$$u_\theta = \omega \cdot r_i \frac{r_0 / r - r / r_0}{r_0 / r_i - r_i / r_0} \quad (13)$$

2.9 Κίνηση στερεού σώματος μέσα σε ιξώδες ρευστό για κανονική και υπερυδροφοβή επιφάνεια

Στο συγκεκριμένο σημείο έχει σημασία να αναλυθεί το φαινόμενο κίνησης ενός στερεού σώματος μέσα σε ιξώδες ρευστό από τη σκοπιά των ταχυτήτων αλλά και των διατμητικών τάσεων όπως απεικονίζεται και στην Εικόνα 12



Εικόνα 12. Προφίλ ταχυτήτων σε κανονική και υπερυδροφοβή επιφάνεια για κινούμενο υποβρύχιο σώμα.

Όπως απεικονίζεται και στη παραπάνω εικόνα όταν ένα στερεό σώμα κινείται με ταχύτητα V μέσα σε ένα νευτώνειο ρευστό δημιουργείται μια διεπιφάνεια επαφής υγρού-στερεού για την στιβάδα του ρευστού που γειτνιάζει με το στερεό όριο. Η συγκεκριμένη στιβάδα δημιουργεί μια δύναμη τριβής f η οποία ανθίσταται στη κίνηση του στερεού σώματος με τη φορά που απεικονίζεται στο σχήμα ενώ

ταυτόχρονα αναπτύσσεται και μια δύναμη F από τη κίνηση του σώματος που συμπαρασύρει τα μόρια του ρευστού κατά τη κατεύθυνση της κίνησης του σώματος. Αυτές οι δύο δυνάμεις, f και F , που λειτουργούν ως δυνάμεις αντίστασης και ώθησης αντίστοιχα έχουν το ίδιο μέτρο και αντίθετη φορά σύμφωνα με το τρίτο νόμο της κίνησης του Νεύτωνα. Επομένως η ταχύτητα V_1 που αναπτύσσεται στα μόρια του ρευστού στην πλησιέστερη στο ρευστό στιβάδα θα είναι πολύ κοντά στη ταχύτητα που έχει το κινούμενο σώμα V . Εξαιτίας του νόμου του Νεύτωνα για το ιξώδες, η κίνηση της πλησιέστερης στιβάδας επιβραδύνεται από τη δεύτερη πιο κοντινή στο στερεό σώμα στιβάδα, στο σχήμα 2nd layer, λόγω της εμφάνισης διατμητικών τάσεων στη μεταξύ τους διεπιφάνεια (θεωρώντας τις στιβάδες ρευστού ως πάρα πολύ λεπτές). Ταυτόχρονα η δεύτερη πιο κοντινή στο στερεό στιβάδα επηρεάζεται από την πιο αργή τρίτη στιβάδα και πάει λέγοντας μεχρις ότου φτάσουμε στην τελευταία στιβάδα η οποία εμφανίζει ταχύτητα οριακά μηδέν. Επομένως με τον τρόπο αυτό, το ρευστό κοντά στο κινούμενο σώμα σχηματίζει μια κλίση ταχύτητας, η οποία θα μπορούσε να συσχετιστεί γραμμικά με την τιμή της διατμητικής τάσης αν το ιξώδες του ρευστού ήταν σταθερό. Με άλλα λόγια δηλαδή η διατμητική τάση (αντίσταση του ρευστού) αυξήθηκε με την αύξηση της κλίσης ταχύτητας.

Για τη περίπτωση όπου το στερεό σώμα φέρει υπερυδρόφοβη επιφάνεια δημιουργείται ένα αέριο στρώμα μεταξύ της υπερυδρόφοβης επιφάνειας και της κοντινότερης στιβάδας του ρευστού εξαιτίας της επίδρασης του πλάστρον. Υπό αυτή τη διαφορετική συνθήκη εκεί που στη κανονική επιφάνεια είχαμε δημιουργία διεπιφάνειας υγρού-στερεού πλέον έχουμε διεπιφάνεια υγρού-αερίου-στερεού. Επομένως έχουμε μια δύναμη f' της διεπιφάνειας αερίου-στερεού που αντιστέκεται στη κίνηση του στερεού σώματος και μια δύναμη f'' της διεπιφάνειας υγρού-αερίου. Όμως επειδή οι δυνάμεις $f'+f'' \ll f$ που δημιουργούταν στη κανονική επιφάνεια αντίστοιχα και οι δυνάμεις $F'+F'' \ll F$. Επομένως η ταχύτητα που αναπτύσσει η πλησιέστερη στο ρευστό στιβάδα, η οποία βρίσκεται σε επαφή με το φιλμ αέρα, V_1' θα είναι πολύ μικρότερη από τη V_1 της κανονικής επιφάνειας. Συνεπώς η κλίση της ταχύτητας μειώνεται και οδηγεί σε χαμηλότερες τιμές διατμητικών τάσεων κοντά στην υπερυδρόφοβη επιφάνεια συμβάλλοντας στη μείωση της οπισθέλκουσας αντίστασης.

2.10 Επιφάνειες riblet

Όπως αναφέραμε και πιο πάνω οι ερευνητές συχνά στρέφουν το ενδιαφέρον τους στη φύση προσπαθώντας να εμπνευστούν και πολλές φορές ακόμα και να προσομοιάσουν με κάποιο μηχανικά ανάλογο τρόπο διάφορους μηχανισμούς που συναντώνται και παρουσιάζουν ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον. Μέσα από διάφορες πειραματικές και ερευνητικές μελέτες σε τυρβώδη ροές παρατηρήθηκε ότι ο μηχανισμός μείωσης της οπισθέλκουσας συμβαίνει όταν οι riblet διαμορφώσεις της επιφάνειας ανυψώνουν τους στροβιλισμούς που δημιουργούνται κατά τη κατεύθυνση της ροής και οι οποίες δημιουργούν εγκάρσιες διατμητικές τάσεις. Αναφορικά με τις δίνες που δημιουργούνται, πρόκειται για σχεδόν κυλινδρικής μορφής στροβιλισμούς που 'ταξιδεύουν' κατά μήκος της κύριας κατεύθυνσης της ροής και περιστρέφονται κατά μήκος ενός άξονα κατά τη κατεύθυνση της ροής τους ρεύματος. Οι επιφάνειες που φέρουν αυλακώσεις (riblets) μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για ρευστά όπως διάφορα έλαια και αέρια. Ωστόσο επειδή αυτά τα ρευστά μέσα παρουσιάζουν διαφορετική δυναμική συνεκτικότητα μεταξύ των μορίων τους εμφανίζονται και διαφορετικές μειώσεις στην οπισθέλκουσα. Ρευστά με μεγαλύτερη δυναμική συνεκτικότητα παρουσιάζουν μεγαλύτερη φαινόμενη τριβή μεταξύ των διαφόρων στρωμάτων τους, γεγονός το οποίο και αυξάνει το πάχος του στρώματος του ρευστού που συστρέφεται από ένα αντικείμενο που παρεμβάλλεται μέσα σε ένα πεδίο ροής.

2.11 Το παράδειγμα του καρχαρία (riblet)

Μια τέτοια περίπτωση βιομιμητισμού αποτελεί και η προσπάθεια να αναπαραστούν οι riblet επιφανειακές δομές που συναντώνται στο δέρμα του καρχαρία και προσφέρουν δυνατότητες αυτοκαθαρισμού σε συνδυασμό με μείωση της οπισθέλκουσας αντίστασης. Αυτές οι δυνατότητες επιτρέπουν στο καρχαρία να κινηθεί γρήγορα μέσα στο νερό καταναλώνοντας αναλογικά λιγότερη ενέργεια διατηρώντας ταυτόχρονα την επιφάνεια του δέρματός του καθαρή δίχως συσσώρευση βιολογικών μικροοργανισμών. Γενικά σε τυρβώδη ροές οι δίνες που δημιουργούνται και περιστρέφονται κατά μήκος ενός άξονα στη κατεύθυνση του ρεύματος δημιουργούν ολοένα και αυξανόμενες εγκάρσιες διατμητικές τάσεις καθώς και αυξανόμενη αντίσταση. Ωστόσο η επιφανειακή δομή του δέρματος του καρχαρία φέρει μοτίβα δερματικής οδοντωτής προβολής τα οποία ανυψώνουν τις δημιουργούμενες δίνες μειώνοντας την εγκάρσια διατμητική τάση και την οπισθέλκουσα. Αυτά τα μοτίβα έχουν μικροσκοπικές αυλακώσεις (riblets) οι οποίες είναι ευθυγραμμισμένες παράλληλα με τη ροή του ρευστού. Οι δυνατότητες αυτές που παρουσιάζονται στο δέρμα του καρχαρία για μείωση της δύναμης οπισθέλκουσας αλλά και αυτοκαθαρισμού παρουσιάζουν ευρεία εφαρμογή εξαιτίας και της πιθανής επέκτασης και τροποποίησης που μπορεί να γίνει στις σχηματιζόμενες αυλακώσεις. Οι αυλακώσεις αυτές μπορούν να σχεδιαστούν από νανοκλίμακα μέχρι μικρόκλιμακα βρίσκοντας απήχηση σε μεταφορές, ιατρικές και βιομηχανικές εφαρμογές.

Για να μπορέσουν να συγκριθούν οι διάφοροι riblet σχεδιασμοί αναπτύχθηκαν οι εξής σχέσεις για να περιγράψουν τη γεωμετρία της επιφάνειας

$$s^+ = \frac{S \cdot u_t}{\nu} \quad (14)$$

$$h^+ = \frac{h \cdot u_t}{\nu} \quad (15)$$

$$t^+ = \frac{t \cdot u_t}{\nu} \quad (16)$$

$$u_t = \left(\frac{\tau_0}{\rho} \right)^{1/2} \quad (17)$$

όπου το σύμβολο + χρησιμοποιείται για να δηλώσει τις αδιάστατες παραμέτρους. Το s είναι η αδιαστατοποιημένη απόσταση μεταξύ των μικρό αυλακώσεων, h το ύψος των δομών riblet και t το πάχος, u_t είναι η ταχύτητα που αναπτύσσεται στο τοίχωμα εξαιτίας της διατμητικής τάσης, τ_0 είναι η διατμητική τάση στο τοίχωμα, ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού και ν είναι η κινηματική του συνεκτικότητα.

Κεφάλαιο 3

Βιβλιογραφική Επισκόπηση

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά ένα μεγάλο μέρος της έρευνας που έχει διεξαχθεί μέχρι σήμερα σχετικά με τη χρησιμοποίηση υδρόφοβων και υπερυδρόφοβων επιφανειών με σκοπό τη μετατροπή της οριακής συνθήκης στη διεπιφάνεια υγρού και στερεού σε ολισθαίνουσα. Η μετατροπή αυτή αποκτά εξαιρετικά σημαντικό ενδιαφέρον καθώς όταν επιτυγχάνεται μεγάλο μήκος ολίσθησης υπάρχει ως συνέπεια μια σημαντική μείωση των διατμητικών δυνάμεων με αποτέλεσμα τη μείωση της οπισθέλκουσας δύναμης. Σήμερα γνωρίζουμε ότι το μήκος της ολίσθησης καθορίζεται κατά κύριο λόγο από τα δομικά χαρακτηριστικά της υδρόφοβης-υπερυδρόφοβης επιφάνειας όπως είναι το βήμα μεταξύ των επιφανειακών δομήσεων, το ποσοστό επαφής υγρού-στερεού και η μορφολογία της επιφανειακής δομής και μπορεί να οριστεί και ως ο ρυθμός διάτμησης της ταχύτητας ολίσθησης στη στερεή επιφάνεια ή ως η εικονική απόσταση εντός του στερεού τοιχώματος στην οποία η ταχύτητα μηδενίζεται όταν προεκταθεί γραμμικά.

Μία κατάλληλη μέθοδος για τη δημιουργία ταχύτητας ολίσθησης επάνω στο όριο της στερεής επιφάνειας είναι η χρησιμοποίηση υδρόφοβων και υπερυδρόφοβων επιφανειακών δομών τόσο σε στρωτά όσο και σε τυρβώδη πεδία ροής. Η δημιουργία αυτής της ταχύτητας ολίσθησης επιφέρει τη μείωση της οπισθέλκουσας δύναμης.

3.1 Παράγοντες που επιδρούν στη μείωση της οπισθέλκουσας σε riblet επιφάνειες

Το καθεστώς που χαρακτηρίζει το είδος μια ροής, στο κατά πόσον είναι τυρβώδης ή στρωτή δηλαδή, επηρεάζει σημαντικά τη μείωση της οπισθέλκουσας σε μια επιφάνεια διαμορφωμένη με riblet. Αρκετές μελέτες έχουν δείξει ότι η μείωση της οπισθέλκουσας για επιφάνειες με riblet επιτυγχάνεται μόνο για τυρβώδη ροές. Μια αρκετά διαδεδομένη αιτία για την οποία οι επιφάνειες με riblet παρουσιάζουν αυξημένη τιμή για την οπισθέλκουσα είναι εξαιτίας μιας αύξησης που υπάρχει στο ποσοστό της επιφάνειας που βρέχεται από το ρευστό. Την ίδια στιγμή η διαμόρφωση των riblets θα διαταράξει το στρωτό πεδίο ροής και θα οδηγήσει σε υψηλή διάτμηση.

Σε καθεστώς στρωτής ροής η οπισθέλκουσα τυπικά αυξάνεται σημαντικά με αύξηση της επιφάνειας που διαβρέχεται καθώς η διατμητική τάση επενεργεί σε μεγαλύτερου μήκους επιφάνεια από ότι συνέβαινε πριν με αποτέλεσμα να αυξάνεται. Ωστόσο για τυρβώδη πεδία ροής καθώς οι δίνες δημιουργούνται πάνω από την επιφάνεια με τα riblet παραμένουν σε αυτό σημείο αλληλεπιδρώντας μόνο με τις κορυφές της διαμόρφωσης και σπανίως δημιουργούν προφίλ υψηλών ταχυτήτων μέσα στις αυλακώσεις της επιφάνειας. Από τη στιγμή επομένως όπου οι υψηλές ταχυτήτων δίνες αλληλεπιδρούν μόνο με μια μικρή περιοχή στη κορυφή της διαμόρφωσης μόνο σε εκείνο το σημείο εξασκούνται υψηλές διατμητικές τάσεις. Συνεπώς το χαμηλής ταχύτητας ρευστό στο εσωτερικό των αυλακώσεων της riblet διαμορφωσης δημιουργεί ένα χαμηλό πεδίο διατμητικών τάσεων κατά μήκος του μεγαλύτερου μέρους της επιφάνειας. Διατηρώντας τις δίνες πάνω από τις κορυφές των riblet οι διακυμάνσεις της ταχύτητας στο εσωτερικό των αυλακώσεων είναι αρκετά μικρότερες από τις διακυμάνσεις της ταχύτητας πάνω από μια λεία επιφάνεια (Lee and Lee 2001). Υπολογιστικές και πειραματικές αναλύσεις απέδειξαν ότι εάν το πάχος του ιξώδους υποστρώματος είναι μεγαλύτερο από το ύψος των κορυφών των riblets όλα τα μικρά κυρτά τμήματα μπορούν να ενσωματωθούν στο ιξώδες

υπόστρωμα. Στης συγκεκριμένη συνθήκη η διεπιφάνεια μπορεί να θεωρηθεί υδροδυναμικά λεία η δύναμη της τριβής θα μετασχηματιστεί σε αντίσταση λόγω συνεκτικότητας, η οποία δεν μπορεί να μειωθεί περαιτέρω τόσο σε τυρβώδη όσο και σε στρωτη ροή.

Ένα κινούμενο σώμα που περιβάλλεται από ρευστό (π.χ αέρα ή νερό) υφίσταται δυνάμεις εξαιτίας του ρευστού με κυριότερες την υδροδυναμική άνωση και την οπισθέλκουσα. Οι δυνάμεις αυτές είναι ίδιες ανεξάρτητα αν το σώμα κινείται μέσα στο ρευστό ή αν το ρευστό κινείται γύρω από το σώμα.

Η οπισθέλκουσα (drag) είναι μια δύναμη που ασκείται σε ένα σώμα από το ρευστό και η οποία αντιστέκεται στη κίνηση (προς τη διεύθυνση του σώματος που κινείται) θεωρώντας ότι το ρευστό είναι ασυμπίεστο. Το μέτρο της οπισθέλκουσας εκφράζεται συνήθως από την εξής σχέση

$$F_D = C_D \cdot \left(\frac{\rho \cdot u^2}{2} \right) \cdot A \quad (18)$$

όπου

- C_D είναι ο συντελεστής της οπισθέλκουσας και είναι ένας αδιάστατος αριθμός ο οποίος εξαρτάται από το σχήμα του σώματος και τον προσανατολισμό του ως προς τη κίνηση
- ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού μέσου
- u είναι η σχετική ταχύτητα μεταξύ του ελεύθερου ρεύματος του ρευστού και του σώματος δίχως να έχει σημασία αν κινείται το σώμα ή το ρευστό. Ωστόσο, η παρουσία άλλων επιφανειών κοντά στο σώμα μπορεί να επηρεάσει την οπισθέλκουσα όπως θα εξετάσουμε και με τη χρήση υπερυδροφόβων και υδρόφοβων επιφανειών παρακάτω
- A είναι το χαρακτηριστικό εμβαδόν του σώματος. Στις περισσότερες των περιπτώσεων ως εμβαδόν λαμβάνεται εκείνο για τη μέγιστη διατομή του σώματος (συνήθως ονομάζεται προβαλλόμενη επιφάνεια)

Η συνολική οπισθέλκουσα που ασκείται σε ένα σώμα οφείλεται σε δύο συνιστώσες, την οπισθέλκουσα μορφής και την οπισθέλκουσα τριβής.

Η οπισθέλκουσα μορφής (pressure drag) οφείλεται στο σχήμα του σώματος και στη διαταραχή της ροής, καθώς περιβάλλει το σώμα, η οποία οδηγεί στο σχηματισμό μιας περιοχής τύρβης και μια αντίστοιχη κατανομή πίεσης γύρω από το σώμα. Τα χαρακτηριστικά της διαταραχής εξαρτώνται από τη μορφή του σώματος και ενίοτε από τον αριθμό Reynolds της ροής και την τραχύτητα της επιφάνειας του σώματος.

Η οπισθέλκουσα τριβής (friction drag) οφείλεται στις διατμητικές τάσεις στην επιφάνεια του σώματος εξαιτίας της περιοχής του οριακού στρώματος όπου η ταχύτητα του ρευστού μεταβάλλεται χωρικά πολύ έντονα.

Είναι σημαντικό να γίνει κατανοητό ποιοί είναι οι παράγοντες για τις riblet επιφάνειες που επιδρούν στη μείωση της οπισθέλκουσας.

- Η κατάσταση της ροής είναι ένας από τους παράγοντες που επιδρούν στη μείωση της οπισθέλκουσας για τις riblet επιφάνειες. Αρκετές μελέτες έχουν δείξει ότι η μείωση της οπισθέλκουσας στις συγκεκριμένες επιφάνειες συμβαίνει σε τυρβώδη ροή. Μία κλασική αιτία όπου μια riblet επιφάνεια παρουσιάζει αύξηση της οπισθέλκουσας είναι το γεγονός ότι αυξάνεται η διαβρεχόμενη επιφάνεια. Στη περίπτωση της στρωτής ροής η οπισθέλκουσα του υγρού συνήθως αυξάνεται σημαντικά καθώς αυξάνεται η επιφανειακή περιοχή εξαιτίας της

διατμητικής τάσης στην επιφάνεια που επενεργεί κατά μήκος της νέας και μεγαλύτερης επιφανειακής περιοχής. Εντούτοις, στη τυρβώδη ροή πιθανός σχηματισμός δινών παραμένει πάνω από τη υδρόφοβη διαμόρφωση αλληλεπιδρώντας με τις κορυφές δημιουργώντας σπάνια ροή υψηλής ταχύτητας στις κοιλότητες των riblet (Fu, Yuan et al. 2017). Από τη στιγμή που οι δίνες υψηλότερης ταχύτητας αλληλεπιδρούν μόνο με μια μικρή περιοχή, όπως είναι οι κορυφές της riblet επιφάνειας, μόνο αυτές οι συγκεκριμένες περιοχές υποδέχονται την αύξηση της διατμητικής τάσης καθώς το χαμηλής ταχύτητας ρευστό που ρέει ανάμεσα στις κοιλότητες της riblet επιφάνειας παράγει πολύ μικρές διατμητικές τάσεις κατά μήκος της επιφάνειας. Παρά το γεγονός ότι δημιουργούνται και δευτερογενείς δίνες που εισέρχονται μέσα στις κοιλότητες έχουν τόσο χαμηλές ταχύτητες ροής που δημιουργείται μικρή διατμητική τάση εξαιτίας της αλληλεπίδρασης τους με την επιφάνεια των κοιλοτήτων.

- Η γεωμετρία των δομών και η επιφανειακή διαμόρφωση επηρεάζουν την οπισθέλκουσα για τις riblet επιφάνειες.
- Επιφάνειες με riblet δε χρησιμοποιούνται μόνο στο νερό αλλά επίσης και με αέρα ή λαδι. Το γεγονός ότι το δυναμικό ιξώδες του νερού, του αέρα και των ελαίων είναι διαφορετικό συνεπάγεται και διαφορετική επίδραση στη δύναμη της οπισθέλκουσας για τα διάφορα αυτά ρευστά μέσα. Τα υγρά που έχουν μεγάλο ιξώδες εμφανίζουν μεγαλύτερες συνεκτικές δυνάμεις μεταξύ των στρωμάτων τους, γεγονός το οποίο αυξάνει το πάχος του στρώματος του ρευστού που παραμορφώνεται από τη παρουσία ενός αντικειμένου κατά τη διάρκεια της ροής. Επομένως τα ρευστά μεγαλύτερου ιξώδους εμφανίζουν σχετικά μεγαλύτερη οπισθέλκουσα συγκριτικά με τα ρευστά που έχουν μικρό ιξώδες.
- Η κατεύθυνση της ροής επηρεάζει σημαντικά τη μείωση της οπισθέλκουσας σε μια διαμορφωμένη επιφάνεια με riblet. Ο (Chen, Rao et al. 2013) μελέτησε herringbone riblets με στενή ομαλή διαμορφωμένη κορυφή επιτυγχάνοντας μείωση της δύναμης της οπισθέλκουσας κατά 16 % μεγαλύτερη από ότι παρατηρείται στις παραδοσιακές υδρόφοβες επιφάνειες.

3.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την ολίσθηση σε υδρόφοβες επιφάνειες

Το 1952 ο (Tolstoi D.M.) προσπάθησε να ορίσει την ολίσθηση με όρους κινηματικού μηχανισμού των μορίων ενός ρευστού και πρότεινε ότι η κινητικότητα των υγρών μορίων που γειτνιάζουν με τα μόρια της στερεής επιφάνειας εξαρτάται από την ισορροπία (equilibrium) της γωνίας επαφής του υγρού με τη στερεή επιφάνεια. Αυτή τη θεώρηση την επέκτεινε ο (Blake 1990) ο οποίος με τη σειρά του επιβεβαίωσε ότι ο βαθμός οριακής ολίσθησης σχετίζεται άμεσα με τη γωνία επαφής στη διεπιφάνεια ρευστού και στερεού. Κάποια χρόνια αργότερα ο Schnell διεξήγαγε τη πρώτη πειραματική μελέτη σχετικά με την ολίσθηση μετρώντας το ρυθμό ροής του νερού σε γυάλινα τοιχώματα με ακτίνα της τάξης των 100μm. Συγκεκριμένα όταν τα γυάλινα τοιχώματα επεξεργάστηκαν με διμεθυλοδιχλωροσιλάνιο για να αποκτήσουν υδρόφοβη συμπεριφορά παρατηρήθηκε μεγαλύτερος ρυθμός ροής ο οποίος και ερμηνεύτηκε ως σημάδι της ολίσθησης πάνω στα γυάλινα τοιχώματα.

Ωστόσο αρκετές προσωμειώσεις μοριακής δυναμικής που διεξήχθησαν παρατήρησαν μήκη ολίσθησης αρκετά μικρότερα από αυτά που μετρήθηκαν μέσα από πειραματικές διαδικασίες (Barrat and Bocquet 1999). Ο (Baudry, Charlaix et al. 2001) απέδειξε ότι η οριακή συνθήκη επάνω σε μία στερεή επιφάνεια κοβαλτίου μετατρέπεται από οριακή συνθήκη μη ολίσθησης σε συνθήκη ολίσθησης όταν η επιφάνεια επικαλύπτεται με μια επεξεργασμένη μεμβράνη χρυσό-θειόλης επιτυγχάνοντας γωνία επαφής $\theta=101^\circ$ και μήκος ολίσθησης $b=40\text{ nm}$. Σύμφωνα με τους (Cottin-Bizonne, Jurine et al. 2002) επιτεύχθηκε ένα

μέτριο μήκος ολίσθησης $b=20$ nm για υδρόφοβη επιφάνεια και ταυτόχρονα δεν παρατηρήθηκε καθόλου οριακή ολίσθηση για την υδρόφιλη επιφάνεια.

Σε αρκετές μελέτες υδρόφοβων επιφανειών όπως αυτή των (Lauga and Brenner 2004), στις οποίες παρατηρούνται πολύ υψηλά μήκη ολίσθησης τα αποτελέσματα οφείλονται στο γεγονός της παρουσίας εγκλωβισμένου αέρα στη διεπιφάνεια του υγρού με το στερεό.

Είναι ερευνητικά αποδεδειγμένο ότι η δομή της διεπιφάνειας υγρού-στερεού και συγκεκριμένα η επιφανειακή διαβροχή και η τραχύτητα έχουν μεγάλη επίδραση στη συμπεριφορά της ολίσθησης.

Ωστόσο έντονο ενδιαφέρον υπάρχει και σε μελέτες, όπως είναι αυτές των (Pit, Hervet et al. 2000), (Craig, Neto et al. 2001), (Bonaccorso, Karpl et al. 2002), (Neto, Craig et al. 2003), (Zhu and Granick 2002), (Pit, Hervet et al. 1999) που βρίσκονται στον αντίποδα της παραπάνω διατυπωμένης και διαδεδομένης άποψης και δείχνουν την ύπαρξη ολίσθησης ακόμα και για επιφάνειες που εμφανίζουν μερική ή και πλήρη διαβροχή από το εργάζομενο ρευστό μέσο.

Αναφόρικά με την επίδραση της διαβροχής στην ολίσθηση και πιάνοντας την ερευνητική ιστορία όπως αυτή εξελίσσεται από τα μέσα της δεκαετίας του 1970 διαπιστώνουμε ότι υπάρχει μια πληθώρα θεωρητικών μελετών που εμφανίζουν αντικρουόμενα συμπεράσματα μεταξύ τους.

Από τη μία έχουμε μελέτες όπως αυτές των (M. Hocking 1976), (Baldoni 1996) και (Cottin-Bizonne, Barentin et al. 2004) όπου η παρουσία τραχύτητας στην επιφάνεια αυξάνει το βαθμό της ολίσθησης και στον αντίποδα οι (Richardson 1973), (Jabbarzadeh 2000) και (Priezjev, Darhuber et al. 2005) οι οποίοι παρατήρησαν μείωση της ολίσθησης σε συνδυασμό με την τραχύτητα της υπό μελέτης επιφάνειας.

3.3 Νανοφουσαλίδες και ολίσθηση

Εάν έχουμε παρουσία νανοφουσαλίδων ή στρώματος αέρα στη διεπιφάνεια ρευστού-στερεού συχνά γίνεται η υπόθεση ότι θα εμφανιστεί άπειρη οριακή ολίσθηση. Αυτές οι νανοφουσαλίδες συνήθως εμφανίζουν διάμετρο της τάξης των 50-100nm και ύψος 5-20nm. Η παρουσία προσροφημένων στοιχείων, όπως τα πολυμερή και οι νανοφουσαλίδες, είναι δυνατόν να μετατοπίσουν το επίπεδο της ολίσθησης μέσα στο ρευστό σε απόσταση από τη στερεή επιφάνεια. Ο όρος του ανηγμένου μήκους ολίσθησης μας διευκολύνει στη συγκεκριμένη περίπτωση να αποτυπώσουμε ένα μέσο όρο της ροής σε μια ετερογενή υδρόφοβη επιφάνεια όπου συνυπάρχουν περιοχές με τέλεια ολίσθηση (αυτές που το ρευστό ρέει και είναι σε επαφή με τον αέρα των νανοφουσαλίδων, $b = \infty$) και περιοχές με μηδενική ολίσθηση ($b=0$). Αρκετές μελέτες (Vinogradova 1995), (Lauga and P Brenner 2004) καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η αύξηση του ρυθμού της ροής στα Νευτώνια ρευστά μπορεί να αποδοθεί στην παρουσία μικρών ποσοτήτων αέρα παγιδευμένων, συνήθως με τη μορφή νανοφουσαλίδων, πάνω στην υδρόφοβη επιφάνεια. Ο εγκλωβισμός αυτός του αέρα από την υδρόφοβη επιφάνεια θεωρείται (Ishida, Inoue et al. 2000), (Sakamoto, Kanda et al. 2002), (Carambassis, Jonker et al. 1998) σημαντική αιτία για την εμφάνιση μεγάλης κλίμακας υδρόφοβων συμπεριφορών επάνω στη στερεή επιφάνεια. Η σταθερότητα των νανοφουσαλίδων είναι μια σημαντική παράμετρος. Οι σφαιρικές νανοφουσαλίδες παρουσιάζουν κάποια αστάθεια διότι η πίεση στο εσωτερικό τους είναι αρκετά μεγαλύτερη από την πίεση που επικρατεί στο περιβάλλοντα χώρο γεγονός το οποίο αυξάνει τη διαλυτότητα της νανοφουσαλίδας αέρα οδηγώντας στην οριστική διάλυση της (S. Epstein and S. Plesset 1951), (Christenson and Claesson 2001). Η διεπιφάνεια αέρα-ρευστού σχετικά γρήγορα συσσωρεύει ρύπους γεγονός το οποίο θα μπορούσε να δημιουργήσει ενός είδους 'δεσμό' μεταξύ του στρώματος αέρα και του υγρού αυξάνοντας με αυτό το τρόπο τη σταθερότητα της διεπιφάνειας (Bachhuber and Sanford 1974). Αυτός ο ιδιότυπος δεσμός θα μπορούσε να λειτουργήσει ως τροχοπέδη στη διάλυση της νανοφουσαλίδας παρέχοντας κάποιο βαθμό μηχανικής αντοχής επηρεάζοντας τις επιφανειακές

δυνάμεις που αναπτύσσονται και να μεταβάλει την οριακή συνθήκη άπειρης ολίσθησης σε συνθήκη μερικής ολίσθησης. Η ύπαρξη αυτού του δεσμού επίσης ευθύνεται και για τις διαφορές που εμφανίζονται σε πειραματικά αποτελέσματα σχετικά με το βαθμό της ολίσθησης ο οποίος εξαρτάται από τη συνολική επιφάνεια που καλύπτουν οι νανοφουσαλίδες και τη διαδικασία καθαρισμού.

Υπάρχουν αρκετές μελέτες (Lou, Ouyang et al. 2000), (Zhang, D Zhang et al. 2004) που έχουν διαπιστώσει ότι νανοφουσαλίδες αναπτύσσονται και σε επιφάνειες που εμφάνίζουν πλήρη διαβροχή γεγονός που υποδεικνύει ότι όλες οι επιφάνειες που έρχονται σε επαφή με ένα ρευστό μπορούν υπό συνθήκες να φέρουν νανοφουσαλίδες. Η σημαντική πρόκληση που εμφανίζει πειραματικό ενδιαφέρον αλλά και ένα υψηλό βαθμό δυσκολίας είναι να μπορέσει να ελεγχθεί η παραγωγή των νανοφουσαλίδων, η πυκνότητα και το μέγεθος τους καθώς και οι επιφανειακές τους ιδιότητες. Ένας πειραματικά τεχνητός τρόπος να διατηρήσεις το στρώμα αέρα είναι ο συνεχής ψεκασμός αέρα πάνω στην υδρόφοβη επιφάνεια.

Τα τελευταία χρόνια δίνεται προσοχή στην επίδραση που μπορεί να έχει η διατμητική τάση και η παρουσία εγκλωβισμένων στρωμάτων αέρα στη διεπιφάνεια ρευστού-στερεού στην ολίσθηση. Οι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την ολίσθηση είναι οι εξής

- Η μακροσκοπική γωνία επαφής, η οποία χρησιμοποιείται και ως δείκτης της διαβροχής, εξαρτάται όχι μόνο από τη χημική τοπογραφική σύσταση της επιφάνειας αλλά και από τη τραχύτητα.
- Μία χημικά ετερογενής επιφάνεια μπορεί να οδηγήσει σε διαφοροποιήσεις σχετικά με τη συμπεριφορά της ολίσθησης εξαιτίας των διαφορετικών οριακών συνθηκών που επικρατούν σε κάθε τμήμα αυτής της επιφάνειας.
- Η σταθερότητα των στοιβάδων του αέρα και των νανοφουσαλίδων είναι υψηλότερη για μεγαλύτερες γωνίες επαφής και για τραχείες επιφάνειες γεγονός το οποίο θεμελιώνει και την ικανότητα των υπερυδρόφοβων επιφανειών να εγκλωβίζουν και να συντηρούν ένα στρώμα αέρα κάτω από το υγρό εμποδίζοντας έτσι τη διαβροχή της επιφάνειας (Lafuma and Quéré 2003).

3.4 Συσχέτιση του μήκους ολίσθησης με τη μείωση της οπισθέλκουσας δύναμης

Η επίδραση του μήκους της ολίσθησης για διάφορες συνθήκες ροής είναι καταλυτική για τη μείωση της οπισθέλκουσας δύναμης.

Εάν θεωρήσουμε μια στρωτή ροή Couette με δύο παράλληλες πλάκες τοποθετημένες σε απόσταση h μεταξύ τους τότε εάν μια από τις δυο πλάκες εμφανίζει μήκος ολίσθησης b , τότε η μείωση της οπισθέλκουσας μπορεί να υπολογιστεί ως

$$\frac{\tau_{slip}}{\tau_{no - slip}} = \frac{1}{1 + h/b} \quad (19)$$

όπου τ_{slip} και $\tau_{no - slip}$ είναι οι διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στο τοίχωμα για συνθήκη ολίσθησης και μη ολίσθησης αντιστοίχα. Όπως είναι εμφανές από την εξίσωση όσο μικραίνει το κενό μεταξύ των δυο πλακών τόσο μεγαλύτερη είναι η μείωση της οπισθέλκουσας δύναμης (Choi and Kim 2006). Μια αντίστοιχη έκφραση για τη μείωση της οπισθέλκουσας παρατηρείται και για ροή Poiseuille

$$DR = \frac{3}{(3 + \frac{h}{b})} \quad (20)$$

Σύμφωνα με τις παραπάνω εκφράσεις μια μείωση της οπισθέλκουσας αναμένεται να επιτευχθεί όταν δημιουργηθεί μήκος ολίσθησης περίπου 10% συγκριτικά με το χαρακτηριστικό μήκος της ροής.

Στη περίπτωση στρωτής ροής για να μπορέσει η ολίσθηση σε μια υδρόφοβη επιφάνεια να επηρεάσει την οπισθέλκουσα δύναμη είναι απαραίτητο το μήκος ολίσθησης (b) να είναι συγκρίσιμο με το χαρακτηριστικό μήκος της ροής. Χρησιμοποιώντας την οριακή συνθήκη του μοντέλου του Navier το ποσοστό του όγκου της ροής ανά μονάδα μήκους (q) του ρευστού ανάμεσα σε δυο απείρου μήκους πλάκες που απέχουν μεταξύ τους απόσταση (h) μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση του ιξώδους (μ), της κλίσης της πίεσης και του μήκους ολίσθησης (b) (Ou, Perot et al. 2004)

$$q = \frac{h^3}{4\mu} \cdot \left(-\frac{dp}{dx}\right) \cdot \left[\frac{1}{3} + \frac{b}{h}\right] \quad (21)$$

Σύμφωνα με τη παραπάνω εξίσωση μια μείωση κατά 20% της οπισθέλκουσας προϋποθέτει ένα μήκος ολίσθησης όπου να είναι $b = h/15$. Για ένα δεδομένο μήκος ολίσθησης, όταν δηλαδή έχω μια συγκεκριμένη επιφάνεια, η μείωση της οπισθέλκουσας θα αυξηθεί εάν το κανάλι γίνει μικρότερο όπως επίσης και για ένα δεδομένο ρευστό με καθορισμένο πεδίο ροής η κλίση της πίεσης μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά από την ολίσθηση όταν η ολίσθηση είναι συγκρίσιμη με το ύψος του μικρο-καναλιού.

Η χρησιμοποίηση υδρόφοβων επιφανειών για τη μείωση της τριβής σε θαλάσσια οχήματα και σε άλλες διατάξεις γενικότερα είναι μια διαδικασία που χρησιμοποιείται αρκετά τα προηγούμενα χρόνια. Ωστόσο, η επίδραση που εμφανίζουν αυτές οι επιφάνειες στη μείωση της οπισθέλκουσας είναι ασταθής σε υψηλές ταχύτητες ροής και πίεσης του πεδίου ροής λόγω καταστροφής της διεπιφάνειας αερα-νερού. Ειδικά στα θαλάσσια οχήματα όπου το πάχος του οριακού στρώματος που δημιουργείται είναι της τάξης του 1mm για να παρατηρηθεί μια αισθητή μείωση της οπισθέλκουσας θα πρέπει το μήκος ολίσθησης να είναι της τάξης των 100 μm νούμερο το οποίο είναι αρκετά μεγαλύτερο από ότι είναι εφικτό σε λείες υδρόφοβες επιφάνειες (10 nm).

3.5 Ολίσθηση σε υπερυδροφικές επιφάνειες. Θεωρητικές προσεγγίσεις.

Ως υπερυδροφική επιφάνεια ορίζεται οποιαδήποτε επιφάνεια επιτυγχάνει γωνία επαφής μεταξύ υγρού και στερεού ορίου μεγαλύτερη από 150° . Οι υπερυδροφικές επιφάνειες έχουν δημιουργήσει έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια καθώς παρέχουν τη δυνατότητα επίτευξης ουσιαστικής μείωσης της οπισθέλκουσας τόσο για στρωτά όσο και για τυρβώδη πεδία ροής καθώς κάτω από ορισμένες συνθήκες μπορούν να επιφέρουν και μείωση της οπισθέλκουσας μέχρι και κατά 40%. Η ουσιαστική διαφορά ανάμεσα σε μια υδρόφοβη και σε μια υπερυδροφική επιφάνεια δεν έχει να κάνει τόσο με τη χημεία της επιφάνειας, αλλά με την επιφανειακή τραχύτητα σε μικρο ή νάνο κλίμακα. Οι (Ou and Rothstein 2005) και (Ou, Perot et al. 2004) ήταν από τους πρώτους που απέδειξαν πειραματικά ότι οι υπερυδροφικές επιφάνειες μπορούν να μειώσουν την οπισθέλκουσα για στρωτή ροή σε μικροκανάλια παρατηρώντας μείωση της οπισθέλκουσας κατά 40%, ταχύτητες ολίσθησης κατά μήκος της υπερυδροφικής επιφάνειας έως και 60% της ελεύθερης ταχύτητας ροής και μήκος ολίσθησης μέχρι και $b=25 \mu\text{m}$.

Ωστόσο οι υπερυδροφικές επιφάνειες οδηγούν σε μείωση της οπισθέλκουσας ακόμα και για τυρβώδη πεδία ροής. Στις τυρβώδεις ροές μια λεπτή στρωτή υπό-στοιβάδα αναπτύσσεται πολύ κοντά στο στερεό τοίχωμα. Αρκετές μελέτες όπως αυτές των (Min and Kim 2004, Fukagata, Kasagi et al. 2006) απέδειξαν ότι για τυρβώδη ροές η ολίσθηση κατά τη κατεύθυνση της ροής οδηγεί σε μείωση της οπισθέλκουσας της τριβής με παρόμοιο τρόπο όπως και στις στρωτές ροές. Σύμφωνα με τις παραπάνω

μελέτες για μια υπερυδροφόβη επιφάνεια, στη περίπτωση που το μήκος ολίσθησης εμφανίζεται παράλληλα με τη κατεύθυνση της ροής καθώς αυξάνεται έχουμε μείωση της διατμητικής τάσης του τοιχώματος ενώ στη περίπτωση όπου η ολίσθηση εμφανίζεται κάθετα στη κατεύθυνση της ροής παρατηρείται αύξηση της διατμητικής τάσης στο τοίχωμα.

Σύμφωνα με τους (Martell, Rothstein et al. 2010) σε τυρβώδη πεδία ροής, σε αντίθεση με τα στρωτά, αυξάνοντας το ρυθμό της ροής και τον αριθμό Reynolds αυξάνεται και η μείωση της οπισθέλκουσας που παρατηρείται.

Από τις μελέτες των (Daniello, Waterhouse et al. 2009), (Gogte, Vorobieff et al. 2005), (Henoch, N Krupenkin et al. 2006) δεν προέκυψε μείωση της οπισθέλκουσας για στρωτή ροή επειδή το υψός του μικροκαναλιού ήταν αρκετά μεγαλύτερο συγκριτικά με το μήκος ολίσθησης της υπερυδροφόβης επιφάνειας. Για τυρβώδη ροή όμως παρατηρήθηκαν μειώσεις της οπισθέλκουσας της τάξης του 50% και μήκη ολίσθησης κοντά στα 100 μm. Από αυτές τις πειραματικές και υπολογιστικές μελέτες συμπεραίνουμε ότι αν θέλουμε να πετύχουμε μείωση της οπισθέλκουσας σε τυρβώδη πεδία ροής πρέπει να φροντίσουμε το διάκενο μεταξύ των μικρο-χαρακτηριστικών της επιφάνειας να είναι της ίδιας τάξης και όσο πιο κοντά γίνεται με το πάχος του ιξώδους υποστρώματος.

3.6 Διεργασίες κατασκευής υπερυδροφόβης επιφάνειας

Οι προσεγγίσεις που ακολουθούνται για τη τροποποίηση των επιφανειών ούτως ώστε να αποκτήσουν υπερυδροφόβα χαρακτηριστικά είναι κυρίως δύο και εξαρτώνται κυρίως από τη πρότερη κατάσταση της επιφάνειας. Η πρώτη προσέγγιση επομένως αφορά υδροφόβες επιφάνειες όπως είναι οι επεξεργασμένες με PTFE (Teflon) και PDMS (poly di-methyl siloxane) επιφάνειες για τις οποίες χρειάζεται μόνο η πρόσδοση τραχύτητας. Η δεύτερη προσέγγιση αφορά τα υδροφιλά υλικά όπως είναι τα περισσότερα μέταλλα (αλουμίνιο, ατσάλι, χαλκός) για τα οποία πρωτίστως πρέπει να δημιουργηθεί τραχύτητα μικρο/νάνο κλίμακας και στη συνέχεια να τροποποιηθούν με υλικά χαμηλού ενεργειακού περιεχομένου (Basu and Paranthaman 2009). Τα υλικά χαμηλού ενεργειακού περιεχομένου που χρησιμοποιούνται όπως η σιλοξάνη (σιλοξάνη είναι ένα βασικό μόριο της σιλικόνης και δημιουργείται με υδρόλυση του σιλανίου και με αφυδάτωση της σιλανόλης που παράγεται από την υδρόλυση) αλλά και τα φθοριο-πολυμερή, τα οποία είναι πολυμερή που βασίζονται στις ενώσεις φθορίου με άνθρακα, έχουν ως στόχο την πρόσδοση υδροφόβης χημείας στην επιφάνεια ούτως ώστε να επιτευχθεί τεχνητά η ικανότητα της υπερυδροφοβικότητας. Ωστόσο η εξαιρετικά χαμηλή επιφανειακή χημική ενέργεια δεν είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την υπερυδροφοβικότητα και αυτό διότι οι φυσικές υπερυδροφόβες επιφάνειες, οι οποίες μπορούν να έχουν αρκετά υψηλές γωνίες επαφής και χαμηλές γωνίες ολίσθησης με τις τελευταίες να αφορούν τη γωνία κλίσης του υποστρώματος στο οποίο η σταγόνα αρχίζει να ολισθαίνει ή να απομακύνεται από την επιφάνεια, διαθέτουν μέτρια επιφανειακή χημική ενέργεια. Σχεδόν οποιοδήποτε στερεό υλικό συμπεριλαμβανομένων των ελαστικών καθώς και των εύκαμπτων πολυμερών αλλά και των υλικών με βάση τις ίνες όπως το χαρτί και τα υφάσματα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν υπόστρωμα για τη κατασκευή μιας υπερυδροφόβης επιφάνειας.

Σε περιπτώσεις όπου το ρευστό που θα περιβάλλει την υπερυδροφόβη επιφάνεια είναι νερό τότε η κατασκευή της υπερυδροφόβης επιφάνειας είναι μια σχετικά εύκολη διαδικασία καθώς το νερό παρουσιάζει υψηλή επιφανειακή τάση (72,1 mN/m) και επομένως οι απαιτήσεις για τη κατασκευή της δεν είναι τόσο αυστηρές καθιστώντας εφικτό να επιτευχθεί υπερυδροφοβικότητα ακόμη και για απλά διαμορφωμένες επιφανειακές δομές με μικροπυλώνες.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για να προσδώσουμε τραχύτητα σε μια επιφάνεια στην επιθυμητή κλίμακα όπως είναι η αμμοβολή, η χημική απόθεση ατμών, η χημική χάραξη, η φωτολιθογραφία, η ανοδική οξειδωση, η χάραξη πλάσματος και η εκτύπωση μελανίου. Συνήθως επιλέγεται η χημική

χάραξη εξαιτίας της ευκολίας με την οποία πραγματοποιείται αλλά και του χαμηλού κόστους που παρουσιάζει ως μέθοδος επεξεργασίας (Huang, Wang et al. 2013), (Li, Ueda et al. 2012). Αφού προσδώσουμε τραχύτητα στην επιφάνεια χρειάζεται να την επεξεργαστούμε χρησιμοποιώντας υδροφοβικούς παράγοντες διότι τα περισσότερα από τα υλικά που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία καθώς και σε πρακτικές εφαρμογές είναι εκ φύσεως υδρόφιλα όπως το αλουμίνιο και το ασάλι. Και σε αυτό το σημείο ωστόσο υπάρχουν διαφορετικοί τρόποι για να επιστρώσουμε μια επιφάνεια με υλικά χαμηλής επιφανειακής ενέργειας όπως είναι η χημική εναπόθεση ατμών, η εμβάπτιση, η περιστροφή και ο ψεκασμός με σπρέι.

3.7 Θεωρητικές προσεγγίσεις για το μήκος ολίσθησης σε διαφορετικά μοτίβα επιφανειών

Αναλυτικά μοντέλα και αριθμητικές προσομοιώσεις είναι χρήσιμα εργαλεία για τη κατανόηση της έννοιας του μήκους ολίσθησης για μια σειρά επιφανειακών μοτίβων όπως είναι οι αυλακώσεις παράλληλες στη ροή, οι αυλακώσεις κάθετες στη ροή, οι πυλώνες και οι οπές. Σύμφωνα με μια σειρά θεωρητικών μελετών (Philip 1972), (Lauga and A. Stone 2003, Davis and Lauga 2010) και (Ybert, Barentin et al. 2007) για ένα συγκεκριμένο επιφανειακό μοτίβο η περιοδικότητα εμφάνισης των επιφανειακών δομών καθώς και το κλάσμα αερίου είναι οι δύο πιο σημαντικοί παράγοντες για το προσδιορισμό του μήκους ολίσθησης.

Συγκεκριμένα για επιφάνεια με αυλακώσεις παράλληλα στη ροή το μήκος ολίσθησης (b) εκφράζεται ως συνάρτηση του κλάσματος του αερίου (ϕ_g) και του βήματος απόστασης μεταξύ των δομών (L)

$$\frac{b}{L} = \frac{\ln(\sec(\pi \cdot \phi_g / 2))}{\pi} \quad (22)$$

Για επιφάνειες με αυλακώσεις κάθετα στη ροή το μήκος ολίσθησης είναι το μισό του μήκους ολίσθησης για αυλακώσεις παράλληλα στη ροή δηλαδή

$$\frac{b}{L} = \frac{\ln(\sec(\pi \cdot \phi_g / 2))}{2\pi} \quad (23)$$

Αναλυτικές λύσεις για το μήκος ολίσθησης σε επιφάνειες που έχουν πυλώνες ως επιφανειακό μοτίβο προσεγγίζονται από τη σχέση

$$\frac{b}{L} = \frac{3}{16} \sqrt{\frac{\pi}{1-\phi_g}} - \frac{3 \ln(1+\sqrt{2})}{2\pi} \quad (24)$$

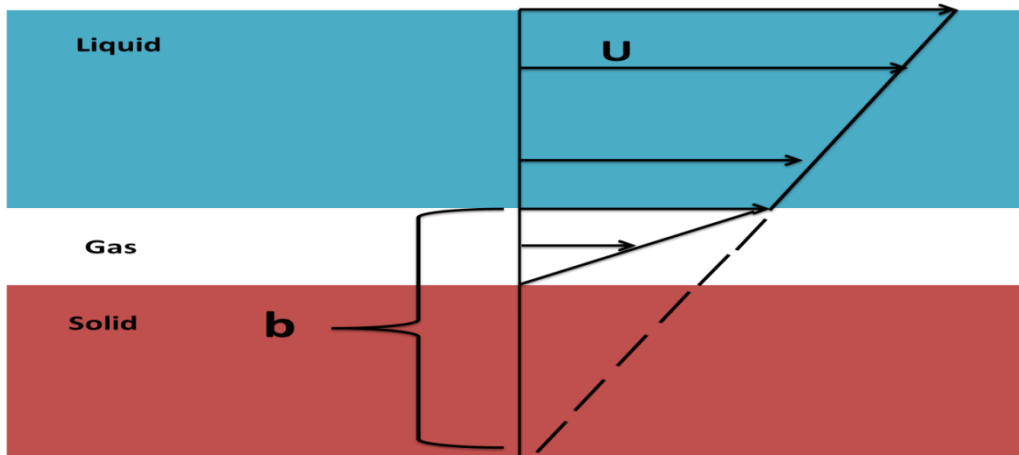
Στη περίπτωση επιφάνειας διαμορφωμένης με οπές το μήκος ολίσθησης εκφράζεται ως

$$\frac{b}{L} = -A \ln(1 - \phi_g) + B \quad (25)$$

όπου A, B παράγοντες που προκύπτουν από αριθμητική προσομοίωση.

3.8 Φαινόμενο μήκος ολίσθησης σε υπερυδροφικές επιφάνειες

Έστω ότι έχουμε ένα ρευστό που ρέει σε μια στερεή επιφάνεια η οποία όμως είναι καλυμμένη με ένα λεπτό και ομοιόμορφο στρώμα αέρα όπως απεικονίζεται και στη Εικόνα 13, όπου επειδή ο αέρας έχει σημαντικά μικρότερο ιξώδες από το ρευστό το υγρό θα έρρεε με πολύ μεγαλύτερο μήκος ολίσθησης.



Εικόνα 13. Ανηγμένο μήκος ολίσθησης για ομοιόμορφο στρώμα αέρα ανάμεσα στο υγρό και στο στερεό.

Το φαινόμενο μήκος ολίσθησης (b) στη περίπτωση που τα ιξώδη υγρού και αερίου είναι n_{liquid} και n_{gas} αντίστοιχα και το πάχος του αερίου στρώματος είναι h υπολογίζεται θεωρώντας τη συνέχεια της διατμητικής τάσης στην διεπιφάνεια

$$b = \left(\frac{n_{liquid}}{n_{gas}} - 1 \right) h \quad (26)$$

Η συγκεκριμένη διάταξη, με το ομοιόμορφο στρώμα αέρα ενδιάμεσα του ρευστού και του στερεού, παραμένει ωστόσο ιδανική διότι εξαιτίας της θερμοδυναμικής αστάθειας το στρώμα αυτό του αέρα είναι αδύνατο να διατηρηθεί. Αυτό όμως που αξίζει να μελετηθεί είναι η δημιουργία και διατήρηση θυλάκων αερίου ανάμεσα στις επιφανειακές δομές που κατασκευάζονται από υπερυδροφόβο μη διαβρέξιμο υλικό και σύμφωνα με τους (Ou, Perot et al. 2004), (Watanabe, Udagawa et al. 1999) και (Kim and Kim 2002) βρέθηκε σημαντική βελτίωση της ολίσθησης σε σύγκριση με λείες επιφάνειες.

Στη περίπτωση της στρωτής ροής αναλυτικές εκφράσεις για το ανηγμένο μήκος ολίσθησης σε ροή Stokes για διαφορετικές οριακές συνθήκες δόθηκαν από τους (Ybert, Barentin et al. 2007) όπου διεξήγαγαν μια κλιμακωτή ανάλυση για να προσεγγίσουν το ανηγμένο μήκος ολίσθησης ως συνάρτηση των χαρακτηριστικών γεωμετρικών παραμέτρων της επιφανειακής δομής όπως είναι η κλίμακα της τραχύτητας.

Επομένως όσο μειώνεται το εύρος της επιφανειακής επαφής του υγρού με τη στερεή επιφάνεια (f) το ανηγμένο μήκος ολίσθησης μπορεί να υπολογιστεί από μια υπό-κλίμακα σχέση όπου

$$b_{eff} \approx \frac{a}{f}, \text{ καθώς το } f \rightarrow 0 \quad (27)$$

Όπου a είναι ένας αριθμητικός παράγοντας που εξαρτάται από την υποκείμενη επιφανειακή τοπογραφία παραδείγματος χάρη αν η επιφάνεια φέρει αυλακώσεις ή εξογκώματα. Πιο συγκεκριμένα

$$b_{eff} \approx L \log f, \text{ για αυλακώσεις} \quad (28)$$

$$b_{eff} \approx \frac{L}{\sqrt{f}}, \text{ για εξογκώματα} \quad (29)$$

Όπου L είναι ένα αδιάστατο μέγεθος για τη περιοδικότητα εμφάνισης των αυλακώσεων και των εξογκωμάτων.

3.9 Σταθερότητα της υπερυδροφοβικότητας κάτω από το νερό

Η σταθερότητα και η εξασφάλιση αντοχής των υπερυδροφόβων χαρακτηριστικών είναι ένα ζήτημα εξαιρετικής ερευνητικής σημασίας. Σε πειράματα που διεξήχθησαν από τον (Samaha, Tafreshi et al. 2012) σε δοχείο πίεσης παρατηρήθηκε ότι μειώθηκε ο χρόνος ζωής της υπερυδροφόβης επιφάνειας με την αύξηση του ρυθμού της ροής και η μείωση της οπισθέλκουσας που εμφανιζόταν εξαρχής στην επιφάνεια έπαψε να υφίσταται γεγονός το οποίο οφείλεται στην επιτάχυνση διάλυσης του αέρα που υπάρχει μέσα στο νερό για τις διαφορετικές συνθήκες ροής. Αντίστοιχα πειράματα των (Rao, Latthe et al. 2011) για χάλκινες υπερυδροφόβες επιφάνειες σε περιβάλλον υγρασίας ποσοστού 95% έδειξαν ότι τα υπερυδροφόβα χαρακτηριστικά δεν επηρεάστηκαν σημαντικά ακόμα και με τη πάροδο 90 ημερών. Αντιθέτως η αντοχή μειωνόταν για αύξηση της θερμοκρασίας της υπερυδροφόβης επιφάνειας (Xiu, Hess et al. 2008).

Το κλειδί για να συντηρηθεί η υπερυδροφοβικότητα κάτω από το νερό είναι να διατηρήσουμε μια μεγάλη περιοχή σταθερά παγιδευμένων κοιλοτήτων αέρα στην επιφάνεια για διαφορετικά υγρά περιβάλλοντα. Η σταθερότητα αυτών των εγκλωβισμένων κοιλοτήτων αέρα δεν εξαρτάται μόνο από τη διαβροχή της επιφάνειας αλλά και από το μέγεθος της δομής ουτως ώστε να αντισταθεί στις υψηλές πιέσεις του υγρού.

Παρόλο που τις περισσότερες φορές οι εγκλωβισμένες κοιλοότητες αέρα πάνω στην υπερυδροφόβη επιφάνεια είναι απομονωμένες από το περιβάλλον (κοιλοότητες αέρα σε κλειστή κατάσταση), υπάρχουν κάποιες περιπτώσεις όπου οι κοιλοότητες αέρα είναι σε ανοιχτή κατάσταση συνδεδεμένες με το περιβάλλον όταν η επιφάνεια είναι μερικώς βυθισμένη κάτω από το νερό όπως οι ρευστομηχανικές κατασκευές που αναπτύχθηκαν από τους (Srinivasan, Kleingartner et al. 2015) και (Carlborg and Wijngaart 2011).

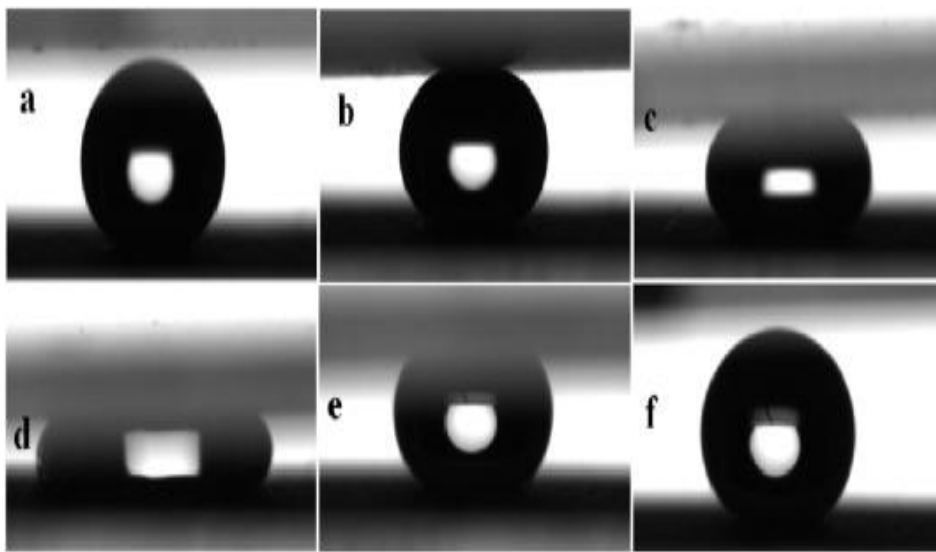
Για τις κοιλοότητες ανοιχτής κατάστασης, ο εγκλωβισμένος αέρας στις κοιλοότητες διατηρεί την ατμοσφαιρική πίεση και η διεπιφάνεια υγρού-αερίου διατηρείται εξαιτίας της μηχανικής ισορροπίας του συστήματος, η πιθανή διατάραξη της οποίας λόγω συμπίεσης θα οδηγήσει σε διαβροχή και εναλλαγή κατάστασης από το μοντέλο Cassie-Baxter σε Wenzel.

Για τις κοιλοότητες κλειστής κατάστασης, οι σχηματιζόμενες κοιλοότητες είναι απομονωμένες από το περιβάλλον και η συμπίεση από τη διείδυση του νερού αυξάνει τη πίεση του εγκλωβισμένου αέρα ωφελώντας έτσι τη μηχανική ισορροπία του συστήματος.

Επομένως το καθεστώς που επικρατεί στις κοιλοότητες του αέρα επηρεάζει τη κατάσταση της διαβροχής και πιθανή μετάβαση της επιφάνειας από το μοντέλο Cassie Baxter μηδενικής διαβροχής στο μοντέλο Wenzel πλήρους διαβροχής. Σε συνθήκες βύθισης η συμπύκνωση μικροσταγονιδίων που εμφανίζεται μέσα στις κοιλοότητες του παγιδευμένου αέρα εξαιτίας της μακρόχρονης επαφής με το νερό είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει τη σταθερότητα και τη λειτουργικότητα της υπερυδροφόβης επιφάνειας.

3.10 Μετάβαση της διαβροχής για κοιλότητες αέρα ανοιχτής κατάστασης

Στη περίπτωση όπου ο εγκλωβισμένος αέρας πάνω στην υπερυδροφόβη επιφάνεια συγκεντρώνεται σε κοιλότητες οι οποίες είναι ανοιχτές και επομένως βρίσκεται σε επαφή με το ρευστό, η πίεση του ρευστού είναι ο κύριος παράγοντας ελέγχου. Ακολουθώντας μια πειραματική αλλά και θεωρητική επισκόπηση διαφόρων μελετών αναφορικά με τη μετάβαση της κατάστασης διαβροχής για σταγονίδια σε υπερυδροφόβες επιφάνειες παρατηρούμε ότι αυτή η μετάβαση συμβαίνει όταν η πίεση του ρευστού υπερβεί κάποιες ορισμένες τιμές οι οποίες παρατηρήθηκαν σε διάφορα σενάρια. Συγκεκριμένα οι (Lafuma and Quéré 2003) έδειξαν ότι η συμπίεση σταγόνων νερού ανάμεσα σε υπερυδροφόβες επιφάνειες με μικρο-επεξεργασμένη τραχύτητα έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση της υστέρησης στη διαβροχή καθώς η εφαρμοζόμενη πίεση αυξάνει. Όπως απεικονίζεται και στην Εικόνα 14 από τη μελέτη των (Wang, Zhang et al. 2016) η συμπίεση μιας σταγόνας των 10 ml μεταξύ δύο υπερυδροφόβων επεξεργασμένων επιφανειών (PDMS-SiO₂) και η σταδιακή αποσυμπίεση της δεν επηρέασε την υπερυδροφόβη συμπεριφορά των δύο επιφανειών.



Εικόνα 14. Συμπεριφορά συμπιεζόμενης σταγόνας 10mL τοποθετημένης μεταξύ δύο υπερυδροφόβων επιφανειών.

Διάφορες μελέτες όπως αυτές των (Reyssat, Pépin et al. 2006) και (Jung and Bhushan 2009) έδειξαν ότι όταν μια σταγόνα προσκρούει σε μια δομημένα υπερυδροφόβη επιφάνεια μπορεί να αναπηδήσει εκτός της επιφάνειας ή να προσκολληθεί πάνω της ανάλογα και με τη ταχύτητα πρόσκρουσης αλλά και την επιφανειακή τοπογραφία. Η αναπήδηση των σταγόνων επάνω σε μια υπερυδροφόβη επιφάνεια ανακαλύφθηκε κατά την εξάτμιση γεγονός το οποίο αποδίδεται στην αυξημένη πίεση των συρρικνωμένων σταγονιδίων.

Τα φαινόμενα της υστέρησης της διαβροχής, της προσκόλλησης των σταγονιδίων ή της αναπήδησης των σταγονιδίων σε μία υπερυδροφόβη επιφάνεια υποδεικνύουν αν υπάρχει μετάβαση στη κατάσταση της διαβροχής.

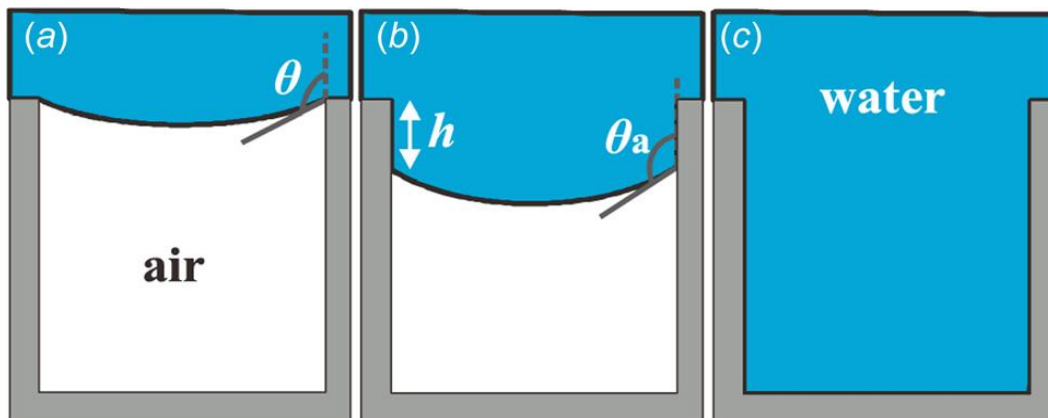
Ο βασικός μηχανισμός εξαιτίας του οποίου παρατηρείται μετάπτωση της διαβροχής είναι η διάρρηξη της επιφανειακής διασύνδεσης υγρού και αερίου όταν η ισορροπία μεταξύ υγρού και αερίου διαρραγεί. Για κυλινδρικά διαμορφωμένους επιφανειακούς πόρους η ισορροπία του μηνίσκου περιγράφεται από την εξίσωση των Young-Laplace όπως φαίνεται παρακάτω

$$p_L - p_A = \frac{2\sigma \cos\theta}{R} \quad (30)$$

όπου p_L είναι η πίεση του υγρού και p_A είναι η πίεση του αέρα, σ είναι η επιφανειακή τάση, θ είναι η γωνία επαφής που σχηματίζει ο μηνίσκος με το παράπλευρο τοίχωμα και R είναι η ακτίνα των κυλινδρικών πόρων. Εξαιτίας του γεγονότος ότι η κοιλότητα του αέρα είναι ανοιχτή η πίεση του αέρα ισούται με την ατμοσφαιρική πίεση, p_o .

Όταν η πίεση του υγρού υπερβαίνει μια κρίσιμη τιμή η καταστροφή της διεπιφάνειας υγρού-αερίου σε μια υπερυδρόφοβη επιφάνεια ορίζεται απο δυο μηχανισμούς, την απώλεια της ενάς με ένα σύνδεσης των ατόμων της διεπιφάνειας και της εμφανιζόμενης κάμψης στη διεπιφάνεια. Οι δύο αυτοί μηχανισμοί που σηματοδοτούν ουσιαστικά την κατάρευση της διεπιφάνειας υγρού-αερίου εξαρτώνται από τη δόμή της επιφάνειας (A Patankar 2010). Για σχετικά χαμηλές πιέσεις υγρών ο μηνίσκος διατηρείται σχεδόν επίπεδος σχηματίζοντας γωνία $\theta \approx 90^\circ$. Καθώς αυξάνεται η πίεση του υγρού ο μηνίσκος σταδιακά αρχίζει να δημιουργεί μια καμπύλη στο εσωτερικό του πόρου με αυξανόμενη γωνία θ .

Η διεπιφάνεια του υγρού και του αέρα, η γωνία επαφής θ , η κάμψη της διεπιφάνειας με τη ταυτόχρονη εμφάνιση του μηνίσκου και τη μετάβαση της διαβροχής από τη κατάσταση Cassie Baxter στη κατάσταση Wenzel εμφανίζεται στην Εικόνα 15. Είναι εμφανές ότι η κατάρευση της διεπιφάνειας συμβαίνει όταν η γωνία επαφής (θ) φτάσει σε μία ανεπτυγμένη τιμή θ_a , η οποία και θα εμφάνιστεί για ένα βάθος κάμψης h .



Εικόνα 15. Απεικόνιση των διαφόρων καταστάσεων κατάρευσης της διεπιφάνειας μέχρι τη διαβροχή για υπερυδρόφοβες επιφάνειες.

Οι μελέτες των (Callies and Quere 2005), (Ma and Hill 2006), (Roach, Shirtcliffe et al. 2008), (Bormashenko 2015) έδειξαν ότι η διαδικασία μετάβασης της διαβροχής για βυθισμένες σε νερό υπερυδρόφοβες επιφάνειες διέπεται από τις ίδιες αρχές όπως ορίζονται και για τα μεγάλα σταγονίδια, οι οποίες έχουν να κάνουν με τη μηχανική ισορροπία της διεπιφάνειας υγρού-αερίου.

3.11 Μετάβαση της διαβροχής για κοιλότητες αέρα κλειστής κατάστασης

Όταν μια υπερυδρόφοβη επιφάνεια είναι πλήρως βυθισμένη μέσα στο νερό ο αέρας που εγκλωβίζεται στις κοιλότητες είναι απομονωμένος από τις περιβαλλοντικές συνθήκες ευρισκόμενος σε κλειστή κατάσταση. Σε αυτή τη περίπτωση η σταθερότητα της διεπιφάνειας υγρού-αέρα εμφανίζεται μόνο μέσα από την επίτευξη μηχανικής και χημικής ισορροπίας. Η μηχανική ισορροπία όπως περιγράφεται από την εξίσωση (30) συμπεριλαμβανομένου του γεγονότος ότι η πίεση του αέρα p_A εξαρτάται απο τη συμπίεσότητα του αέρα.

Η χημική ισορροπία εξαρτάται από τη χημική δυνατότητα της κλίσης του αέρα κατά μήκος της διεπιφάνειας υγρού-αέρα. Η συναλλαγή του εγκλωβισμένου αέρα με τον διαλυμένο αέρα που υπάρχει στο νερό μπορεί επίσης να οδηγήσει σε μετάβαση της διαβροχής. Συμφωνα με τις μελέτες των (Liu, Feng et al. 2007), (Patankar 2009) είναι εμφανές ότι οι κλειστές κοιλότητες αέρα που υπάρχουν κατω από το νερό ενισχύουν την υπερυδροφοβικότητα των επιφανειών καθώς εμποδίζουν την διείσδυση

του νερού μεσά στις επιφανειακές δομές δημιουργώντας μια πολλαπλή κατάσταση σταθερής ισορροπίας. Η μετάβαση μεταξύ αυτών των πολλαπλών σταθερών καταστάσεων ισορροπίας απαιτεί την υπέρβαση κάποιων ενεργειακών εμποδίων, έχοντας κατά αυτό το τρόπο ως συνέπεια την αναβολή της μετάβασης της διαβροχής για την επιφάνεια (Patankar 2009).

Πειράματα όπως αυτό του (Lei, Li et al. 2010) όπου χρησιμοποιείται υπερυδροφόβο, διάφανο PDMS μελετούν την πίεση που προκύπτει κατά τη διαδικασία της μετάβασης της διαβροχής μέσω της περίθλασης. Η εξασθένιση ακόμα και η καθολική εξαφάνιση αυτών των προτύπων περίθλασης εξαιτίας της υψηλής πίεσης του υγρού υποδεικνύει την διείδυση του υγρού στην επιφάνεια και άρα τη μετάβαση σε κατάσταση διαβροχής Wenzel.

Η ιδιότητα αντανάκλασης υψηλού φωτός από τη διεπιφάνεια υγρού-αερίου μελετήθηκε από τους (Forsberg, Nikolajeff et al. 2011) για να παρατηρήσουν τη συμπεριφορά της διαβροχής υπερυδροφώνων επιφανειών βυθισμένες στο νερό κάτω από υδροστατική πίεση στις οποίες η μετάβαση της διαβροχής έγινε αντιληπτή από τη μείωση της πυκνότητας του αντανακλώμενου φωτός. Παρουσίασαν πειραματικά κατά αυτό το τρόπο ότι το έντονο φαινόμενο της συμπίεσης του αέρα που δημιουργείται από τη διαμορφωμένη υπερυδροφόβη επιφάνεια συμβάλει στη σταθεροποίηση της κατάστασης διαβροχής Cassie-Baxter.

Οι (Samaha, Tafreshi et al. 2011) συνδυάζοντας προσομοιώσεις και χρησιμοποιώντας μη επεμβατική τεχνική σκέδασης φωτός αξιολόγησαν τη σταθερότητα του μηνίσκου σε υπερυδροφόβες επιφάνειες βυθισμένες κάτω από το νερό και με αυξημένη υδροστατική πίεση παρακολουθώντας ταυτόχρονα την επίδραση στη μείωση της οπισθέλκουσας. Το συμπέρασμα που εξήγαγαν από τη κατάρρευση του μηνίσκου κάτω από το καθεστώς υψηλής πίεσης υγρού ήταν ότι δεν παρατηρείται καμία μείωση στην οπισθέλκουσα για βυθισμένες υπερυδροφόβες επιφάνειες.

Ωστόσο έχουν μελετηθεί (Emami, Tafreshi et al. 2011) και πιο γενικές περιπτώσεις αναφορικά με τη σταθερότητα του μηνίσκου χρησιμοποιώντας και πιο 'αυθαίρετες' μορφές δόμησης της υπερυδροφόβης επιφάνειας όπως στη περίπτωση των επιφανειών με τυχαία κατανομημένες διαμορφωμένες θέσεις, ίνες, κόκκους ή αυθαίρετα διαμορφωμένους πόρους σε συνθήκες υδροστατικής πίεσης. Για αυτού του τύπου τις επιφάνειες με ακανόνιστες δομές το σχήμα της διεπιφάνειας υγρού-αερίου βρέθηκε από την αριθμητική επίλυση της γενικευμένης εξίσωσης Young-Laplace και η κρίσιμη υδροστατική πίεση για την οποία η υπερυδροφόβη συμπεριφορά της επιφάνειας εξαφανιζόταν είχε προβλεφθεί. Η μοντελοποίηση των (Emami, Tafreshi et al. 2011) απέδειξε ότι οι λεπτές επιστρώσεις από ίνες με ορθογωνική διαμόρφωση θα μπορούσαν να αντέξουν υψηλότερες υδροστατικές πιέσεις σε σύγκριση με τις επιστρώσεις που φέρουν τυχαία διαμόρφωση.

Με τη βοήθεια μιας λεπτομερούς θερμοδυναμικής ανάλυσης του συστήματος εγκλωβισμένου αέρα σε κοιλότητες κλειστής κατάστασης παρατηρούμε ότι ανάμεσα στη κατάσταση διαβροχής Cassie-Baxter και Wenzel μεσολαβεί μια καινούρια κατάσταση ισορροπίας την οποία ονομάζουμε ενδιάμεση κατάσταση αποσυναρθρωμένης σταθερότητας (depinned metastable state) η οποία απεικονίζεται στη (b) περίπτωση της Εικόνα 17. Σύμφωνα με τα αναλυτικά και πειραματικά αποτελέσματα των (Xue, Chu et al. 2012) η ύπαρξη αυτής της ενδιάμεσης κατάστασης βοηθάει την υπερυδροφόβη επιφάνεια να αντέξει υψηλότερες πιέσεις από το υγρό και επομένως αυξάνοντας τη σταθερότητα της ενισχύουμε ταυτόχρονα και την υπερυδροφοβικότητα της επιφάνειας.

Οι διάφορες εφαρμογές των υπερυδροφώνων επιφανειών που βρίσκονται βυθισμένες στο νερό έχοντας εγκλωβίσει αέρα σε κοιλότητες, οφείλουν να μπορούν να αντιστέκονται στις υψηλές πιέσεις που εξασκεί το υγρό στον εγκλωβισμένο αέρα μέσα στις κοιλότητες αλλά ταυτόχρονα να μπορούν να διατηρήσουν και αυτή την αντίσταση για μεγάλο χρονικό διάστημα. Διάφορες παρατηρήσεις που έχουν

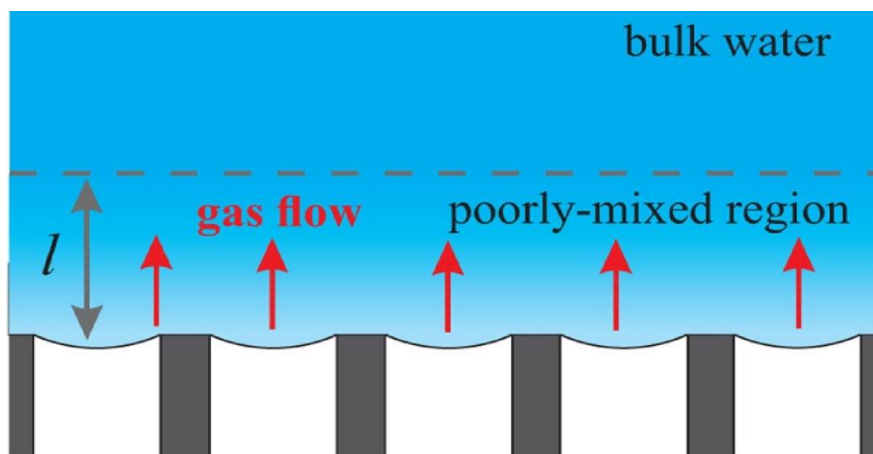
γίνει (Herminghaus 2000), (Zhang, Sheng et al. 2009), (Sheng and Zhang 2011) σχετικά με τη μετάβαση της διαβροχής σε ένα φύλο λωτού το οποίο βυθίζεται στο νερό για λίγα λεπτά δείχνουν ότι το φιλμ του αέρα plastron που επικαλύπτει την επιφάνεια που βυθίζεται είναι ευάλωτο και ευεπίφορο στην ανταλλαγή αερίων από αυτά που βρίσκονται στο νερό που τα περιβάλλει ιδιαίτερα κάτω από υψηλές πιέσεις.

Η φθορά που παρατηρείται στο φιλμ του αέρα που επικαλύπτει την επιφάνεια μελετήθηκε από τους (Sakai, Yanagisawa et al. 2009) οι οποίοι χρησιμοποίησαν την αντανάκλαση μιας δέσμης λέιζερ για να εκτιμήσουν το στρώμα του αέρα σε μια υπερυδροφόβη επιφάνεια που περιλαμβάνει σωματίδια από πολυ-τετρα-φθορο-αιθυλένιο (PTFE) και φθοροπολυμερές επισημαίνοντας ότι η σχετικά μικρότερη τραχύτητα ενισχύει τη βιωσιμότητα του αέριου φιλμ.

Οι (Roetes, Holtzmann et al. 2010) χρησιμοποίησαν τη μέθοδο της αντανάκλασης φωτός διεξάγοντας μετρήσεις μικροσκοπικής εστίασης ούτως ώστε να μελετήσουν τη φθορά που θα υποστεί το plastron σε μια βυθισμένη στο νερό υπερυδροφόβη επιφάνεια. Η ύπαρξη του plastron γίνεται εμφανής από την εμφάνιση με ασημένιο χρώμα αυτών των δειγμάτων εξαιτίας της αντανάκλασης του φωτός, ενώ η αποσύνθεση του plastron σκουραίνει την εμφάνιση του δείγματος. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων συνεστίασης αποκάλυψαν ότι το plastron μειώνεται σταδιακά με τη πάροδο του χρόνου μέχρι το σχηματισμό διανεμημένων φυσαλλίδων.

Μια βασική διαφορά των κοιλοτήτων αέρα κλειστής κατάστασης σε σχέση με τις κοιλότητες αέρα ανοιχτής κατάστασης είναι το γεγονός ότι η μετάβαση της διαβροχής των κλειστών κοιλοτήτων αέρα διαμεσολαβείται από τη διάχυση του αέρα για τις διάφορες πιέσεις του υγρού.

Για κυλινδρικά διαμορφωμένες κοιλότητες αέρα η ανταλλαγή αερίων από τις κοιλότητες αυτές με το νερό που τις περιβάλλει ελέγχεται από τη κλίση της μερικής πίεσης του αερίου κατά μήκος μιας ανεπαρκώς ανεμεμιγμένης περιοχής πάχους l μέσα στο νερό παραπλήσια στη στερεή επιφάνεια όπως απεικονίζεται και στην Εικόνα 16 (Flynn and Bush 2008), (Emami, Hemedda et al. 2013).



Εικόνα 16. Μοντέλο διάχυσης του αέρα από τις κοιλότητες προς το περιβάλλον νερό και δημιουργία μιας περιοχής ανεπαρκούς ανάμειξης πάχους l .

Υποθέτωντας ότι το πρόβλημα είναι μιας διάστασης η διάχυση του αέρα προς το περιβάλλον νερό μπορεί να περιγραφεί από τη παρακάτω εξίσωση

$$\frac{dn_G(t)}{dt} = -\frac{1}{R_G \cdot T} \cdot \frac{A(t)D_G}{l \cdot K_G} \cdot [p_G(t) - s \cdot p_{G,0}] \quad (31)$$

Όπου A είναι η επιφανειακή περιοχή του μηνίσκου, (t) είναι ο χρόνος, D_G και K_G είναι ο συντελεστής διάχυσης του αέρα και η σταθερά του Henry αντίστοιχα, $p_{G,0}$ είναι η μερική ατμοσφαιρική πίεση του αερίου που ισούται με $p_0 - p_v$, $p_G = p_L - p_v + 2\gamma \cdot \cos\theta / r$ είναι η μερική πίεση του αερίου μέσα στη κοιλότητα και προκύπτει από τροποποιήσεις της εξίσωσης των Young-Laplace, l είναι το χαρακτηριστικό μήκος της διάχυσης, s είναι ο βαθμός του κορεσμού του αέρα για την ατμοσφαιρική πίεση στο περιβάλλον νερό και μπορεί να μετρηθεί πειραματικά.

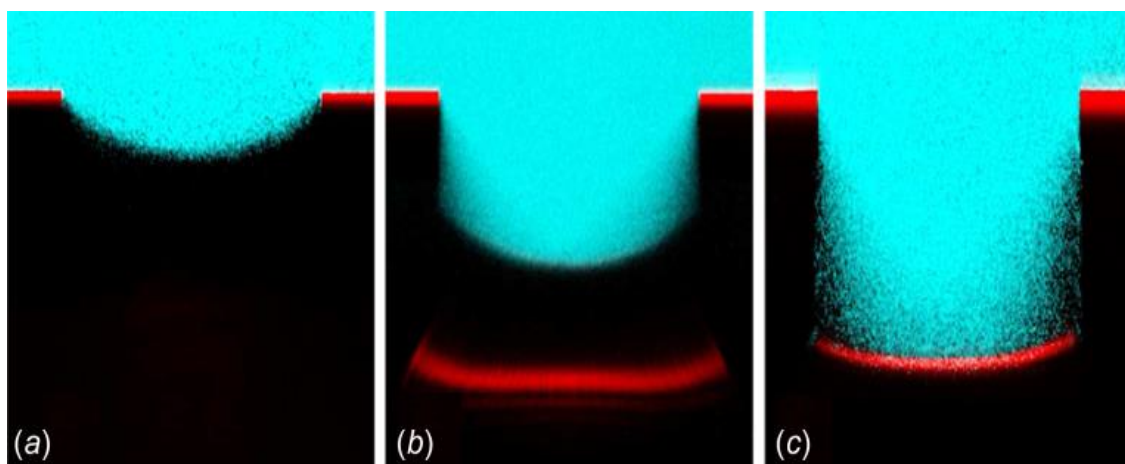
Σύμφωνα με την εξίσωση (31) η κατεύθυνση της ροής του αέρα καθορίζεται από το πρόσημο της σχέσης

$$\langle p_G(t) - s \cdot p_{G,0} \rangle \quad (32)$$

Για μηδενική διαφορά πίεσης η διάχυση του αέρα στη κοιλότητα οδηγεί σε δημιουργία υπερπίεσης και διόγκωση του μηνίσκου, με μειωμένη γωνία επαφής (θ) και ως εκ τούτου η σχέση (31) αποκτά αρνητικό πρόσημο.

Στην Εικόνα 17 παρατηρούμε, τη δημιουργία μηνίσκου σε μια κοιλότητα αέρα η οποία βρίσκεται σε μια υπερυδροφόβη επιφάνεια βυθισμένη στο νερό. Παρατηρούμε ότι για διάστημα 5 λεπτών και ασκούμενη πίεση υγρού 4 kPa, υποπερίπτωση (α), οι άκρες της επιφάνειας του μηνίσκου που δημιουργείται είναι ακόμα προσαρτημένες στις ακμές της κοιλότητας ενώ για την υποπερίπτωση (β) που έχουμε ασκούμενη πίεση από το υγρό 50 kPa η επιφάνεια του μηνίσκου έχει βυθιστεί μέσα στη κοιλότητα χωρίς να έχει υπάρξει όμως διαβροχή της επιφάνειας. Για την υποπερίπτωση (c) και αφού περάσουν 15 λεπτά όπου η επιφάνεια είναι βυθισμένη 50 kPa είναι εμφανές ότι η διαβροχή έχει οδηγήσει στο μοντέλο Wenzel. Σύμφωνα με μελέτη των (Lv, Xue et al. 2014) για χαμηλές τιμές της διαφοράς πίεσης (ΔP) η γωνία επαφής αυξάνεται μονοτονικά και το βάθος της κάμψης που παρατηρείται για τη διεπιφάνεια (h) δεν αλλάζει διατηρώντας την επαφή των άκρων της διεπιφάνειας με τις δύο ακμές της κοιλότητας. Συγκεκριμένα μετρήθηκε ότι η πίεση που οδηγεί στην 'αποσυναρμολόγηση' της επιφάνειας από τις ακμές της κοιλότητας είναι μεταξύ $\Delta P=12$ και 15 kPa. Επομένως για $\Delta P=12$ kPa ο εγκλωβισμένος αέρας διαχέεται εκτός της κοιλότητας προκαλώντας αύξηση τη γωνίας επαφής βυθίζοντας τη διεπιφάνεια του δημιουργούμενου μηνίσκου δίνοντας θετική τιμή στη σχέση (32).

Επομένως η ρύθμιση παραγόντων όπως ο βαθμός κορεσμού των αερίων στο περιβάλλον νερό, η πίεση του υγρού που περιβάλλει την επιφάνεια και οι επιφανειακές δομές παρουσιάζουν εξαιρετική σημασία όσο αφορά την διατήρηση και τη σταθερότητα της διεπιφάνειας υγρού-αερίου σε μια υπερυδροφόβη επιφάνεια που είναι βυθισμένη στο νερό.



Εικόνα 17. Στιγμιότυπα από λέιζερ μικροσκοπικής εστίασης μετάβασης της διαβροχής για βυθισμένες στο νερό υπερυδρόφοβες επιφάνειες.

Η ποσότητα των moles του αερίου n_G που έχει εγκλωβιστεί σε κάθε κοιλότητα μετريέται σύμφωνα με το νόμο των ιδανικών αερίων

$$p_G \cdot V = n_G \cdot R_G \cdot T = \beta \cdot (p_0 - p_v) \cdot V_H \quad (33)$$

Το χαρακτηριστικό μήκος διάχυσης l μπορεί είτε να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας από τον τύπο $l = \sqrt{D_G \cdot t}$ ο οποίος δίνει τιμές του μήκους σε χιλιοστά (mm) εάν θεωρηθεί ότι $t \rightarrow 10^3$ s είτε να μετρηθεί πειραματικά.

Πιο συγκεκριμένα, η αναλυτική λύση της εξίσωσης (30) οδηγεί στο νόμο της ομοιότητας για τη μετάβαση της διαβροχής στις ενδιάμεσες καταστάσεις αποσυναρθρωμένης σταθερότητας από τη στιγμή όπου η περιοχή του μηνίσκου (A) και η γωνία επαφής (θ) διατηρούνται σταθερά.

$$\frac{h(t)}{H} = \frac{h_0}{H} + \frac{A/(\pi \cdot R^2)}{K_G/(R_G \cdot T)} \cdot \frac{t}{t_D} \quad (34)$$

Όπου σύμφωνα με τη παραπάνω εξίσωση h_0 είναι το αρχικό βάθος της καμπτώμενης διεπιφάνειας και t_D είναι το χρονοδιάγραμμα που καθορίζει τη διάρκεια ζωής των ενδιάμεσων καταστάσεων σύμφωνα με την εξίσωση

$$t_D = \frac{p_G}{p_G - s \cdot p_{G,0}} \cdot \frac{h \cdot l}{D_G} \quad (35)$$

Από την εξίσωση του νόμου της ομοιότητας (34) παρατηρούμε ότι το βάθος της καμπτώμενης επιφάνειας (h) αλλάζει γραμμικά με το χρόνο σύμφωνα με τη πίεση που ασκεί το υγρό (Lv, Xue et al. 2014).

Επομένως στρατηγικές προσεγγίσεις όπως είναι η μείωση του μεγέθους των κοιλοτήτων σύμφωνα με την εξίσωση των Young-Laplace ώστε να επιτευχθεί μια κατάσταση ισορροπίας ενώ βρισκόμαστε στο μοντέλο Cassie-Baxter ακόμη και για χαμηλή πίεση των αερίων (p_G) αναμένεται να μειώσουν τη ροή διάχυσης του αέρα και επομένως να παρατείνουν το χρόνο ζωής της υπερυδρόφοβης συμπεριφοράς της βυθισμένης επιφάνειας.

Οι πειραματικές παρατηρήσεις του (Xu, Sun et al. 2014) αναδεικνύουν τις προϋποθέσεις ουτως ώστε να επιτευχθεί μείωση της δύναμης της οπισθέλκουσας σε βυθισμένες υπερυδρόφοβες επιφάνειες για εφαρμογές μεγάλης διάρκειας. Υποθέτοντας ότι το περιβάλλον νερό εξισορροπεί καθώς έρχεται σε επαφή με την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια και ότι ο βαθμός κορεσμού του αέρα είναι $s=1$, από τη συνθήκη μηδενικού ρυθμού ροής αέρα (εξίσωση 31) έχουμε ότι $p_G = p_0 - p_v$ το οποίο σε συνδυασμό με την εξίσωση των Young-Laplace υπολογίζει τη κρίσιμη υπερπίεση για να διατηρηθεί η κατάσταση Cassie-Baxter στη κοιλότητα της υπερυδρόφοβης επιφάνειας είναι

$$\Delta p = p_L - p_0 = \sigma \cdot \cos \theta_\alpha / R \quad (36)$$

Επισημαίνεται επίσης ότι η κρίσιμη αυτή τιμή της υπερπίεσης παρουσιάζει αμοιβαία εξάρτηση από το μέγεθος των επιφανειακών δομών.

Μια ιδιαίτερη περίπτωση εμφανίζεται όταν ο βαθμός κορεσμού (s) του αέρα στο νερό που περιβάλλει τη κοιλότητα είναι μηδέν γεγονός που συνεπάγεται ότι $p_G = 0$. Σε αυτή τη περίπτωση η κρίσιμη συνθήκη ισορροπίας της διεπιφάνειας υφρού-αερίου για τη διατήρηση της κατάστασης Cassie-Baxter είναι

$$p_L - p_V = \sigma \cdot \cos \theta_a / R \quad (37)$$

Καταλήγοντας, είναι εμφανές το γεγονός ότι η διάχυση του αέρα από τις κοιλότητες στο περιβάλλον νερό επηρεάζει σημαντικά την διατήρηση της υπερυδροφοβικότητας στην βυθισμένη επιφάνεια για διαφορετικές τιμές της πίεσης του νερού οδηγώντας σταδιακά στην μείωση της ικανότητας απώθησης του νερού.

Ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τη διατήρηση της υπερυδροφόβης συμπεριφοράς για τις βυθισμένες επιφάνειες είναι οι συνθήκες ροής του ρευστού. Ένα κρίσιμο στοιχείο για τη ροή του ρευστού είναι η διατμητική τάση που αναπτύσσεται η οποία όταν προσεγγίζει υψηλές τιμές μπορεί να οδηγήσει σε παραμόρφωση ή ακόμα και σε αποκόλληση της εγκλωβισμένης φυσαλλίδας αέρα που βρίσκεται μέσα στη κοιλότητα.

Καθώς αυξάνεται η ταχύτητα με την οποία ρέει το ρευστό αναμένεται να αυξηθεί και ο ρυθμός διάχυσης του αέρα από τις κλειστές κοιλότητες προς το περιβάλλον νερό γεγονός το οποίο ευνοεί και επιταχύνει τη μετάβαση της διαβροχής σε κατάσταση Wenzel για την υπερυδροφόβη υποβρύχια επιφάνεια. Μέσα από πειραματικές απεικονίσεις που διεξήγαγαν οι (Govardhan-Ankulkar, S. Srinivas et al. 2009) παρατηρήθηκε μείωση της οπισθέλκουσας για ροή σε υπερυδροφόβες βυθισμένες στο νερό επιφάνειες με κοιλότητες εγκλωβισμένου αέρα, οι οποίες ωστόσο κοιλότητες φθείρονται και μειώνονται με τη πάροδο του χρόνου. Πιο συγκεκριμένα η οπτικοποίηση της επιφάνειας έδειξε ότι η μείωση της τριβής (εμφανίζεται ως δύναμη οπισθέλκουσας) εξαρτάται από το χρόνο ακριβώς γιατί επηρεάζεται από τη σταδιακή εξαφάνιση των εγκλωβισμένων φυσαλλίδων αέρα με τη πάροδο του χρόνου καθώς και ότι ο ρυθμός φθοράς των κοιλοτήτων εγκλωβισμένου αέρα αυξάνεται όσο αυξάνεται η ταχύτητα της ροής.

Η μείωση της δύναμης οπισθέλκουσας εμφανίζεται ως απόρροια της ύπαρξης επάνω στην επιφάνεια κοιλοτήτων που έχουν εγκλωβίσει αέρα από τη στιγμή που στη διεπιφάνεια υγρού-αερίου δεν υπάρχει διάτμηση.

Για να μελετήσουμε την εξάρτηση μεταξύ της μείωσης της δύναμης οπισθέλκουσας και το χρόνο για μια υπερυδροφόβη επιφάνεια διαμορφωμένη με κοιλότητες αέρα χρειάζεται να αναλύσουμε την εξέλιξη του μηνίσκου που δημιουργείται στη διάρκεια του χρόνου. Το ποσοστό μεταφοράς μάζας σε υπερυδροφόβες επιφάνειες για στρωτή ροή προσεγγίστηκε από τους (A. Barth, Samaha et al. 2013) χρησιμοποιώντας ένα μαθηματικό μοντέλο βασισμένο σε λύση τύπου Blasius, επεκτείνοντας τη κλασική συσχέτιση για την εξαναγκασμένη μεταφορά μάζας από μια στερεή πλάκα

$$Sh = 0.332 Re^{1/2} \cdot Sc^{1/3} \quad (38)$$

και προτείνοντας μια τροποποιημένη συσχέτιση λαμβάνοντας υπόψιν τη συνθήκη οριακής ολίσθησης

$$Sh = K \cdot \Phi_G \cdot Re^{1/2} \cdot Sc^{(1/3 + \Phi_G/6)} \quad (39)$$

όπου Sh , Re και Sc είναι οι αριθμοί Sherwood, Reynolds και Schmidt αντίστοιχα. Ο αριθμός Sherwood, που συχνά αποκαλείται και αριθμός μεταφοράς μάζας Nusselt, δείχνει το λόγο του συνολικού ρυθμού μεταφοράς μάζας προς το ρυθμό διάχυσης της μάζας. Ο αριθμός Schmidt υποδηλώνει το λόγο της

κινηματικής συνεκτικότητας του ρευστού προς τη διάχυση της μάζας του αέρα μέσα στο περιβάλλον νερό, Φ_G είναι το κλάσμα του αερίου το οποίο παίρνει τιμές από 0-1 για συνθήκη μηδενικής και τέλει ολίσθησης αντίστοιχα, K είναι μια παράμετρος όπου για στρωτή ροή παίρνει τη τιμή 0.0145. Συνεπώς ο εκτιμώμενος ρυθμός μεταφοράς μάζας του ρευστού ενισχύει τη διάχυση του αέρα από τις κλειστές κοιλότητες προς το περιβάλλον νερό επιφέροντας με αυτό το τρόπο τη μείωση της υπερυδροφобыς συμπεριφοράς μιας επιφάνειας η οποία βρίσκεται βυθισμένη στο νερό.

Ένα επιπλέον ζήτημα που ανακύπτει για υπερυδροφобыς επιφάνειες οι οποίες βρίσκονται για μεγάλο χρονικό διάστημα βυθισμένες στο νερό είναι η εμφάνιση συμπύκνωσης σταγονιδίων πάνω στην επιφάνεια. Σύμφωνα με τις μελέτες των (A Wier and J McCarthy 2006) και (Dorger and Rühle 2007) η συμπύκνωση μικρο-σταγονιδίων στην υπερυδροφобыς επιφάνεια είναι ικανή συνθήκη για να προκληθεί μετάβαση της διαβροχής έχοντας ως συνέπεια την αυξημένη απορρόφηση των σταγονιδίων από την επιφάνεια. Από απευθείας παρατηρήσεις των (Jung and Bhushan 2008) και (Ryckaczewski, Scott et al. 2011) της διαδικασίας συμπύκνωσης μικρο-σταγονιδίων έγινε εμφανές ότι σταγονίδια εμφανίζονται μεταξύ καθώς και πάνω στις μικρο-δομές της επιφανειακής τραχύτητας τα οποία ενώνονται μεταξύ τους οδηγώντας σε μετάβαση της διαβροχής στο μοντέλου του Wenzel. Η ένωση αυτή των σωματιδίων δημιουργεί μια αυτό-προωθούμενη κίνηση για τα σταγονίδια η οποία προκαλείται από τη κινητική ενέργεια που απελευθερώνεται στην επιφάνεια κατά τη διαδικασία της μεταξύ τους συμπύκνωσης.

Για εφαργογές υποβρυχίων υπερυδροφобыς επιφανειών οι (Boinovich, Emelyanenko et al. 2010) παρατήρησαν την εξέλιξη της διαβροχής για επιφάνειες επεξεργασμένες με σιλοξάνιο κατά τη συνύπαρξή τους με το νερό που τις περιβάλλει μετρώντας την ισορροπία της διεπιφάνειας και τις γωνίες επαφής που δημιουργούνται με τη πάροδο του χρόνου καταδεικνύοντας ότι η επιφάνεια σταδιακά αποκτούσε υδροφίλη συμπεριφορά.

3.12 Σχεδιασμός και συνθήκες διατήρησης των υπερυδροφобыς επιφανειών

Όπως αναδεικνύεται και στα παραπάνω εδάφια υπάρχουν αρκετοί παράμετροι όπου επηρεάζουν την υπερυδροφοβικότητα μιας βυθισμένης στο νερό υπερυδροφобыς επιφάνειας, όπως είναι η αύξηση της πίεσης του υγρού, η διάχυση του εγκλωβισμένου αέρα από τις κοιλότητες καθώς και η συμπύκνωση σταγονιδίων πάνω στην επιφάνεια. Ωστόσο υπάρχει η δυνατότητα μέσα από κάποιες ενέργειες να αντιμετωπιστούν τα παραπάνω ζητήματα που οδηγούν σε μετάβαση της διαβροχής σε κατάσταση Wenzel. Μια πρώτη αντιμετώπιση είναι ο στιβαρός σχεδιασμός των επιφανειών ο οποίος μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ως εξής: σχεδιασμός επιφάνειας εμπνευσμένος από τα φύλλα του λωτού με ιεραρχικές δομές στην επιφάνεια, επιφάνειες με δομές επαναλαμβανόμενες όπως συναντώνται σε αρθρώποδα έντομα (collembola), επιφάνειες με λειαντικό καθώς και μηχανικά ανθεκτικές επιφάνειες που μπορούν να αντέξουν τη περιβαλλοντική φθορά.

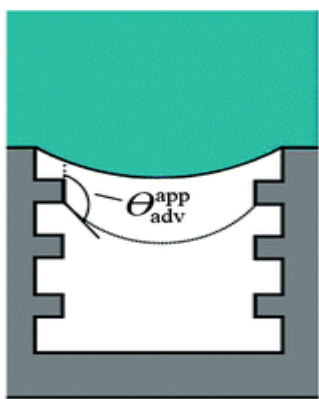
Οι ιεραρχικές δομές κατασκευάζονται συνδυάζοντας μια τυποποιημένη τεχνική βαθιάς χάραξης με σιλικόνη για μικροσκοπικές δομές καθώς και μια ισοτροπική τεχνική χάραξης αέριας φάσης για να επιτευχθεί με αυτό το τρόπο ομοιόμορφος σχηματισμός τραχύτητας σε νανοκλίμακα για μικροδιαμορφωμένους πυλώνες πυριτίου.

Δύο επιπέδων ιεραρχικά διαμορφωμένες επιφανειακές δομές σύμφωνα με τους (Wen, Tian et al. 2015) συναντώνται συνήθως σε βιολογικά συστήματα που καταφέρνουν και απωθούν το νερό, όπως τα φύλλα του λωτού και τα μεγάλα διασκελισμού πόδια κάποιων εντόμων που καταφέρνουν και στέκονται στην επιφάνεια του νερού. Οι ιεραρχικά διαμορφωμένες επιφανειακές δομές ενισχύουν την σταθερότητα των βυθισμένων στο νερό υπερυδροφобыς επιφανειών ούτως ώστε να αντιστέκονται στις υψηλές πιέσεις του νερού που τις περιβάλλει επιτυγχάνοντας το αυτό κατά κύριο λόγο μέσα από δύο μηχανισμούς: ο ένας περιλαμβάνει τη μείωση του μεγέθους της επιφανειακής δομής και ο άλλος

περιλαμβάνει την ενίσχυση της αναπτυσσόμενης γωνίας επαφής στα πλευρικά τοιχώματα. Όπως συζητήθηκε και παραπάνω το κρίσιμο στοιχείο για να διατηρηθεί η υπερυδροφοβικότητα σε μια βυθισμένη επιφάνεια είναι να κρατηθεί η διεπιφάνεια υγρού-αερίου 'καρφίτωμένη' στις ακμές των κοιλοτήτων που έχουν εγκλωβίσει τον αέρα. Σύμφωνα με τις παραπάνω εξισώσεις το μέγεθος των επιφανειακών δομών όπως και αναπτυσσόμενη γωνία επαφής είναι οι δύο παράμετροι που επηρεάζουν το αν και κατά πόσο θα διατηρηθεί η υπερυδροφοβικότητα.

Σύμφωνα με τη μελέτη των (Su, Ji et al. 2010) παρατηρήθηκε ότι οι επιφανειακές δομές σε νανοκλίμακα επιτρέπουν στην επιφάνεια να αντέχει τις μεγαλύτερες πιέσεις καθώς και ότι οι επιφανειακές δομές σε επίπεδο μικροκλίμακας μειώνουν σημαντικά την επιφάνεια επαφής μεταξύ υγρού και στερεού μειώνοντας τη προσρόφηση του υγρού. Οι επιφάνειες που συνδυάζουν την νανοκλίμακα και την μικροκλίμακα για τη διαμόρφωση της επιφανειακής τους τραχύτητας παρουσιάζουν μια συμπεριφορά που προσιδιάζει περισσότερο στο μοντέλο Cassie-Baxter παρά στο μοντέλο Wenzel. Αντιθέτως αν εκλείψουν οι τριχιδής νονοδομές από την επιφάνεια του φύλλου του λωτού παρατηρείται άμεση προσρόφηση του νερού από το φύλλωμα (Cheng, E Rodak et al. 2006).

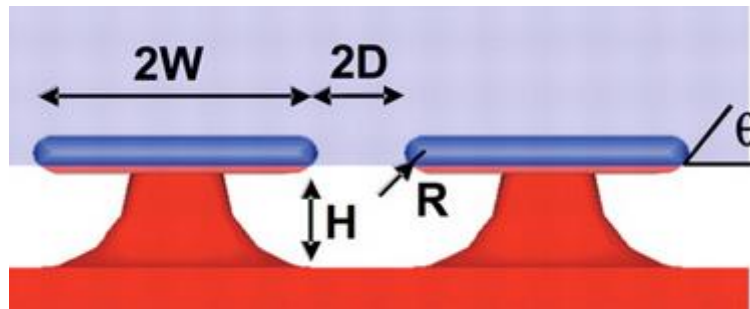
Από την άλλη, οι μικροδιαμορφωμένες επιφάνειες με νανοδιαμορφωμένα τα πλευρικά τοιχώματα των κοιλοτήτων τους εμποδίζουν την ολίσθηση της γραμμής επαφής υγρού-αέρα κατά μήκος των πλευρικών τοιχωμάτων της κοιλότητας διατηρώντας με αυτό το τρόπο την υπερυδροφοβικότητα για επιφάνειες που βρίσκονται βυθισμένες στο νερό. Αριθμητικές μελέτες που διεξήχθησαν από τους (Hemeda, Gad-el-Hak et al. 2014) έδειξαν ότι η επίδραση των ιεραρχικών δομών στη διατήρηση της υπερυδροφοβικότητας μιας επιφάνειας είναι μεγάλη καθώς η κρίσιμη πίεση για την οποία εμφανιζόταν η αποσύνδεση της γραμμής επαφής υγρού-αερίου με τις ακμές της κοιλότητας βελτιωνόταν διατηρώντας την υπερυδροφοβική ικανότητα της επιφάνειας για βυθισμένες στο νερό εφαρμογές. Η γραμμή επαφής παραμένει 'καρφίτωμένη' στις ακμές της κοιλότητας μέχρι να επιτευχθεί μια προωθητική γωνία επαφής (θ_a) σε σχέση με το πλευρικό τοίχωμα. Ενδεχομένως και για μια επιφάνεια η οποία εμφανίζει προωθητική γωνία επαφής $\theta_a \approx 0$ το υγρό μπορεί να αποκοπεί στην επιφάνεια δίχως να εισχωρήσει προς το πυθμένα της επιφανειακής διαμόρφωσης.



Εικόνα 18. Απεικόνιση της απορρόφησης της γραμμής επαφής της διεπιφάνειας υγρού-αερίου από τις διαδοχικές δομές της διαμορφωμένης κοιλότητας καθώς αυξάνεται η γωνία επαφής.

Οι επιφανειακές δομές επανα-εισαγωγής, ή αλλιώς επιφάνειες τύπου 'μανιτάρι', έχουν διαδοθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια αποκτώντας διαρκώς όλο και μεγαλύτερη εφαρμογή εξαιτίας της εξαιρετικής ικανότητας που εμφανίζουν στην απώθηση του νερού για σχετικά χαμηλές επιφανειακές τάσεις (Cao, Hu et al. 2007), (Cao, P Price et al. 2008). Οι συγκεκριμένες επιφάνειες επαναεισαγωγής σταθεροποιούν την ενδιάμεση κατάσταση Cassie-Baxter μέσα από την ενίσχυση της τριφασικής γραμμής επαφής στις κορυφές της τραχύτητας με παρόμοιο τρόπο με τις ιεραχικές δομές όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 19.

Παρ όλα αυτά, οι (Liu and Kim 2014) παρατήρησαν ότι η επιφάνεια επαναεισαγωγής, όπως αναπαριστάται και στην Εικόνα 19, δε μπορεί να βελτιστοποιηθεί από τη στιγμή που η επιφάνεια δε μπορεί να αντισταθεί στις πιέσεις του υγρού που εμφανίζονται για πραγματικές εφαρμογές ακόμα και αν είναι σε θέση να αναστείλει μια πλήρη διαβροχή της από το νερό.



Εικόνα 19. Απεικόνιση μιας διαμορφωμένης επιφάνειας επαναεισαγωγής (τύπου μανιτάρι) που διατηρεί μια ετερογενή κατάσταση διαβροχής στην οποία η κορυφή είναι διαβρεγμένη και η βάση της δεν βρίσκεται σε επαφή με το νερό.

Σχετικά πρόσφατα ερευνητικές μελέτες προσέγγισαν τη δυνατότητα μείωσης της δύναμης οπισθέλκουσας για επιφάνειες επικαλυμμένες με ένα υγρό λειαντικό φιλμ το οποίο έχει δημιουργηθεί μέσα στο υπόστρωμα της επιφάνειας ούτως ώστε να απωθείται το ρευστό που ρέει γύρω από την επιφάνεια και να μην αναμιγνύεται με το λειαντικό φιλμ. Η προσέγγιση μέσω της λειαντικής ουσίας για τη μείωση της οπισθέλκουσας κέντρισε το ερευνητικό ενδιαφέρον καθώς οι επιφάνειες με τη συγκεκριμένη επεξεργασία παρουσιάζουν ανθεκτικότητα στην αστοχία που προκαλείται από την πίεση του υγρού. Οι (Solomon, S Khalil et al. 2014) διαπίστωσαν ότι το αποτέλεσμα της μείωσης της δύναμης της οπισθέλκουσας εξαρτάται από το ιζώδες του λειαντικού που χρησιμοποιείται και επομένως διαλέγοντας ένα λειαντικό με ιζώδες 260 φορές μικρότερο από το ιζώδες του εργαζόμενου μέσου κατόρθωσαν να επιτύχουν μείωση της οπισθέλκουσας κατά 16% που αντιστοιχεί σε ένα αποτελεσματικό μήκος ολίσθησης 18 μm. Αντιθέτως οι (S Wexler, Jacobi et al. 2015) επισήμαναν το γεγονός ότι όποτε οι συγκεκριμένες επιφάνειες λειτουργούσαν σε δυναμικές πραγματικές συνθήκες η ροή του ρευστού παρέσερνε το λειαντικό φιλμ αφαιρώντας με αυτό το τρόπο την υπερυψρόφοβη συμπεριφορά της επιφάνειας. Ωστόσο πειράματα όπως αυτά των (S. Wexler, Grosskopf et al. 2015) έδειξαν ότι είναι εφικτό να αποτραπεί στο ρευστό που ρέει να παρασύρει τη λειαντική ουσία που εγχυθεί στην επιφάνεια μέσα από την ενίσχυση της ικανότητας του υποστρώματος να εγκλωβίσει την λειαντική ουσία.

Η φτωχή και ασθενής μηχανική σταθερότητα που παρουσιάζουν οι υπερυδρόφοβες επιφάνειες από τη σκοπία της επιφανειακής μικροσκοπικής τοπογραφίας τους είναι άλλο ένα σημαντικό εμπόδιο στην διάδοση αυτών των επιφανειών για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Η μηχανική φθορά προκαλεί ζημία στη δομή ή παράγει υδρόφιλες ακαθαρσίες στην επιφάνεια οδηγώντας σταδιακά σε μετάβαση της διαβροχής σε κατάσταση διαβροχής Wenzel. Ένας βέλτιστος συνδυασμός από μηχανικά σταθερές επιφανειακές μικροδομές και από ένα μη διαβρέξιμο διαμορφωμένο σε νανοκλίμακα κάλυμα είναι ο κύριος λόγος εμφάνισης της υπερυδροφοβικότητας (Verho, Bower et al. 2011), (Yu, Zhao et al. 2007). Οι μεγαλύτερης κλίμακας μικροδομές μπορούν να υπομείνουν τη μηχανική φθορά ενώ οι μικρότερες νανοδομήσεις διατηρούν την απωθητικότητα του νερού (Groten and Rühle 2013) και (Elliott, Stagon et al. 2015).

Στη περίπτωση που η εξασθένηση της υπερυδρόφοβης ιδιότητας της επιφάνειας οφείλεται στη κατάρρευση της διεπιφάνειας του υγρού με τον αέρα και όχι στη καταστροφή των υλικών της

επιφανειακής τοπογραφίας, είναι εφικτό να ανακτήσουμε τον εγκλωβισμένο αέρα της κοιλότητας σηματοδοτώντας με αυτό το τρόπο μια διαδικασία αντιστροφής της διαβροχής από τη κατάσταση Wenzel στη κατάσταση Cassie-Baxter. Η κινητική ενέργεια που δημιουργείται εξαιτίας των μηχανικών κραδασμών της επιφάνειας θα μπορούσε να λειτουργήσει ως έναυσμα ούτως ώστε να ξεπεραστεί το φράγμα ενέργειας που απαιτείται για να γίνει η μετάβαση από τη κατάσταση Wenzel στη κατάσταση Cassie-Baxter. Αυτή η κινητική ενέργεια που απαιτείται για να υπάρξει 'αναπήδηση' ουσιαστικά των προσροφημένων στην επιφάνεια σταγονιδίων μπορεί να προσφερθεί και από την ενοποίηση των σταγονιδίων κατά τη διαδικασία της συμπύκνωσης. Επίσης η υπερπίεση που δημιουργείται κάτω από τη σταγόνα που παράγεται εξαιτίας της ταχείας εξάτμισης του υγρού επειδή βρίσκεται σε ένα περιβάλλον μειωμένης πίεσης μπορεί να αποτελέσει παράγοντα αφαίρεσης των σταγονιδίων επάνω στην επιφάνεια (Schutzius, Jung et al. 2015).

Ωστόσο υπάρχουν και απευθείας επεμβάσεις που μπορεί να δρομολογηθούν αντιστρέφοντας τη κατάσταση της διαβροχής, εκτός δηλαδή της κινητικής ενέργειας και της επιφανειακής πίεσης, όπως η ανοικοδόμηση ενός σταθερού στρώματος αέρα/ατμού για να αντικαταστήσει το εγκλωβισμένο υγρό μέσα στις κοιλότητες. Μια μέθοδος για την ανοικοδόμηση του στρώματος αέρα παρατηρήθηκε από τους (N Krupenkin, Ashley Taylor et al. 2007) κατά την εξάτμιση του υγρού για ροή σε θερμές επιφανειακές δομές όπου αντιστράφηκε η κατάσταση διαβροχής και ανακτήθηκε η υπερυδροφοβικότητα της επιφάνειας. Η παρατήρηση για την εξαρτήση της διαβροχής από την επιφανειακή θερμοκρασία έγινε από τους (Adera, Raj et al. 2013), όπου σταγόνες που πέφτανε σε υδρόφιλες επιφάνειες αμέσως απλώνονταν σχηματίζοντας σχεδόν μηδενική γωνία επαφής αλλά όταν η επιφάνεια θερμαινόταν φτάνοντας μια κρίσιμη τιμή οι επιφανειακές δομές της μπορούσαν να διατηρήσουν τις σταγόνες σε ένα υπερυδρόφοβο καθεστώς. Αυτό το φαινόμενο οφείλεται στο γεγονός ότι δημιουργείται υπερπίεση κατά τη διάρκεια εξάτμισης του υγρού η οποία εμποδίζει την εισχώρηση της σταγόνας στους πόρους της επιφάνειας.

Είναι γεγονός ότι η αποκατάσταση της υδροφοβικότητας μέσα από την εξάτμιση του ρευστού μέσου αποτελεί μια μέθοδο περισσότερο εφικτή για ανοιχτές κοιλότητες αέρα καθώς ο κενός χώρος που θα δημιουργηθεί από την εξάτμιση θα καλυφθεί από τον εισερχόμενο αέρα του περιβάλλοντος. Αντιθέτως στις κλειστές κοιλότητες όπου έχει εγκλωβιστεί αέρας η πίεση του κορεσμένου ατμού πιθανόν να μην είναι ικανή για να διατηρήσει την ισορροπία της διεπιφάνειας υγρού-αέρα και επομένως να χρειάζεται μια διαρκής εξάτμιση για να επιτευχθεί μια δυναμική κατάσταση μη διαβροχής.

3.13 Δυνατότητες και εφαρμογές υπερυδρόφοβων επιφανειών

3.13.1 Απόθηση του νερού (water repellency)

Η απόθηση του νερού είναι η πιο προφανής εφαρμογή που μπορεί να αναπτυχθεί από τη χρήση υπερυδρόφοβων επιφανειών. Συγκεκριμένα για εφαρμογές τόσο στο ρουχισμό, στα υλικά των κτηριακών εγκαταστάσεων αλλά και σε μπογιές και άλλα υλικά η χρησιμότητα των συγκεκριμένων επιφανειών είναι σημαντική.

3.13.2 Μείωση της οπισθέλκουσας δύναμης (drag reduction)

Η μείωση της οπισθέλκουσας εμφανίζεται σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών για διεπιφάνειες υγρού και στερεού που είναι απαλλάγμενες από διατμητικές τάσεις. Το αναφερόμενο στη βιβλιογραφία μήκος ολίσθησης για υδρόφοβες επιφάνειες παίρνει τιμές από μερικά νανόμετρα και φτάνει μέχρι κάποια μικρόμετρα ενώ για τη περίπτωση της υπερυδρόφοβης επιφάνειας η οποία είναι κατασκευασμένη από μικρό/νανό δομές το μήκος ολίσθησης μπορεί να κυμανθεί από δεκάδες έως και εκατοντάδες μικρόμετρα.

3.13.3 Εμπόδιση επικάθισης πάγου (anti-icing)

Η ιδιότητα των επιφανειών αυτών να εμποδίζουν τη δημιουργία και επικάθιση του πάγου είναι μια από τις πιο σημαντικές ιδιότητες που εμφανίζουν τόσο σε εφαρμογές αεροσκαφών στα οποία ο αέρας μέσα στον οποίο κινούνται εμπεριέχει αρκετή υγρασία κυρίως σε μεγάλα ύψη όσο και σε εφαρμογές πλοίων που κινούνται σε νερά με χαμηλή θερμοκρασία. Σε εφαρμογές αεροσκαφών όπου η αεροδυναμική παίζει σημαντικό ρόλο στην απόδοση του αεροσκάφους μια πιθανή επικόλληση πάγου θα τροποποιούσε σημαντικά τον αεροδυναμικό σχεδιασμό επιφέροντας αρνητικά αποτελέσματα. Η συγκεκριμένη ιδιότητα των επιφανειών αυτών μπορεί να βρει εφαρμογή και σε ανεμογεννήτριες. Η ιδιότητα τους εξηγείται από το γεγονός ότι οι υψηλές γωνίες επαφής που παρουσιάζουν, οι οποίες συνδέονται με την δύναμη που αναπτύσσεται στην επιφάνεια, σε συνδυασμό με την χαμηλή τιμή της γωνίας υστέρησης η οποία συνδέεται με την διατμητική τάση είναι αυτές που εμποδίζουν την επικάθηση του πάγου.

3.13.4 Δυνατότητα αυτοκαθαρισμού (self cleaning)

Η συγκεκριμένη ιδιότητα δεν προκύπτει από την υπερυδρόφοβη επιφάνεια αυτή καθε αυτή, η οποία είναι εξαιρετικά στεγνή και απωθεί το νερό, αλλά από την ικανότητα της να μη διαβρέχεται και επομένως η κινούμενη σταγόνα να καθαρίζει τις όποιες επικαθίσεις. Η συγκεκριμένη ιδιότητα είναι πολύ χρήσιμη σε εφαρμογές φωτοβολταϊκών και ηλιακών συλλεκτών για την εμπόδιση επικαθίσης σκόνης το οποίο θα μείωνε την απόδοση της εγκατεστημένης ισχύς.

3.13.5 Δυνατότητα αντιρύπανσης (anti-biofouling)

Η συσσώρευση βιογενών υλικών σε μια στερεή επιφάνεια κυρίως γαι εφαρμογές στο νερό όπως είναι τα πλοία και τα υποβρύχια επηρεάζει σημαντικά τις τεχνικές αποδόσεις οι οποίες αντανakλώνται στην αύξηση κατανάλωσης καυσίμου. Η χρησιμοποίηση υπερυδρόφοβης επιφάνειας σε αυτές τις περιπτώσεις είναι εξαιρετικά σημαντική εξαιτίας της δυνατότητας της να μειώνει την επιφάνεια επαφής του ρευστού με τη στερεή επιφάνεια καθώς διατηρεί ένα φιλμ αέρα στις κορυφές της τραχύτητας εμποδίζοντας με αυτό το τρόπο τη ρύπανση της επιφάνειας.

3.13.6 Εμπόδιση δημιουργίας φαινόμενης ομίχλωσης (anti-fogging)

Ένα ομιχλώδες φιλμ αερίου μπορεί να δημιουργηθεί πάνω από μια επιφάνεια εξαιτίας της μερικής ατμοποίησης του νερού σε περιοδικές εναλλαγές της θερμοκρασίας. Η επιφάνεια στην οποία εμφανίζεται αυτό το φαινόμενο διασκορπίζει την προσπίπτουσα ακτινοβολία επηρεάζοντας τις οπτικές δυνατότητες σε μια διάφανη επιφάνεια. Επομένως σε εφαρμογές επιφανειών που χρησιμοποιούνται ως παρμπρίζ και γυαλία ασφαλείας η συγκεκριμένη ιδιότητα παρουσιάζει ενδιαφέρον.

3.13.7 Αντιανακλαστικές επιφάνειες (Anti reflective)

Η αντι ανακλαστική δυνατότητα είναι σημαντική για εφαρμογές όπως οι κυψέλες των φωτοβολταϊκών, οι δίοδοι εκπομπής φωτός καθώς και τα laser. Οι επιφάνειες με περιοδικά εμφανιζόμενες υποδομές λιγότερες από το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης δέσμης φωτός οδηγούν γενικά σε αποτροπή της ανάκλασης και σε υψηλή μετάδοση της δέσμης. Υψηλός ρυθμός μετάδοσης της δέσμης του εκπεμπόμενου φωτός απαιτείται για τη μείωση της ανάκλασης του φωτός. Συγκεκριμένα πρέπει να ικανοποιείται η παρακάτω σχέση

$$h > \frac{\lambda}{\sqrt{n_1 \cdot n_2}} \quad (40)$$

όπου h είναι το ύψος της επιφανειακής τραχύτητας, λ το μήκος κύματος και n_1, n_2 ο δείκτης διάθλασης του αέρα και της οπτικής επιφάνειας που μελετάμε αντίστοιχα. Όπως φαίνεται και από τη παράπανω σχέση χρειάζεται τραχύτητα ούτως ώστε να αποκτήσει η επιφάνεια αντι-ανακλαστική ιδιότητα.

3.14 Έλεγχος της σπηλαιώσης

Όταν ένα υγρό διέρχεται γύρω από ένα σώμα η στατική του πίεση μειώνεται. Αν η πίεση μειωθεί αρκετά τότε το υγρό ατμοποιείται σχηματίζοντας φυσαλίδες και επειδή η περιοχή χαμηλών πιέσεων είναι συνήθως μικρή οι φυσαλίδες συμπυκνώνονται πέραν αυτής της περιοχής. Όμως όταν η συμπύκνωση των φυσαλλίδων γίνεται κοντά σε ένα σώμα τότε η επιφάνεια του σώματος κινδυνεύει από διάβρωση. Η σπηλαιώση είναι ένα φαινόμενο που αναπτύσσεται στις ρευστομηχανικές εφαρμογές επιφέροντας συνέπειες όπως κατάρρευση της απόδοσης, υψηλός ήχος και δόνηση καθώς και διάβρωση της πειραματικής διάταξης. Ωστόσο σε αρκετές περιπτώσεις υπερ-σπηλαιώσης μπορεί να επιτευχθεί σημαντική μείωση στη δύναμη της οπισθέλκουσας όπως γίνεται για τα θαλάσσια οχήματα (Ceccio 2010). Οι προυπάρχουσες κοιλότητες αέρα που βρίσκονται εκτεθειμένες σε χύδην ροή του ρευστού επειδή μειώνουν σημαντικά το κατώφλι ενέργειας που απαιτείται για να ξεκινήσει η σπηλαιώση μπορεί να λειτουργήσουν ως πυρήνες για την έναρξη της σπηλαιώσης (A. Mørch 2007). Οι πυρήνες της σπηλαιώσης επιδεικνύουν συνήθως εξαιρετική μακροζωία και οι μηχανισμοί σταθεροποίησης τους μπορεί να εξηγηθούν μέσα από δύο μοντέλα, το μοντέλο της μεταβλητής διαπερατότητας (Fox and Herzfeld 1954) και το μοντέλο των σχισμών (Atchley and Prosperetti 1989). Για σχετικά μικρές κοιλότητες αέρα, η διατάραξη της μηχανικής ισορροπίας συμβαίνει όταν ο μηνίσκος που είναι 'καρφιτσωμένος' στις ακμές της κοιλότητας σχηματίζει μια γωνία επαφής με την άνω επιφάνεια που υποχωρεί υπό το βάρος μιας κρίσιμης πίεσης του υγρού.

3.15 Παρεμφερείς πειραματικές μελέτες

Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό στη βάση αξιολόγησης και εποπτείας των παραγόμενων αποτελεσμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας να παρατεθούν κάποια πειραματικά αποτελέσματα από παρόμοιες ερευνητικές μελέτες. Ωστόσο επειδή η κύριος θεματικός άξονας πάνω στον οποίο στήθηκε η παρούσα διπλωματική εργασία και αφορά τη μελέτη της επίδρασης στη ροή περιστρεφόμενου κυλίνδρου δεν συναντάται συχνά στη διεθνή βιβλιογραφία η σύγκριση των αποτελεσμάτων θα βασιστεί σε δύο μελέτες για στρωτά και τυρβώδη πεδία ροής που προσομοιάζουν αρκετά τις συνθήκες διεξαγωγής και του δικού μας πειράματος.

Η πρώτη πειραματική μελέτη που θα χρησιμοποιήσουμε ως βάση σύγκρισης και αξιολόγησης αφορά μια εξαιρετικά σημαντική μελέτη που διεξήγαγαν οι (Daniello, Waterhouse et al. 2009) και αφορά την επίδραση που έχουν οι υπερυδροφόβες επιφάνειες για τυρβώδη ροές στη μείωση της οπισθέλκουσας. Συγκεκριμένα οι υπερυδροφόβες επιφάνειες εμφάνιζαν κλίμακα τραχύτητας της τάξης των μικρό-/νανομέτρων η οποία και υποστηρίζει τη δημιουργία ενός φιλμ άερα στις κορυφές της τραχύτητας, και επομένως μιας διεπιφάνειας νερού-αερίου, και στο οποίο η διατμητική τάση είναι μηδέν. Για δεδομένους και σταθερούς αριθμούς Reynolds και για στρωτό πεδίο ροής βρέθηκε ότι η μείωση της οπισθέλκουσας επιταχύνεται καθώς μεγαλώνουν οι προεξοχές της επιφάνειας αλλά και το μεταξύ τους διάκενο. Η μείωση της οπισθέλκουσας ξεκινάει να σημειώνεται για μια κρίσιμη τιμή του αριθμού Reynolds όπου το πάχος του οριακού υποστρώματος του ρευστού προσεγγίζει τη κλίμακα των υπερυδροφοβικών μικροπροεξοχών

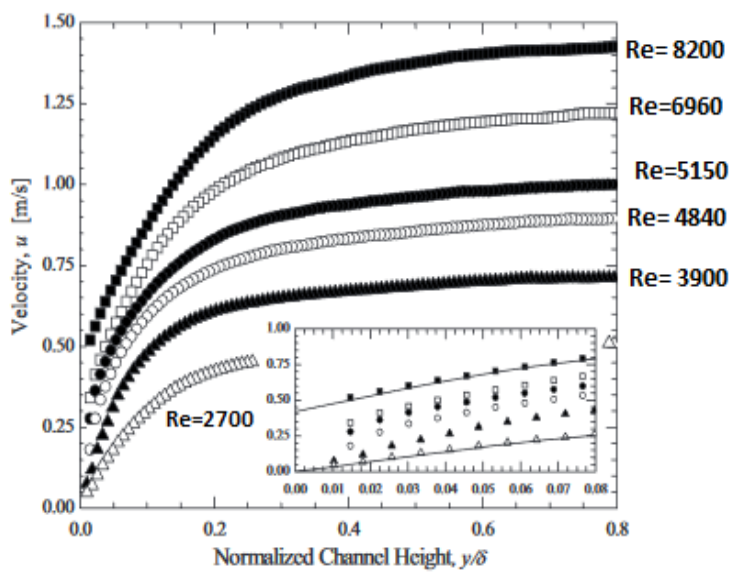
Επί της αρχής το αποτελεσματικό μήκος ολίσθησης (b_{eff}), δηλαδή το πόσο μειώνεται το όριο της διεπιφάνειας υγρού-στερεού, ως ένας δείκτης μείωσης της οπισθέλκουσας σε μια υπερυδροφόβη επιφάνεια θα έπρεπε να μην επηρεάζεται από το αν η ροή είναι στρωτή η τυρβώδης. Ωστόσο για περιπτώσεις τυρβώδους ροής ένα λεπτό ιξώδες υπόστρωμα εμφανίζεται πολύ κοντά στο στερεό τοίχωμα και το οποίο έχει ύψος

$$y^+ = \frac{y}{\nu \cdot \sqrt{\tau_w / \rho}}$$

όπου y είναι η απόσταση από το στερεό τοίχωμα, ν η κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού, τ_w η διατμητική τάση που εμφανίζεται στο τοίχωμα και ρ η πυκνότητα του ρευστού. Μεταξύ των υποστρωμάτων του ρευστού η μέση ταχύτητα αυξάνει γραμμικά με τη θέση ($u^+ = y^+$).

Στη περίπτωση όπου η επιφάνεια διαθέτει riblets, τα οποία είναι κορυφές ευθυγραμμισμένες στη κατεύθυνση της ροής και μειώνουν την οπισθέλκουσα σε τυρβώδη ροή με το να διακόπτουν την εγκάρσια κίνηση του ρευστού στη επιφάνεια, η μείωση στην οπισθέλκουσα εμφανίζεται για ένα περιορισμένο εύρος αριθμών Reynolds.

Συγκεκριμένα για αριθμούς Reynolds $2700 < Re < 8200$ και για περιπτώσεις λείας και υπερυδροφόβης επιφάνειας ένα τυπικό προφίλ πεδίου ταχυτήτων εμφανίζεται στη παρακάτω Εικόνα 20 όπου δ είναι το ύψος του καναλιού και y η απόσταση από το στερεό τοίχωμα



Εικόνα 20. Προφίλ ταχυτήτων για διαφορετικούς αριθμούς Reynolds.

Η παραπάνω εικόνα αναπαριστά το πεδίο ταχυτήτων για υπερυδροφόβη επιφάνεια όπου φαίνεται το πως αυξάνεται το μέτρο της ταχύτητας οίσθησης για αυξανόμενους αριθμούς Reynolds συναρτήση της αδιάστατης απόστασης του ρευστού από το στερεό τοίχωμα. Η επίδραση που έχει η υπερυδροφόβη επιφάνεια στη ροή δεν εμφανίζεται για χαμηλούς αριθμούς Reynolds για τους οποίους τα προφίλ της ταχύτητας στην τυρβώδη ροή είναι ισοδύναμα με τα αντίστοιχα προφίλ της ταχύτητας για στρωτή ροή.

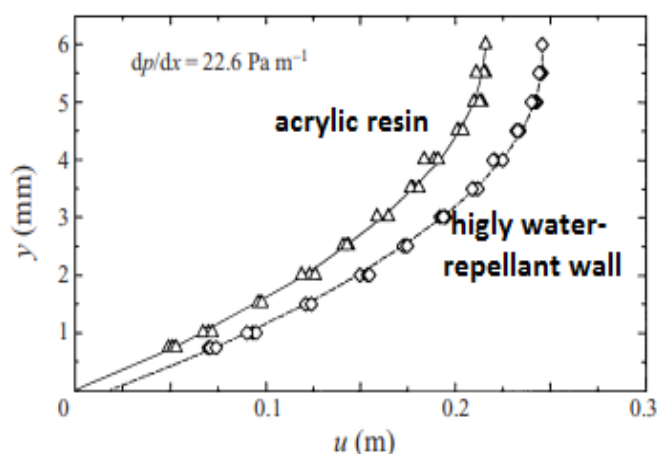
Σύμφωνα με πειραματικές μελέτες για στρωτή ροή γύρω από υπερυδροφόβες επιφάνειες μετρήθηκαν μήκη ολίσθησης της τάξης των $b=25\mu\text{m}$ ανεξαρτήτως του αριθμού Reynolds και αντίστοιχα η ταχύτητα ολίσθησης μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά από τη σχέση

$$u_{slip} = \frac{4 \cdot U \cdot b}{\delta} \quad (42)$$

η οποία θα πρέπει να είναι της τάξης του 2% της μέσης τάχυτητας ροής U . Καθώς αυξάνεται ο αριθμός Reynolds και η ροή γίνεται πλήρως τυρβώδη μεγαλύτερα μήκη ολίσθησης παρατηρούνται ($b > 25 \mu\text{m}$).

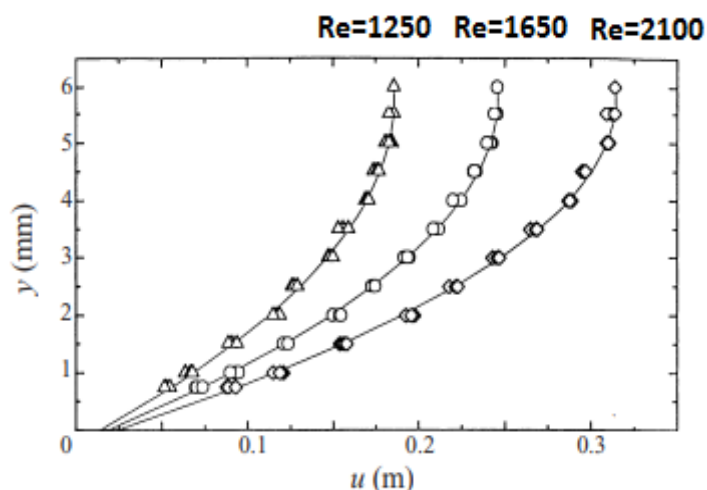
Η δεύτερη πειραματική δουλειά η οποία παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι αυτή των (Watanabe, Udagawa et al. 1999) οι οποίοι ερευνούν τη μείωση της οπισθέλκουσας σε κυλινδρικό αγωγό με υδατό απωθητικά τοιχώματα με τα οποία έρχεται σε επαφή νευτώνειο ρευστό. Τα πειράματα τα οποία διεξήχθησαν με τη βοήθεια ενός μετατροπέα πίεσης και ενός ανεμόμετρου θερμού νήματος για τη μέτρηση της πτώσης πίεσης και του προφίλ της ταχύτητας απέδειξαν ότι η διατμητική τάση είναι απευθείας ανάλογη της ταχύτητας ολίσθησης.

Η παρακάτω Εικόνα 21 αναπαριστά το προφίλ ταχύτητας νερού για πλήρως ανεπτυγμένη στρωτή ροή μέσα σε ένα κυλινδρικό αγωγό οποίος φέρει υδατό απωθητικά και λεία (ακρυλική ρυτίνη) τοιχώματα για την ίδια κλίση πίεσης $dp/dx = -22.6 \text{ Pa m}^{-1}$.



Εικόνα 21. Προφίλ ταχύτητας του ρευστού συναρτήσει της απόστασης από το στερεό τοίχωμα.

Η επίδραση του αριθμού Reynold στο προφίλ της ταχύτητας εμφανίζεται στη παρακάτω Εικόνα 22 όπου παρατηρούμε ότι με την αύξηση του αριθμού Reynolds αυξάνεται και η ταχύτητα ολίσθησης.



Εικόνα 22. Επίδραση αριθμού Reynolds στην αύξηση της ταχύτητας.

3.16 Τι είναι αυτό που εμποδίζει την εξάπλωση υπερυδροφόβων επιφανειών

Οι αναμφισβήτητα σημαντικές βελτιώσεις στα μετρούμενα πειραματικά αποτελέσματα που έχουν παρατηρηθεί κατά καιρούς σε διάφορες εφαρμογές υπερυδροφόβων επιφανειών έχουν δημιουργήσει την προσδοκία ότι μπορεί να σημειωθεί σημαντική μείωση της οπισθέλκουσας για εφαρμογές ευρείας κλίμακας όπως είναι οι θαλάσσιες μεταφορές. Ωστόσο τη δεδομένη χρονική στιγμή απέχουμε αρκετά από το συγκεκριμένο σημείο για πολλούς και διάφορους λόγους.

Αν μπορούσαμε να απομονώσουμε ένα στοιχείο ως το πλέον κρίσιμο για την επιτυχή εφαρμογή των συγκεκριμένων επιφανειών αυτό θα ήταν η αδυναμία που παρουσιάζουν τουλάχιστον μέχρι στιγμής να διατηρήσουν το παγιδευμένο αέριο στις κοιλότητες της τραχύτητας τους για τις περισσότερες εφαρμογές.

Για να παρατηρηθεί αξιόλογη μείωση της οπισθέλκουσας σε ρευστομηχανικά συστήματα μεγάλης κλίμακας πρέπει η επιφάνεια να είναι σε θέση να παρέχει όχι μόνο ένα αρκετά μεγάλο μήκος ολίσθησης αλλά να διατηρεί ταυτόχρονα και κατά τη διάρκεια λειτουργίας της τον εγκλωβισμένο αέρα στις κοιλότητες της. Ένα μήκος ολίσθησης της τάξης των 10-100 μm είναι απαραίτητο για τις περισσότερες εφαρμογές σε μακρο-κλίμακα, θεωρώντας ταυτόχρονα ένα τυπικό πάχος οριακού στρώματος της τάξης του ενός χιλιοστού.

Από την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας προκύπτει ως γενικός κανόνας ότι για να επιτευχθούν μεγάλες τιμές του μήκους της ολίσθησης απαιτείται γεωμετρικό βήμα συγκρίσιμο με το επιθυμητό μήκος της ολίσθησης γεγονός το οποίο συνεπάγεται ότι δομές μικρό-κλίμακας, και όχι νανοκλίμακας, είτε είναι τυχαία δομημένες είτε τακτικά είναι απαραίτητες για μήκος ολίσθησης στη περιοχή των 10-100 μm .

3.17 Αρχική πειραματική διάταξη

Πριν προχωρήσουμε στη πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή της διπλωματικής εργασίας και των αντίστοιχων αποτελεσμάτων της έχει σημασία να γίνει αναφορά στην αρχική ιδέα που υπήρξε και πάνω στην οποία επιχειρήθηκε να στηθεί η πειραματική διάταξη.

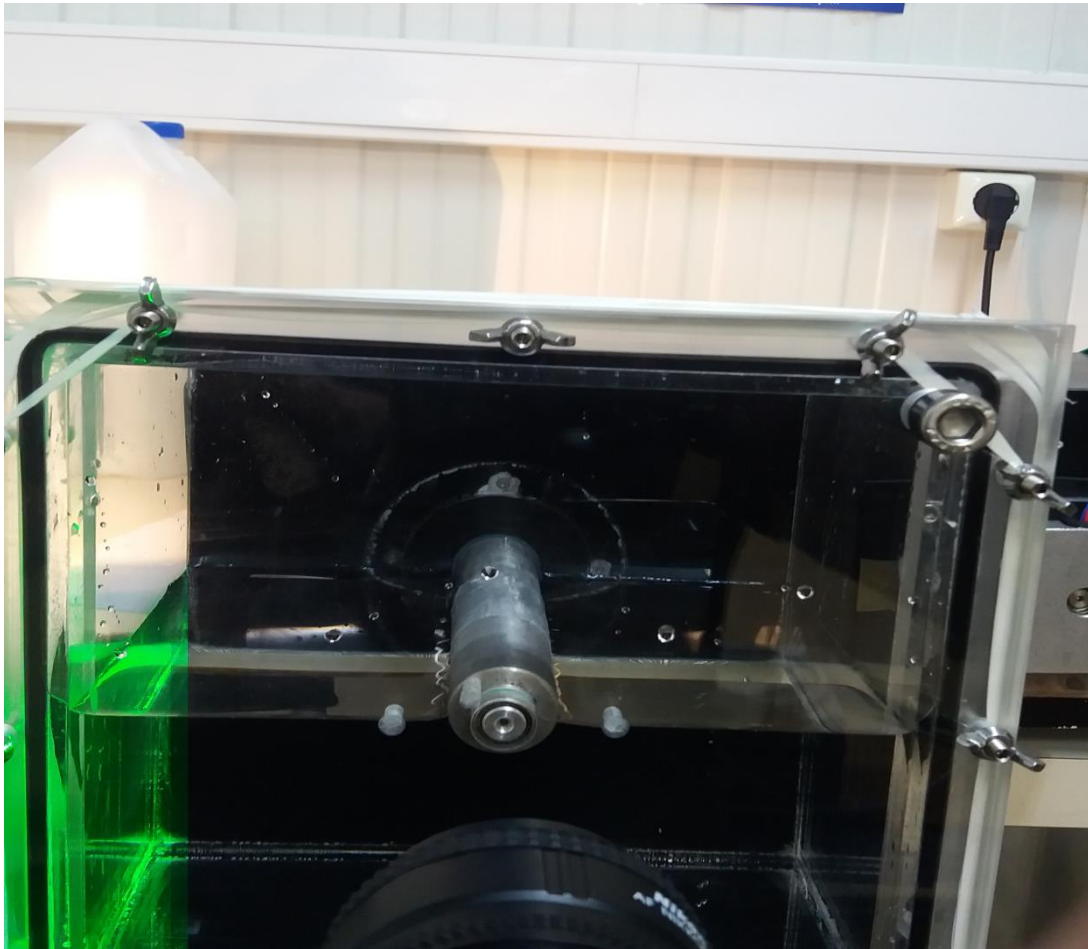
Η αρχική ιδέα αφορούσε τη μελέτη της επίδρασης στη ροή περιστρεφόμενου κυλίνδρου μέσα σε γλυκερίνη στον οποίο είχε προστεθεί κατάλληλα επεξεργασμένο γυάλινο κυλινδρικό περίβλημα ώστε να απομονωθεί η περιοχή της ροής κοντά στο κύλινδρο και να αυξηθεί ο ρυθμός διάτμησης της ροής και το ανεμόμενο παρατηρούμενο μήκος ολίσθησης. Η επιφάνεια του περιστρεφόμενου κυλίνδρου θα έφερε κατάλληλα επεξεργασμένες υπερυδροφώβες και υδρόφιλες επιφάνειες και το γυάλινο κυλινδρικό περίβλημα ήταν κατάλληλα επεξεργασμένο ώστε ο δείκτης διάθλασης του γυαλιού (1.52) να προσεγγίζει αυτόν της γλυκερίνης (1.47). Ωστόσο ενώ την επεξεργασία του δείκτη διάθλασης του γυαλιού την ανέλαβε αρχικά το Ε.Κ.Ε.Φ.Ε 'Δ' δεν κατέστη δυνατή εντέλει η δυνατότητα να προσεγγιστεί ο εν λόγω δείκτης διάθλασης της γλυκερίνης με αποτέλεσμα να μην μπορέσει να πραγματοποιηθεί το συγκεκριμένο πείραμα. Το βασικό πρόβλημα που δημιουργήθηκε επομένως ήταν ότι κατά την επεξεργασία των μετρήσεων το PIV έβλεπε ίχνη σωματιδίων από την οπτικοποίηση της ροής εξαιτίας της διάθλασης με αποτέλεσμα τα κινούμενα σωματίδια να μην απεικονίζονται καθαρά γεγονός το οποίο και στάθηκε εμπόδιο στη διεξαγωγή συμπερασμάτων.

Έπειτα αποφασίστηκε το πείραμα να διεξαχθεί δίχως τη παρουσία του γυάλινου κυλινδρικού περιβλήματος χρησιμοποιώντας ως εργαζόμενο μέσο απιονισμένο νερό και ο άξονας του κυλίνδρου να τοποθετηθεί παράλληλα με την ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού. Η δεξαμενή που εμπεριέχει το ρευστό αποφασίστηκε να πληρωθεί μέχρι τη μέση ούτως ώστε ο κύλινδρος ενώ εκτελεί μια πλήρη περιστροφή να εμβαπτίζεται στο νερό έχοντας έρθει σε επαφή με τον αέρα που βρίσκεται εγκλωβισμένος στη δεξαμενή, γεγονός που όπως προκύπτει από τις μελέτες που αναφέρονται και σε πιο πάνω εδάφια βοηθάει στη διατήρηση για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα της υπερυδροφώβης ικανότητας μια επιφάνειας.

Κεφάλαιο 4

Πειραματική διάταξη και εξοπλισμός

Διεξήχθησαν μετρήσεις της ταχύτητας ροής του νερού γύρω από στρεφόμενο κύλινδρο διαμέτρου 25 mm σε κλειστή δεξαμενή τετραγωνικής διατομής η οποία ήταν γεμισμένη μέχρι τη μέση με νερό, εμβαπτίζοντας το κύλινδρο κατά τη περιστροφή του. Η δεξαμενή ήταν τοποθετημένη με τέτοιο τρόπο ώστε ο άξονας του κυλίνδρου να είναι παράλληλος με την ελεύθερη επιφάνεια του νερού εμβαπτίζοντας την επιφάνεια που κολλάται κάθε φορά όπως φαίνεται και στην Εικόνα 23.



Εικόνα 23. Περιστρεφόμενος κύλινδρος και δεξαμενή.

Ο κύλινδρος είναι κατασκευασμένος από αλουμίνιο και στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής μελέτης διεξήχθησαν τέσσερις διαφορετικές μετρήσεις, οι οποίες περιελάμβαναν i) τον περιστρεφόμενο κυλινδρο με υδρόφιλη μεμβράνη COP, ii) επιφάνεια riblet με περιοδικά ισαπέχοντα ισοσκελή τρίγωνα με διαστάσεις 15x80μm και μεταξύ τους απόσταση 70μm προσαρτημένη στο κύλινδρο με την κατεύθυνση των δομών παράλληλη στη ροή, iii) επιφάνεια riblet όπου έχει υποστεί επεξεργασία ώστε να καταστεί υπερυδροφόβη και iv) υπερυδροφόβη επιφάνεια από υπόστρωμα COP με εγχάραξη πλάσματος. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας επίσης χρησιμοποιήθηκε πειραματική διάταξη δεξαμενής-κυλίνδρου-συστήματος μετάδοσης της κίνησης και γίνανε μετρήσεις για διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής του κυλίνδρου. Οι μετρήσεις του πεδίου της ταχύτητας διεξήχθησαν με τη δεξαμενή μέχρι τη μέση πληρωμένη με τη βοήθεια μιας κάμερας και μιας δέσμης λέιζερ η οποία έπεφτε στο σημείο όπου κατέγραφε η κάμερα και η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση των αποτελεσμάτων ήταν η Particle Image Velocimetry.

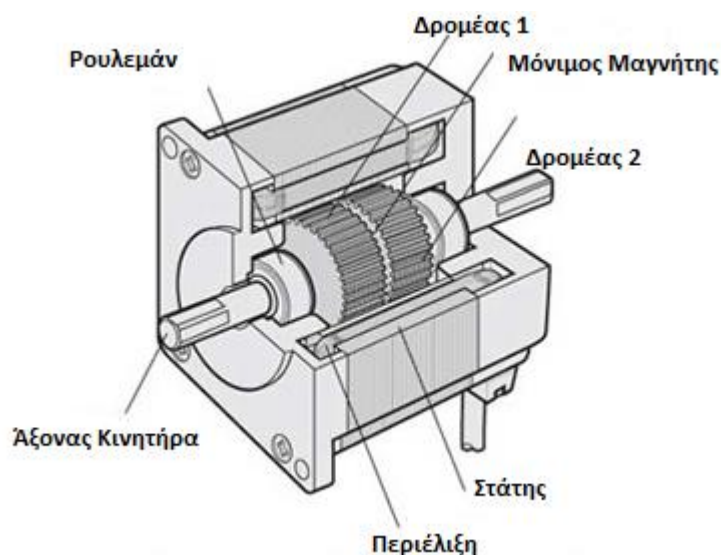
4.1 Δεξαμενή-κυλινδρος

Χρησιμοποιήθηκε κύλινδρος από αλουμίνιο διαμέτρου $D=25\text{mm}$ και μήκους 15cm στον οποίο πρσαρτήθηκαν τεσσάρων ειδών επιφάνειες και πάρθηκαν τέσσερις διαφορετικές μετρήσεις. Ο κύλινδρος βρισκόταν καθόλη τη διάρκεια των μετρήσεων συνδεδεμένος μέσω μίας όπης στο πυθμένα της δεξαμενής με ένα βηματικό κινητήρα όποιος τον περιέστρεφε με διαφορετικές ταχύτητες. Η δεξαμενή τετραγωνικής διατομής κατασκευασμένη από plexiglass με διαστάσεις $15 \times 15\text{ cm}$ και στην οποία προστέθηκε ένα αποσπώμενο καπάκι από plexiglass το οποίο έφερε ενσωματωμένο ρουλεμάν για την έδραση του άνω άκρου του κυλίνδρου αποτρέποντας την έκκεντρη κίνηση η οποία πιθανόν να δημιουργούσε διαταραχές στη ροή μετατοπίζοντας και το σταθερό σημείο αναφοράς της εικόνας. Το κάλυμα της δεξαμενής κλείνει με τη βοήθεια σπειρωμάτων και περικοχλιών για καλύτερη υδροδυναμική σφράγιση και φέρει και δύο βαλβίδες για την εξισορρόπηση της πίεσης με την ατμοσφαιρική.

Για όλες τις μετρήσεις που διεξήχθησαν ο κύλινδρος περιστρεφόταν με συγκεκριμένο αριθμό στροφών το λεπτό (RPM) ούτως ώστε να μπορούν να συγκριθούν και να αναλυθούν τα αποτελέσματα των επιμέρους διαφορετικών μετρήσεων.

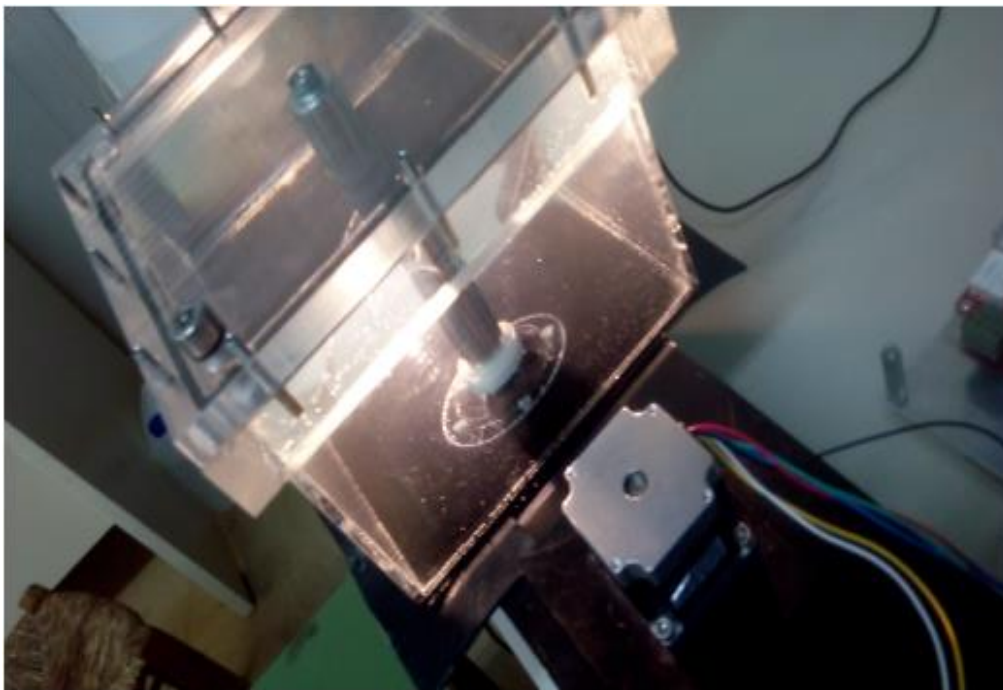
4.2 Σύστημα μετάδοσης της κίνησης

Στο συγκεκριμένο πείραμα για τη μετάδοσης της κίνησης και τη περιστροφή του κυλίνδρου χρησιμοποιήθηκε βηματικός κινητήρας. Στους βηματικούς κινητήρες ο άξονας εξόδου περιστρέφεται σε μια σειρά διακεκριμένων γωνιακών βημάτων (steps) τα οποία και πραγματοποιούνται κάθε φορά που λαμβάνεται μια εντολή παλμού και επομένως όταν παραχθεί ένας τελικός αριθμός παλμών ο άξονας θα περιστραφεί προς μια γνωστή γωνία. Οι βηματικοί κινητήρες είναι συνήθως κινητήρες γωνιακής θέσης και όχι γωνιακών στροφών και η ρύθμιση της ταχύτητας του δρομέα μπορεί να γίνει αυξάνοντας τη συχνότητα των παλμών τάσης. Στη παρακάτω Εικόνα 24 φαίνεται το εσωτερικό ενός βηματικού κινητήρα με τα αποτελούμενα μέρη.



Εικόνα 24. Βηματικός κινητήρας.

Για την πληρέστερη και πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση των πειραμάτων για δυνατότητα μεταβλητών στροφών από $10\text{-}350\text{ RPM}$ χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα αύξησης στροφών με συνδυασμό τροχαλίας και ιμάντα το οποίο και βρισκόταν κάτω από τη δεξαμενή με το περιστρεφόμενο κύλινδρο επιτυγχάνοντας με αυτό το τρόπο να αυξήσουμε 2.5 φορές τις στροφές του βηματικού κινητήρα.



Εικόνα 25. Δεξαμενή, κύλινδρος και βηματικός κινητήρας.

4.3 Μέθοδος Particle Image Velocimetry.

Η μέθοδος PIV είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ταχύτητας του ρευστού σε μακροσκοπικά συστήματα. Ουσιαστικά αυτή η τεχνική παρατηρεί τη θέση των σωματιδίων και η ταχύτητα τους προσδιορίζεται μέσα από στατιστική συσχέτιση εικόνων που λαμβάνονται μέσα σε μικρά χρονικά διαστήματα με τη χρήση πηγών παλμικού φωτός. Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου για να μετρηθεί η ταχύτητα του ρευστού είναι μια εύκολη διαδικασία που περιλαμβάνει μια ετεροσυσχέτιση μεταξύ δύο εικόνων για τη μετατόπιση και το χρόνο στον οποίο συντελέστηκε αυτή ενός σωματιδίου μέσα στο ρευστό. Ο χρονικός διαχωρισμός μεταξύ των δύο εικόνων ορίζεται από τον χρήστη της μεθόδου και είναι γνωστός με μεγάλη ακρίβεια. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η ταχύτητα που μετριέται με τη μέθοδο του PIV είναι η μέση ταχύτητα των σωματιδίων στο χρόνο που μεσολαβεί ενδιάμεσα των δύο εικόνων. Για τη μέτρηση του μήκους ολίσθησης η μέθοδος του PIV έχει χρησιμοποιηθεί αρκετά στο παρελθόν σε διάφορες ερευνητικές μελέτες.

Η μέθοδος του PIV σε αντίθεση με άλλες μεθόδους που πραγματοποιούν μετρήσεις σε ένα σημείο του πεδίου ροής (LDA, θερμό νήμα) μπορεί να παρατηρήσει τη χωρική κατανομή της ταχύτητας για ένα ολόκληρο πεδίο ροής ταυτόχρονα και σε υψηλή ανάλυση. Αποτελεί μια μη παρεμβατική μέθοδο δίχως να επηρεάζει τη ροή η οποία όμως παρουσιάζει κάποια συγκεκριμένα όρια τα οποία καθιστούν κάποιες φορές τις μετρήσεις LDV (Laser Doppler Velocimetry) χρήσιμα συμπληρωματικές.

Τα μέρη που συναποτελούν μια διάταξη PIV είναι

- Μια πηγή φωτός (laser) με μια ή δύο κοιλότητες για γρήγορους συνεχής παλμούς
- Οπτικά για τη παραγωγή φύλλων
- Μια κάμερα CCD
- Έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή
- Λογισμικό επεξεργασίας
- Σωματίδια διασκορπισμού απελευθερωμένα μέσα στο ρευστό
- Συγχρονιστής

Η πηγή παλμικού φωτός που χρησιμοποιείται στα πλαίσια του συγκεκριμένου πειράματος είναι ένα Laser το οποίο τοποθετείται σε ένα επίπεδο κάθετο ως προς τον άξονα περιστροφής του κυλίνδρου. Η δέσμη φωτός που εκπέμπεται από το Laser προσπίπτει σε κάθε σωματίδιο δύο φορές σε σύντομο χρονικό διάστημα το οποίο κατά τη διάρκεια των μετρήσεων είναι μεταβλητό προκειμένου η μέγιστη μετατόπιση των σωματιδίων της ροής να μην ξεπερνάει το 1/4 του μήκους του παραθύρου ολοκλήρωσης (interrogation window 32x 32 pixel).



Εικόνα 26. Πειραματική διάταξη.

Η δέσμη φωτός που σκεδάζεται από τα γυάλινα σφαιρικά σωματίδια, διαμέτρου 10μm και πυκνότητας 1.1 kg/m^3 , τα οποία έχουν αναμειχθεί με το ρευστό καταγράφεται σε δύο διαδοχικά στιγμιότυπα από την κάμερα και υπολογίζουμε τη μετατόπιση των σωματιδίων μεταξύ δυο διαδοχικών παλμών φωτός με τη μέθοδο της ετεροσυσχέτισης. Στην επεξεργασία του σήματος η ετεροσυσχέτιση είναι ένα μέτρο ομοιότητας δύο σειρών συναρτήση της μετατόπισης της μίας σε σχέση με την άλλη.

Το Laser που συμμετέχει στη διαδικασία του πειράματος είναι παλμικό ND: YAG με μήκος κύματος $\lambda=532 \text{ nm}$ και ενέργεια 30 MJ/παλμό. Για εφαρμογές σε PIV το laser ND: YAG εκπέμπει παλμούς συνήθως με μήκος κύματος $\lambda=1064 \text{ nm}$ ωστόσο για λόγους ασφαλείας η εκπομπή της δέσμης φιλτράρεται για την απομόνωση των αρμονικών με $\lambda=532 \text{ nm}$ παράγοντας ένα πράσινο φως το οποίο είναι και το μόνο που μπορεί να γίνει αντιληπτό από το ανθρώπινο μάτι. Η διέγερση επιτυγχάνεται με τη μέθοδο της οπτικής άντλησης σε ευρείες ζώνες ενέργειας και μη ακτινοβόλουσα μετάβαση στο ανώτερο επίπεδο. Στο παρακάτω πίνακα παραθέτονται ορισμένοι χαρακτηριστικοί τύποι Laser για παλμική λειτουργία

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικοί τύποι laser.

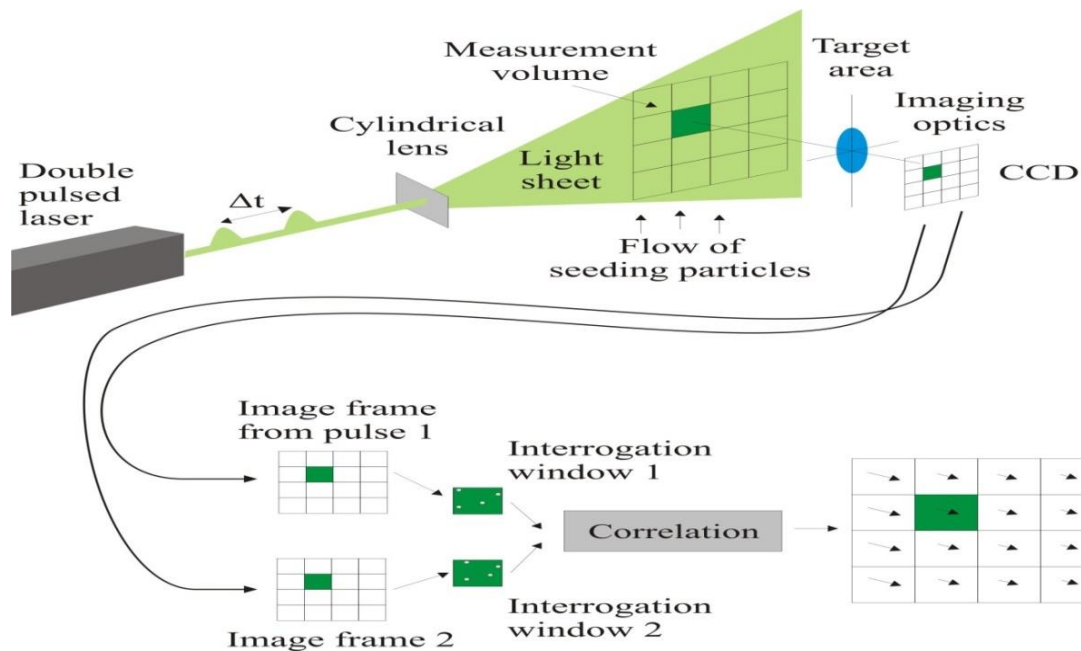
Παλλόμενο laser	Μήκος κύματος (nm)	Διάρκεια Παλμού (ns)	Ενέργεια ανά παλμό (J)	Συχνότητα παλμών (Hz)
Ruby	694	20	10	1
ND: Yag	503	10	500	50
Ατμών Χαλκού	511-578	20	0.002	8000

Τα σωματίδια καταγράφηκαν από αερόψυκτη κάμερα CCD σε δυο ξεχωριστά στιγμιότυπα (Power View 1.4MP , 1376x1040 pixels) η οποία ήταν συγχρονισμένη με το laser με τη βοήθεια του συγχρονιστή TSI (model 610036). Τα σωματίδια αποτυπώνονται σαν φωτεινές κουκίδες σε μαύρο φόντο όπως φαίνεται και στην Εικόνα 27



Εικόνα 27. Στιγμιότυπο της ροής όπως αποτυπώνεται με τη μέθοδο του PIV και τα σωματίδια διασκορπισμού.

Μια τυπική πειραματική διάταξη φαίνεται και στη παρακάτω Εικόνα 28 όπου τα σωματίδια εισάγονται στον υπό εξέταση μετρητικό επιφανειακό όγκο. Το επίπεδο της ροής που μας ενδιαφέρει να μετρήσουμε φωτίζεται διαδοχικά δύο φορές μέσω μιας λεπτής δέσμης laser, με το χρονικό διάστημα παρεμβολής μεταξύ των δύο αυτών παλμών να εξαρτάται από τη μέση ταχύτητα της ροής. Επομένως για υψηλές τάχυτες ροής απαιτείται μικρό χρονικό διάστημα μεταξύ των παλμών, ενώ για μικρές ταχύτητες ροής απαιτείται μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Θεωρούμε ότι η ταχύτητα των σωματιδίων συμπίπτει με την ταχύτητα της ροής κάθε φορά που εξετάζεται και με τη βοήθεια της CCD κάμερας το φως που σκεδάζεται από τα σωματίδια καταγράφεται σε δύο ξεχωριστές εικόνες από τις οποίες μέσα από κατάλληλη επεξεργασία εξάγουμε τα διανύσματα της ταχύτητας που αντιστοιχούν στη ροή.



Εικόνα 28. Πειραματική διάταξη PIV.

Τα σωματίδια διασποράς/διασκορπισμού (seeding particles) τα οποία εγχύονται μέσα στο ρευστό είναι εξαιρετικής σημασίας για την επιτυχή διεξαγωγή του πειράματος PIV. Όπως αναφέρει και ο (Melling 1999) η ακρίβεια προσδιορισμού του πεδίου ταχύτητας περιορίζεται τελικά από την ικανότητα των σωματιδίων διασκορπισμού να ακολουθούν τη στιγμιαία κίνηση της συνεχούς φάσης. Επομένως είναι αναγκαίο να γίνει ένας ‘συμβιβασμός’ μεταξύ της ανάγκης να μειωθεί το μέγεθος των σωματιδίων ούτως ώστε να μπορούν να ακολουθούν τη ροή και από την άλλη είναι αναγκαία και μια αύξηση του μεγέθους των σωματιδίων για τη βελτίωση της σκέδασης του φωτός κατά τη πειραματική διαδικασία. Για τις περισσότερες περιπτώσεις πειραμάτων είναι επιθυμητό τα σωματίδια διασκορπισμού να είναι μη τοξικά, μη διαβρωτικά, μη πτητικά, μη λειαντικά και χημικά αδρανή.

Μια βολική σχέση για το προσδιορισμό της ικανότητας σκέδασης του φωτός είναι η διατομή σκέδασης (C_s) που προσδιορίζεται ως ο λόγος της συνολικής σκεδαζόμενης ισχύος P_s προς την ένταση της δέσμης του laser (I_0) που προσπίπτει στο σωματίδιο (Melling 1999)

$$C_s = \frac{P_s}{I_0} \quad (43)$$

Εάν οι εξωτερικές δυνάμεις όπως η βαρύτητα, οι φυγόκεντρες και οι ηλεκτροστατικές θεωρηθούν αμελητέες η ικανότητα παρακολούθησης των διασκορπισμένων σωματιδίων επηρεάζεται μόνο από το σχήμα των σωματιδίων, τη διάμετρο τους, τη πυκνότητα τους, τη πυκνότητα του ρευστού που τα εμπεριέχει καθώς και τη κινηματική του συνεκτικότητα. Επομένως ενώ η επιλογή των σωματιδίων εξαρτάται από τη φύση του ρευστού, γενικά για macro-PIV έρευνες επιλέγονται γυάλινα σφαιρίδια, πολυστυρένιο ή σωματίδια αργιλίου παρουσιάζοντας δείκτη διάθλασης διαφορετικό από αυτόν του ρευστού για να μπορεί να σκεδάζεται η δέσμη φωτός του laser.

4.4 Επιφάνειες που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη πειραματική διαδικασία

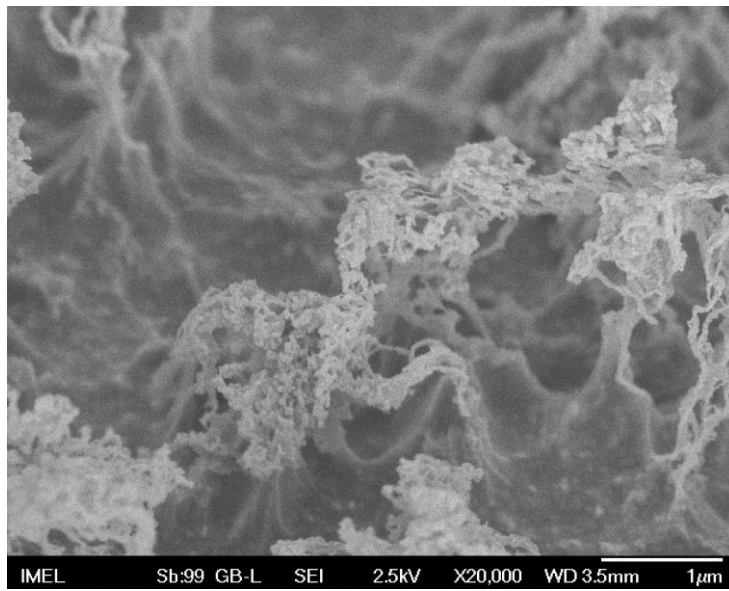
Στα πλαίσια της διεξαγωγής του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν οι εξής επιφάνειες

- i. Υδρόφιλη μεμβράνη COP
- ii. Υπερυδρόφοβη επιφάνεια από υπόστρωμα COP με εγχάραξη πλάσματος
- iii. Επιφάνεια riblet με περιοδικά ισαπέχοντα ισοσκελή τρίγωνα με διαστάσεις 15x80μm και μεταξύ τους απόσταση 70μm
- iv. Επιφάνεια riblet με υπερυδρόφοβα χαρακτηριστικά

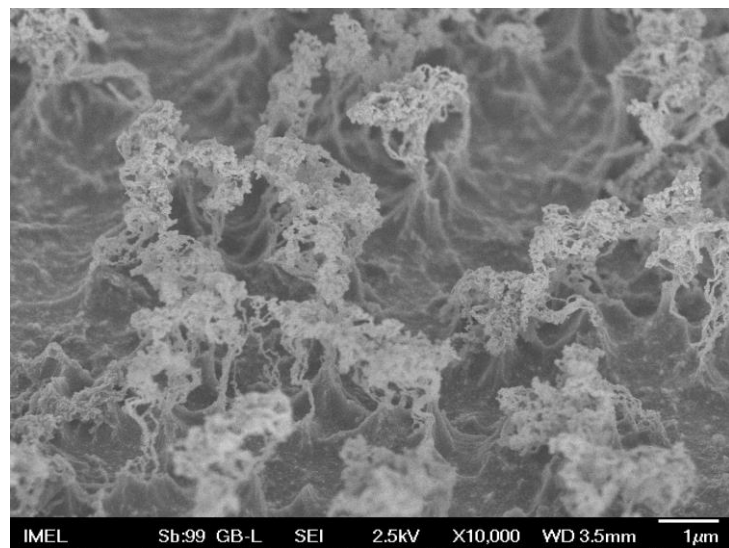
Οι βασικές κατεργασίες που επιτελεί μια ηλεκτρική εκκένωση πλάσματος αφορούν την α) την εγχάραξη (plasma etching) η οποία ουσιαστικά περιλαμβάνει την απομάκρυνση κάποιας ποσότητας υλικού β) την απόθεση (plasma deposition) η οποία δημιουργεί ένα υμένιο υλικού πάνω σε ένα άλλο υλικό και τέλος γ) την τροποποίηση (plasma treatment) η οποία περιλαμβάνει την μεταβολή των επιφανειακών χαρακτηριστικών (π.χ επιφανειακή χημεία).

Για την εγχάραξη πολυμερών χρησιμοποιούνται συνήθως αντιδραστήρες RIE (Reactive Ion Etching) στα 13.56 MHz ή αντιδραστήρες ECR (Electron Cyclotron Resonance) ή ICP (Inductively Coupled Plasma) ή τέλος Helicon στα 13.56 MHz. Για τις τρεις τελευταίες διεργασίες (ECR, ICP, Helicon) η ενέργεια βομβαρδισμού στην επιφάνεια μπορεί να ρυθμίζεται ανεξάρτητα από την ισχύ του πλάσματος. Τα συστατικά της αέριας φάσης που οδηγούν σε εγχάραξη είναι τα ιόντα και τα ενεργά ουδέτερα συστατικά. Τα ενεργά ουδέτερα συστατικά-ελεύθερες ρίζες ως επί το 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 να δρουν είτε ανεξάρτητα το ένα με το άλλο είτε σε συνεργασία. Όταν τα ουδέτερα συστατικά δρουν μόνα τους η διεργασία ονομάζεται χημική εγχάραξη ενώ όταν τα ιόντα δρουν μόνα τους η διεργασία ονομάζεται φυσική εγχάραξη ή ιονοβολή ενώ όταν ιόντα και ουδέτερα συστατικά δρουν μαζί η διεργασία ονομάζεται υποβοηθούμενη από ιόντα εγχάραξη.

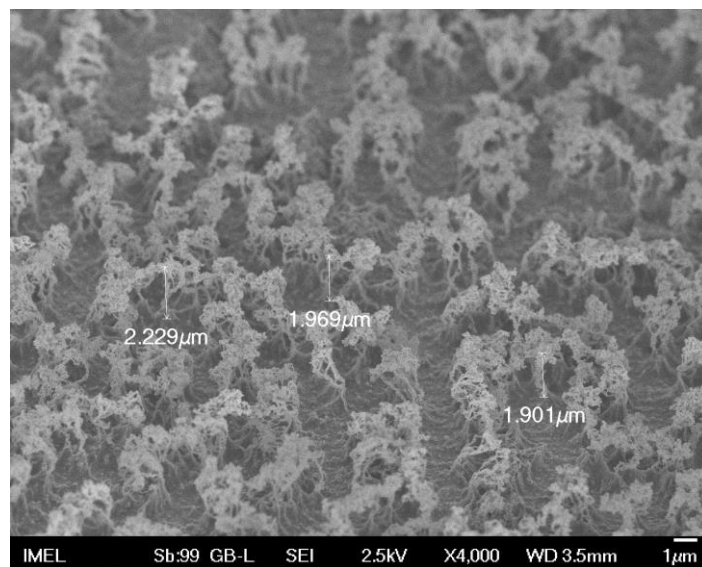
Η κατασκευή της υπερυδρόφοβης επιφάνειας συντελείται σε δύο βήματα στα εργαστήρια του Τομέα Μικροηλεκτρονικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε 'Δ'. Το πρώτο βήμα αποσκοπεί στη κατασκευή επιφανειακής τοπογραφίας High Aspect Ratio και το δεύτερο στην απόθεση πολυμερικού φθορανθρακικού (fluorocarbon, Teflon-like) υμενίου χαμηλής επιφανειακής ενέργειας. Για το στάδιο της κατασκευής επιφανειακής τοπογραφίας 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 <math><10\text{nm}</math>. Η επιφάνεια COP μετά από επεξεργασία 20min εμφανίζει χαρακτηριστικά τύπου βελόνας με δύο κλίμακες τραχύτητας όπως φαίνεται και στις παρακάτω εικόνες Εικόνα 29, Εικόνα 30 και Εικόνα 31



Εικόνα 29. Εικόνα SEM (a).



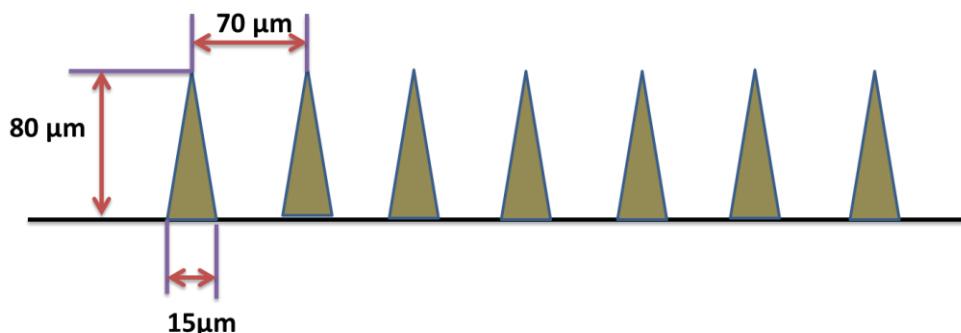
Εικόνα 30. Εικόνα SEM (b).



Εικόνα 31. Εικόνα SEM (c).

Η επιφάνεια riblet με υπερυδρόφοβα χαρακτηριστικά που χρησιμοποιήθηκε είναι της 3M και τα χαρακτηριστικά της επιφανειακής τοπογραφίας είναι σύμφωνα με την Εικόνα 32

3M riblet film



Εικόνα 32. Διαστάσεις επιφανειακής τοπογραφίας επιφάνειας riblet.

Η κόλληση τόσο της υδρόφιλης COP επιφάνειας όσο και της υπερυδρόφοβης, της riblet καθώς και της riblet υπερυδρόφοβης επιφάνειας στο κύλινδρο έγινε με τον ίδιο τρόπο και για την riblet συγκεκριμένα με τέτοιο τρόπο ώστε οι αυλακώσεις που σχηματίζονται μεταξύ των δομών να είναι παράλληλες της ροής.

Κεφάλαιο 5

Ανάλυση Πειραματικών Δεδομένων

5.1 Κώδικας Matlab

Στο Παράρτημα Α της διπλωματικής μελέτης παρουσιάζεται ο κώδικας που δημιουργήθηκε για την ανάλυση των μετρήσεων του πειράματος σε υπολογιστικό περιβάλλον MATLAB (R2017a). Ο υπολογιστικός κώδικας που δημιουργήθηκε 'τρέχτηκε' για όλες τις ταχύτητες περιστροφής του κυλίνδρου ($N=10, 60, 100, 150, 200, 250, 300, 350$) και για τις τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις προσαρτημένων επιφανειών.

5.2 Μεθοδολογία διεξαγωγής πειράματος. Παραδοχές και παράμετροι για τη ροή

Για τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας λαμβάνονται κάποιες παραδοχές για τη ροή οι οποίες και ικανοποιούν απόλυτα την παρούσα μελέτη

- Το ρευστό είναι νερό και θεωρείται νευτώνιο, ασυμπίεστο και η ροή πλήρως διαμορφωμένη.
- Η θερμοκρασία διατηρείται ομοιόμορφη και σταθερή καθ όλη τη διάρκεια της πειραματικής διεργασίας.
- Η θερμική αγωγή μεταξύ των τοιχωμάτων του plexi-glass και του ρευστού καθώς και η φυσική συναγωγή και οι θερμικές εκπομπές θεωρούνται αμελητέες.
- Ρύθμιση της διάταξης του PIV με κεντράρισμα/εστίαση της κάμερας καθώς και εστίαση του laser να χτυπάει στο κέντρο της δεξαμενής.
- Πλήρωση μέχρι τη μέση της δεξαμενής με απιονισμένο νερό και σωματίδια διασκορπισμού. Το γέμισμα της δεξαμενής έγινε με προσοχή για αποφυγή δημιουργίας φυσαλίδων κατά την έγχυση του νερού.

5.3 Μελέτη περιπτώσεων.

Οι περιπτώσεις επιφανειών που μελετήθηκαν για την επίδραση στη ροή περιστρεφόμενου κυλίνδρου ήταν οι εξής

- i. Περιστροφή κυλίνδρου φέροντας υδρόφιλη μεμβράνη COP
- ii. Περιστροφή κυλίνδρου με προσαρμοσμένη υπερυδροφόβη επιφάνεια από υπόστρωμα COP με εγχάραξη πλάσματος
- iii. Περιστροφή κυλίνδρου με επιφάνεια riblet
- iv. Περιστροφή κυλίνδρου με επιφάνεια riblet με υπερυδροφόβα χαρακτηριστικά

Η επεξεργασία των δεδομένων που απορρέουν από τη πειραματική μέτρηση με χρήση της μεθόδου περιλαμβάνει την επικύρωση των μετρήσεων, την αφαίρεση τυχών λανθασμένων και άκυρων διανυσμάτων ταχύτητας καθώς και την εξομάλυνση και βελτιστοποίηση των τελικών αποτελεσμάτων. Είναι σημαντικό να μειωθούν οι αντανάκλασεις του φωτός όσο είναι εφικτό κατά τη διαδικασία λήψης της εικόνας χρησιμοποιώντας ταυτόχρονα την απαραίτητη ισχύ για τη δέσμη του φωτός. Ωστόσο οι πραγματικές εικόνες ροής δεν είναι απολύτως τυχαίες και τα περιοδικά στοιχεία συσχετίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε τροποποιούν τη συνάρτηση συσχέτισης οδηγώντας σε λανθασμένα διανύσματα ταχύτητας. Ένα κριτήριο που χρησιμοποιείται για την απαλοιφή των λανθασμένων διανυσμάτων της ταχύτητας είναι το ότι η αναλογία της μεγαλύτερης προς τη δεύτερη μεγαλύτερη διανυσματική κορυφή δεν πρέπει να υπερβαίνει μια ορισμένη τιμή εμφανίζοντας κατά τη διαδικασία της ετεροσυσχέτισης. Πιθανές λανθασμένες και αναξιόπιστες μετρήσεις μπορούν χωρίς βλάβη της γενικότητας να αντικατασταθούν παρεμβάλλοντας στις γειτονικές έγκυρες μετρήσεις. Στο παρακάτω πίνακα παρατείνονται η περιφερειακή ταχύτητα του κυλίνδρου (RPM) καθώς και η χρονική απόσταση (dT) ακτινοβολίας της δέσμης του φωτός μεταξύ δύο διαδοχικών παλμών για τις διάφορες περιπτώσεις που μελετήθηκαν. Καταγράφηκαν 500 εικόνες από τη κάμερα πάνω στις οποίες έγινε η επεξεργασία των μετρούμενων διανυσμάτων της ταχύτητας και αξίζει να σημειωθεί το γεγονός ότι και για τις τέσσερις επιφάνειες που εξετάστηκαν πειραματικά στη παρούσα διπλωματική εργασία διατηρήθηκαν σταθερές οι στροφές του κυλίνδρου ουτως ώστε να αναλυθούν συγκριτικά τα εξαγόμενα αποτελέσματα.

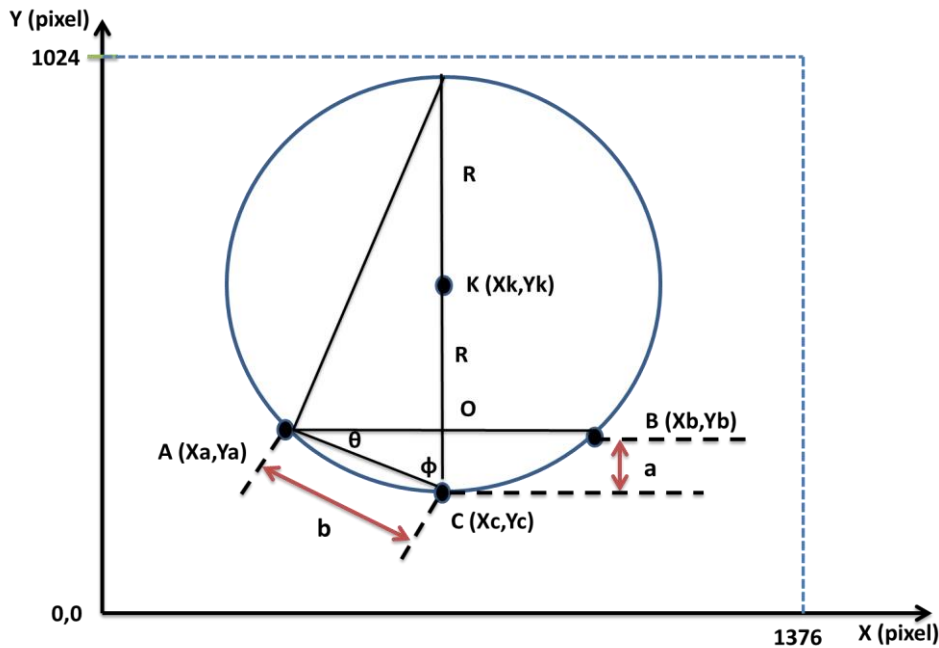
Πίνακας 2. Κατηγοριοποίηση περιπτώσεων πειραματικών μελετών.

		Ακατέργαστη επιφάνεια (R=12,6mm)	Υπευδροφόβη επιφάνεια (R=12,6mm)	3M riblet επιφάνεια (R=12,7 mm)	3M riblet υπερυδροφόβα επεξεργασμένη επιφάνεια (R=12,7mm)
RPM	dT	$\omega \cdot R$ (mm/sec)	$\omega \cdot R$ (mm/sec)	$\omega \cdot R$ (mm/sec)	$\omega \cdot R$ (mm/sec)
10	9000	13,19	13,19	13,29	13,29
60	2000	79,16	79,16	79,76	79,76
100	1200	131,95	131,94	132,93	132,93
150	1200	197,92	197,92	199,39	199,39
200	1200	263,89	263,89	265,85	265,85
250	1200	329,86	329,86	332,32	332,32
300	1000	395,84	395,84	398,78	398,78

350	1000	461,81	461,81	465,24	465,24
-----	------	--------	--------	--------	--------

5.4 Προσδιορισμός κέντρου του κυλίνδρου για τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν

Πιο συγκεκριμένα για να μπορέσω να προσδιορίσω το κέντρο του περιστρεφόμενου κυλίνδρου αλλά και για να βρω την αναλογία των pixel της παρατηρούμενης εικόνας με χιλιοστά (mm) ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία χρησιμοποιώντας μια καλά φωτισμένη επιφάνεια από το λογισμικό INSIGHT. Παρακάτω στην Εικόνα 33 δίνεται μια σχηματική αναπαράσταση του κυλίνδρου και των μεγεθών που χρειάζεται να υπολογίσω ούτως ώστε να προσδιορίσω το κέντρο. Θα υπολογίσω επομένως το κέντρο του κυλίνδρου για τη κάθε περίπτωση αλλά και την αναλογία pixel και χιλιοστών την οποία και θα διατηρήσω και για τις τέσσερις πειραματικές περιπτώσεις.



Εικόνα 33. Υπολογισμός κέντρου του κυλίνδρου.

Για την περίπτωση όπου ο κύλινδρος φέρει την untreated επιφάνεια, θεώρησαμε ένα σημείο A (Xa, Ya) πάνω στην επιφάνεια του κυλίνδρου το οποίο είχε συντεταγμένες σε pixel A (376,642). Το σημείο B βρίσκεται βρισκείται στην ισο-υψή AB και έχει συντεταγμένες B (1141,642). Το σημείο C είναι το μέσο του ευθύγραμμου τμήματος AB και η τεταγμένη του προσδιορίστηκε οπτικά στο σημείο όπου 'κόβει' το κύλινδρο, επομένως C ($\frac{376+1141}{2}$, 560)=(758.5,560).

Η απόσταση της ευθείας AB από το C είναι $a = |Yc - Ya| = |560 - 642| = 82 \text{ pixel}$

Αντίστοιχα το μήκος b υπολογίζεται ως $b = \sqrt{(Xc - Xa)^2 + (Yc - Ya)^2} = 374 \text{ pixel}$

Από το ορθογώνιο τρίγωνο \widehat{AOC} καθώς και από το ορθογώνιο τρίγωνο που σχηματίζεται έχοντας ως υποτεινούσα την διάμετρο του κυλίνδρου έχουμε αντίστοιχα ότι

$$\left. \begin{aligned} \sin \theta &= \frac{a}{b} \\ \cos \varphi &= \frac{b}{2R} \end{aligned} \right\} \begin{array}{c} \text{Ομοιότητα} \\ \text{Τριγώνων} \end{array} \Rightarrow \frac{a}{b} = \frac{b}{2R} \quad (44)$$

Από τη παραπάνω σχέση υπολογίζουμε την αναλογία pixel και χιλιοστών (mm) και πολλαπλασιάζοντας με την ακτίνα R=12.6 βρίσκουμε πόσα pixel είναι η ακτίνα. Προσθέτοντας την ακτίνα στη τεταγμένη του σημείου C βρίσκουμε το κέντρο του κυλίνδρου.

$$\text{Άρα } K (X_k (=X_c), Y_k(Y_c+R)) \rightarrow K (758.5, 1411)$$

Όμοια για την υπερυδροφόβη επιφάνεια, θα την ονομάζουμε SH από εδώ και πέρα, θεωρήσαμε ένα σημείο A (X_a, Y_a) πάνω στην επιφάνεια του κυλίνδρου το οποίο είχε συντεταγμένες σε pixel A (308, 587). Το σημείο B βρίσκεται βρισκείται στην ισο-υψή AB και έχει συντεταγμένες B (1147, 587). Το σημείο C είναι το μέσο του ευθύγραμμου τμήματος AB και η τεταγμένη του προσδιορίστηκε οπτικά στο σημείο όπου 'κόβει το κύλινδρο, επομένως C ($\frac{308+1147}{2}$, 453)=(727.5, 453).

$$\text{Η απόσταση της ευθείας AB από το C είναι } a = |Y_c - Y_a| = |453 - 587| = 134 \text{ pixel}$$

$$\text{Αντίστοιχα το μήκος b υπολογίζεται ως } b = \sqrt{(X_c - X_a)^2 + (Y_c - Y_a)^2} = 397.5 \text{ pixel}$$

Στη περίπτωση της SH επιφάνειας μετρήθηκε και υπολογίστηκε η ακτίνα του κυλίνδρου όταν είναι κολλημένη η επιφάνεια και έχουμε R=12.6mm.

$$\begin{array}{l} \sin \theta = \frac{a}{b} \\ \cos \varphi = \frac{b}{2R} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \text{Ομοιότητα} \\ \text{Τριγώνων} \end{array} \right. \rightarrow \frac{a}{b} = \frac{b}{2R}$$

Από τη παραπάνω σχέση υπολογίζουμε την αναλογία pixel και χιλιοστών (mm) και πολλαπλασιάζοντας με την ακτίνα R=12.6 βρίσκουμε πόσα χιλιοστά είναι η ακτίνα. Προσθέτοντας την ακτίνα στη τεταγμένη του σημείου C βρίσκουμε το κέντρο του κυλίνδρου.

$$\text{Άρα } K (X_k (=X_c), Y_k(Y_c+R)) \rightarrow K (727.5, 1042.5)$$

Για την περίπτωση όπου ο κύλινδρος φέρει επιφάνεια με riblet, θα την ονομάζουμε 3M από εδώ και πέρα, θεωρήσαμε ένα σημείο A (X_a, Y_a) πάνω στην επιφάνεια του κυλίνδρου το οποίο είχε συντεταγμένες σε pixel A (279, 535). Το σημείο B βρίσκεται βρισκείται στην ισο-υψή AB και έχει συντεταγμένες B (1201, 535). Το σημείο C είναι το μέσο του ευθύγραμμου τμήματος AB και η τεταγμένη του προσδιορίστηκε οπτικά στο σημείο όπου 'κόβει το κύλινδρο, επομένως C ($\frac{279+1201}{2}$, 535)=(740, 363).

$$\text{Η απόσταση της ευθείας AB από το C είναι } a = |Y_c - Y_a| = |363 - 535| = 172 \text{ pixel}$$

$$\text{Αντίστοιχα το μήκος b υπολογίζεται ως } b = \sqrt{(X_c - X_a)^2 + (Y_c - Y_a)^2} = 427.7 \text{ pixel}$$

$$\begin{array}{l} \sin \theta = \frac{a}{b} \\ \cos \varphi = \frac{b}{2R} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \text{Ομοιότητα} \\ \text{Τριγώνων} \end{array} \right. \rightarrow \frac{a}{b} = \frac{b}{2R}$$

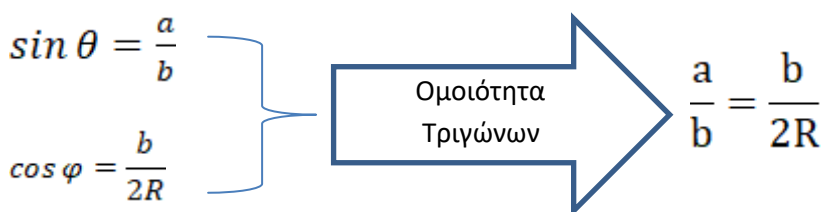
Από τη παραπάνω σχέση υπολογίζουμε την αναλογία pixel και χιλιοστών (mm) και πολλαπλασιάζοντας με την ακτίνα R=12.7 βρίσκουμε πόσα χιλιοστά είναι η ακτίνα. Προσθέτοντας την ακτίνα στη τεταγμένη του σημείου C βρίσκουμε το κέντρο του κυλίνδρου.

Άρα K (Xk (=Xc), Yk(Yc+R)) → **K (740,895)**

Τέλος για την υπερυδροφόβα επεξεργασμένη riblet επιφάνεια, θα την ονομάζουμε 3M_SH από εδώ και στο εξής, θεώρησαμε ένα σημείο A (Xa,Ya) πάνω στην επιφάνεια του κυλίνδρου το οποίο είχε συντεταγμένες σε pixel A (268,377). Το σημείο B βρίσκεται βρίσκεται στην ισο-υψή AB και έχει συντεταγμένες B (1020,377). Το σημείο C είναι το μέσο του ευθύγραμμου τμήματος AB και η τεταγμένη του προσδιορίστηκε οπτικά στο σημείο όπου 'κόβει' το κύλινδρο, επομένως C ($\frac{268+1020}{2}$, 278)=(644,278).

Η απόσταση της ευθείας AB από το C είναι $a = |Yc - Ya| = |278 - 377| = 99 \text{ pixel}$

Αντίστοιχα το μήκος b υπολογίζεται ως $b = \sqrt{(Xc - Xa)^2 + (Yc - Ya)^2} = 362.7 \text{ pixel}$



Η ακτίνα του κυλίνδρου για τη συγκεκριμένη επιφάνεια μετρήθηκε και βρέθηκε R=12.7mm. Από τη παραπάνω σχέση υπολογίζουμε την αναλογία pixel και χιλιοστών (mm) και πολλαπλασιάζοντας με την ακτίνα R=12.7 βρίσκουμε πόσα χιλιοστά είναι η ακτίνα. Προσθέτοντας την ακτίνα στη τεταγμένη του σημείου C βρίσκουμε το κέντρο του κυλίνδρου.

Άρα K (Xk (=Xc), Yk(Yc+R)) → **K (644,942)**

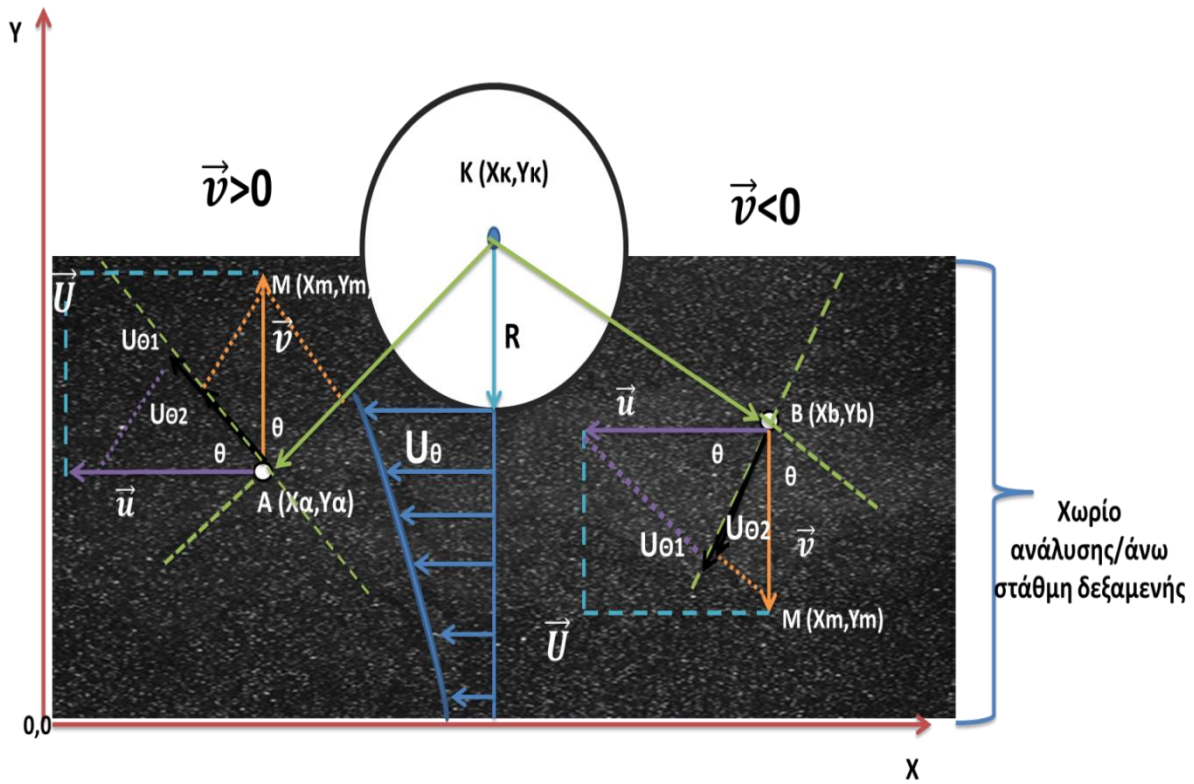
Στο παρακάτω πίνακα εμφανίζονται συγκεντρωμένες οι συντεταγμένες του κέντρου για κάθε μια από τις τέσσερις εξεταζόμενες περιπτώσεις καθώς και η αναλογία pixel/mm η οποία διατηρήθηκε σταθερή καθόλη τη διάρκεια των υπολογισμών

Πίνακας 3. Κέντρο του κυλίνδρου για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις και αναλογία pixel-mm.

Επιφάνεια	Xk (pixel)	Yk (pixel)	Ratio (pixel/mm)
Untreated	758.5	1411	52.3
SH	727.5	1042.5	
3M	740	895	
3M_SH	644	942	

5.5 Σχηματική αναπαράσταση και έυρεση της κάθετης στην ακτίνα ταχύτητας

Για καλύτερη εποπτεία της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε κατά την ανάλυση του διανυσματικού πεδίου της ταχύτητας συναρτήση της απόστασης από το κέντρο του κυλίνδρου παραθέτουμε το παρακάτω σχήμα. Με βάση το παρακάτω σχήμα και τις σχέσεις που υπολογίζουν την κάθετη στην ακτίνα ταχύτητα, U_{θ} από εδώ και πέρα, τρέχτηκε ο κώδικας στη Matlab και προέκυψαν τα διαγράμματα για κάθε μια περίπτωση.



Εικόνα 34. Ανάλυση του διανυσματικού πεδίου ταχυτήτων του ρευστού.

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 34 και επιβεβαιώνεται και παρακάτω από τα διαγράμματα του διανυσματικού πεδίου ταχύτητας η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας (\vec{u}) είναι διαρκώς προσανατολισμένη προς τα αρνητικά ενώ η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας (\vec{v}) αλλάζει πρόσημο εκατέρωθεν της κάθετης ακτίνας στο κύλινδρο.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε αφορά δύο σημεία, ένα με $\vec{v} > 0$ και ένα με $\vec{v} < 0$, και οδηγεί στον υπολογισμό της κάθετης στην ακτίνα συνιστώσα της ταχύτητας (U_{θ}).

Αρχικά θεωρούμε ένα σημείο A (X_a, Y_a) όπως φαίνεται στο σχήμα το οποίο κινείται βάση της συνισταμένης ταχύτητας $\vec{U} = (\vec{u}, \vec{v})$ βρισκόμενο σε απόσταση r από το περιστρεφόμενο κύλινδρο. Θεωρούμε την κάθετη προβολή της ταχύτητας \vec{u} στον άξονα που είναι κάθετος στην ακτίνα r την οποία και ονομάζουμε $U_{\theta 1}$ και αντίστοιχα για την \vec{v} την $U_{\theta 2}$.

Επίσης ορίζουμε ως γωνία θ την γωνία που σχηματίζει η \vec{u} με τον φορέα των $U_{\theta 1}$ και $U_{\theta 2}$. Η γωνία θ μεταφέρεται όπως φαίνεται και στο σχήμα μεταξύ του διανύσματος \vec{AK} και του \vec{AM} εξαιτίας των κάθετων μεταξύ τους πλευρών (με χρώματα μοβ/πορτοκαλί και μαύρο/πράσινο) και έχω $\vec{AK} (X_k - X_a, Y_k - Y_a)$ και $\vec{AM} (0, r)$ και $\theta = (\vec{AM}, \vec{AK})$ και εφαρμόζοντας το εξωτερικό γινόμενο μεταξύ αυτών των δύο διανυσμάτων βρίσκω τη γωνία

$$\hat{\theta} = \cos^{-1}\left(\frac{\overrightarrow{AK} * \overrightarrow{AM}}{|\overrightarrow{AK}| * |\overrightarrow{AM}|}\right) \quad (45)$$

Όπως φαίνεται και στο σχήμα και με τη χρήση του τύπου του ημιτόνου και των συνημιτόνων έχω

$$\left. \begin{aligned} \cos \theta &= \frac{u_{\theta 1}}{u} \\ \sin \theta &= \frac{u_{\theta 2}}{v} \end{aligned} \right\} \mathbf{U}_{\theta} = u \cos \theta - v \sin \theta \quad (46)$$

Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθείται και στη περίπτωση όπου $v < 0$. Η μόνη διαφορά βρίσκεται στο ότι το σημείο M έχει συντεταγμένες $M(0, -v)$ και τα διανύσματα που δημιουργούνται στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι το $\overrightarrow{KB} = (Xb - Xk, Yb - Yk)$ και το \overrightarrow{BM} και η μεταξύ τους γωνία η οποία είναι

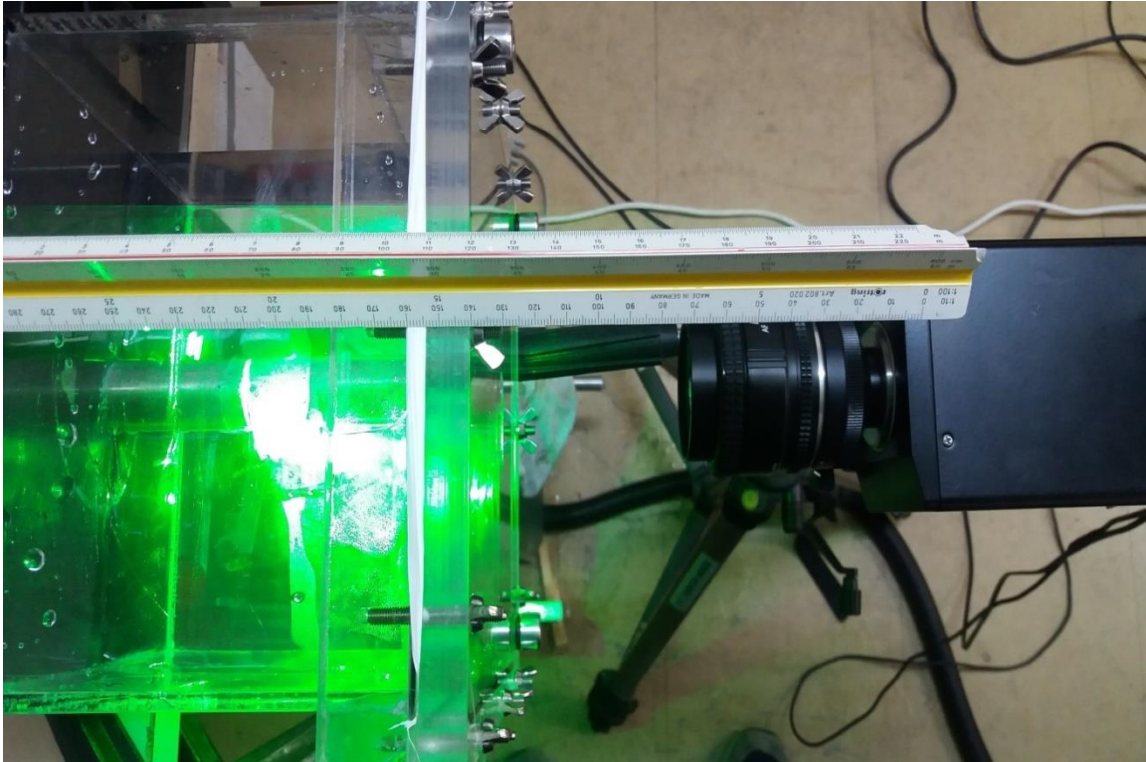
$$\hat{\theta} = \cos^{-1}\left(\frac{\overrightarrow{KB} * \overrightarrow{BM}}{|\overrightarrow{KB}| * |\overrightarrow{BM}|}\right) \quad (47)$$

Όπως φαίνεται και στο σχήμα και με τη χρήση του τύπου του ημιτόνου και των συνημιτόνων έχω

$$\left. \begin{aligned} \cos \theta &= \frac{u_{\theta 1}}{u} \\ \sin \theta &= \frac{u_{\theta 2}}{v} \end{aligned} \right\} \mathbf{U}_{\theta} = u \cos \theta + v \sin \theta \quad (48)$$

5.6 Περίπτωση 1^η : Περιστροφή κυλίνδρου με untreated COP επιφάνεια

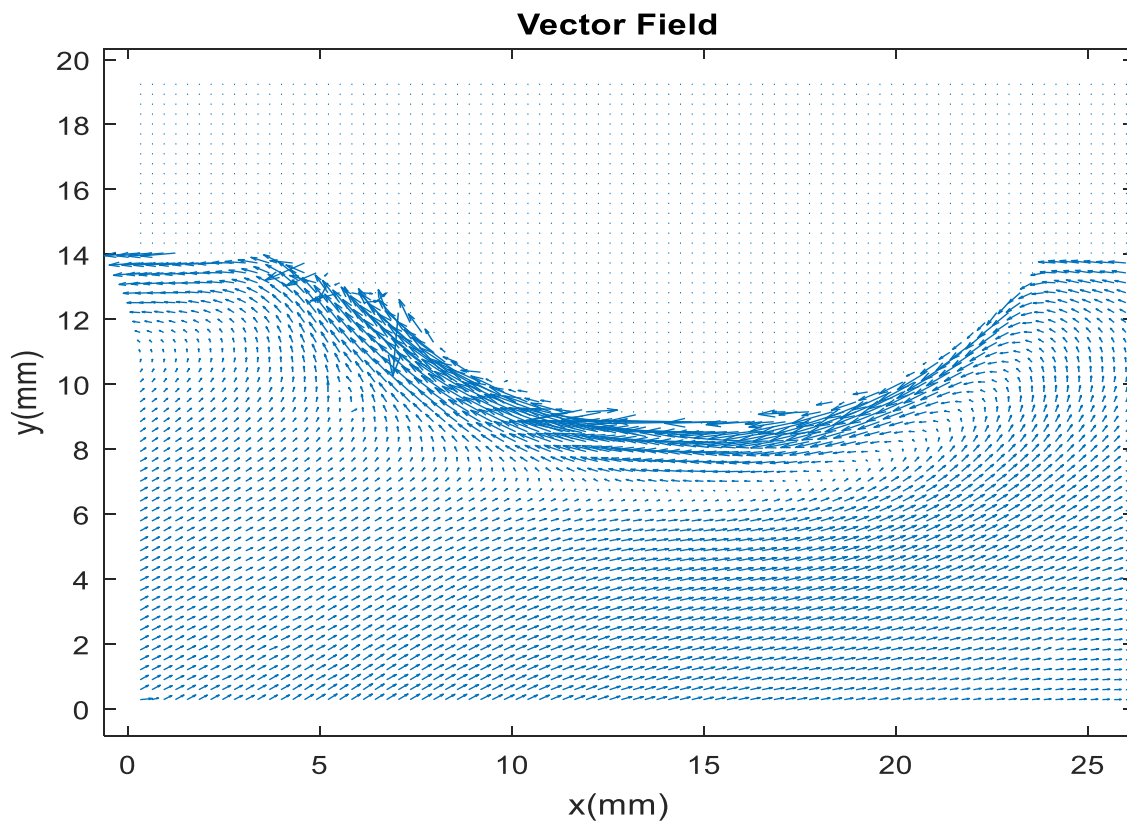
Αφού επομένως προσδιορίσαμε τη θέση του κέντρου του κυλίνδρου για κάθε μια από τις τέσσερις περιπτώσεις ξεκινάμε την ανάλυση της untreated επιφάνειας με ακτίνα $R=12.6\text{mm}$ όπου και πάρθηκαν 500 μετρήσεις σε χρονική διάρκεια 104sec. Στη συγκεκριμένη περίπτωση ο κύλινδρος περιστρέφεται με τον αριθμό των σταθερών στροφών του παραπάνω πίνακα. Η κάμερα ευθυγραμμίστηκε με τον άξονα περιστροφής του κυλίνδρου και τοποθετήθηκε σε απόσταση 8cm από το plexiglass της δεξαμενής όπως φαίνεται και στη παρακάτω Εικόνα 35, απόσταση η οποία και διατηρήθηκε για τις υπόλοιπες περιπτώσεις που μελετήθηκαν.



Εικόνα 35. Ευθυγράμμιση της κάμερας με τον περιστρεφόμενο κύλινδρο.

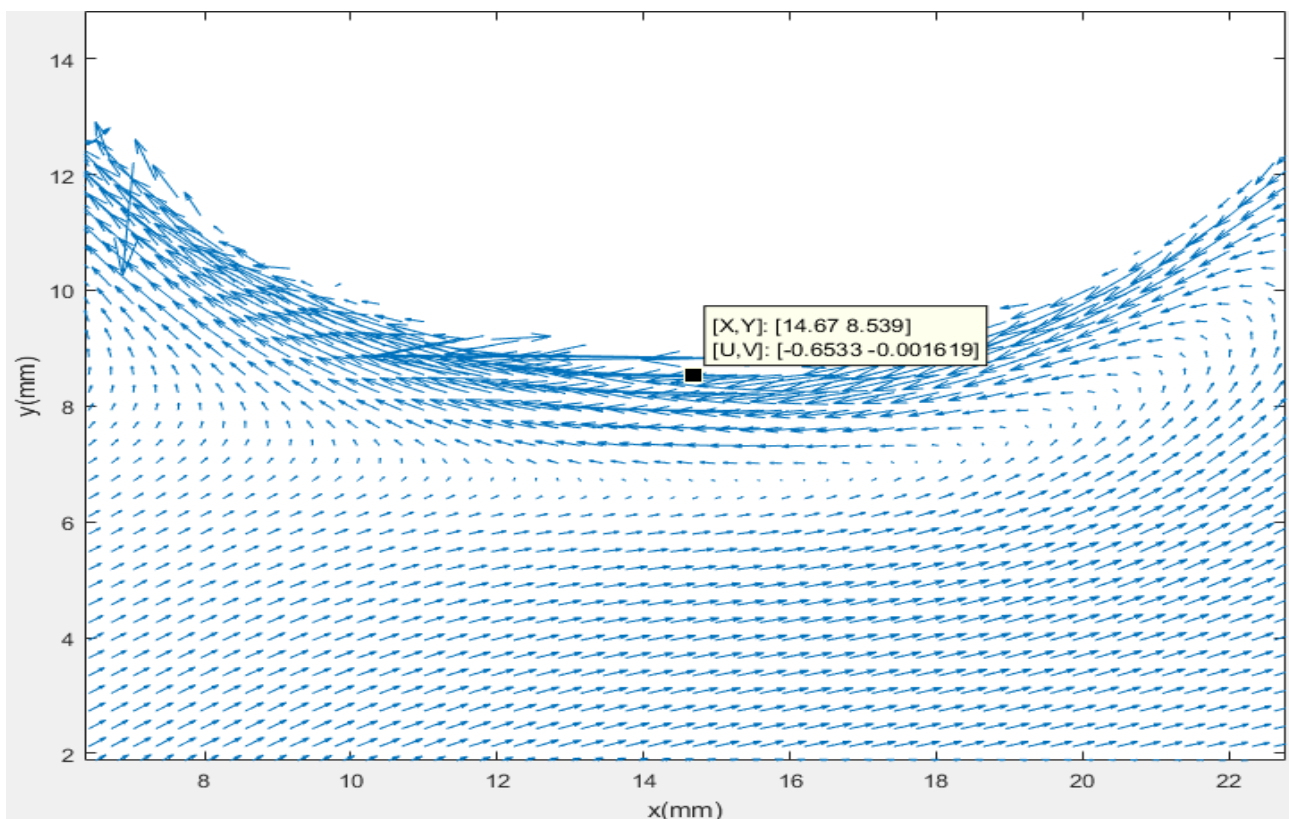
Οι εικόνες που καταγράφηκαν από την αερόψυκτη κάμερα CCD αποθηκεύτηκαν στο λογισμικό INSIGHT 4G όπου και έγινε η επεξεργασία τους για τις διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής και το χρόνο ακτινοβολίας της δέσμης του laser. Το συγκεκριμένο λογισμικό παρέχει ένα πλήρη έλεγχο της διεργασίας από το χρήστη επιτρέποντας τη συλλογή των δεδομένων καθώς και την αναλύση και την εμφάνιση των αποτελεσμάτων κατά τη διάρκεια διεξαγωγής του πειράματος. Επομένως είναι κατάλληλο για ανάλυση των εικόνων με τη μέθοδο της ετεροσυσχέτισης για την απεικόνιση του πεδίου ταχυτήτων σε μια επίπεδη περιοχή της ροής. Ταυτόχρονα παρέχει και τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει και το μέγεθος του πλέγματος αλλά και τη περιοχή πάνω στα οποία θα διεξαχθεί η ανάλυση των αποτελεσμάτων. Στη παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχθηκε οι κόμβοι του πλέγματος να είναι 85×63 το οποίο και συνεπάγεται αριθμό εξεταζόμενων κόμβων $K=5355$. Το χωρίο ανάλυσης επιλέχθηκε να είναι τετραγωνικό με διαστάσεις 32×32 pixels.

Το πρώτο διάγραμμα (Εικόνα 36) αφορά το πεδίο διανυσμάτων της ταχύτητας για 10 RPM και στο οποίο βλέπουμε ότι τα διανύσματα της ταχύτητας κοντά στο στερεό όριο του κυλίνδρου ακολουθούν τη φορά περιστροφής του κυλίνδρου (ωρολογιακή) ενώ όσο μετακινούμαστε κατά τον άξονα των τεταγμένων (Y) αλλάζουν διεύθυνση πηγαίνοντας προς τα θετικά του άξονα των τεταγμένων (X). Για μια κατακόρυφη περιοχή σχετικά κοντά στο στερεό περιστρεφόμενο όριο του κυλίνδρου, σχηματικά από τα 7.6mm - 8.5mm , παρατηρούμε ότι η κατά τον άξονα των (X) φορά της ταχύτητας (u) έχει διαρκώς αρνητικές τιμές ενώ η κατά τον άξονα (Y) ταχύτητα (v) ξεκινώντας από τα δεξιά έχει αρνητική τιμή και σε κάποιο σημείο ($X=14,67\text{mm}$) ξεκινάει και λαμβάνει θετικές τιμές.



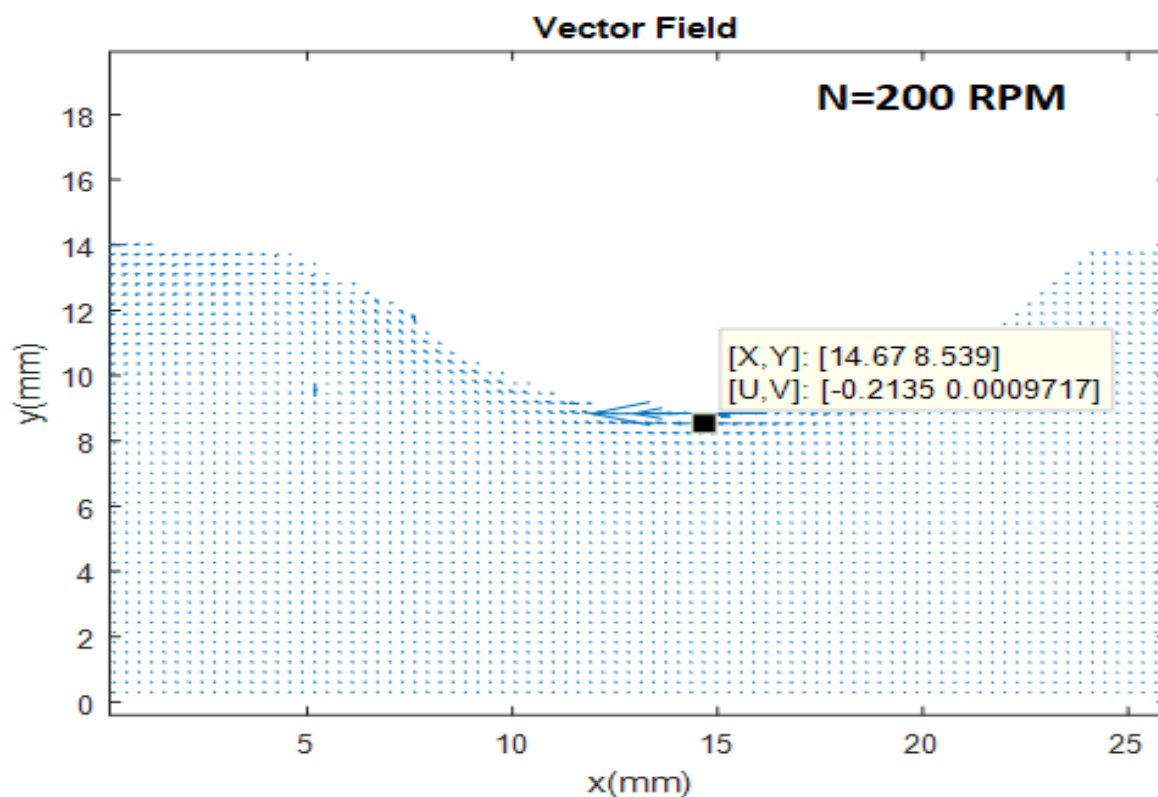
Εικόνα 36. Διανυσματικό πεδίο ταχύτητας του ρευστού για 10 RPM του περιστρεφόμενου κυλίνδρου.

Εστιάζοντας ακόμα περισσότερο στη περιοχή κοντα στο κύλινδρο Εικόνα 37 παρατηρούμε τη φορά που έχουν τα διανύσματα της ταχύτητας για το πεδίο της ροής. Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός όπως φαίνεται και από τη τοποθέτηση του data cursor πάνω στο πεδίο της ροής και πολύ κοντα στερεό όριο του κυλίνδρου ότι η ταχύτητα $u = -0.6533 \text{ m/s}$ ή αλλιώς είναι το 65.3% της $U = \omega \cdot R$, νούμερο το οποίο δηλώνει ότι το ρευστό κόντα στο περιστρεφόμενο όριο του κυλίνρου συμπαρασύρεται από τη κινούμενη επιφάνεια σε μεγάλο βαθμό.

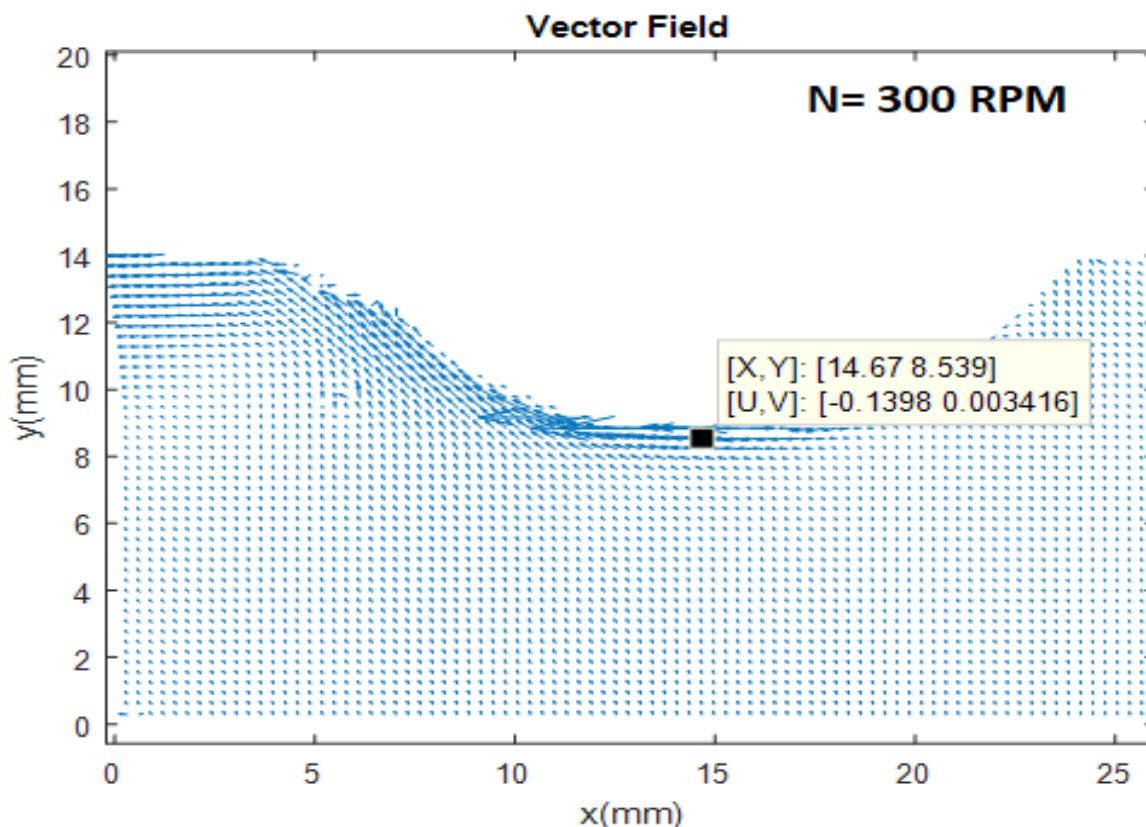


Εικόνα 37. Εστιασμένο διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων του ρευστού για 10 RPM περιστροφής του κυλίνδρου.

Αυξάνοντας τη ταχύτητα περιστροφής του κυλίνδρου παρατηρούμε (Εικόνα 38, Εικόνα 39) ότι το προφίλ των διανυσμάτων της ταχύτητας του ρευστού 'ομαλοποιείται' παρουσιάζοντας αξιοσημείωτες τιμές ταχύτητας μόνο κοντά στο στερεό όριο που υπάρχει επαφή με τον περιστρεφόμενο κύλινδρο και όσο προχωράμε προς τα κάτω η ταχύτητα μειώνεται σημαντικά. Ένα επόμενο συμπέρασμα που μπορεί να διεξαχθεί από τις παρακάτω εικόνες για τις διάφορες ταχύτητες περιστροφής του κυλίνδρου είναι το γεγονός ότι όσο αυξάνονται οι στροφές περιστροφής του κυλίνδρου η ταχύτητα του ρευστού κοντά στο στερεό όριο δείχνει να μειώνεται όπως παρατηρούμε και στις δυο παρακάτω εικόνες.

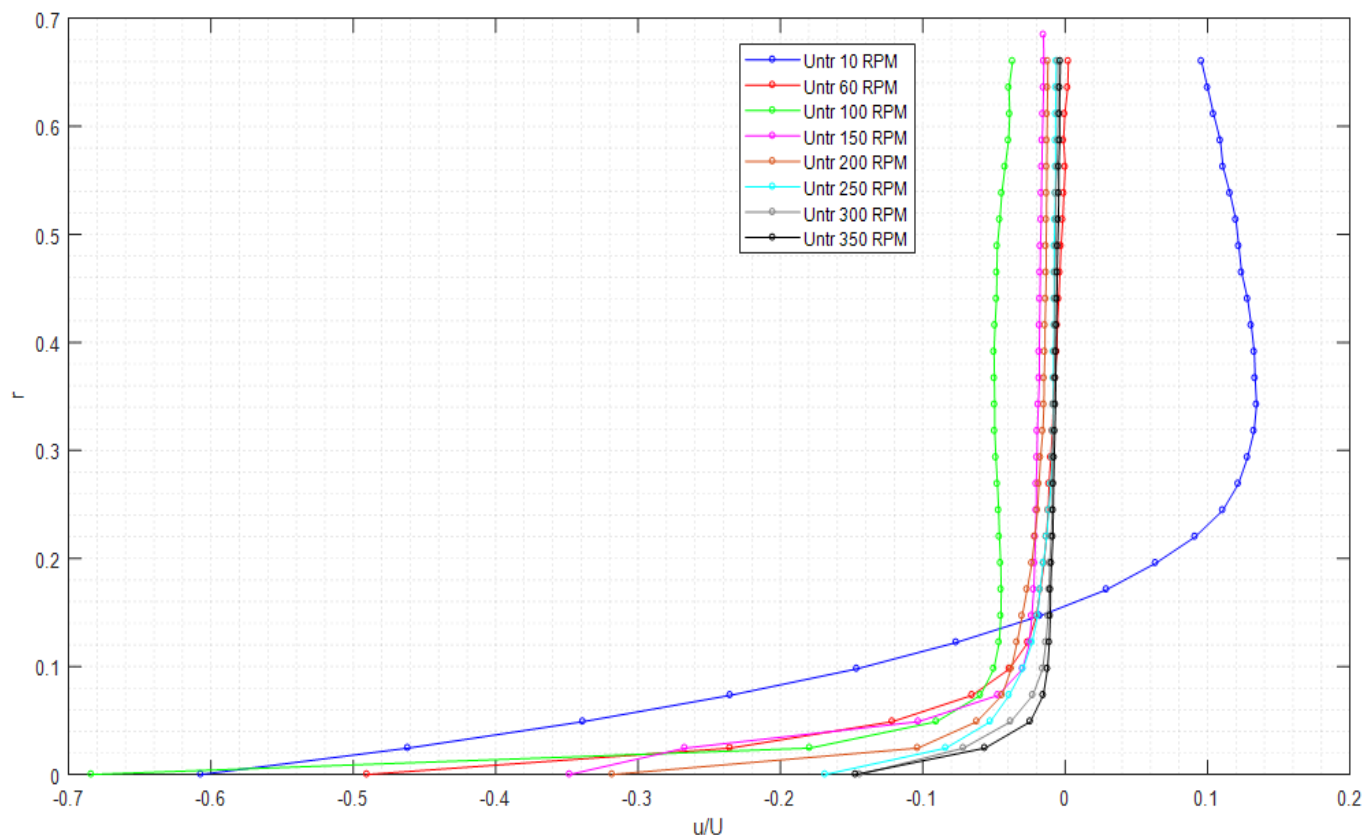


Εικόνα 38. Διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων για 200 RPM.



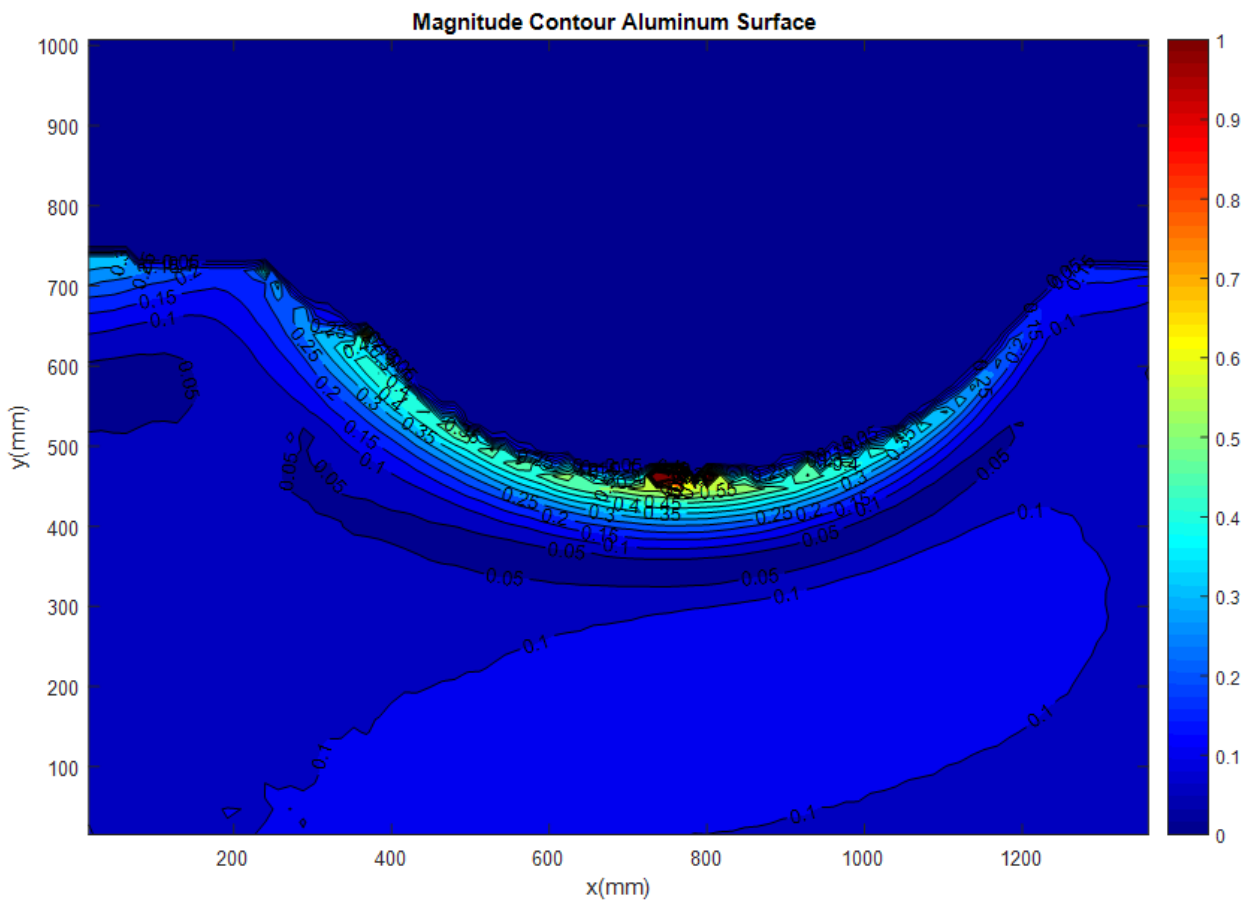
Εικόνα 39. Διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων για 300 RPM.

Στο παρακάτω διάγραμμα Εικόνα 40 παρατηρούμε την εξέλιξη της αδιάστατης ταχύτητας u συναρτήσει της αδιάστατης απόστασης από τον κύλινδρο r για την untreated επιφάνεια για το εξεταζόμενο εύρος στροφών. Η δημιουργία του διαγράμματος προέκυψε για όλες τις ταχύτητες u που παρατηρήθηκαν, ξεκινώντας από τη μεγαλύτερη που ήταν πολύ κοντά στο κύλινδρο, διατρέχοντας το πεδίο ροής κατά τον άξονα των (Y) προς το τέλος του πλέγματος. Όπως είναι εμφανές η μεγαλύτερη ταχύτητα που έχει το ρευστό κοντά στο περιστρεφόμενο κύλινδρο εμφανίζεται όταν αυτός περιστρέφεται στις 100 RPM ($\sim 70\% \omega \cdot R$) ενώ όσο μεγαλώνουν οι στροφές η ταχύτητα του συμπαρασυρόμενου ρευστού μειώνεται.

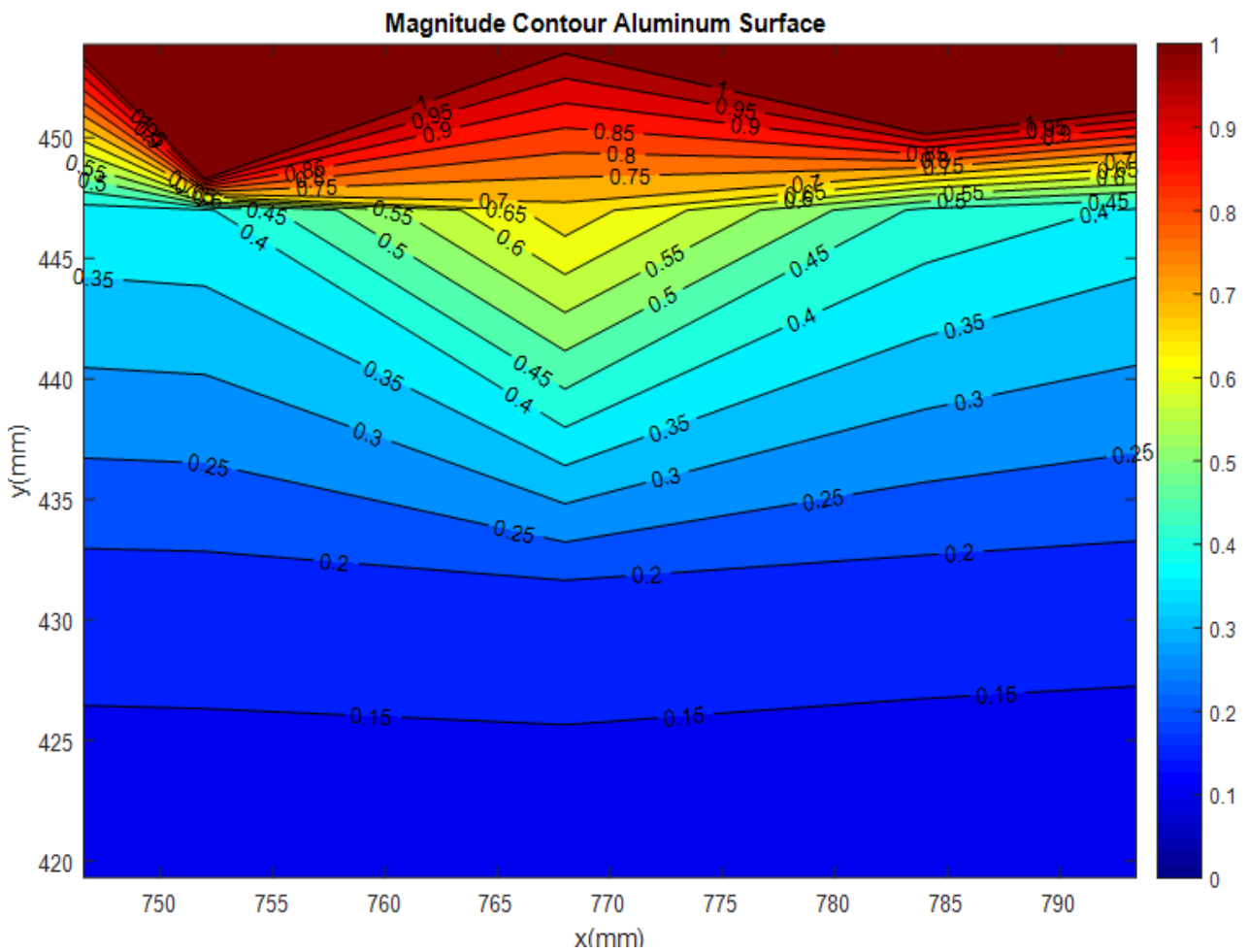


Εικόνα 40. Αδιάστατο προφίλ της ταχύτητας u συναρτήσει της απόστασης r από το στερεό όριο του κυλίνδρου για όλο το εύρος στροφών για την untreated επιφάνεια.

Στη παρακάτω Εικόνα 41 παρακολουθούμε τις ισοϋψείς καμπύλες του μέτρου της ταχύτητας για διάφορες στιβάδες του ρευστού. Όπως έγινε εμφανές και από το παραπάνω διάγραμμα του διανυσματικού πεδίου ταχυτήτων το μέτρο της ταχύτητας γίνεται μέγιστο για τα στοιχεία του ρευστού τα οποία βρίσκονται πολύ κοντά στη κινούμενη επιφάνεια του κυλίνδρου ενώ όσο απομακρυνόμαστε από αυτή το ρευστό ηρεμεί και το μέτρο της ταχύτητας μειώνεται. Μια ακόμα πιο εποπτική εικόνα της διαστρωμάτωσης της ταχύτητας εμφανίζεται αν εστιάσουμε σε μια περιοχή κοντά στο περιστρεφόμενο κύλινδρο, εικόνα η οποία και διατηρείται για το σύνολο των εξεταζόμενων στροφών του κυλίνδρου Εικόνα 42.



Εικόνα 41. Ισοϋψείς καμπύλες ταχύτητας για το ρευστό.

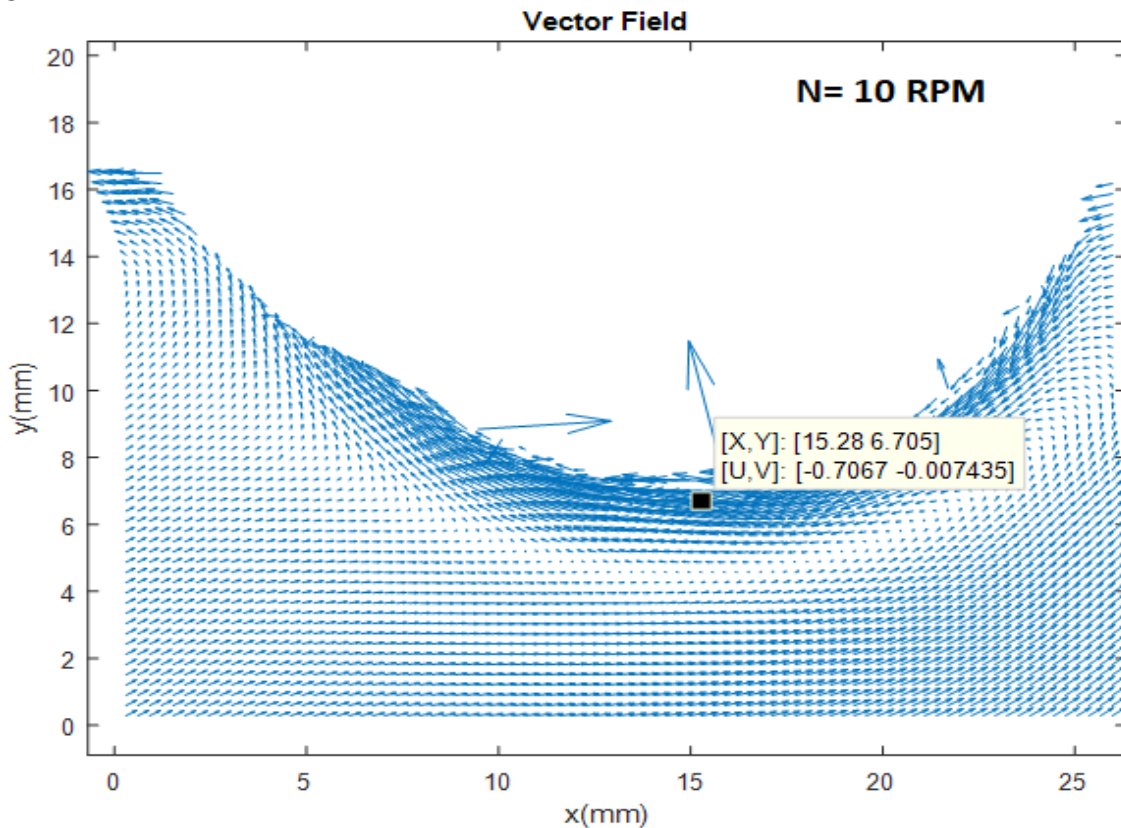


Εικόνα 42. Εστιασμένες ισοϋψείς καμπύλες ταχύτητας για το ρευστό.

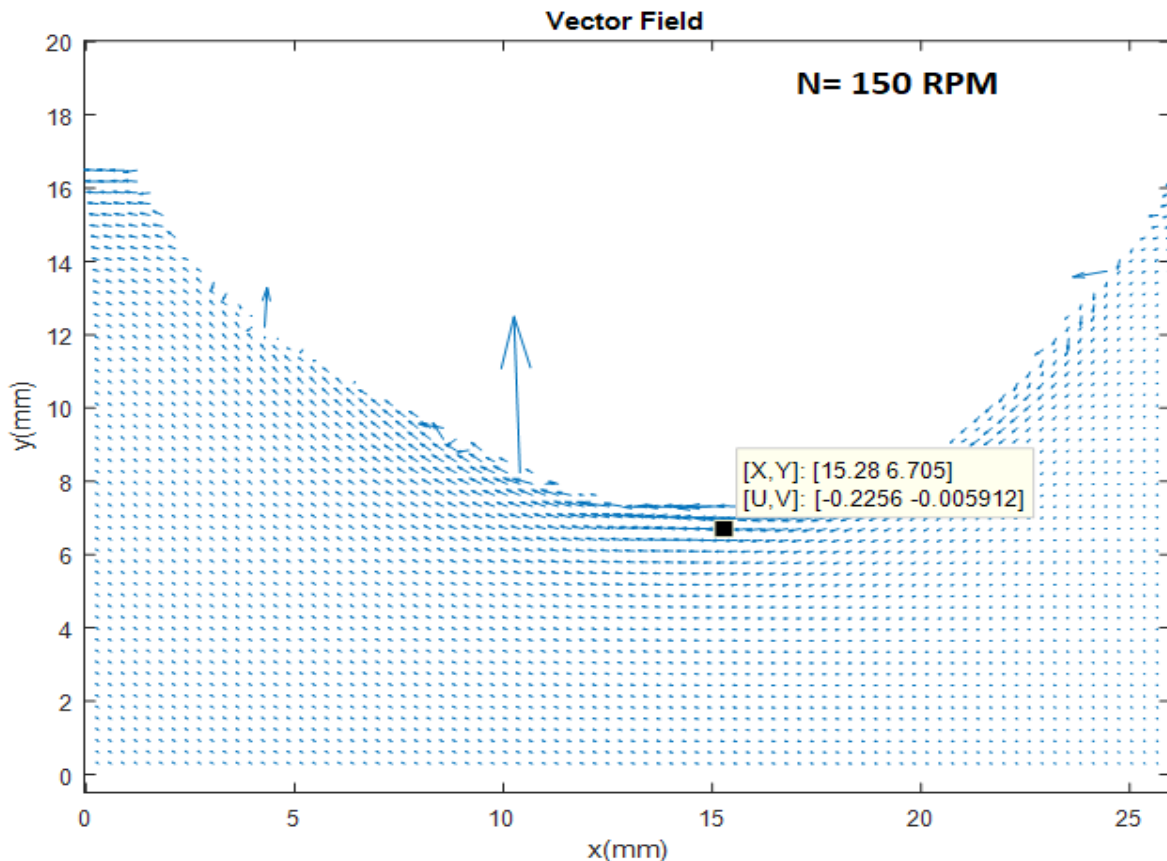
5.7 Περίπτωση 2^η :Περιστροφή κυλίνδρου με Υπερυδρόφοβη επιφάνεια

Η κάμερα παρέμεινε ευθυγραμμισμένη με τον άξονα περιστροφής του κυλίνδρου και τοποθετήθηκε σε απόσταση 8cm από το plexiglass της δεξαμενής. Η υπερυδρόφοβη επιφάνεια κολλήθηκε στο μέσο του κυλίνδρου από αλουμίνιο, μήκους 15cm, και είχε διαστάσεις 5x8cm αυξάνοντας την ακτίνα του κυλίνδρου σε $R=12.6$ mm και πάρθηκαν 500 μετρήσεις σε διάρκεια 104 seconds.

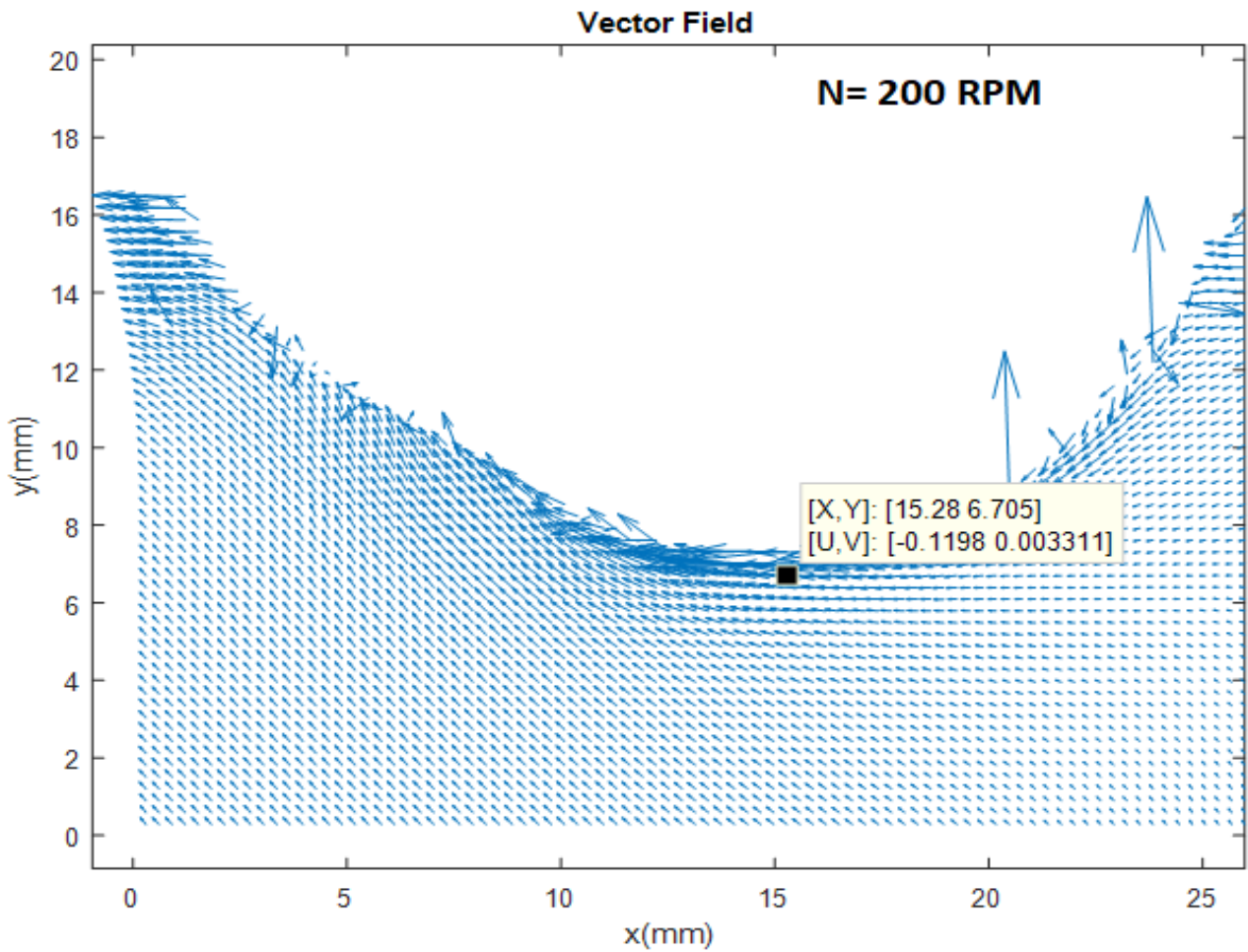
Το προφίλ της ταχύτητας των διανυσμάτων του πεδίου της ροής διαμορφώθηκε με τον εξής τρόπο για τις διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής του κυλίνδρου όπως φαίνεται και Εικόνα 43, Εικόνα 44, Εικόνα 45



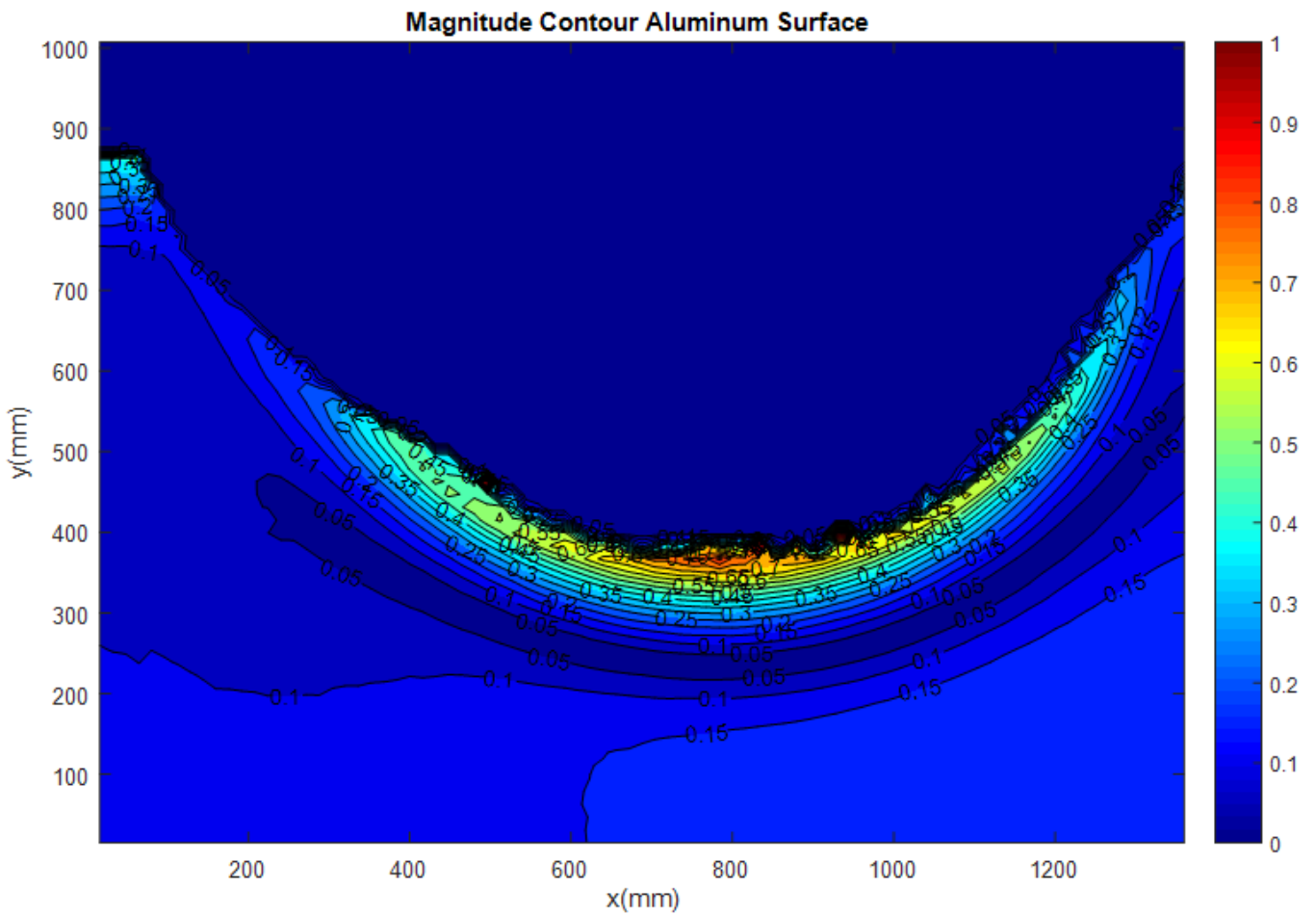
Εικόνα 43. Διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων για υπερυδρόφοβη επιφάνεια στις 10 RPM.



Εικόνα 44. Διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων για υπερυδρόφοβη επιφάνεια στις 150 RPM.



Εικόνα 45. Διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων για υπερυδροόφοβη επιφάνεια στις 200 RPM.

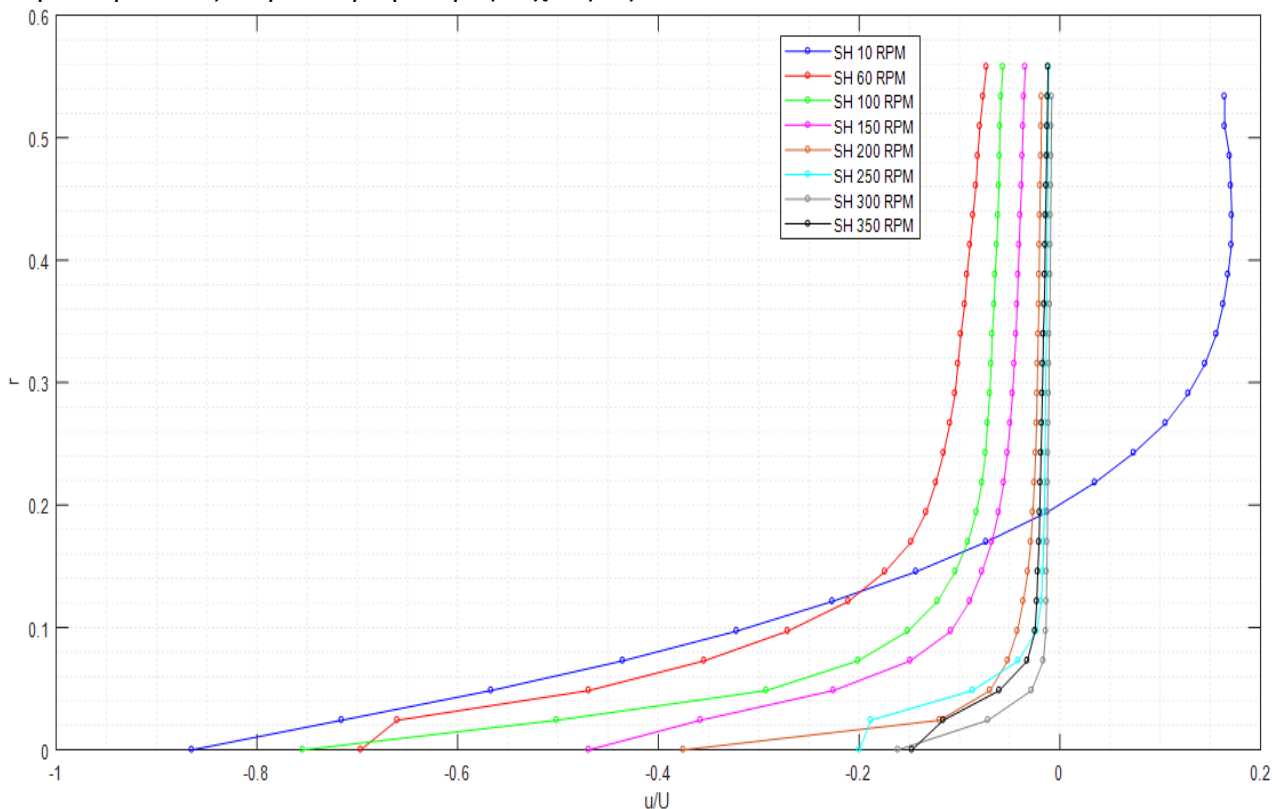


Εικόνα 46. Ισοϋψείς καμπύλες του μέτρου της ταχύτητας του ρευστού για τη περίπτωση της υπερυδροόφοβης επιφάνειας.

Στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 47) παρατηρούμε πως εξελίσσεται η ταχύτητα u συναρτήσει της αδιάστατης απόστασης r από το στερεό όριο του κυλίνδρου για μια υπερυδροφόβη επιφάνεια αναφορικά με ένα πλήθος διαφορετικών στροφών περιστροφής του κυλίνδρου.

Η δημιουργία του διαγράμματος προέκυψε για όλες τις ταχύτητες u που παρατηρήθηκαν, επιλέγοντας η ανάλυση να ξεκινήσει από τη μεγαλύτερη ταχύτητα u που ήταν πολύ κοντά στο κύλινδρο, διατρέχοντας το πεδίο ροής κατά τον άξονα των (Y) προς το τέλος του πλέγματος.

Όπως είναι εμφανές για χαμηλότερες RPM του κυλίνδρου (10) το ρευστό παρουσιάζει μεγαλύτερη ταχύτητα κοντά στο στερεό όριο ενώ όσο αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής το ρευστό κοντά στο κύλινδρο παρουσιάζει αρκετά μικρότερες ταχύτητες.



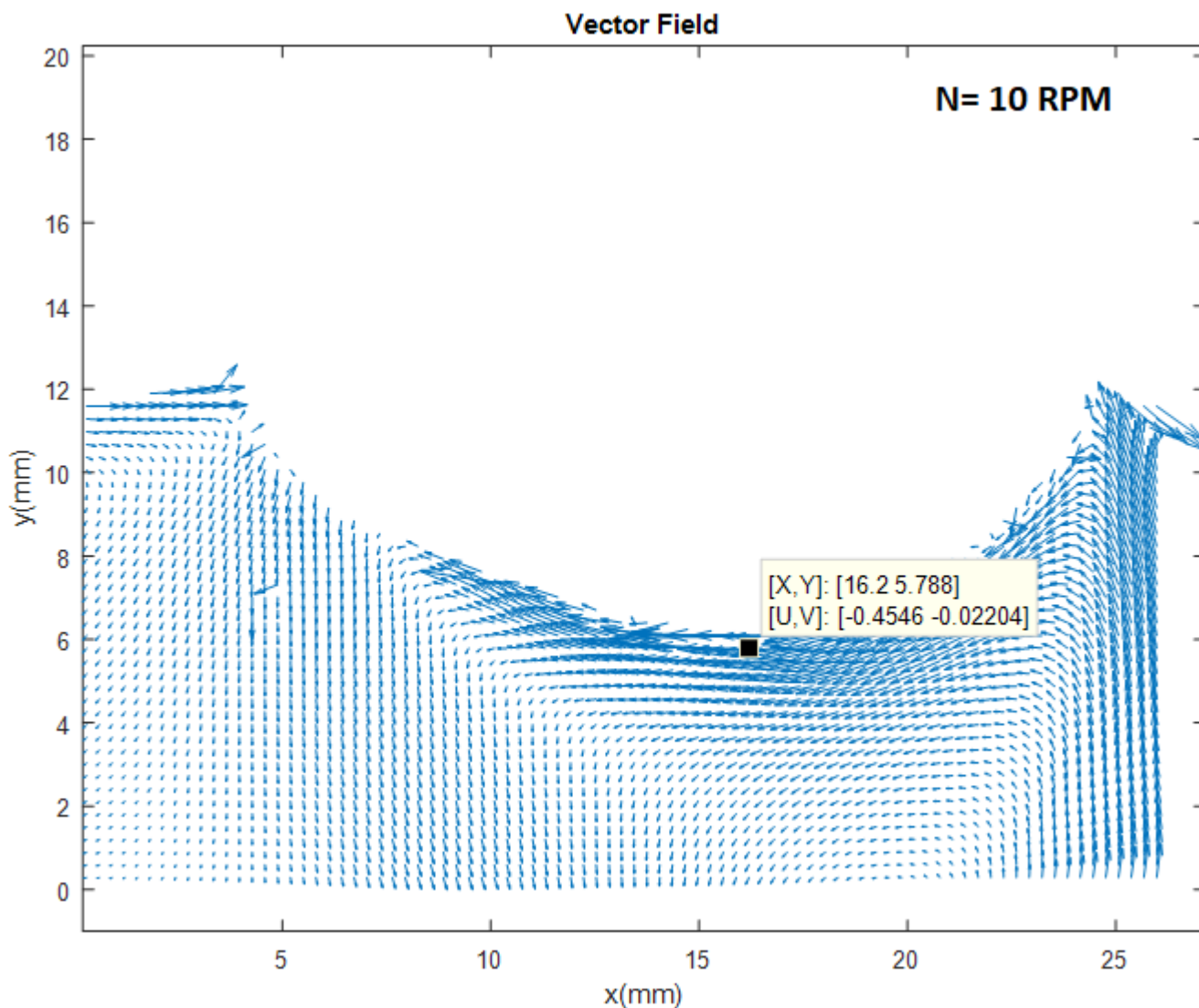
Εικόνα 47. Αδιάστατο προφίλ της ταχύτητας u συναρτήσει της απόστασης r από το στερεό όριο του κυλίνδρου για όλο το εύρος στροφών για την υπερυδροφόβη επιφάνεια.

5.8 Περίπτωση 3^η : Περιστροφή κυλίνδρου με επιφάνεια riblet

Διατηρώντας ευθυγραμμισμένη τη κάμερα με τον οριζόντιο άξονα του κυλίνδρου κολλήθηκε επιφάνεια με riblet στη μέση του κυλίνδρου, θα αναφέρεται ως 3M από εδώ και πέρα, αυξάνοντας την ακτίνα του κυλίνδρου σε $R=12.7\text{mm}$, και πάρθηκαν 500 μετρήσεις για τις ταχύτητες περιστροφής που αναφέρονται και παραπάνω. Η συγκεκριμένη περίπτωση ωστόσο παρουσιάζει μια διαφοροποίηση καθώς λόγω βλάβης του drive το οποίο ήταν συνδεδεμένο με το βηματικό κινητήρα παρέχοντας του το ηλεκτρικό σήμα ούτως ώστε να αρχίσει να περιστρέφει την άτρακτο του κυλίνδρου χρειάστηκε να αντικατασταθεί και το καινούριο που χρησιμοποιήθηκε έστρεψε το κύλινδρο με αντίθετη φορά (ανθρωλογιακά) από τις προηγούμενες δύο περιπτώσεις (untreated και υπερυδροφόβη). Ωστόσο ο κώδικας στη Matlab που παρήγαγε τα παρακάτω διαγράμματα τροποποιήθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε τα αποτελέσματα να ανάγονται στην ίδια φορά γωνιακής ταχύτητας για να έχει αξία η σύγκριση μεταξύ των επιφανειών.

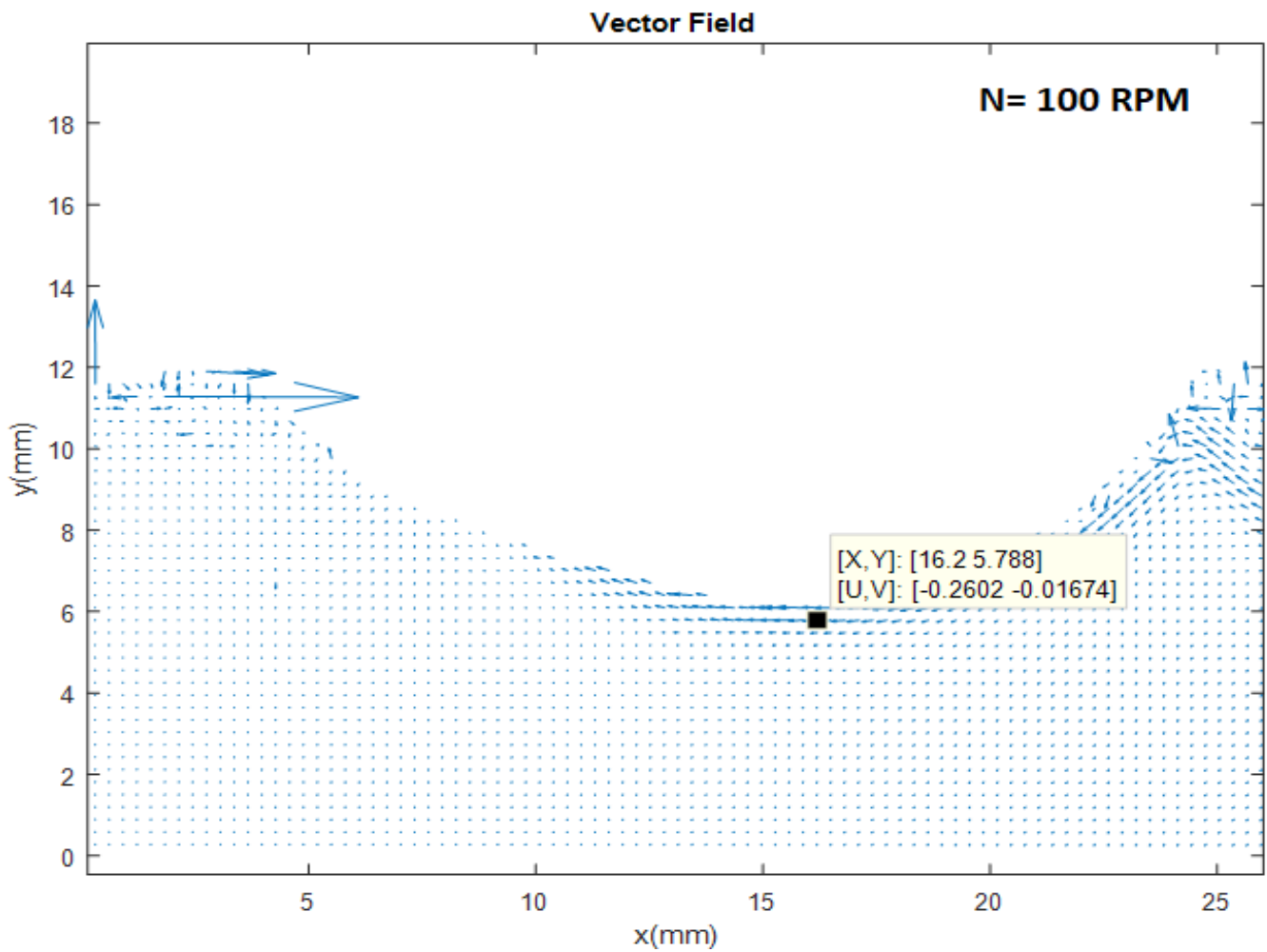
Ξεκινώντας από το διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων για 10 RPM και έχοντας ρυθμίσει το κώδικα στη Matlab να παράγει το πεδίο ταχυτήτων για ωρολογιακή φορά περιστροφής του κυλίνδρου παρατηρούμε ότι οι μεγαλύτερες τιμές για την ακτινική κατεύθυνση της ταχύτητας (u) παρατηρούνται κοντά στο στερεό όριο, με την μέγιστη να παρατηρείται στο σημείο που απεικονίζεται στο σχήμα, και όσο απομακρυνόμαστε κατακόρυφα από το κύλινδρο η ταχύτητα δείχνει να μειώνεται. Επίσης ένα επόμενο σημείο που γίνεται αντιληπτό είναι το ότι για μια 'φέτα' διανυσμάτων κοντά στο κύλινδρο τα διανύσματα δείχνουν ξεκινώντας από τα δεξιά προς τα αριστερά να κατεβαίνουν και όσο πλησιάζουμε προς το κέντρο να τείνουν ανα ανέβουν ενώ έξω από αυτή τη περιοχή δείχνουν να έχουν μια μόνιμη

τάση προς το πυθμένα της δεξιάμενης το οποίο πιθανόν να οφείλεται στη διαφορά πίεσης μεταξύ της ελεύθερης στάθμης και του πυθμένα καθώς και στο γεγονός ότι η επίδραση της βαρύτητας τείνει να κατευθύνει προς τα κάτω τα διανύσματα της ταχύτητας.

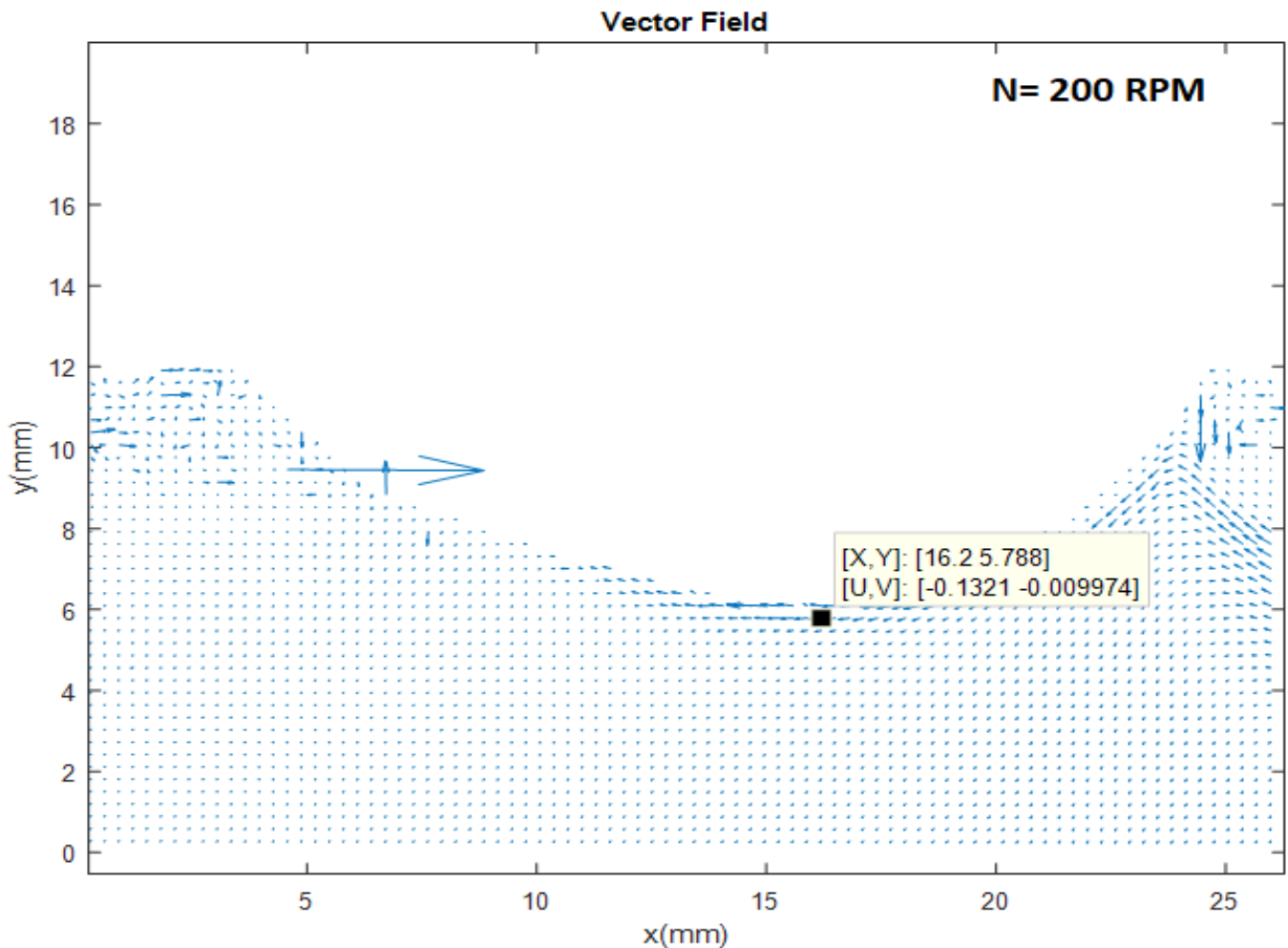


Εικόνα 48. Διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων για riblet 3M επιφάνεια στις 10 RPM.

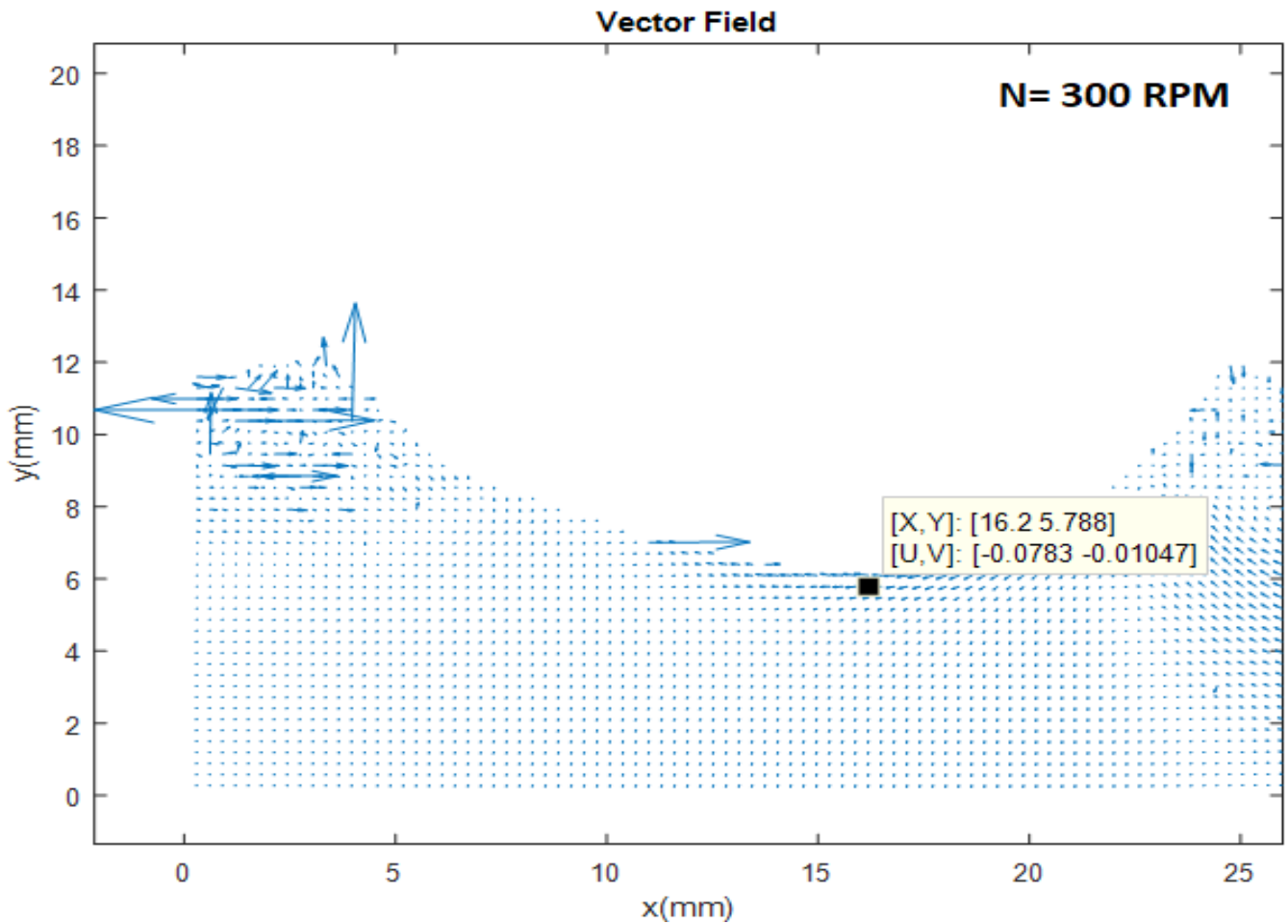
Παρατηρώντας και το πεδίο ταχυτήτων για μεγαλύτερες στροφές περιστροφής του κυλίνδρου είναι εμφανές ότι η ταχύτητα μειώνεται όσο διατρέχουμε κάθετα το κύλινδρο όπως επίσης και ότι παρατηρούνται συνολικά μικρότερες ταχύτητες καθ όλη την έκταση του αναλυόμενου πεδίου ροής.



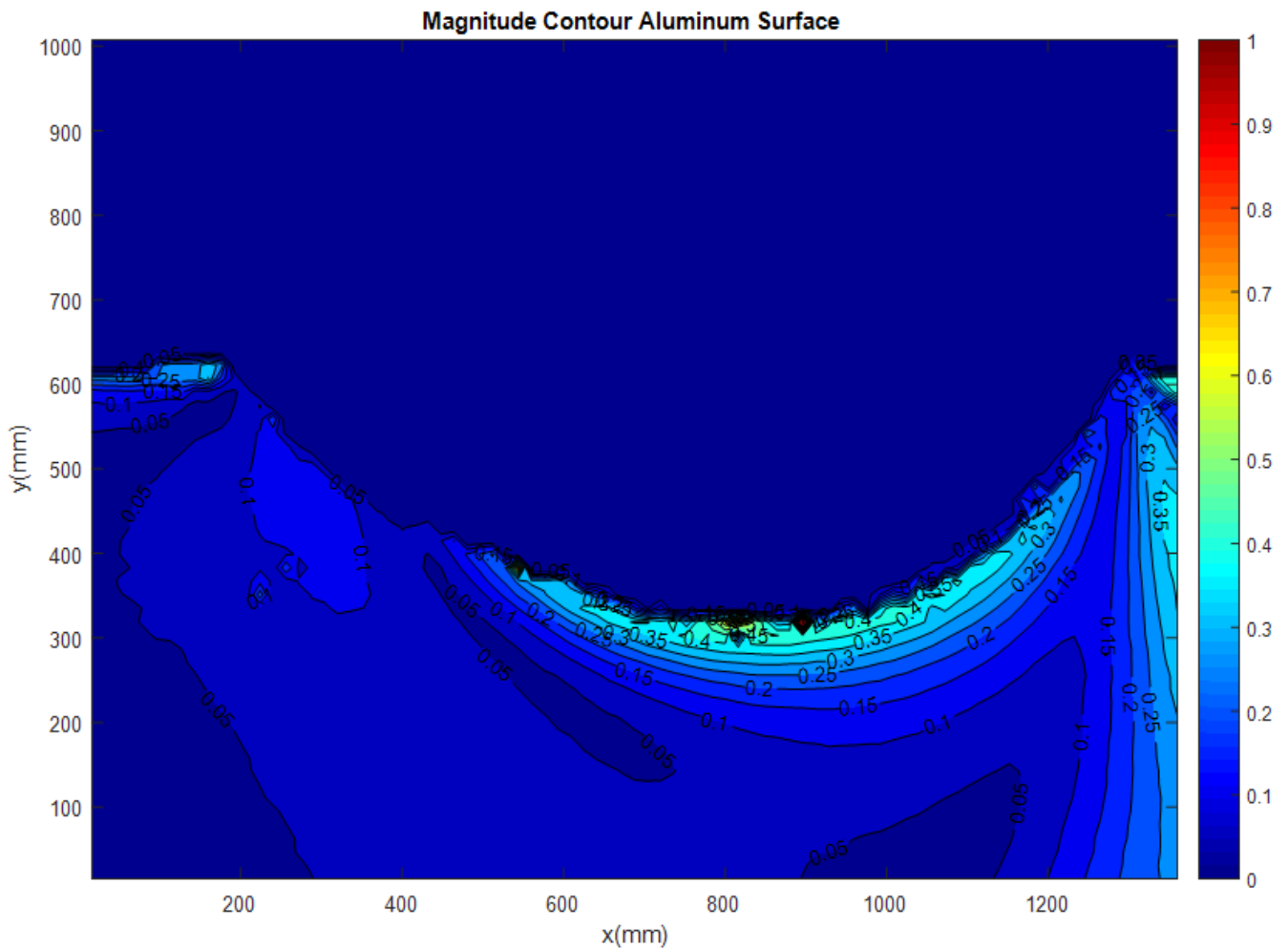
Εικόνα 49. Διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων για riblet 3M επιφάνεια στις 100 RPM.



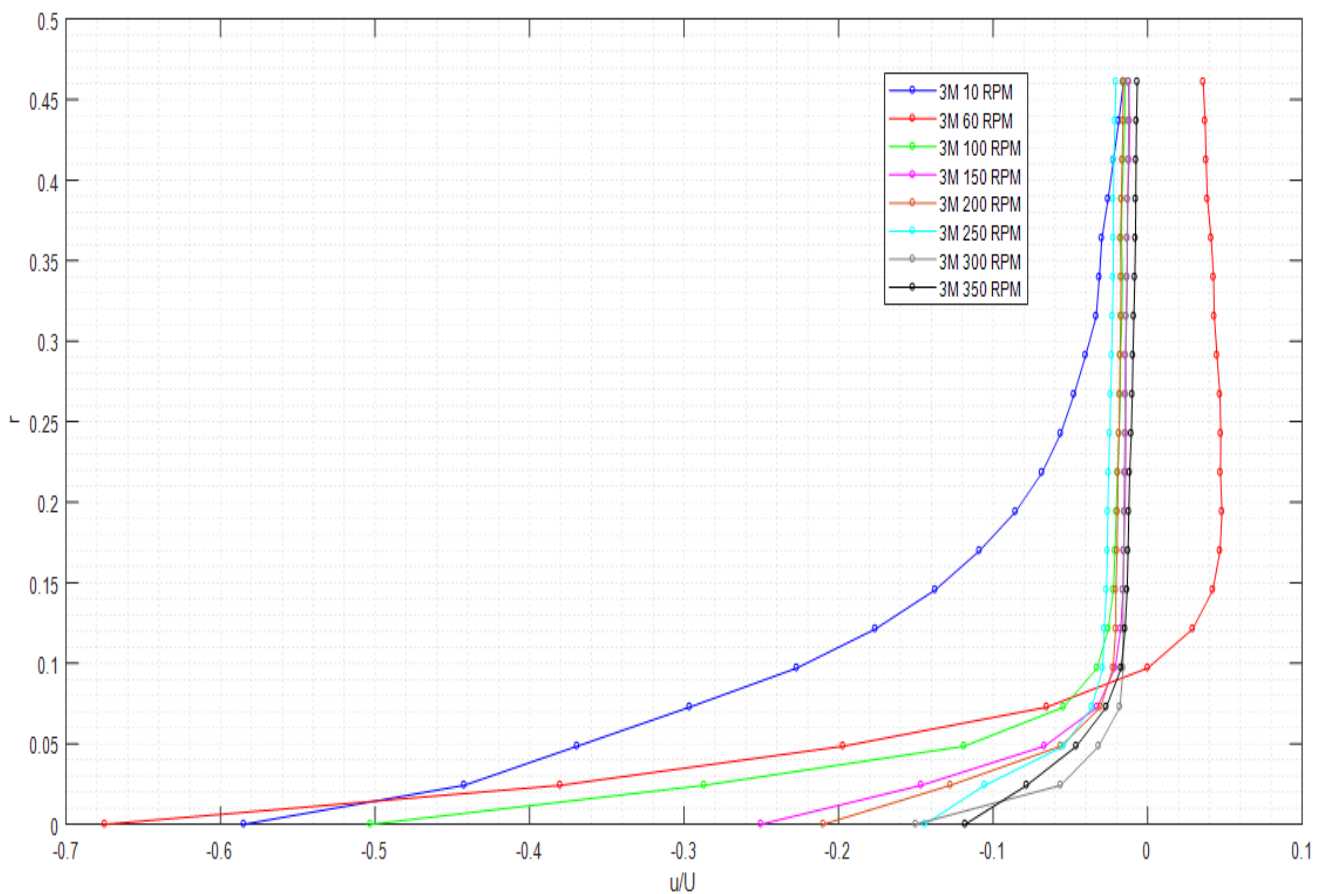
Εικόνα 50. Διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων για riblet 3M επιφάνεια στις 200 RPM.



Εικόνα 51. Διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων για riblet 3M επιφάνεια στις 300 RPM.



Εικόνα 52. . Ισοϋψείς καμπύλες του μέτρου της ταχύτητας του ρευστό για τη περίπτωση της riblet 3M επιφάνειας.

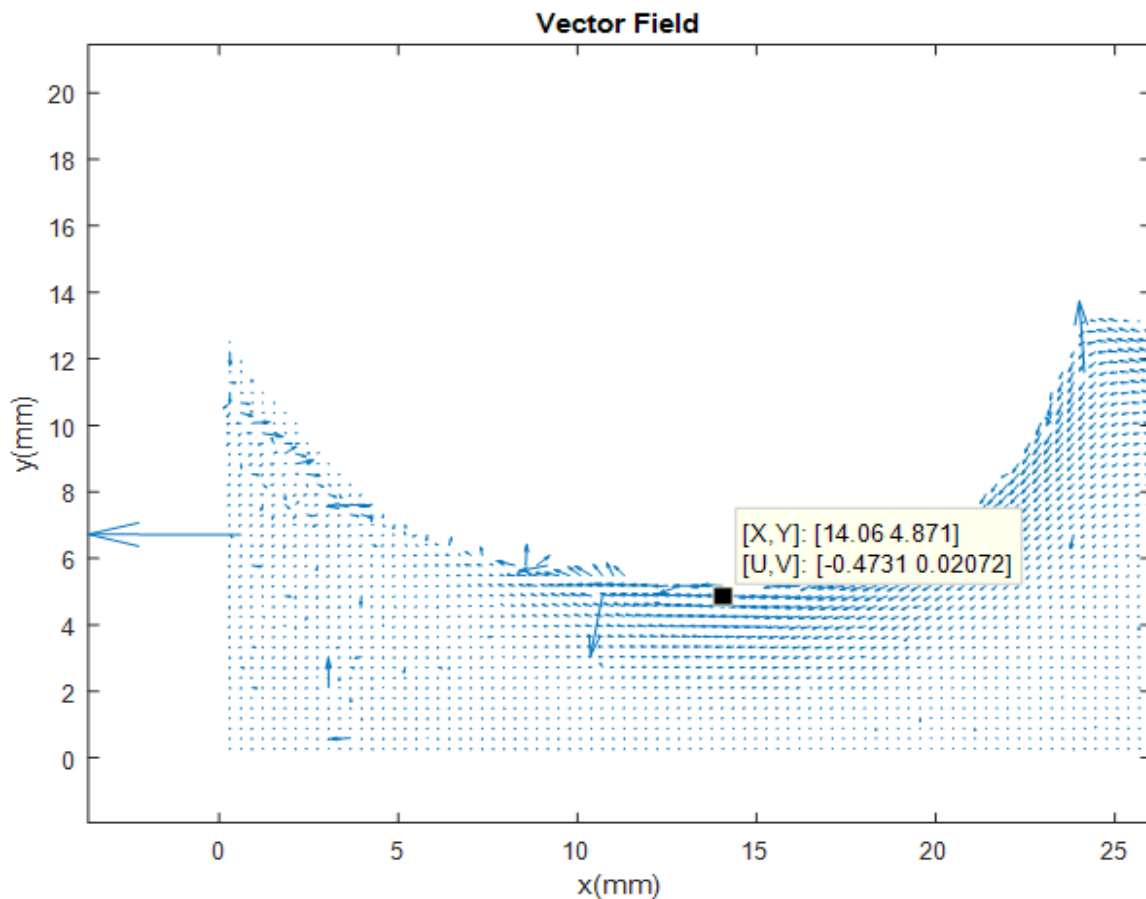


Εικόνα 53. Αδιάστατο προφίλ της ταχύτητας u συναρτήσει της απόστασης r από το στερεό όριο του κυλίνδρου για όλο το εύρος στροφών για την 3M riblet επιφάνεια.

5.9 Περίπτωση 4^η: Περιστρεφόμενος κύλινδρος με υπερυδρόφοβα επεξεργασμένη riblet επιφάνεια

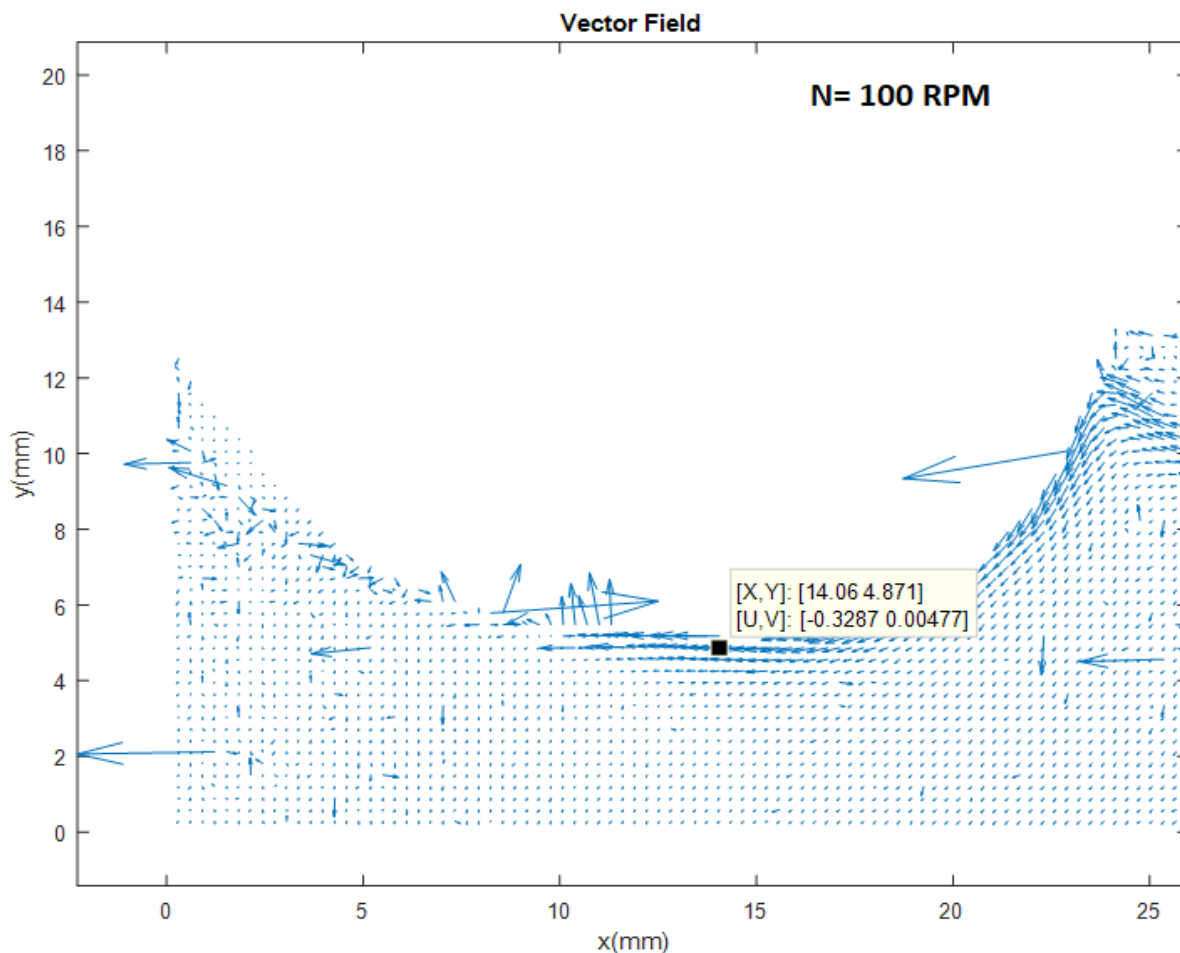
Διατηρώντας και σε αυτή τη περίπτωση ευθυγραμμισμένη τη κάμερα με τον οριζόντιο άξονα του κυλίνδρου κολλήθηκε επιφάνεια με riblet η οποία έχει υποστεί επεξεργασία για να αποκτήσει υπερυδρόφοβα χαρακτηριστικά στη μέση του κυλίνδρου, θα αναφέρεται ως 3M_SH από εδώ και πέρα, αυξάνοντας την ακτίνα του κυλίνδρου σε $R=12.7\text{mm}$, και πάρθηκαν 500 μετρήσεις για τις ταχύτητες περιστροφής που αναφέρονται και παραπάνω διάρκειας 104sec. Όπως και στη περίπτωση της απλής riblet επιφάνειας επειδή οι μετρήσεις που πάρθηκαν είχαν ανθρωπολογική φορά περιστροφής του κυλίνδρου ο κώδικας τροποποιήθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε τα διαγράμματα να διατηρούν τη φορά περιστροφής που διατηρείται και στις προηγούμενες περιπτώσεις.

Για ταχύτητα περιστροφής του κυλίνδρου 10 RPM το πεδίο ταχυτήτων όπως απεικονίζεται στο παρακάτω διάγραμμα εμφανίζει υψηλά διανύσματα ταχύτητας κοντά στο στερεό όριο, με μεγαλύτερο το σημείο που σημειώνεται πάνω στο διάγραμμα, του κυλίνδρου τα οποία αποδεικνύουν ότι το ρευστό ακολουθεί τη περιστροφική κίνηση του κυλίνδρου ενώ όσο κινούμαστε προς τα κάτω στο χωρίο ανάλυσης η ταχύτητα μειώνεται.

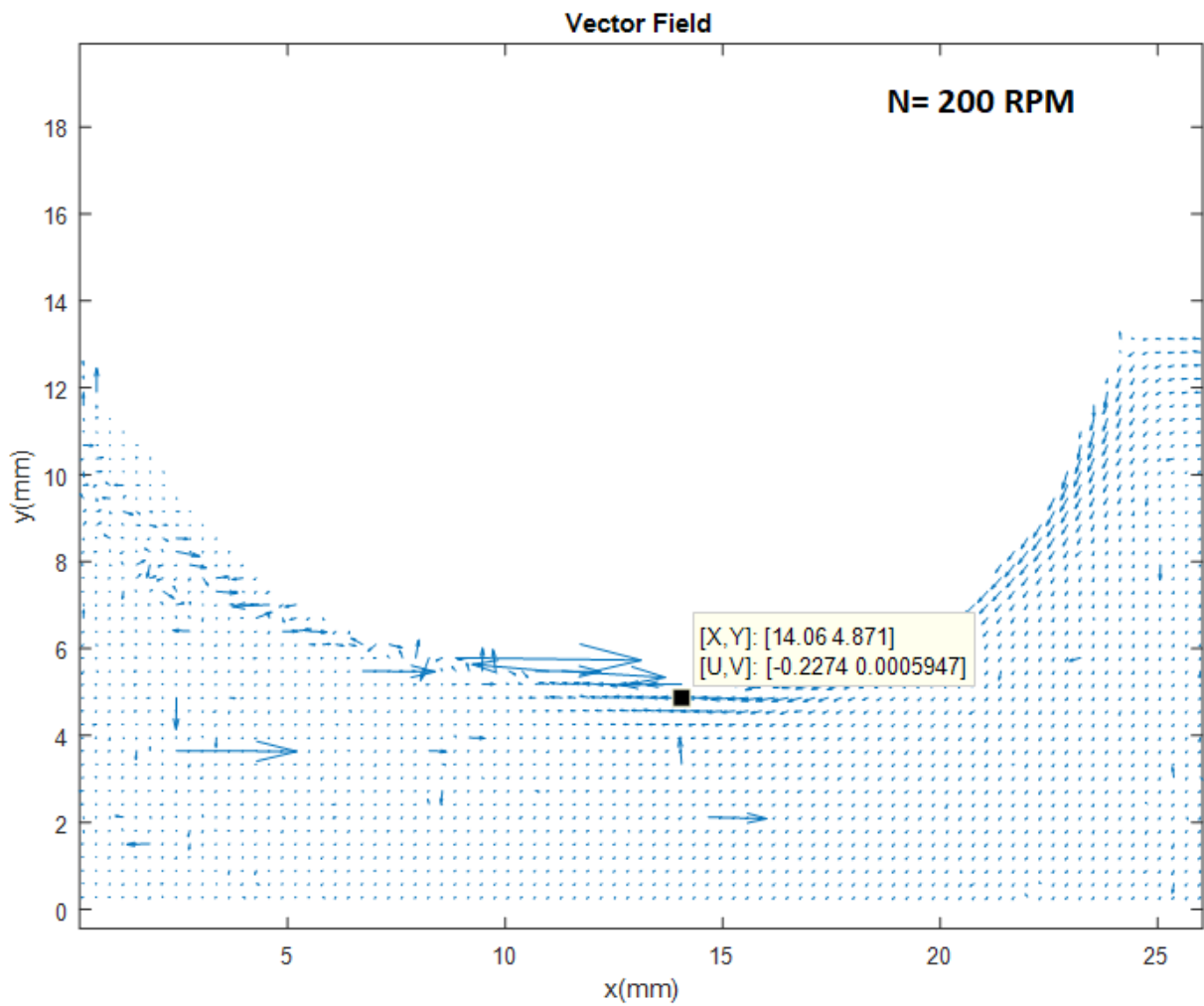


Εικόνα 54. Διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων στις 10 RPM.

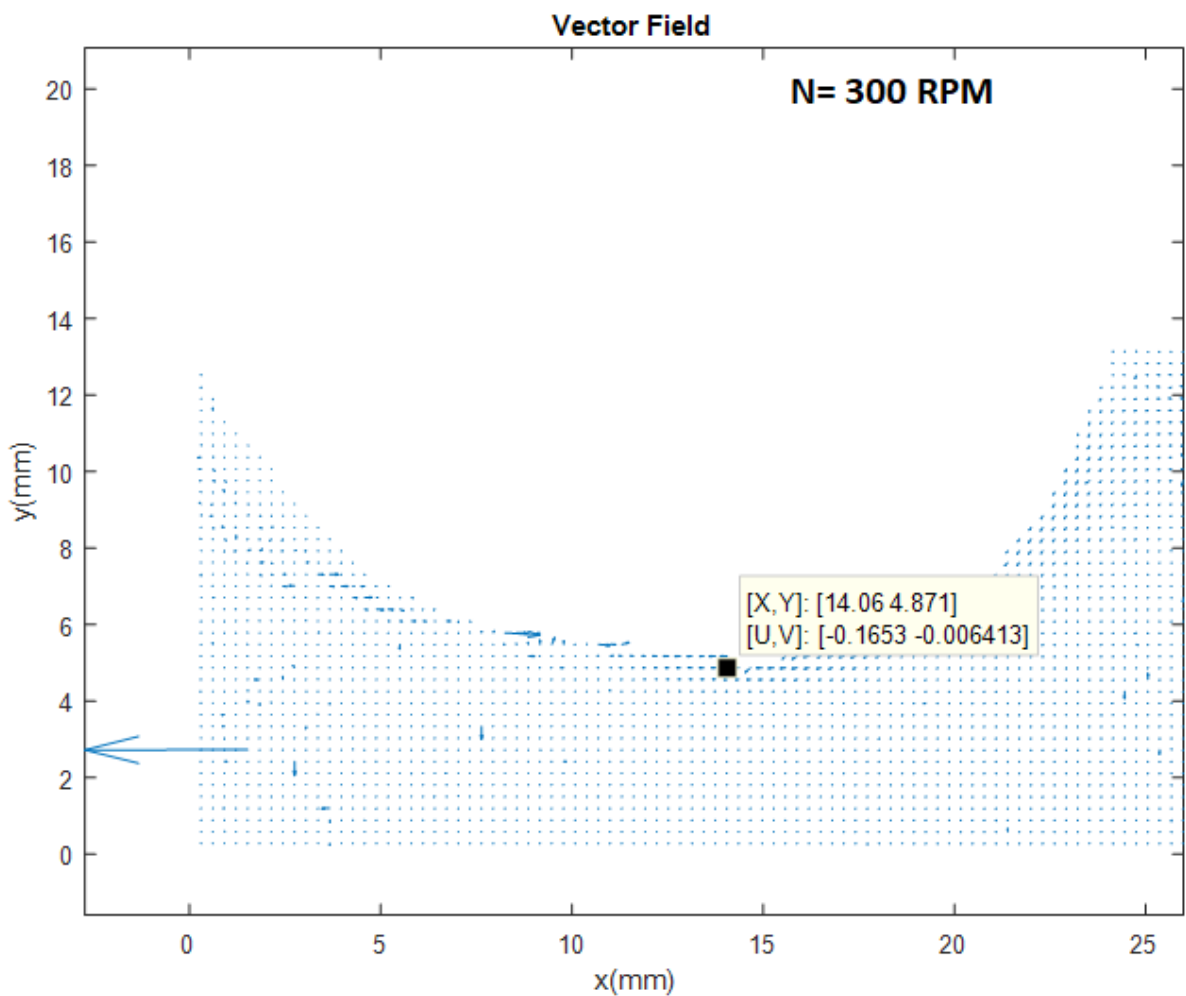
Για υψηλότερες ταχύτητες περιστροφής του κυλίνδρου παρατηρούμε ότι η ταχύτητα κοντά στο στερεό όριο του κυλίνδρου μειώνεται καθώς και το γεγονός ότι για μεγαλύτερες ταχύτητες περιστροφής όσο μετακινούμαστε προς τα αρνητικά του άξονα των (Y) η ταχύτητα μειώνεται.



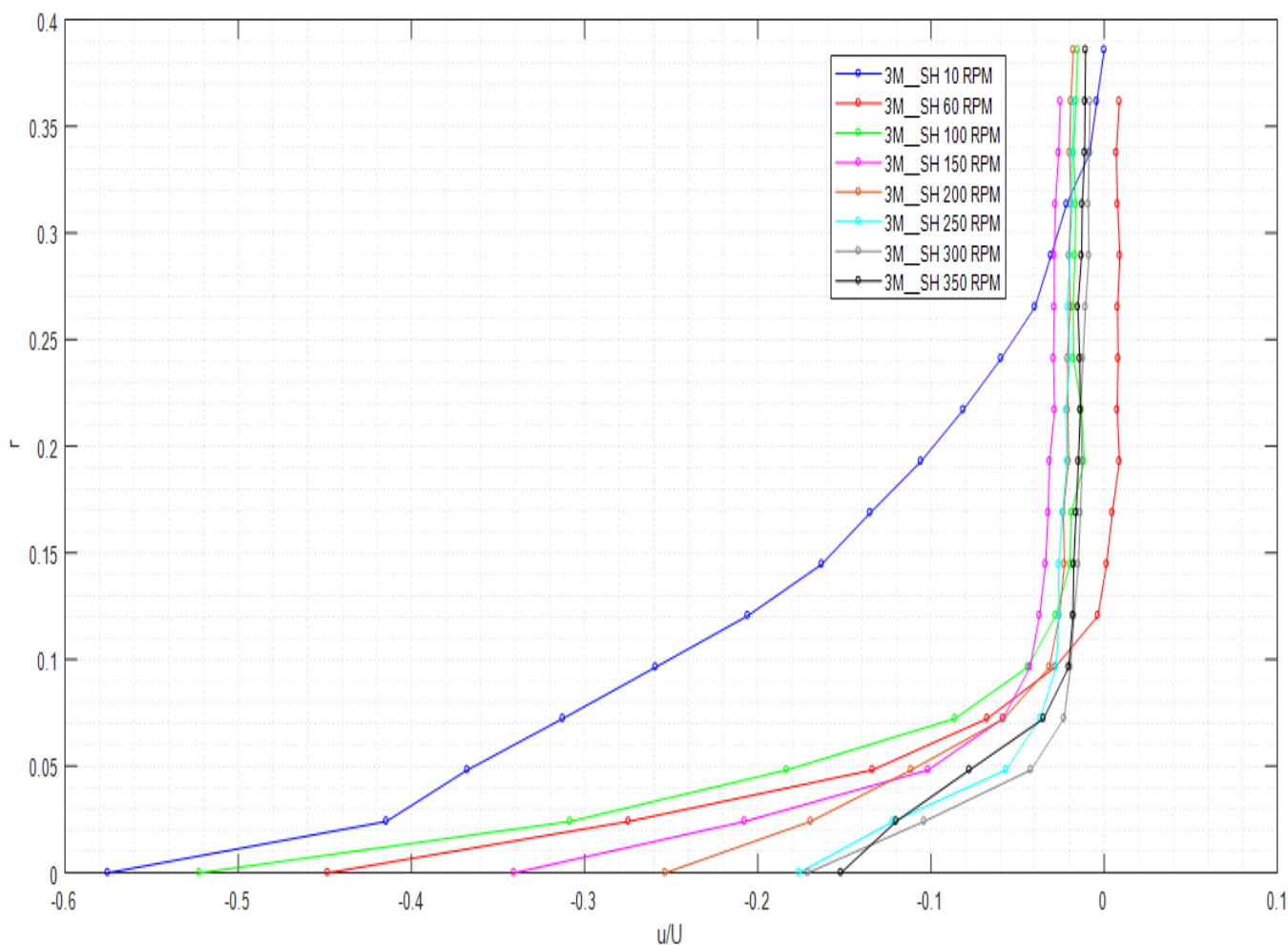
Εικόνα 55. Διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων στις 100 RPM.



Εικόνα 56. Διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων στις 200 RPM.



Εικόνα 57. Διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων στις 300 RPM.

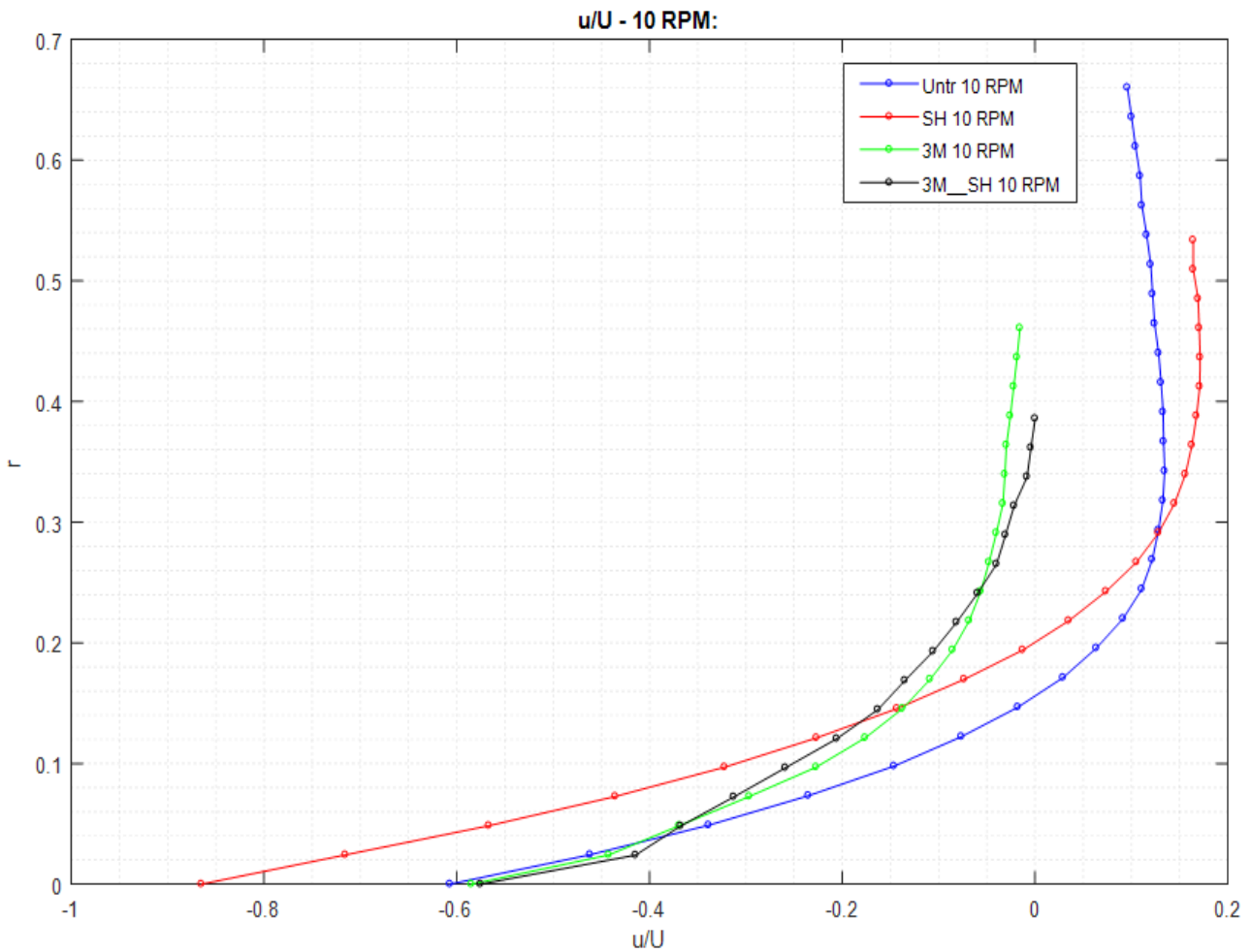


Εικόνα 58. Αδιάστατο προφίλ της ταχύτητας u συναρτήση της απόστασης r από το στερεό όριο του κυλίνδρου για όλο το εύρος στροφών για την 3M riblet υπερυδροφόβη επιφάνεια.

5.10 Συγκριτικές τιμές της αδιάστατης οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας συναρτήση της απόστασης από τον κύλινδρο ανά ταχύτητα περιστροφής για όλες τις επιφάνειες

Στο συγκεκριμένο εδάφιο θα παρουσιάσουμε πως εξελίσσεται η αδιαστατοποιημένη συνιστώσα της ταχύτητας u συναρτήση της απόστασης r από το στερεό όριο του περιστρεφόμενου κυλίνδρου. Να υπενθυμίσουμε ότι η ταχύτητα u είναι η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας που έχει ένα στοιχείο του ρευστού.

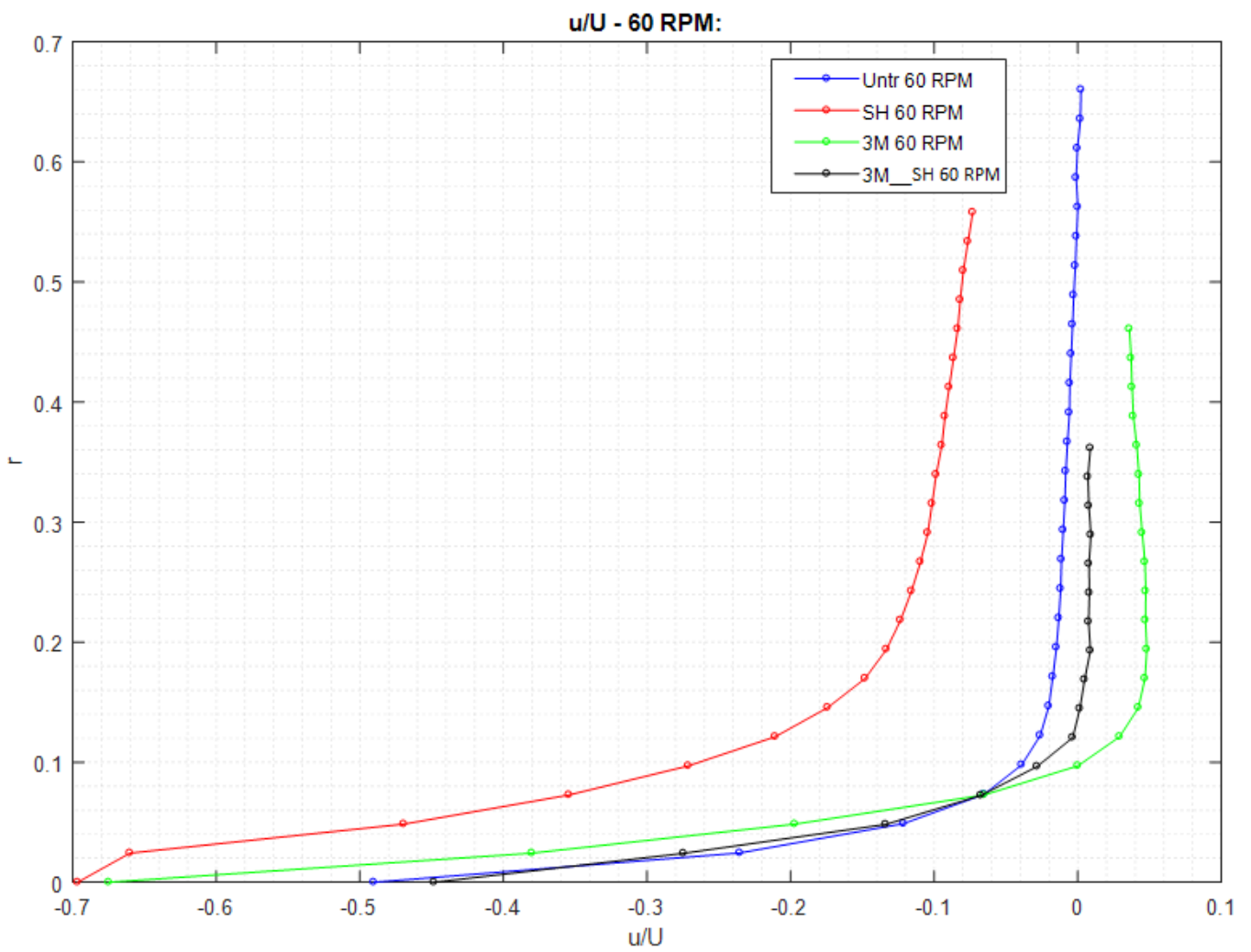
Για χαμηλές στροφές, 10 RPM συγκεκριμένα, παρατηρούμε η υπερυδροφόβη επιφάνεια είναι αυτή που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής κοντά στο στερεό όριο γεγονός το οποίο κρίνεται προβληματικό καθότι η χρησιμοποίηση της υπερυδροφόβης επιφάνειας θα έπρεπε να μειώνει τη ταχύτητα ολίσθησης του ρευστού εξαιτίας της αναμενόμενης ολίσθησης. Η επιφάνεια που παρουσιάζει τη μικρότερη ταχύτητα κοντά στο κύλινδρο είναι η επιφάνεια με riblet της 3M που έχει καταστεί υπερυδροφόβη με επεξεργασία η οποία όμως για τις μεγάλες ταχύτητες περιστροφής (>250 RPM) δείχνει να χάνει αυτή της την ιδιότητα συγκριτικά με την untreated.



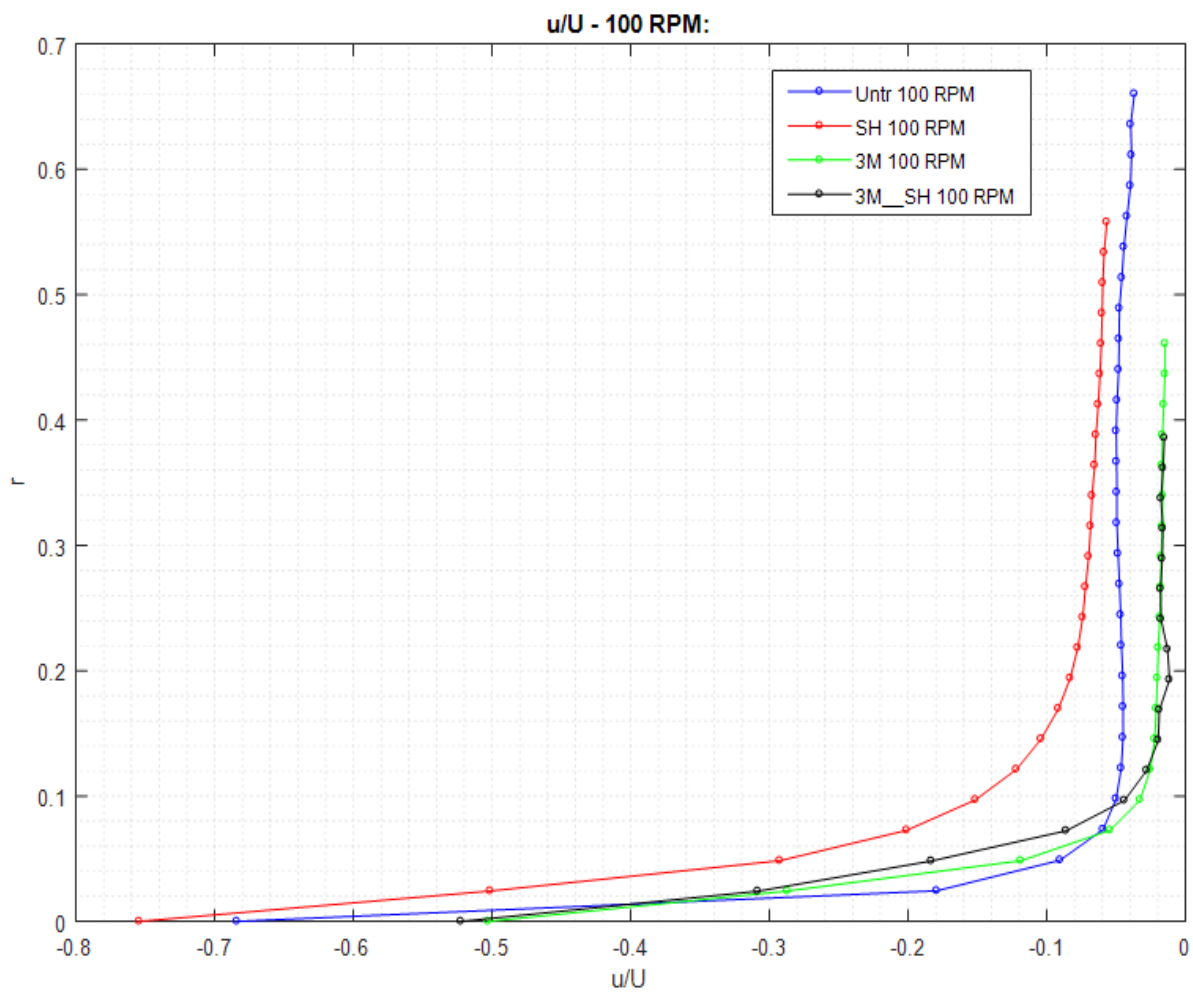
Εικόνα 59. Αδιάστατο προφίλ της ταχύτητας u συναρτήση της απόστασης r από το στερεό όριο του κυλίνδρου για τις 10 RPM για όλες τις εξεταζόμενες επιφάνειες.

Η ίδια κατάσταση με τις 10 RPM επικρατεί και στη περίπτωση όπου ο κύλινδρος περιστρέφεται με 60 RPM. Η υπερυδροφόβη επιφάνεια είναι αυτή στην οποία παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ταχύτητα το ρευστό κοντά στο στερεό τοίχωμα γεγονός το οποίο κρίνεται προβληματικό με βάση τα θεωρητικά αναμενόμενα αποτελέσματα. Ωστόσο παρατηρείται μια μείωση της ταχύτητας της τάξης του 15% του που παρουσιάζεται στην υπερυδροφόβη επιφάνεια για τις 60 RPM συγκριτικά με τις 10 RPM.

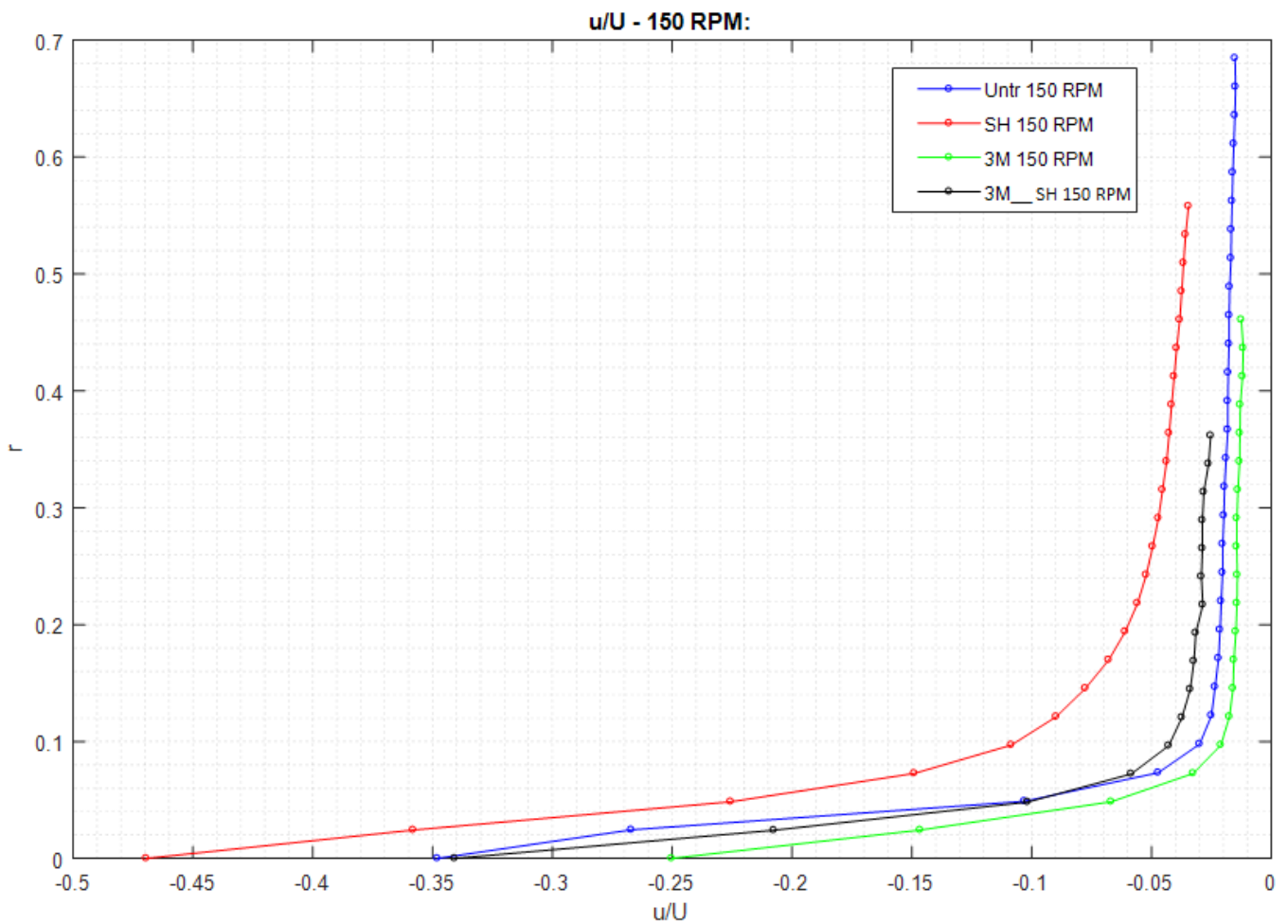
Η μικρότερη ταχύτητα κοντά στο στερεό όριο του κυλίνδρου επιτυγχάνεται με τη χρησιμοποίηση της υπερυδροφόβα επεξεργασμένης επιφάνειας με riblet η οποία συγκριτικά με τις 10 RPM παρουσιάζει μια μείωση της τάξης του 13%.



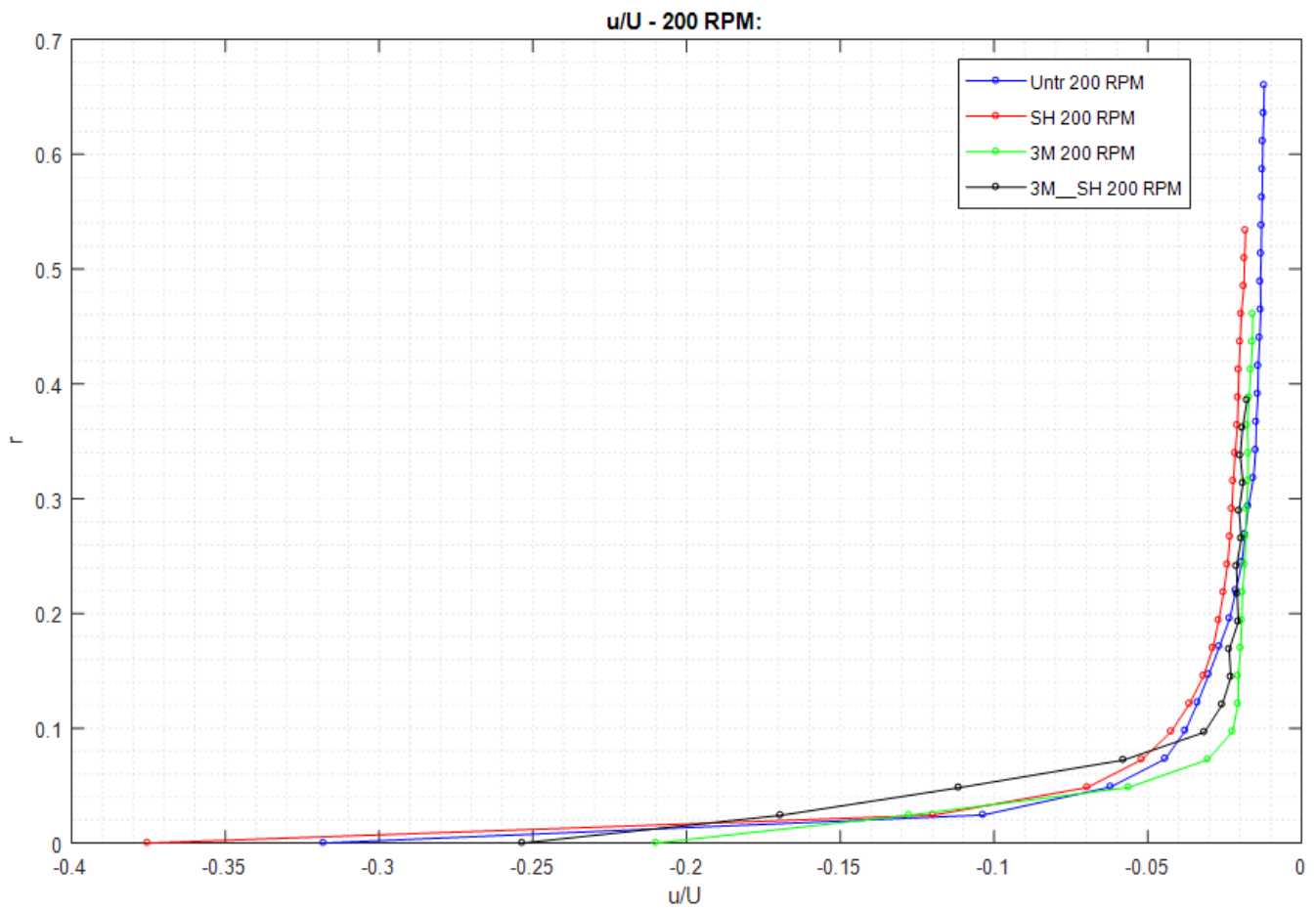
Εικόνα 60. Αδιάστατο προφίλ της ταχύτητας u συναρτήσει της απόστασης r από το στερεό όριο του κυλίνδρου για τις 60 RPM για όλες τις εξεταζόμενες επιφάνειες.



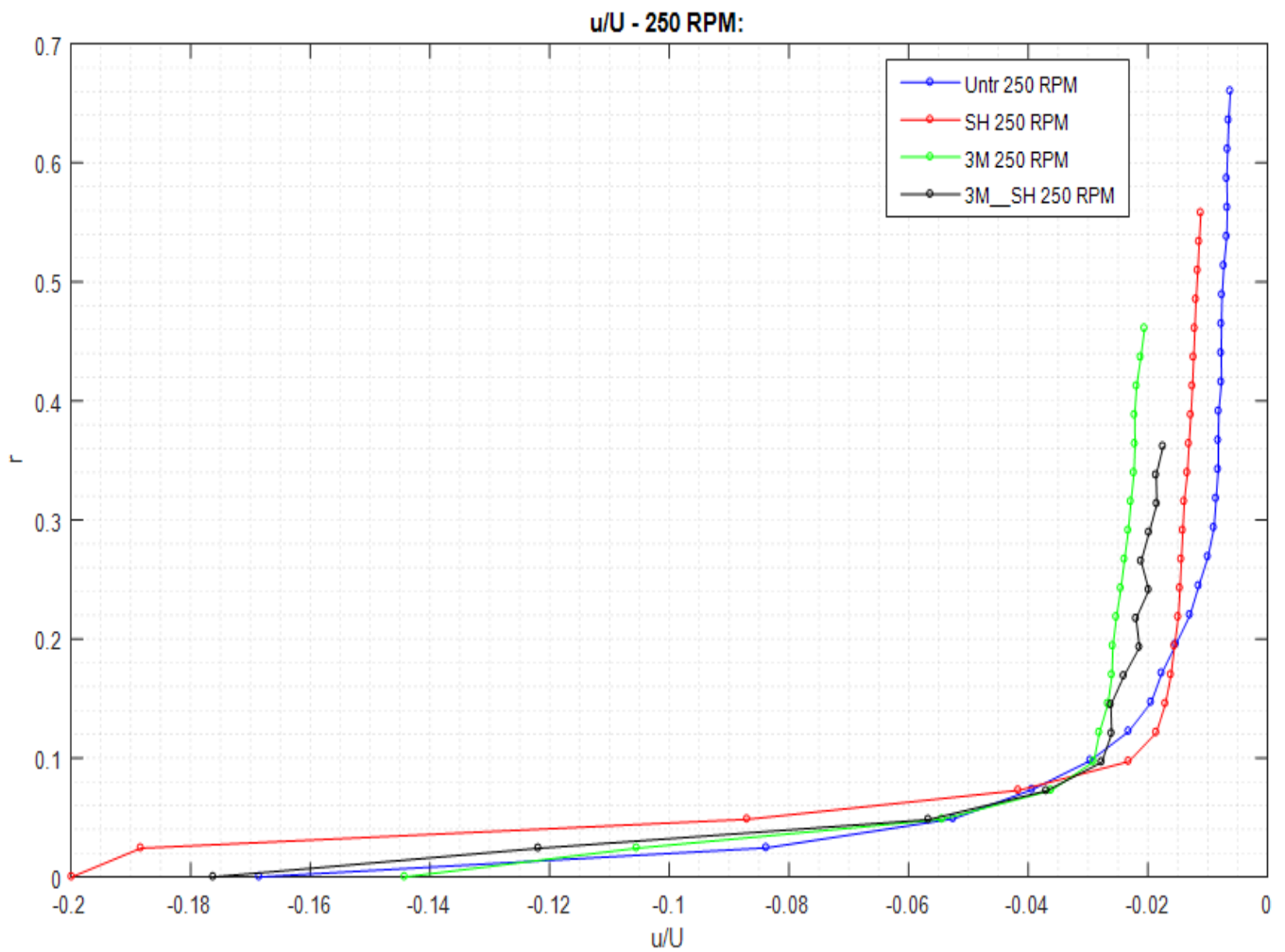
Εικόνα 61. Αδιάστατο προφίλ της ταχύτητας u συναρτήση της απόστασης r από το στερεό όριο του κυλίνδρου για τις 100 RPM για όλες τις εξεταζόμενες επιφάνειες.



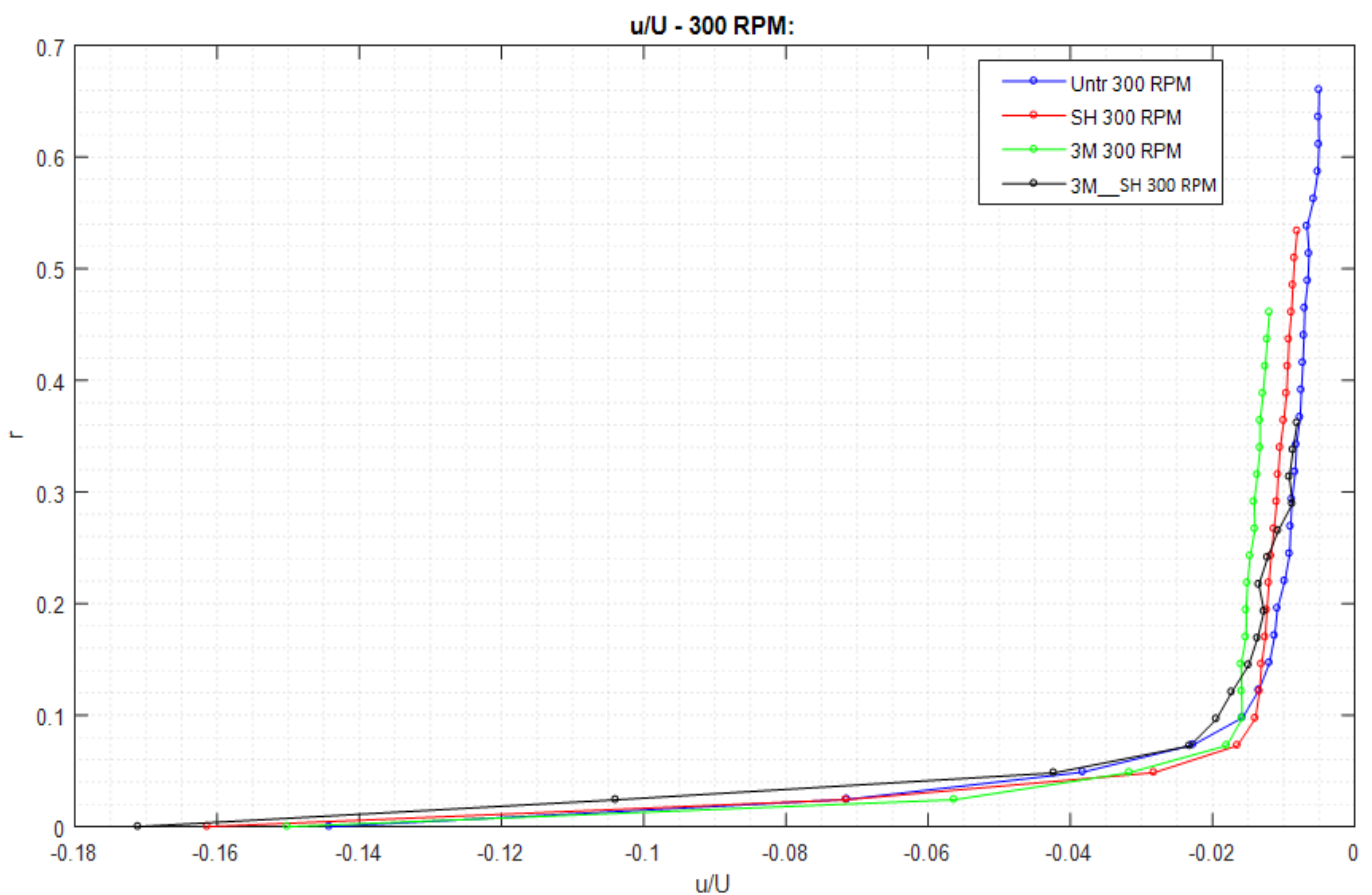
Εικόνα 62. Αδιάστατο προφίλ της ταχύτητας u συναρτήσει της απόστασης r από το στερεό όριο του κυλίνδρου για τις 150 RPM για όλες τις εξεταζόμενες επιφάνειες.



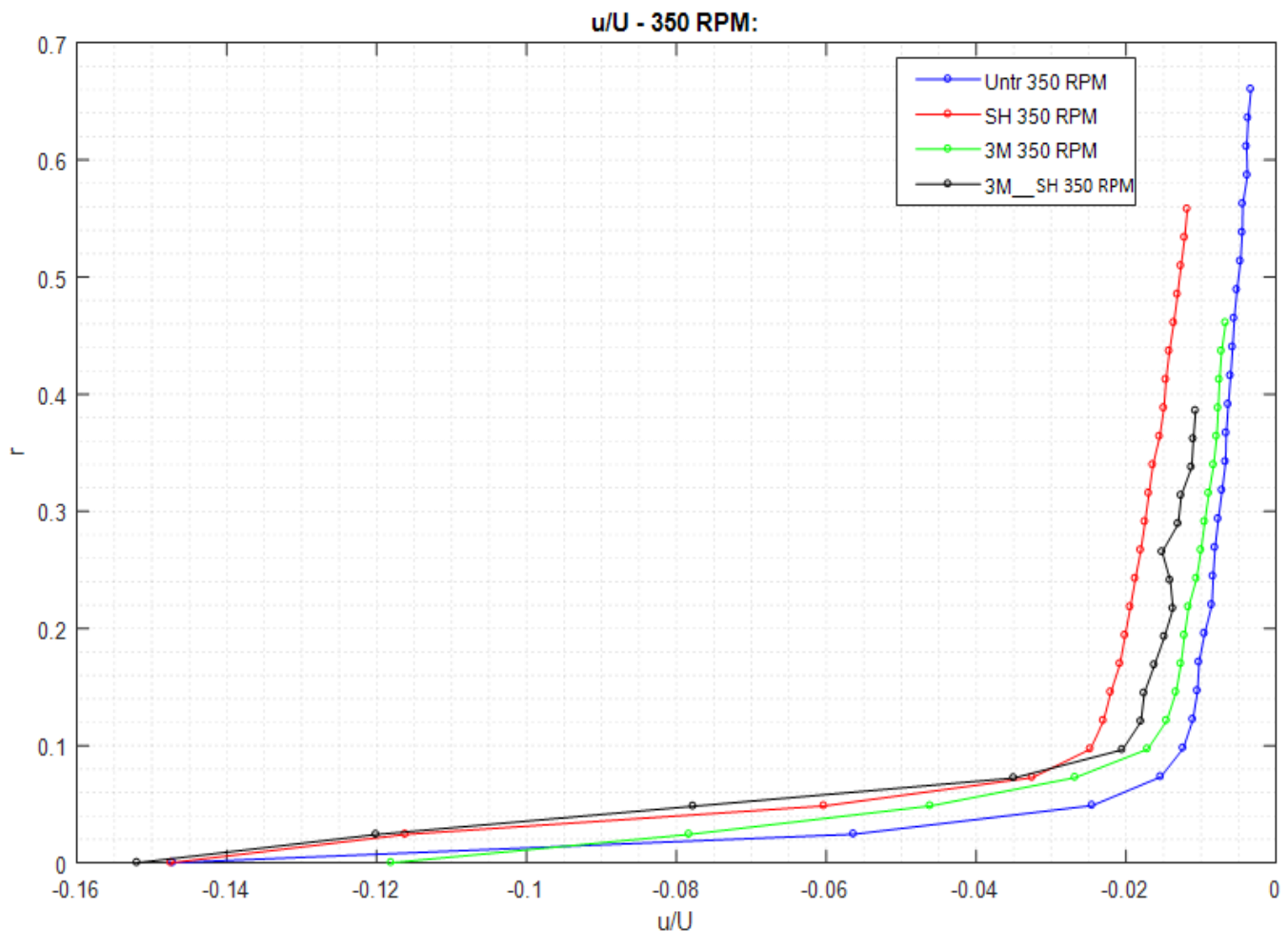
Εικόνα 63. Αδιάστατο προφίλ της ταχύτητας u συναρτήσει της απόστασης r από το στερεό όριο του κυλίνδρου για τις 200 RPM για όλες τις εξεταζόμενες επιφάνειες.



Εικόνα 64. Αδιάστατο προφίλ της ταχύτητας u συναρτήση της απόστασης r από το στερεό όριο του κυλίνδρου για τις 250 RPM για όλες τις εξεταζόμενες επιφάνειες.



Εικόνα 65. Αδιάστατο προφίλ της ταχύτητας u συναρτήση της απόστασης r από το στερεό όριο του κυλίνδρου για τις 300 RPM για όλες τις εξεταζόμενες επιφάνειες.



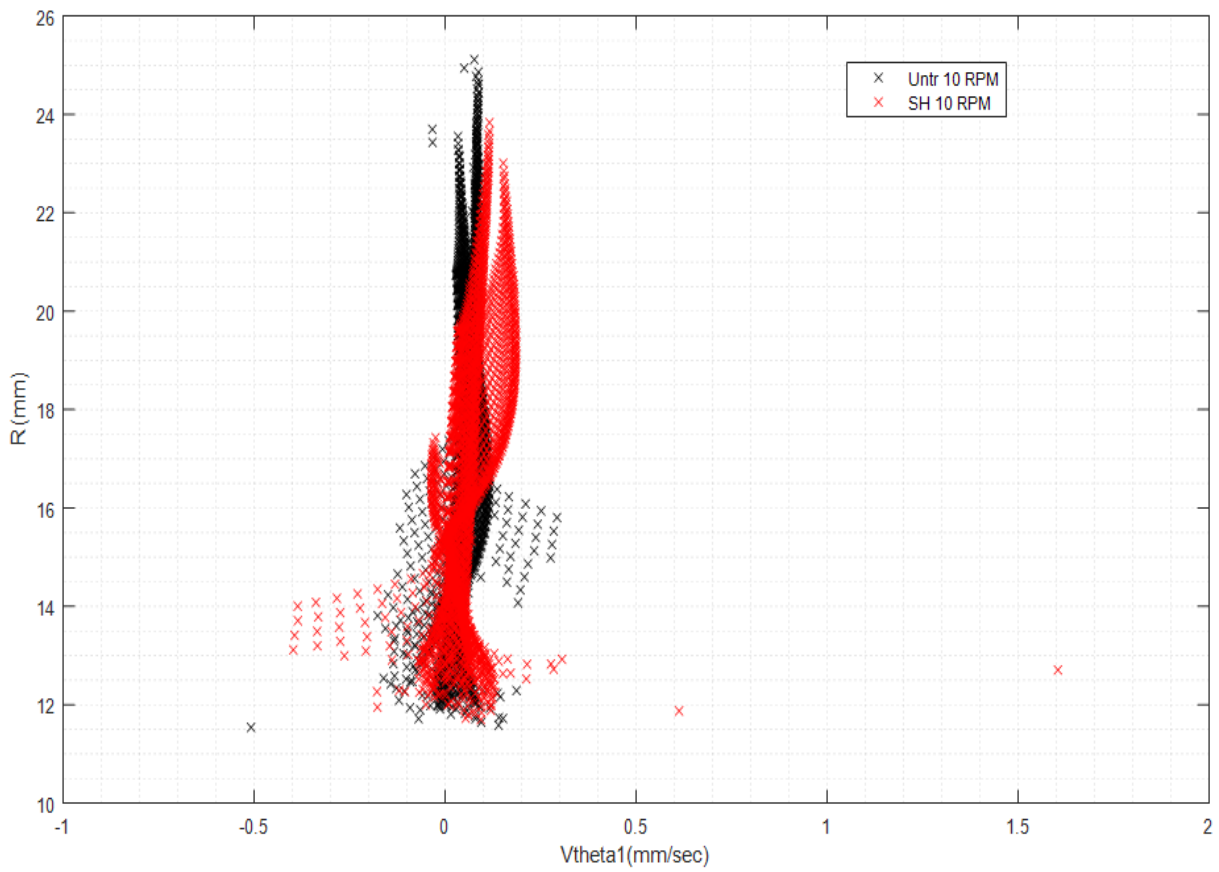
Εικόνα 66. Αδιάστατο προφίλ της ταχύτητας u συναρτήση της απόστασης r από το στερεό όριο του κυλίνδρου για τις 350 RPM για όλες τις εξεταζόμενες επιφάνειες.

5.11 Συγκριτικές τιμές της ακτινικής συνιστώσας της ταχύτητας συναρτήση της απόστασης από τον κύλινδρο για τις 10 RPM για όλες τις επιφάνειες

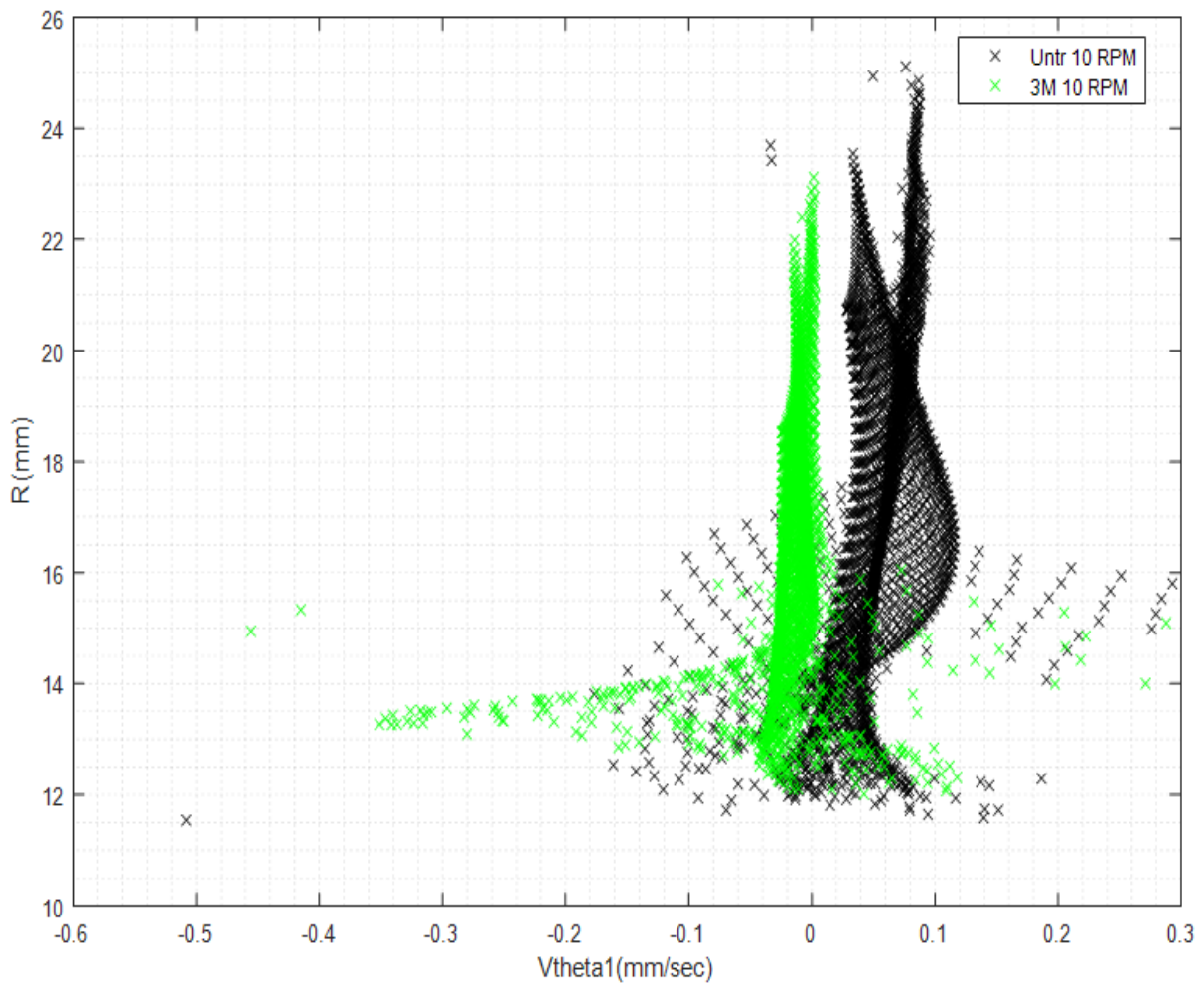
Στο συγκεκριμένο εδάφιο και για λόγους πληρότητας θα παρουσιάσουμε πως εξελίσσεται η κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας v_θ συναρτήση της ακτίνας του περιστρεφόμενου κυλίνδρου για τις χαμηλές στροφές περιστροφής (10 RPM). Να υπενθυμίσουμε ότι η ταχύτητα v_θ είναι η ακτινική συνιστώσα της ταχύτητας.

Όπως παρατηρούμε και από τα παρακάτω διαγράμματα τόσο η SM, η 3M όσο και η 3M_SH εμφανίζουν μεγαλύτερες ακτινικές ταχύτητες v_θ κοντά στο στερεό όριο του περιστρεφόμενου κυλίνδρου. Όπως παρατηρούμε η SH και η 3M_SH κοντά στο περιστρεφόμενο κύλινδρο προκαλεί μεγαλύτερη κατακόρυφη ταχύτητα ενώ η 3M μικρότερη.

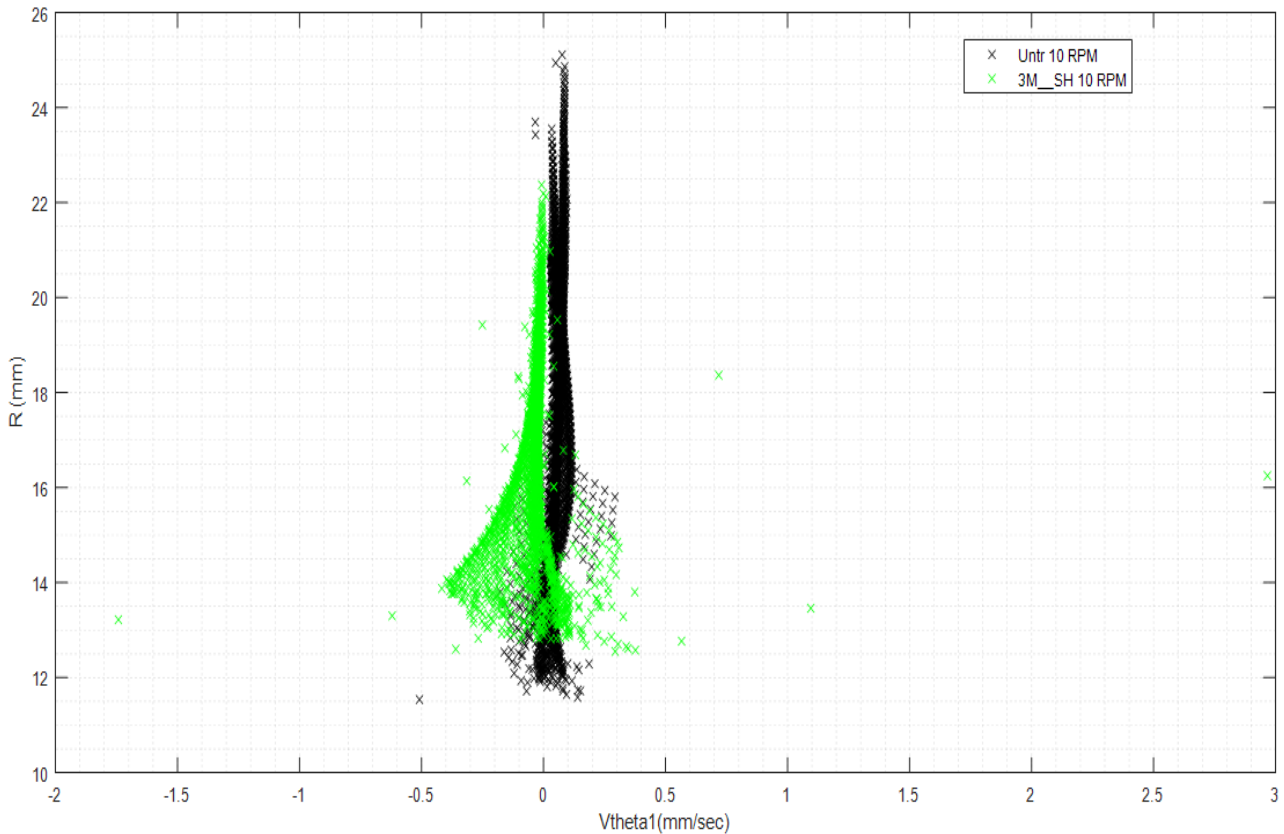
Ενέχεται ωστόσο μια αβεβαιότητα που εμφανίζεται στο προσδιορισμό του κέντρου του κυλίνδρου με τη τεχνική που περιγράφηκε σε παραπάνω εδάφιο η οποία αποτυπώνεται στα παρακάτω διαγράμματα μέσα από τη μη ταύτιση των κλάδων της ταχύτητας μεταξύ των επιφανειών κατά τον κατακόρυφο άξονα ο οποίος εμφανίζεται μετατοπισμένος καθώς επίσης και στην εμφάνιση ταχυτήτων σε ακτίνες μικρότερες από την ακτίνα του κυλίνδρου σε κάθε περίπτωση.



Εικόνα 67. Προφίλ της κατακόρυφης συνιστώσας της ταχύτητας v_{θ} για την SH για τις 10 RPM.



Εικόνα 68. Προφίλ της κατακόρυφης συνιστώσας της ταχύτητας v_{θ} για την 3M για τις 10 RPM.

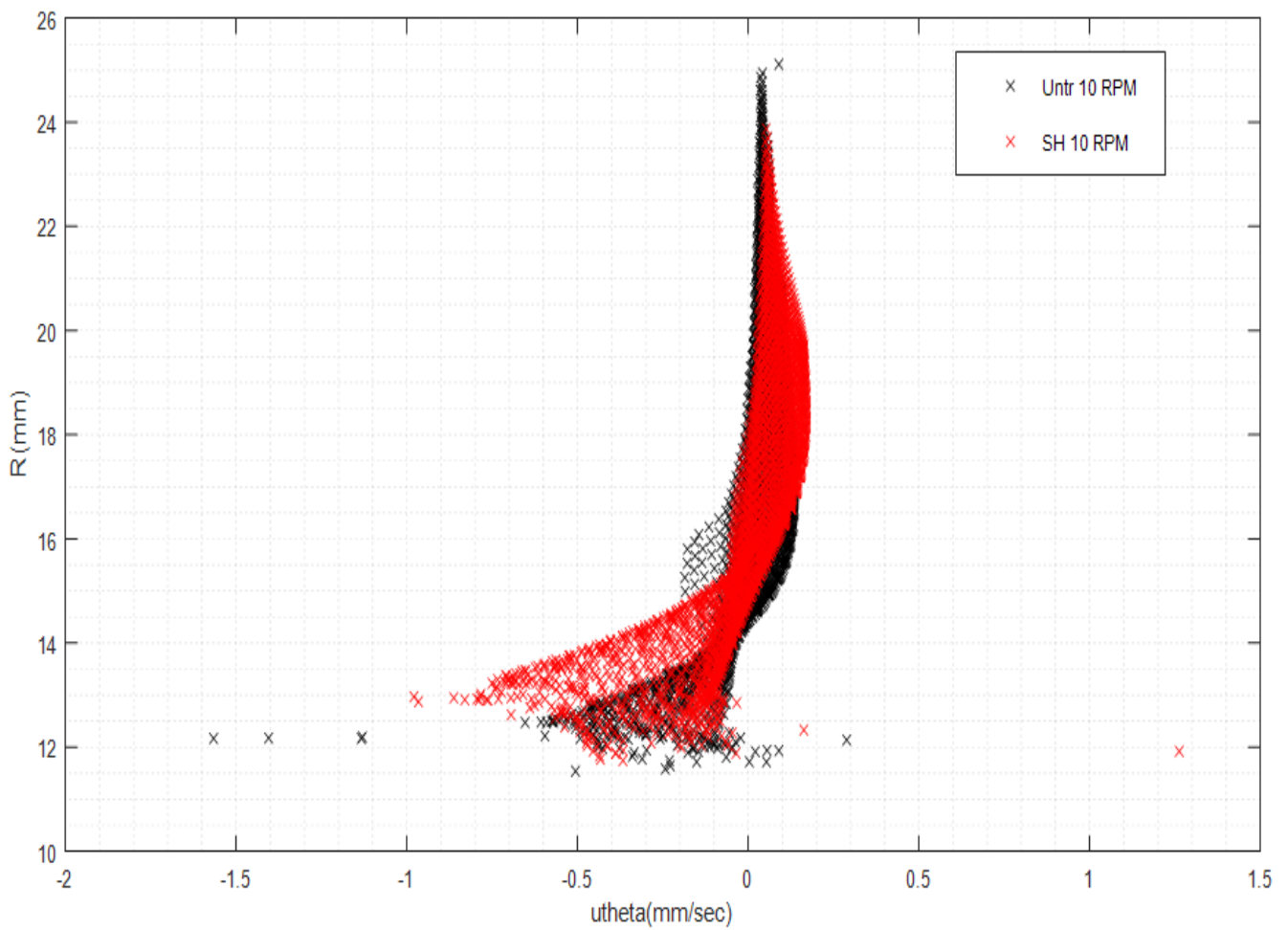


Εικόνα 69. Προφίλ της κατακόρυφης συνιστώσας της ταχύτητας v_θ για την 3M__SH για τις 10 RPM.

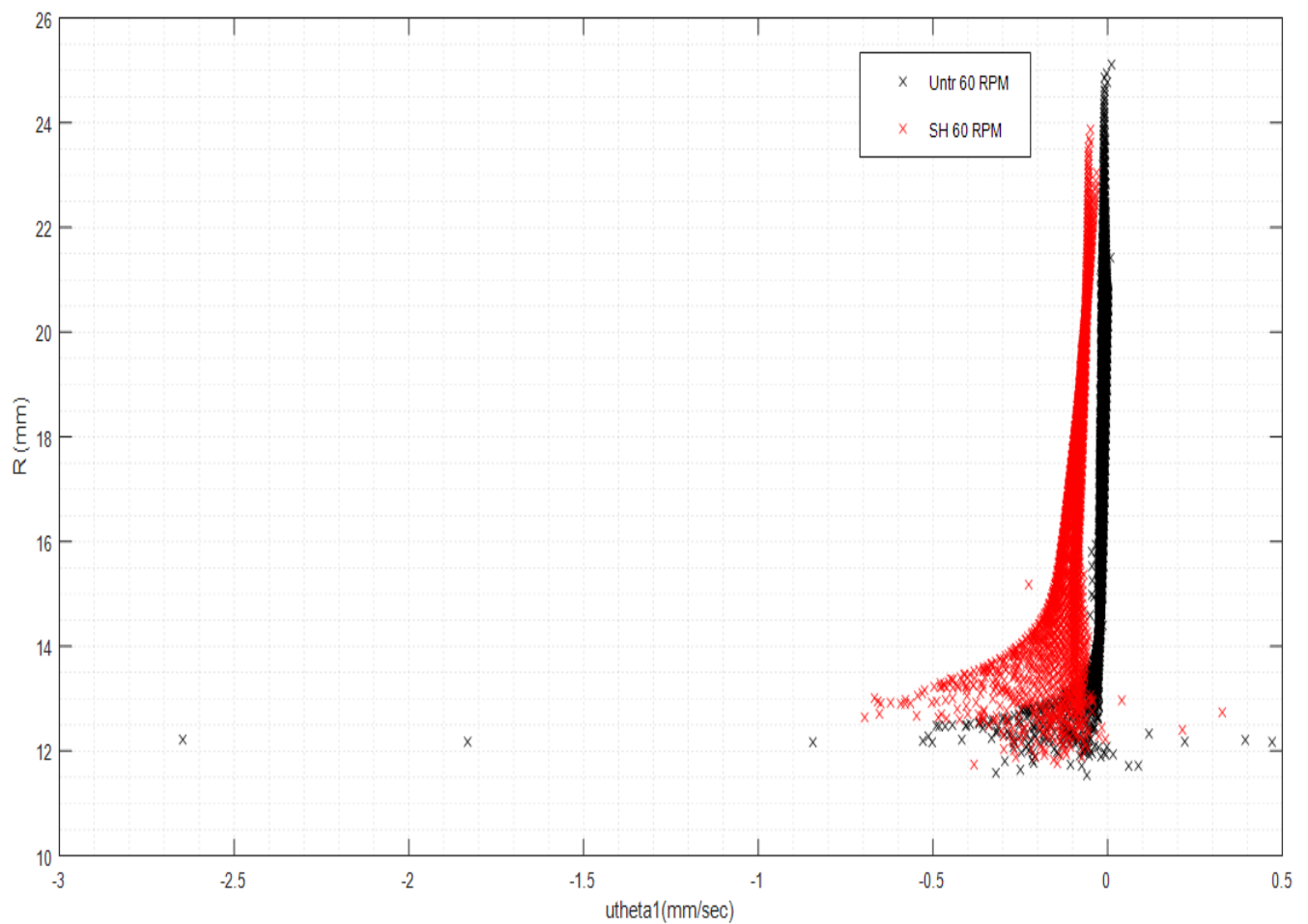
Πριν προχωρήσουμε στη παράθεση των διαγραμμάτων σύγκρισης των ταχυτήτων u_θ συναρτήση της ακτίνας του κυλίνδρου είναι σκόπιμο να αναφερθεί ότι η παρούσα ανάλυση χρησιμοποιείται κυρίως για λόγους πληρότητας και όχι για τη τελική σύγκριση και αξιολόγηση της επίδρασης των επιφανειών στη ροή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός της αβεβαιότητας που εμφανίζεται στο προσδιορισμό του κέντρου του κυλίνδρου με τη τεχνική που περιγράφηκε σε παραπάνω εδάφιο. Το σφάλμα αυτό αποτυπώνεται στα παρακάτω διαγράμματα μέσα από τη μη ταύτιση των κλάδων της ταχύτητας μεταξύ των επιφανειών κατά τον κατακόρυφο άξονα ο οποίος εμφανίζεται μετατοπισμένος καθώς επίσης και στην εμφάνιση ταχυτήτων σε ακτίνες μικρότερες από την ακτίνα του κυλίνδρου σε κάθε περίπτωση.

5.12 Σύγκριση της κάθετης στην ακτίνα συνιστώσα της ταχύτητας της Untreated με SH για το εύρος στροφών του κυλίνδρου

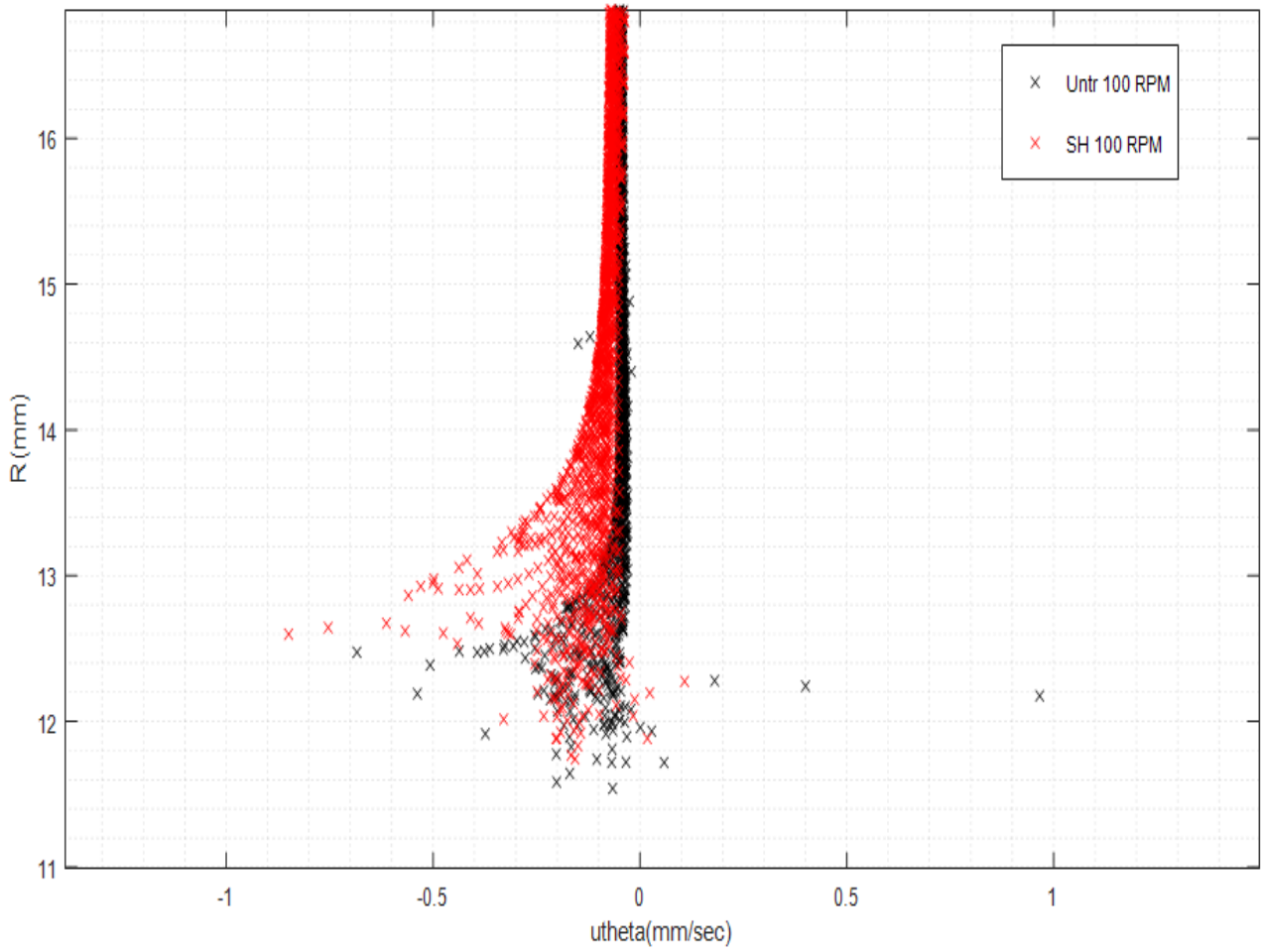
Στο παρόν εδάφιο δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα της u_θ , που όπως δείξαμε παραπάνω είναι η κάθετη στην ακτίνα ταχύτητα, συναρτήση της απόστασης R από το κέντρο του κυλίνδρου. Τα διαγράμματα που παρουσιάζονται παρακάτω αφορούν το σύνολο των ταχυτήτων περιστροφής του κυλίνδρου όταν αυτός περιστρέφεται έχοντας κολλημένη untreated και υπερυδροφόβη επιφάνεια. Και στις δυο περιπτώσεις η μετρούμενη ακτίνα του κυλίνδρου με τις επιφάνειες βρέθηκε $R=12.6\text{mm}$. Επομένως οποιεσδήποτε τιμές της u_θ εμφανίζονται για τιμές της ακτίνας μικρότερες των 12.6mm αποτελούν σφάλματα της μεθόδου. Παρατηρούμε στις παρακάτω εικόνες ότι η υπερυδροφόβη επιφάνεια δεν παρουσιάζει την επιθυμητή μείωση της κάθετης στην ακτίνα ταχύτητας u_θ κοντά στο στερεό όριο του περιστρεφόμενου κυλίνδρου όπως ανεμενόταν αντιθέτως συγκριτικά με την untreated επιφάνεια εμφανίζονται τοπικά αυξημένες συνιστώσες της ταχύτητας για για το σύνολο των ταχυτήτων περιστροφής που μελετήθηκαν.



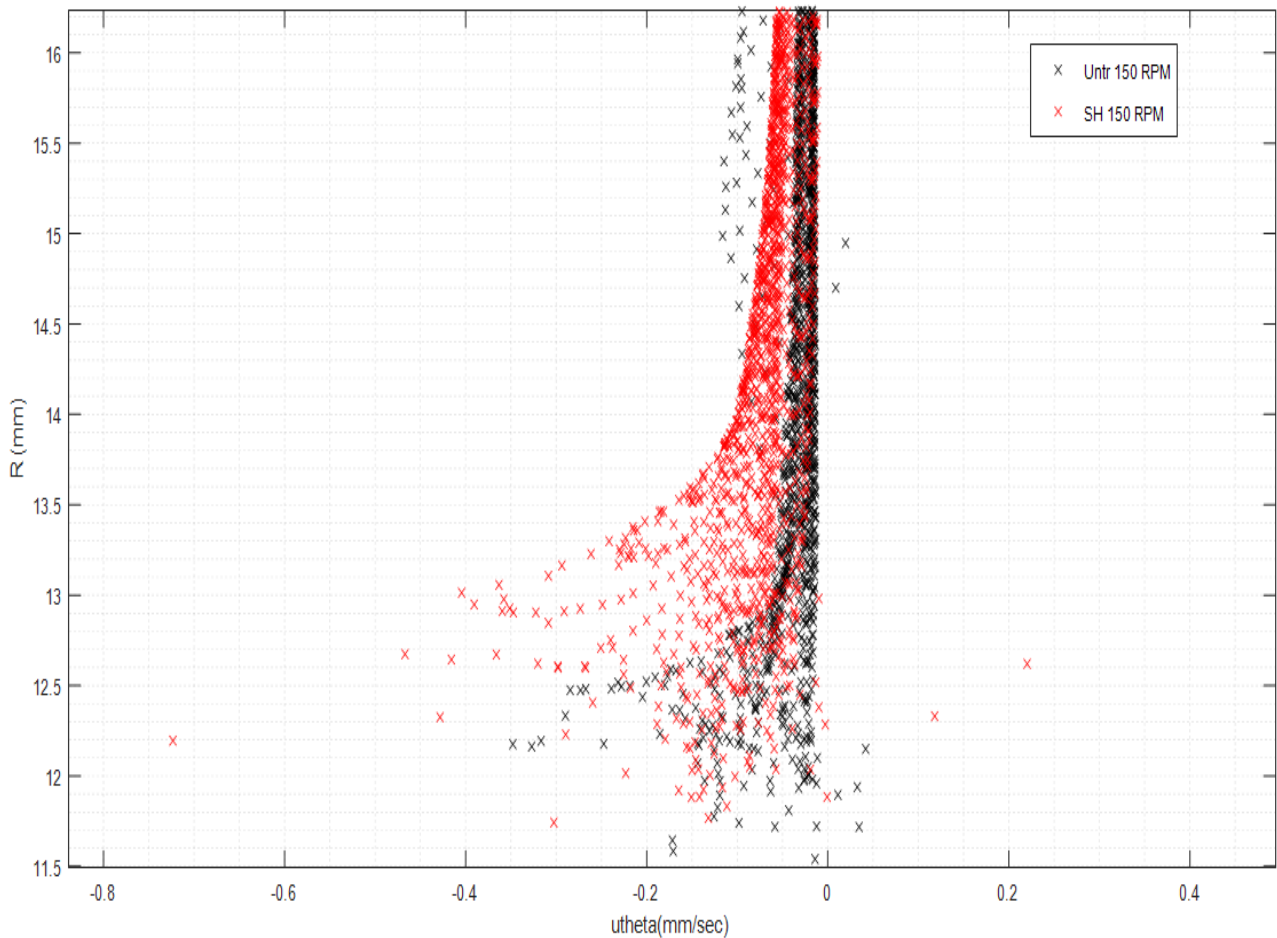
Εικόνα 70. Προφίλ της ταχύτητας u_θ συναρτήση της ακτίνας του κυλίνδρου για τις 10 RPM.



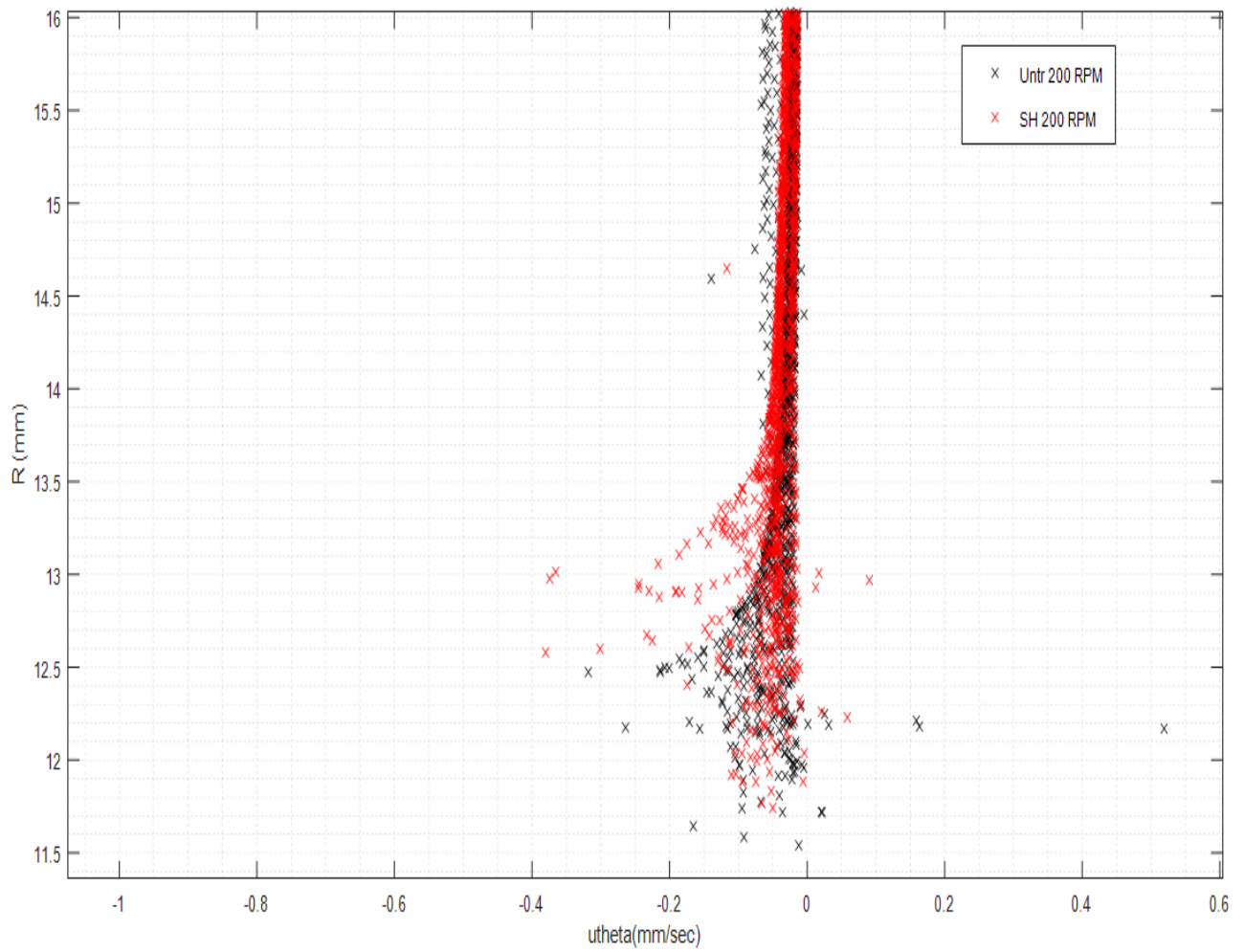
Εικόνα 71. Προφίλ της ταχύτητας u_θ συναρτήση της ακτίνας του κυλίνδρου για τις 60 RPM.



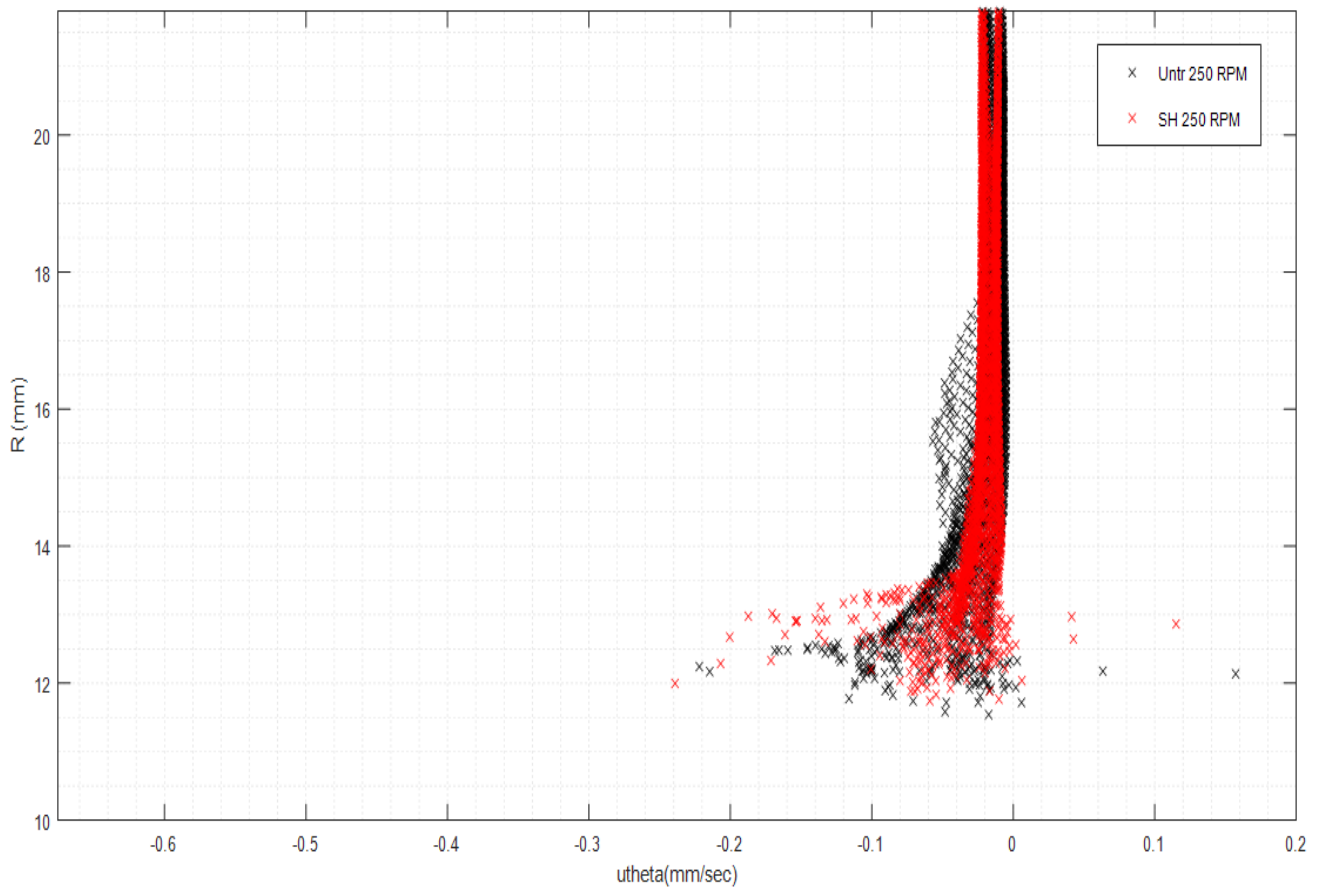
Εικόνα 72. Προφίλ της ταχύτητας u_θ συναρτήση της ακτίνας του κυλίνδρου για τις 100 RPM.



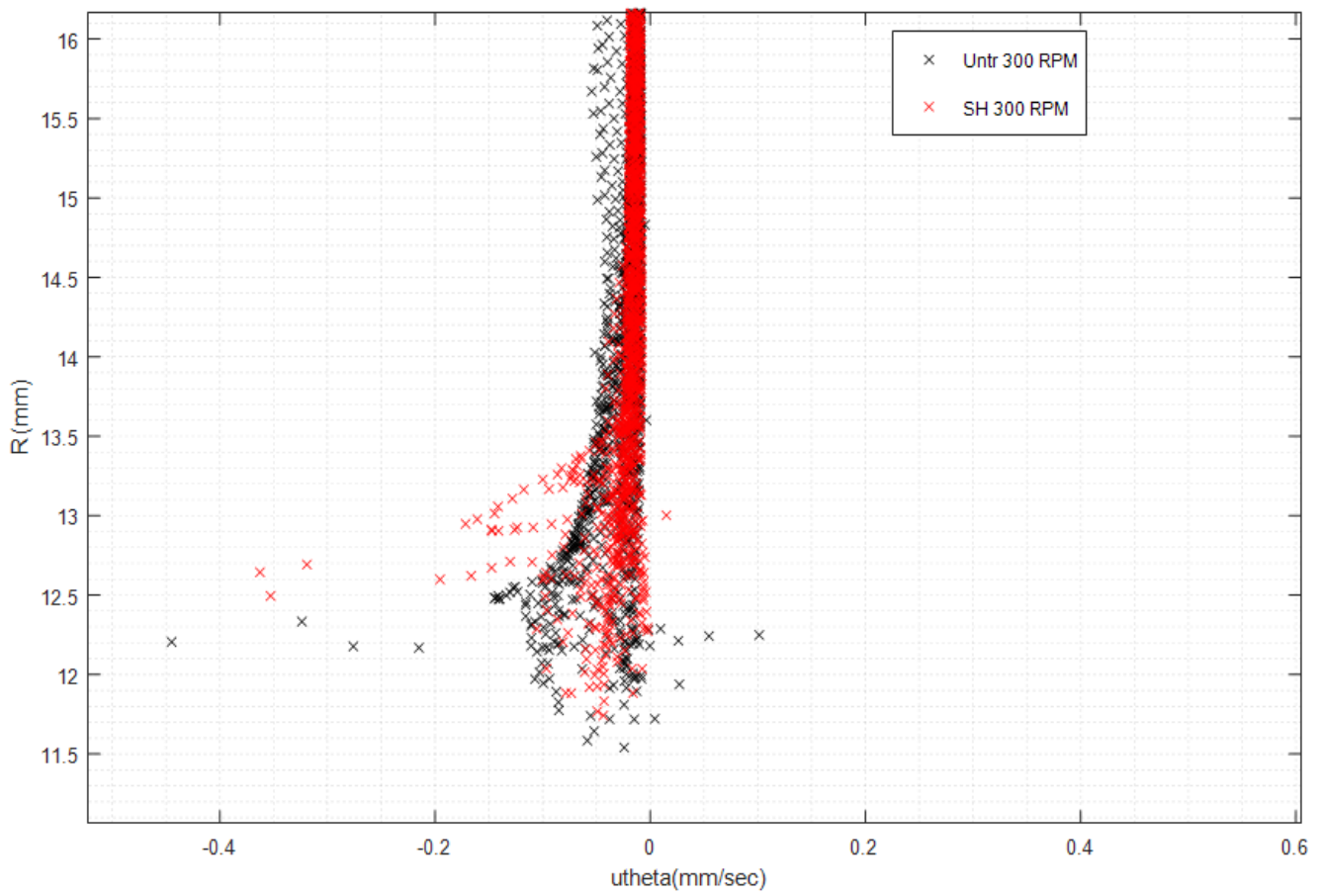
Εικόνα 73. Προφίλ της ταχύτητας u_θ συναρτήση της ακτίνας του κυλίνδρου για τις 150 RPM.



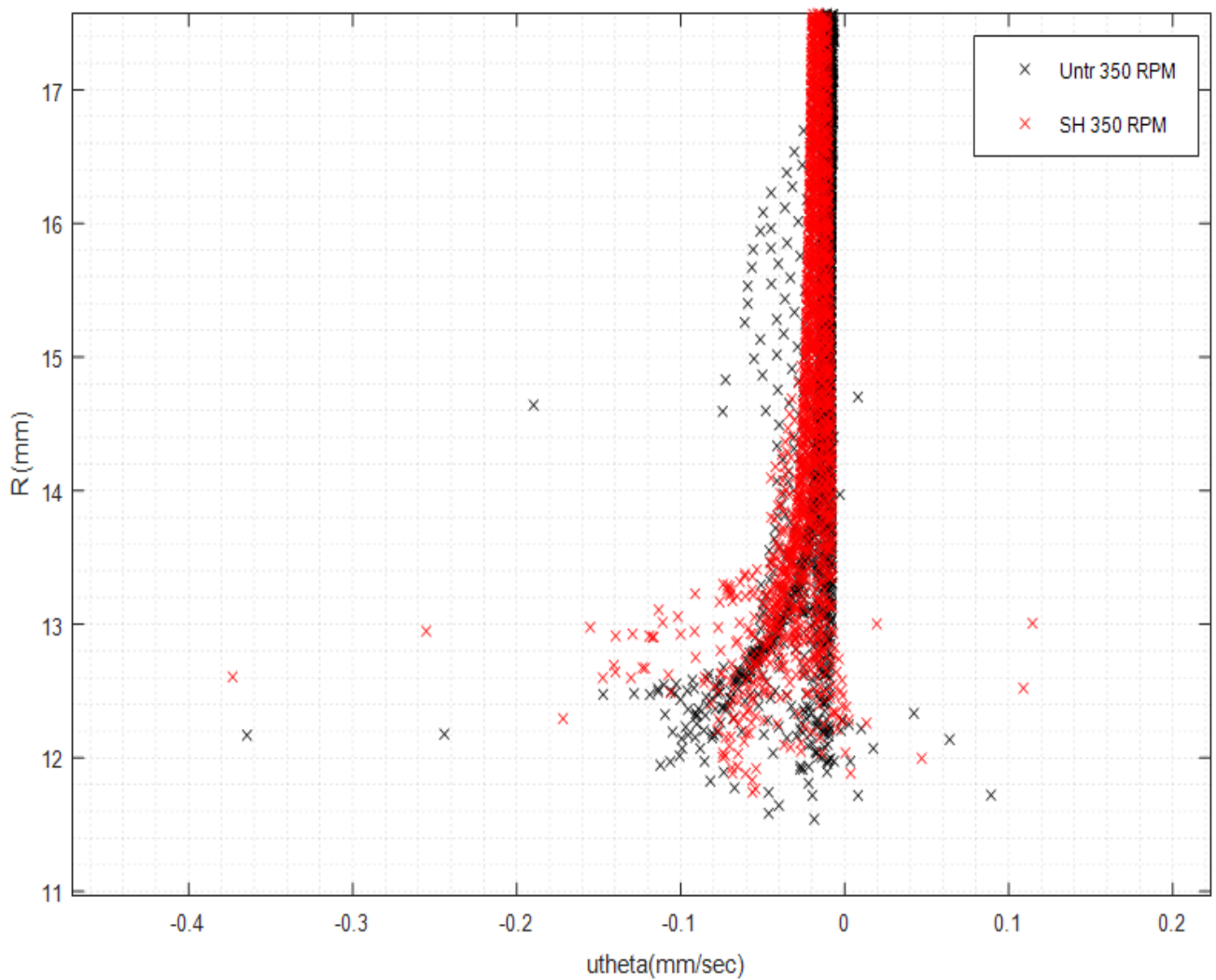
Εικόνα 74. Προφίλ της ταχύτητας u_{θ} συναρτήση της ακτίνας του κυλίνδρου για τις 200 RPM.



Εικόνα 75. Προφίλ της ταχύτητας u_{θ} συναρτήση της ακτίνας του κυλίνδρου για τις 250 RPM.



Εικόνα 76. Προφίλ της ταχύτητας u_{θ} συναρτήση της ακτίνας του κυλίνδρου για τις 300 RPM.

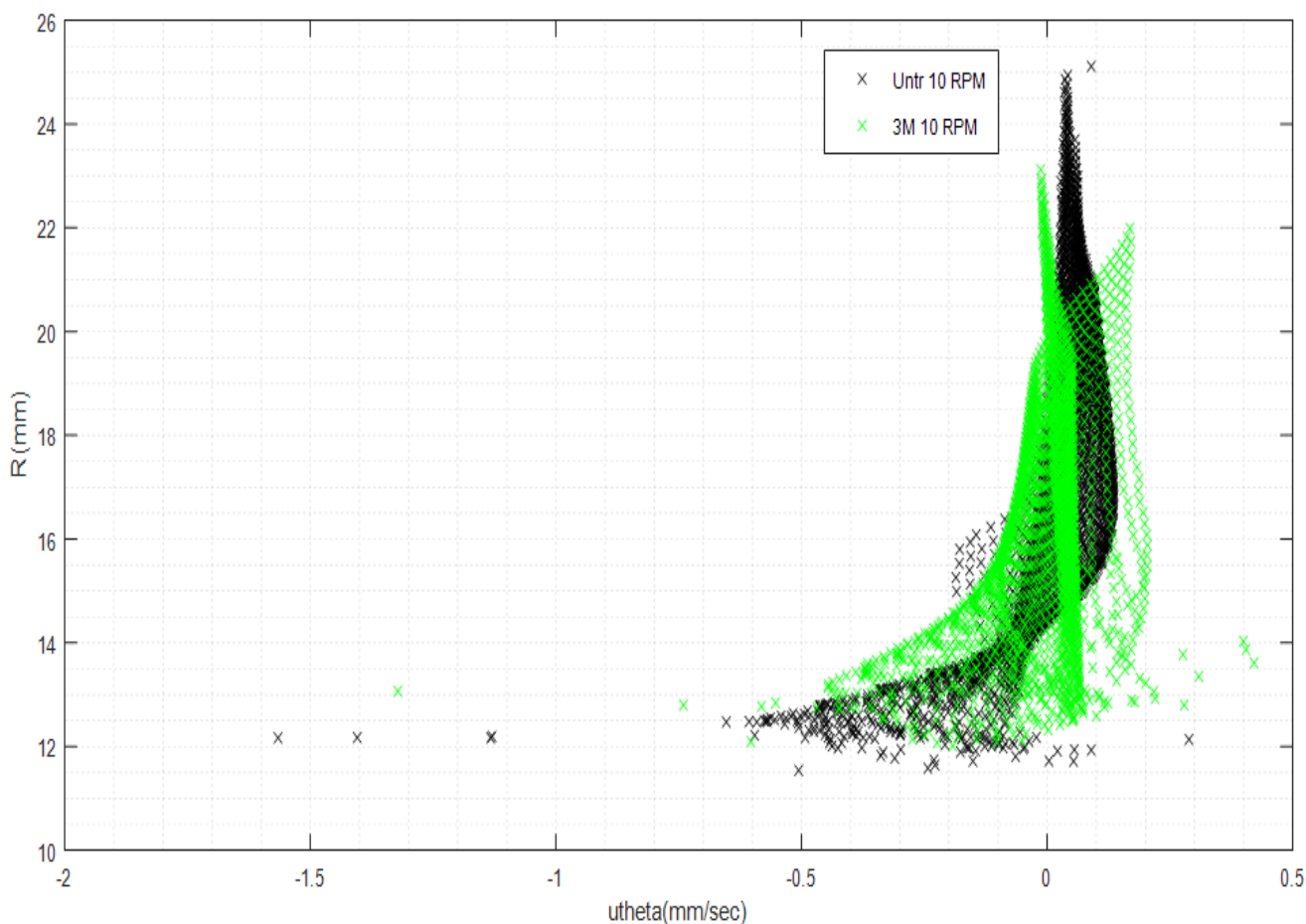


Εικόνα 77. Προφίλ της ταχύτητας u_{θ} συναρτήση της ακτίνας του κυλίνδρου για τις 350 RPM.

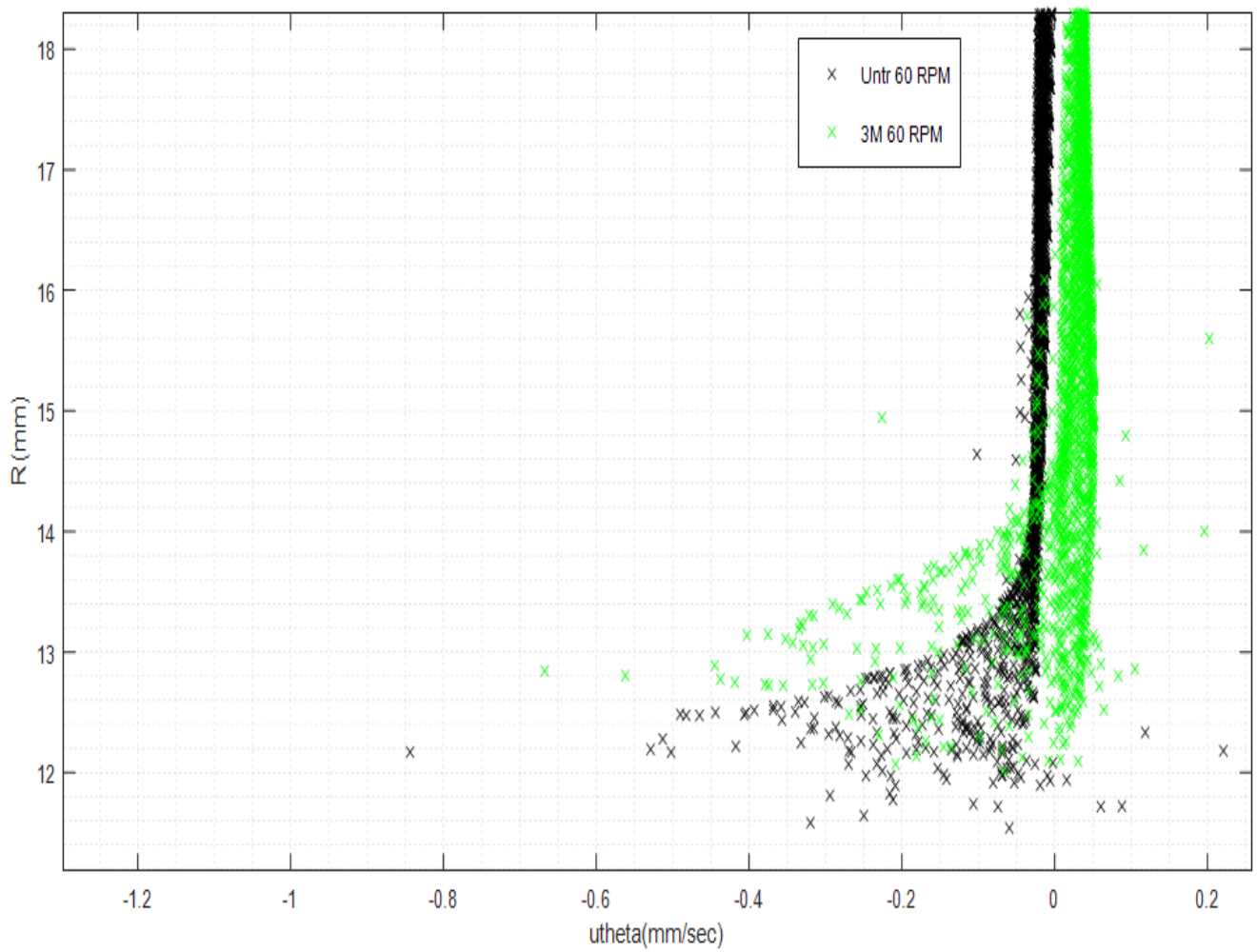
5.13 Σύγκριση της κάθετης στην ακτίνα συνιστώσα της ταχύτητας της Untreated επιφάνεια με riblet 3M

Τα διαγράμματα που παρουσιάζονται παρακάτω αφορούν το σύνολο των ταχυτήτων περιστροφής του κυλίνδρου όταν αυτός περιστρέφεται έχοντας κολλημένη untreated και επιφάνεια με riblet της 3M. Στη περίπτωση της riblet 3M επιφάνειας η μετρούμενη ακτίνα του κυλίνδρου μετά τη προσάρτηση της βρέθηκε $R=12.7\text{mm}$. Επομένως οποιεσδήποτε τιμές της u_θ εμφανίζονται για τιμές της ακτίνας μικρότερες των 12.6mm για την untreated και μικρότερες των 12.7mm για την riblet 3M δεν πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν καθώς αποτελούν σφάλματα της μεθόδου τα οποία και προέκυψαν κατά τη διαδικασία γεωμετρικού προσδιορισμού του κέντρου όπως παρατείνεται και παραπάνω σε σχετική παράγραφο. Η 3M επιφάνεια παρατηρούμε ότι παρουσιάζει μικρότερες ταχύτητες κοντά στο περιστρεφόμενο κύλινδρο σε σύγκριση με την untreated καθότι φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα όπου το 'νεφος' των σημείων για την 3M riblet ξεκινάει από μικρότερες τιμές της u_θ απ'ότι το αντίστοιχο της untreated.

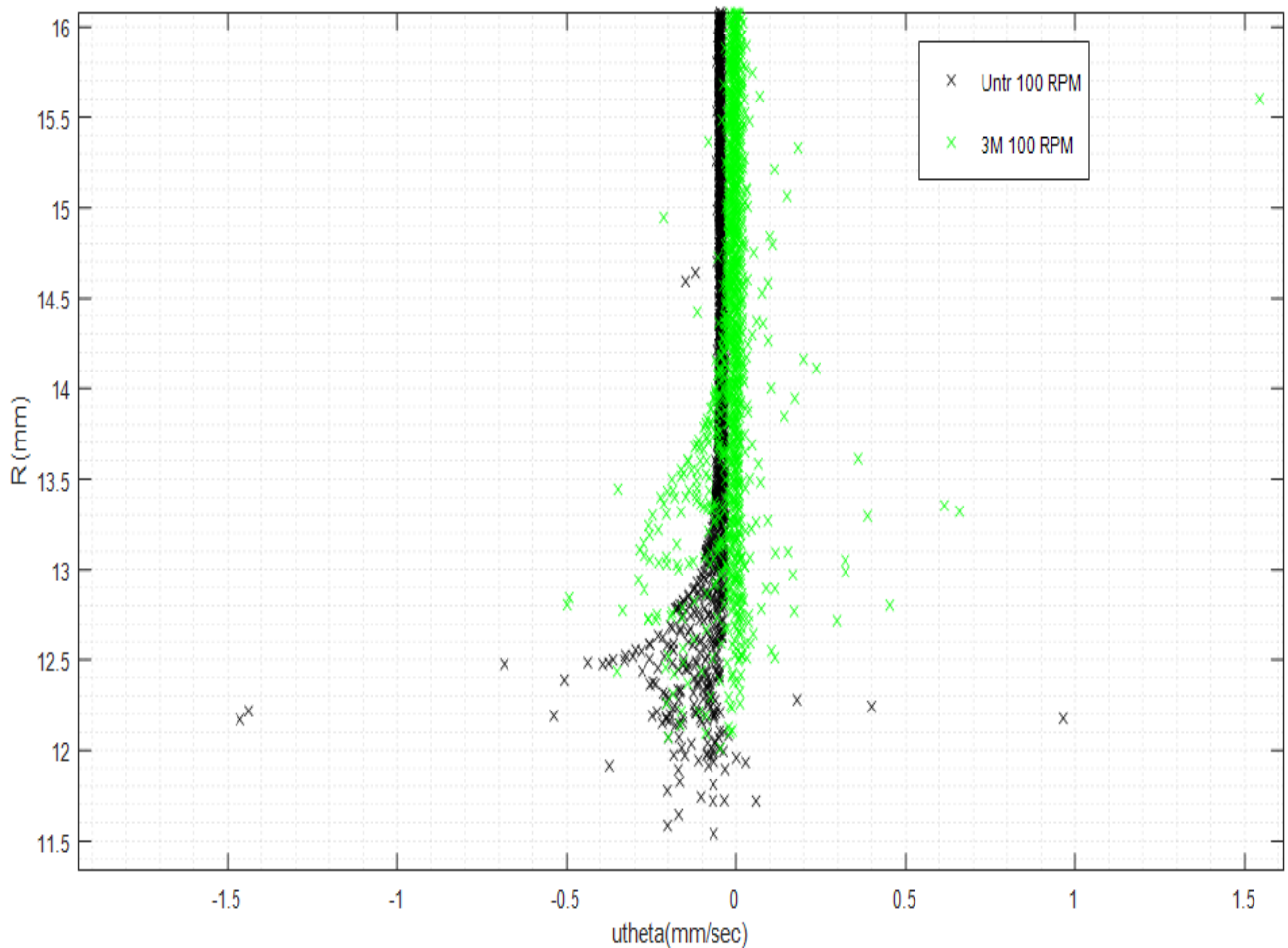
Η συγκεκριμένη εικόνα για την 3M riblet, να ξεκινάει δηλαδή από μικρότερες τιμές της ταχύτητας u_θ κοντά στο κύλινδρο συγκριτικά με την untreated επιφάνεια, φαίνεται να παγιώνεται με κάποιες διαφοροποιήσεις για το σύνολο των ταχυτήτων περιστροφής του κυλίνδρου.



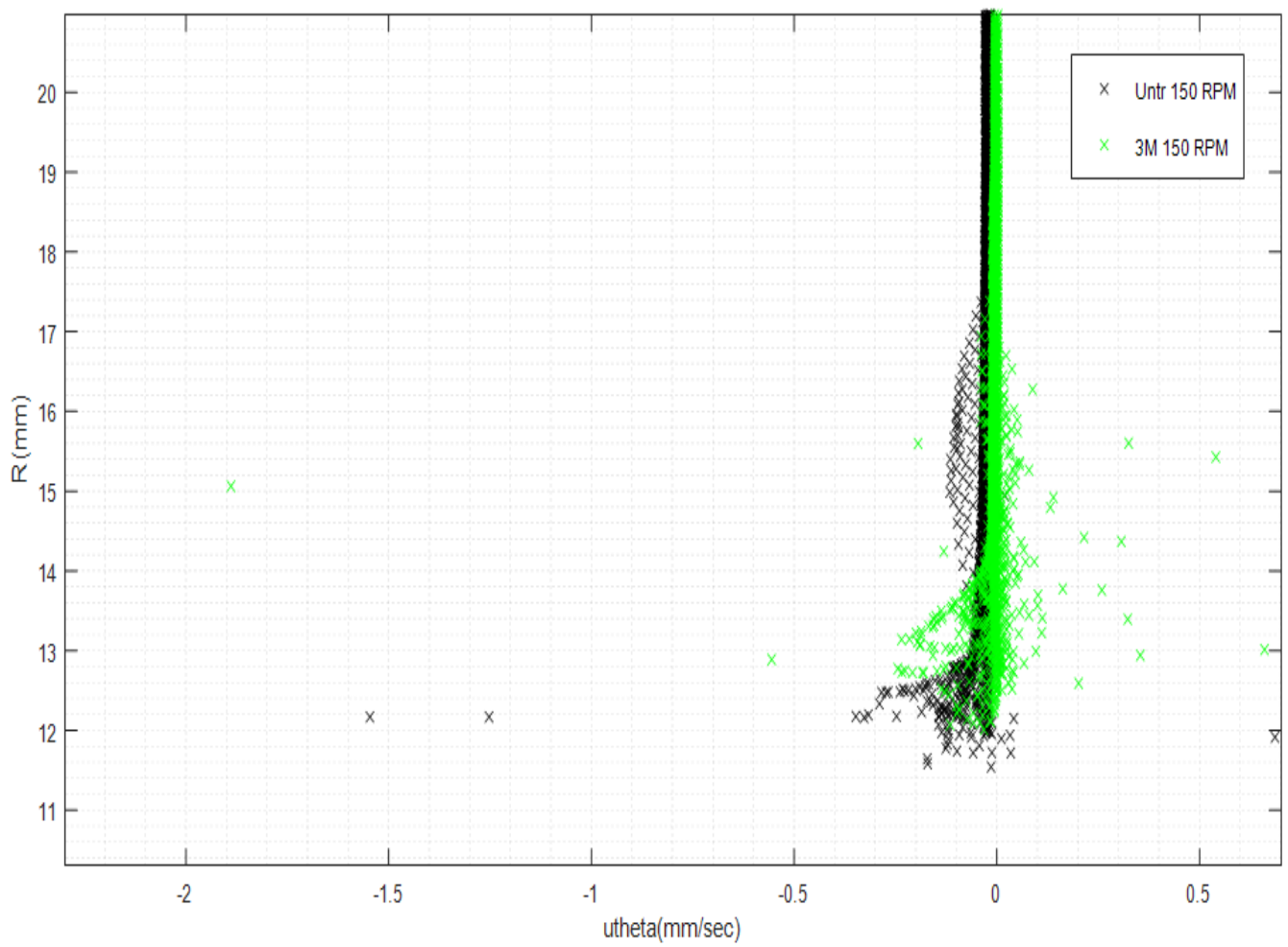
Εικόνα 78. Προφίλ της ταχύτητας u_θ συναρτήση της ακτίνας του κυλίνδρου για τις 10 RPM.



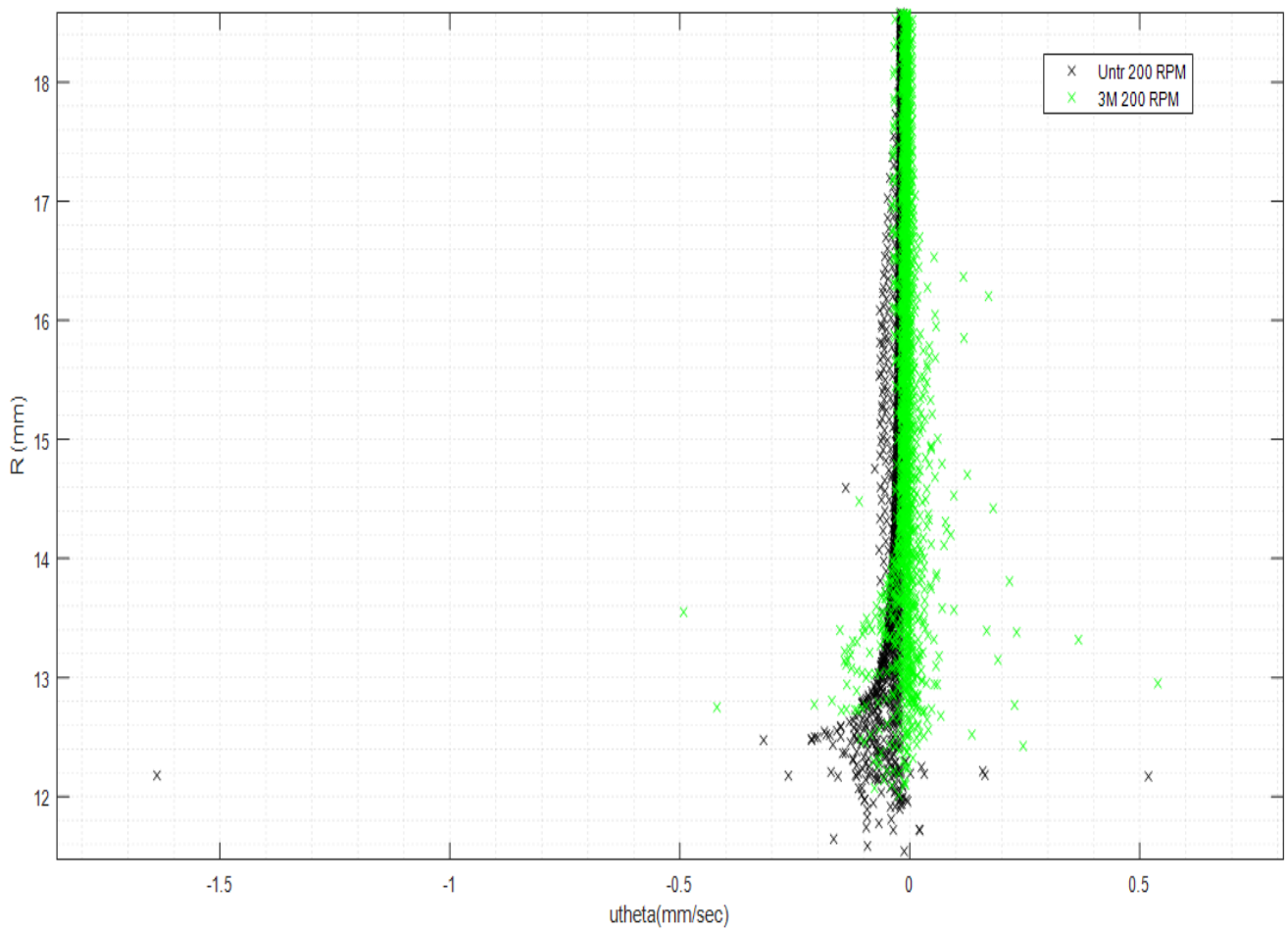
Εικόνα 79. Προφίλ της ταχύτητας u_θ συναρτήση της ακτίνας του κυλίνδρου για τις 60 RPM.



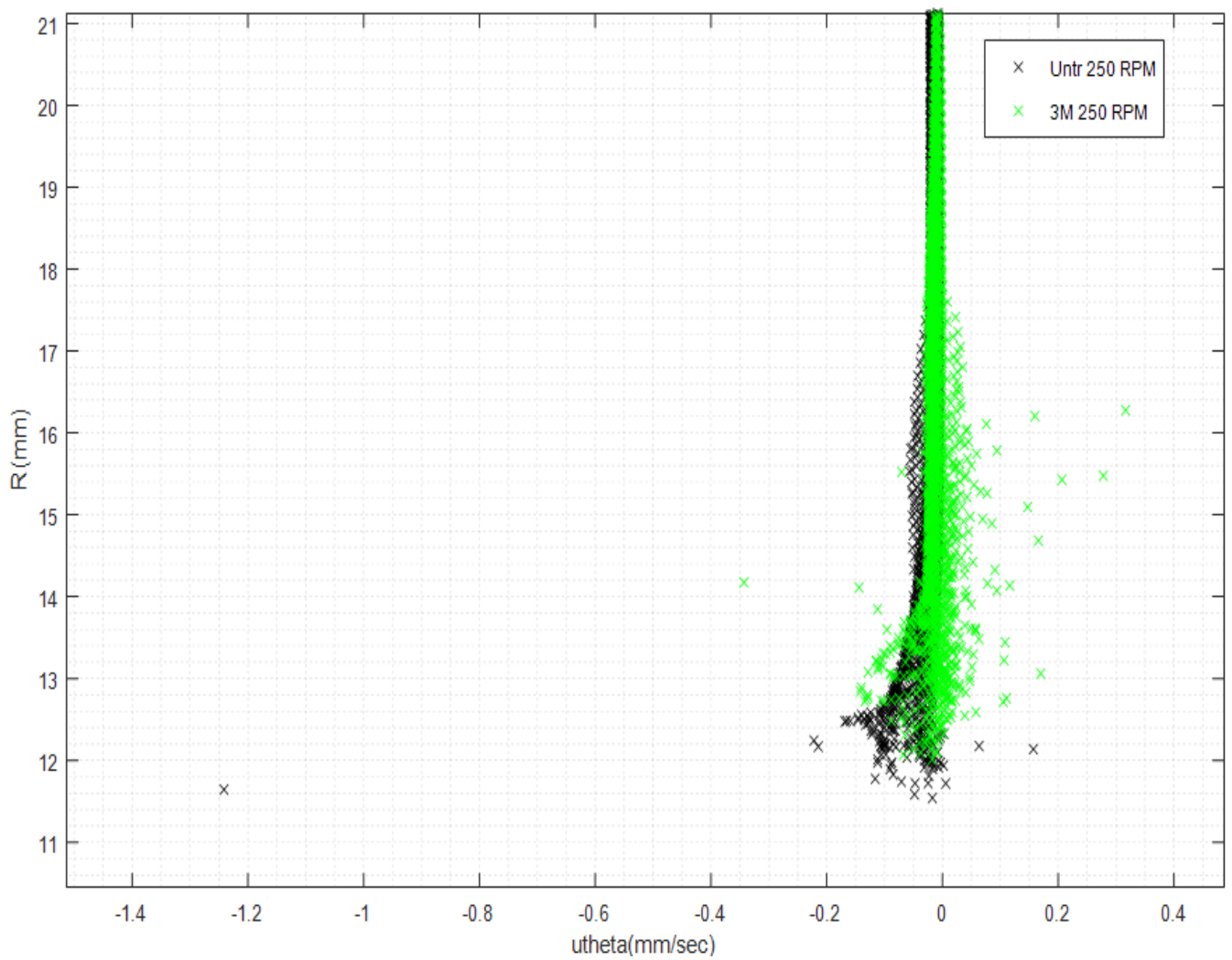
Εικόνα 80. Προφίλ της ταχύτητας u_θ συναρτήση της ακτίνας του κυλίνδρου για τις 100 RPM.



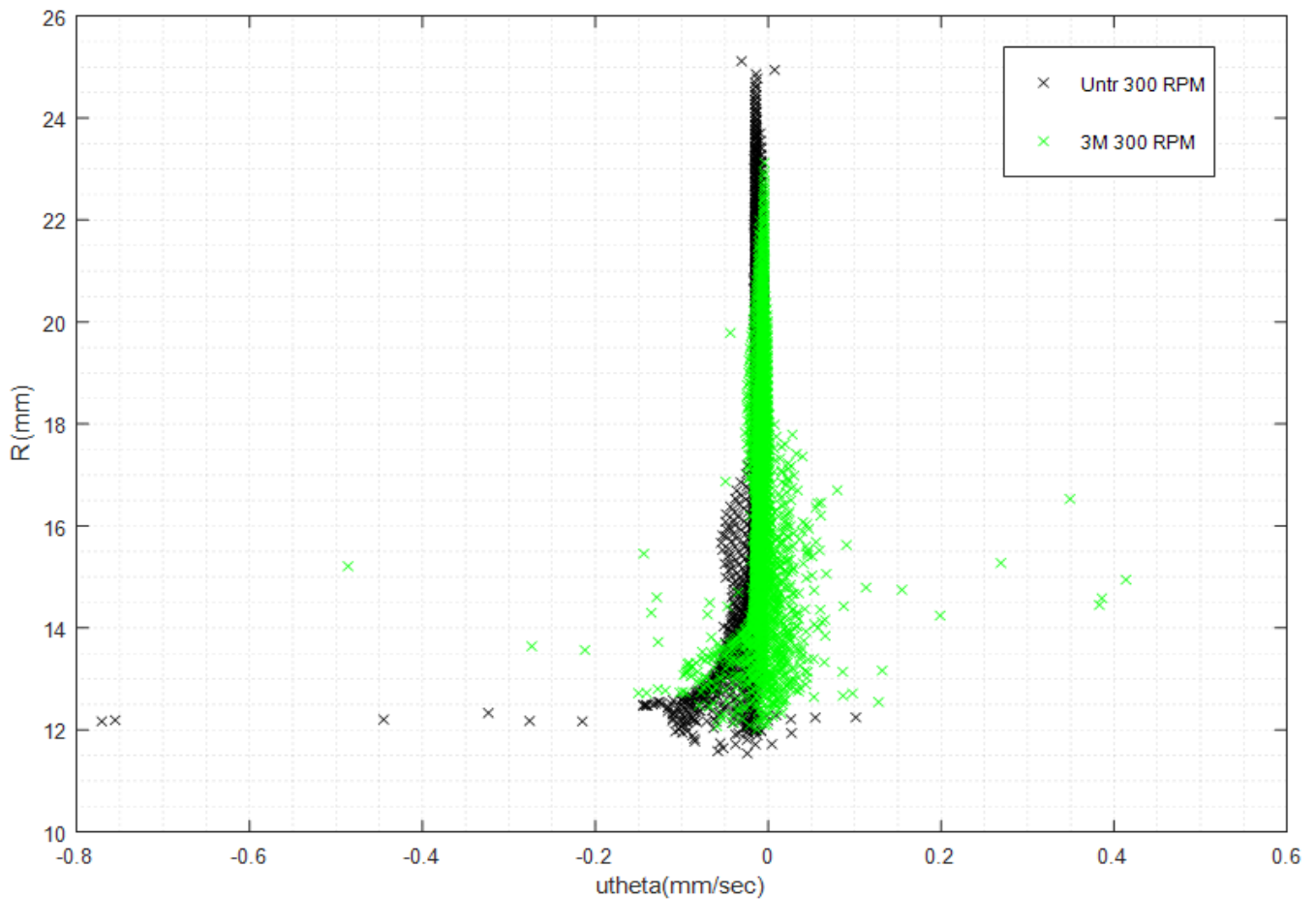
Εικόνα 81. Προφίλ της ταχύτητας u_θ συναρτήση της ακτίνας του κυλίνδρου για τις 150 RPM.



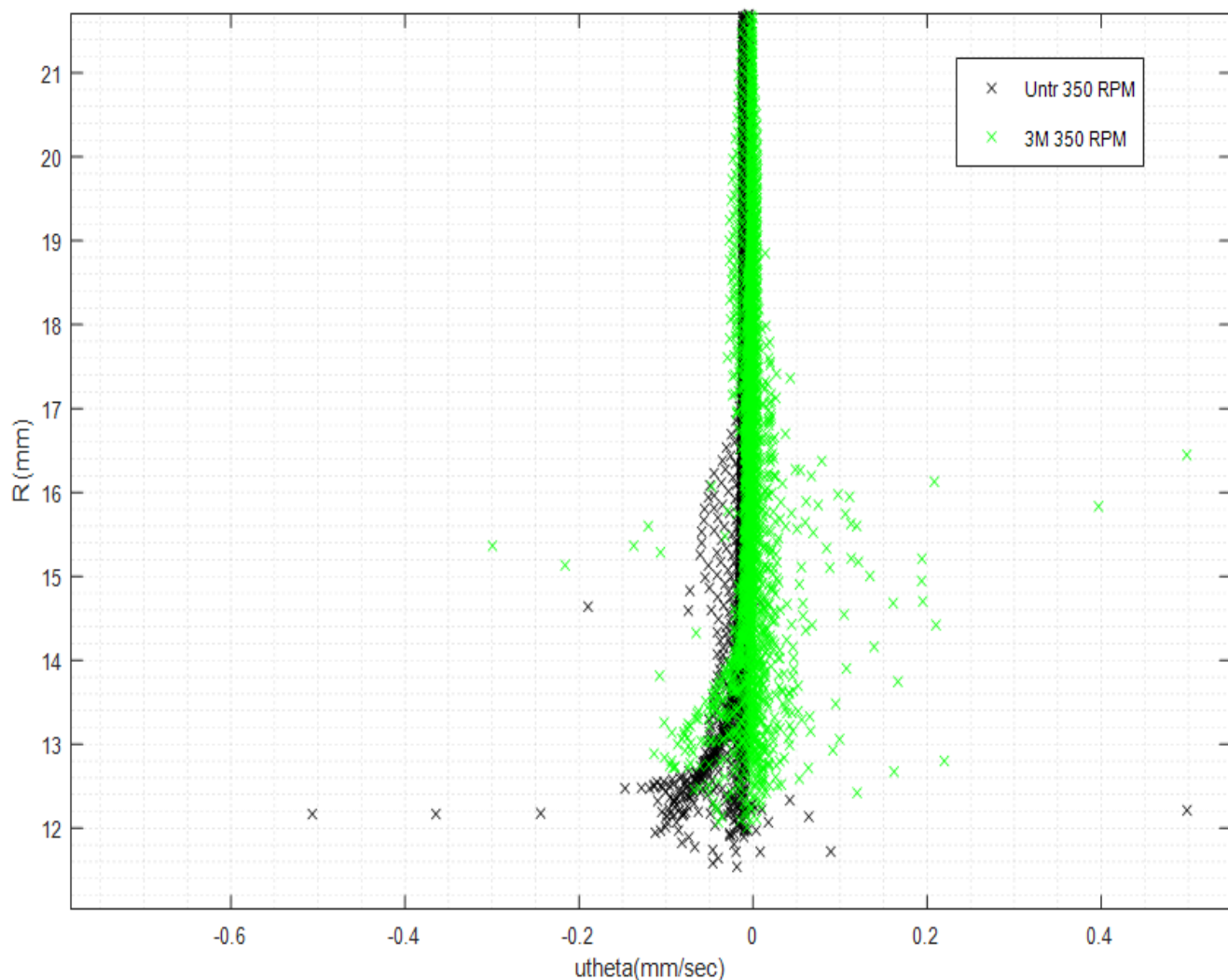
Εικόνα 82. Προφίλ της ταχύτητας u_θ συναρτήση της ακτίνας του κυλίνδρου για τις 200 RPM.



Εικόνα 83. Προφίλ της ταχύτητας u_θ συναρτήση της ακτίνας του κυλίνδρου για τις 250 RPM.



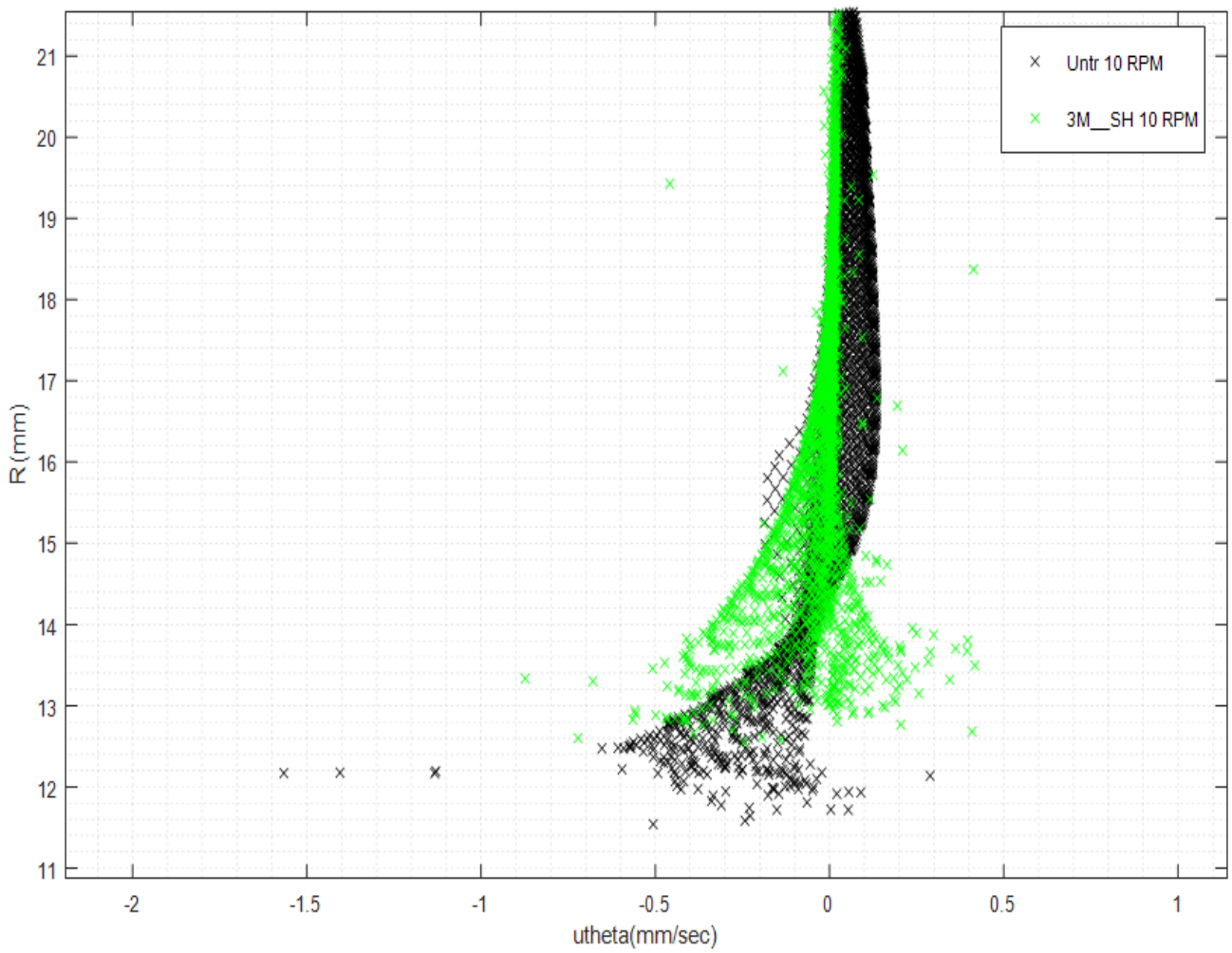
Εικόνα 84. Προφίλ της ταχύτητας u_θ συναρτήση της ακτίνας του κυλίνδρου για τις 300 RPM.



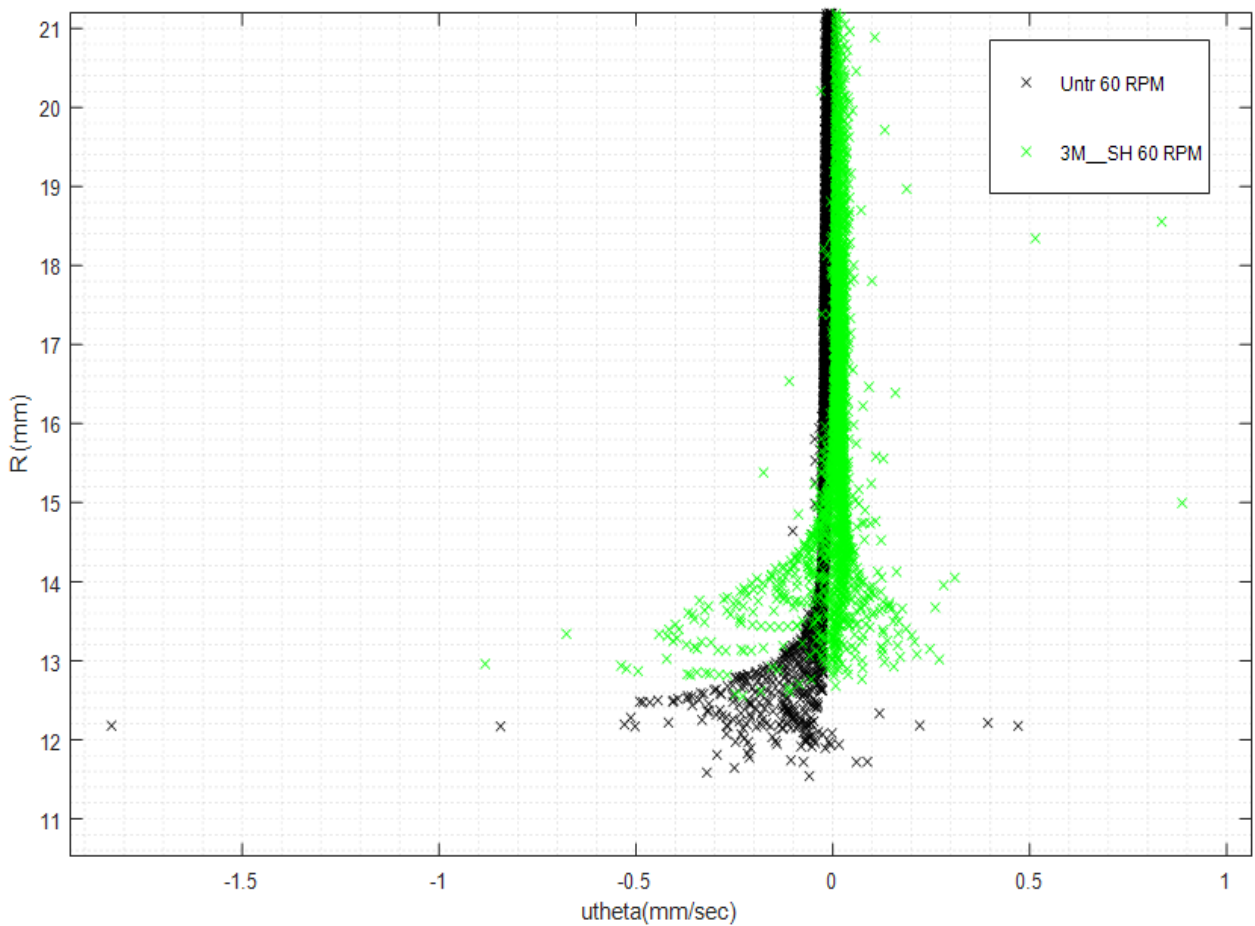
Εικόνα 85. Προφίλ της ταχύτητας u_θ συναρτήσει της ακτίνας του κυλίνδρου για τις 350 RPM.

5.14 Σύγκριση της κάθετης στην ακτίνα συνιστώσα της ταχύτητας της Untreated με επιφάνεια riblet υπερυδροφόβα επεξεργασμένη

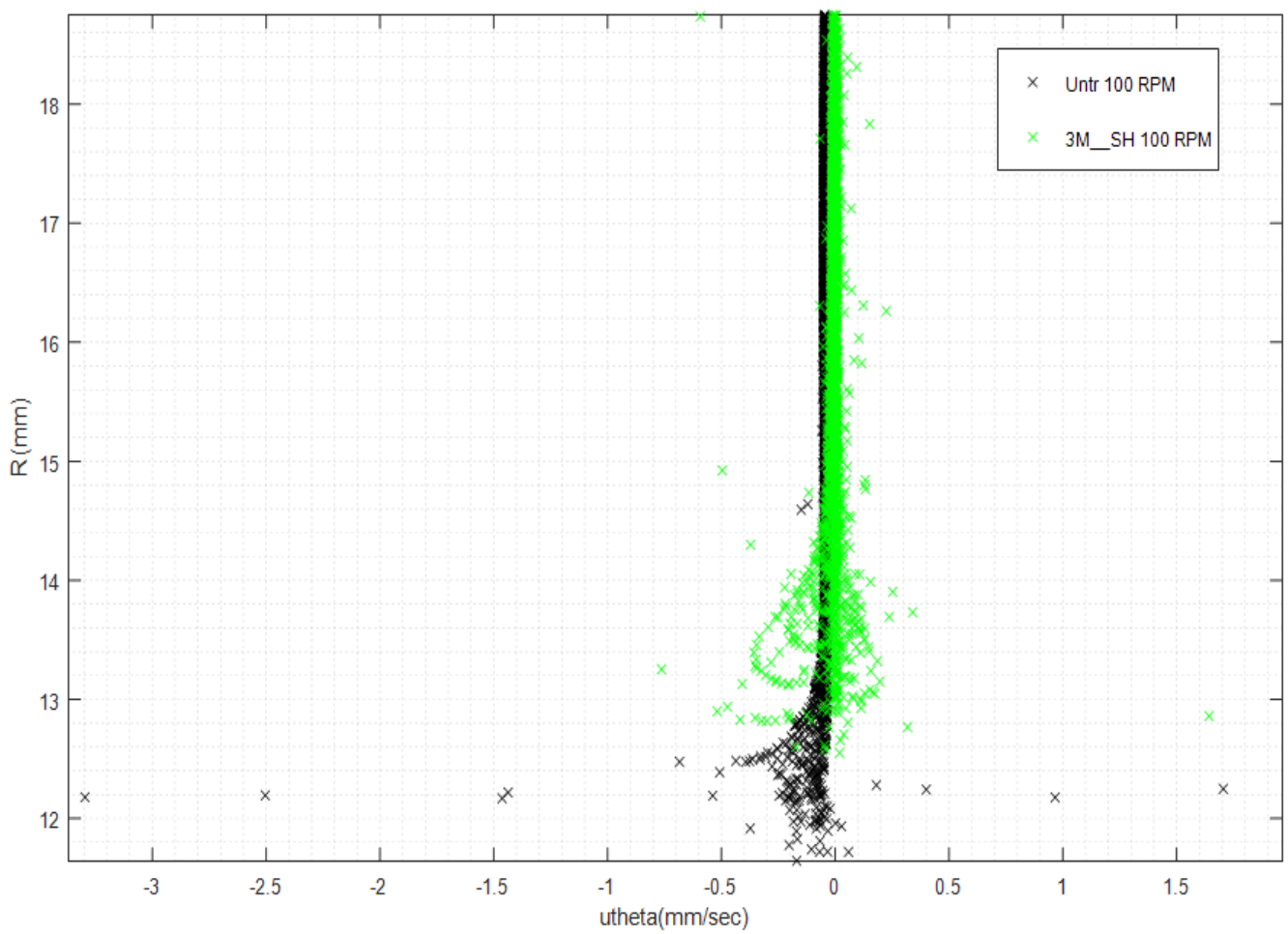
Τα διαγράμματα που παρουσιάζονται παρακάτω αφορούν το σύνολο των ταχυτήτων περιστροφής του κυλίνδρου όταν αυτός περιστρέφεται έχοντας κολλημένη untreated και επιφάνεια με riblet της 3M η οποία όμως έχει καταστεί υπερυδροφόβα. Στη περίπτωση της riblet 3M υπερυδροφόβης επιφάνειας η μετρούμενη ακτίνα του κυλίνδρου μετά τη προσάρτηση της βρέθηκε $R=12.7\text{mm}$. Επομένως οποιεσδήποτε τιμές της u_θ εμφανίζονται για τιμές της ακτίνας μικρότερες των 12.6mm για την untreated και μικρότερες των 12.7mm για την riblet 3M δεν πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν καθώς αποτελούν σφάλμα της μεθόδου. Η 3M επιφάνεια παρατηρούμε ότι παρουσιάζει αρκετά μικρότερες ταχύτητες κοντά στο περιστρεφόμενο κύλινδρο σε σύγκριση με την untreated για τις 10 RPM καθόπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα όπου το 'νεφος' των σημείων για την 3M riblet ξεκινάει από μικρότερες τιμές της u_θ απ'ότι το αντίστοιχο της untreated.



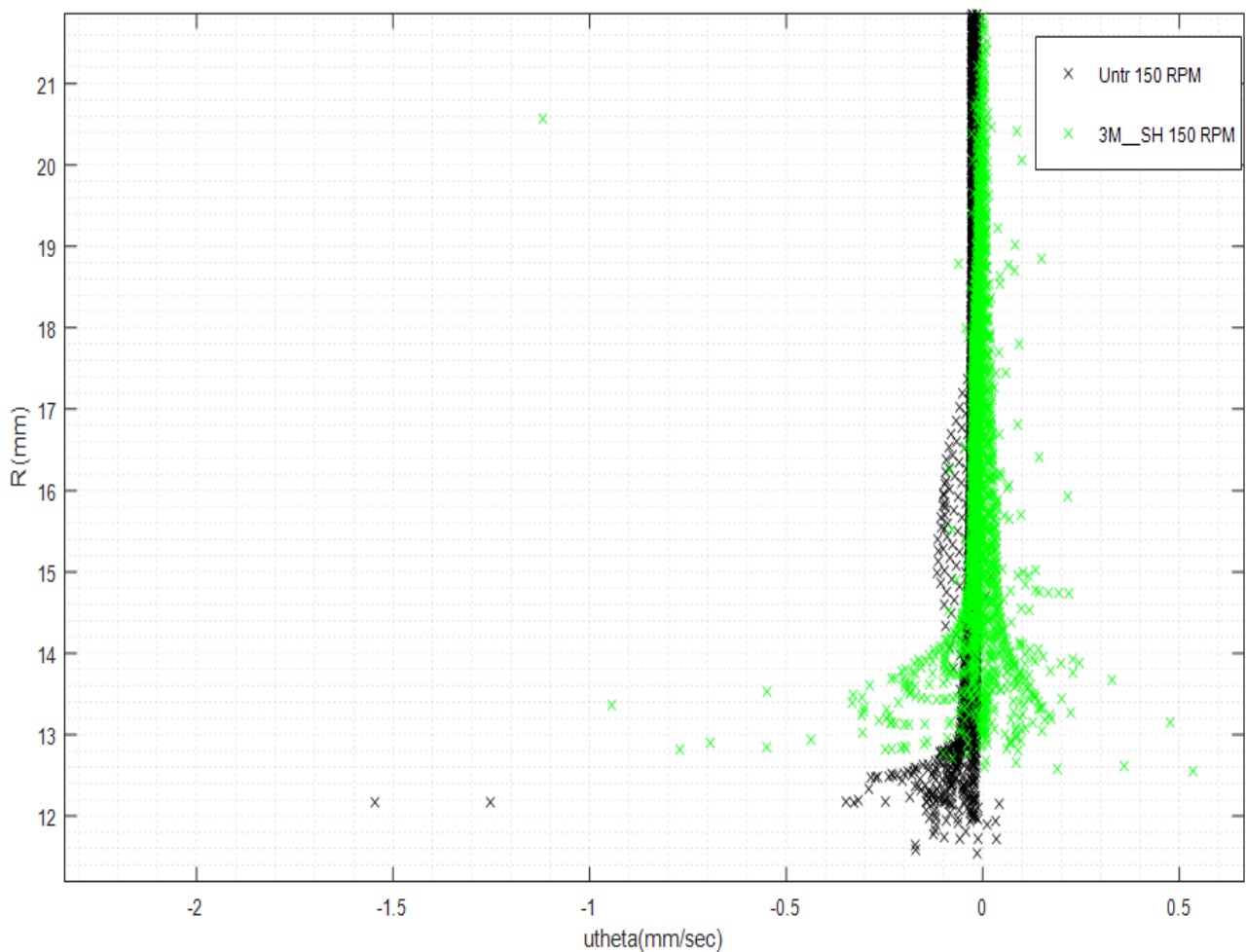
Εικόνα 86. Προφίλ της ταχύτητας u_θ συναρτήση της ακτίνας του κυλίνδρου για τις 10 RPM.



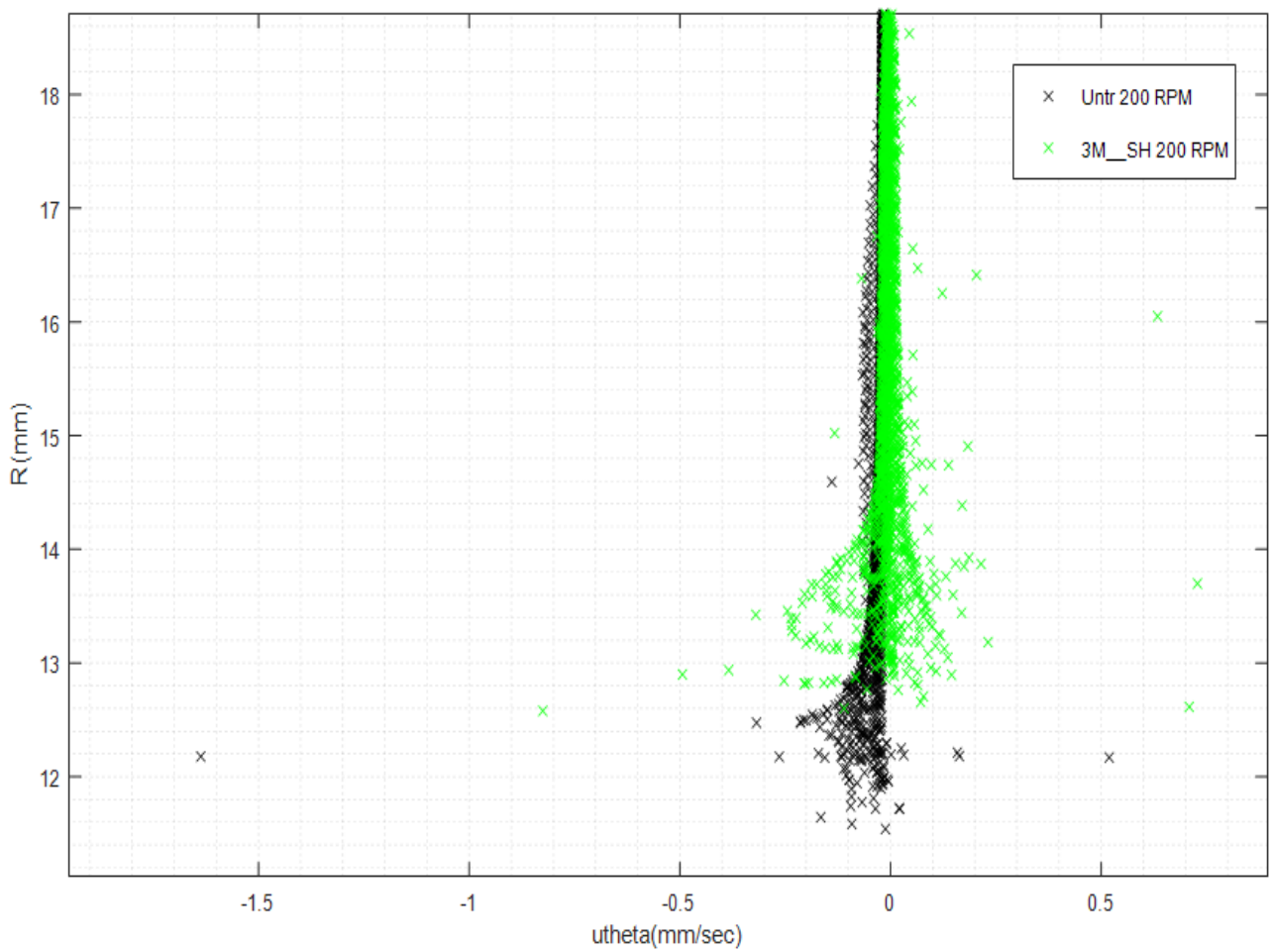
Εικόνα 87. Προφίλ της ταχύτητας u_θ συναρτήση της ακτίνας του κυλίνδρου για τις 60 RPM.



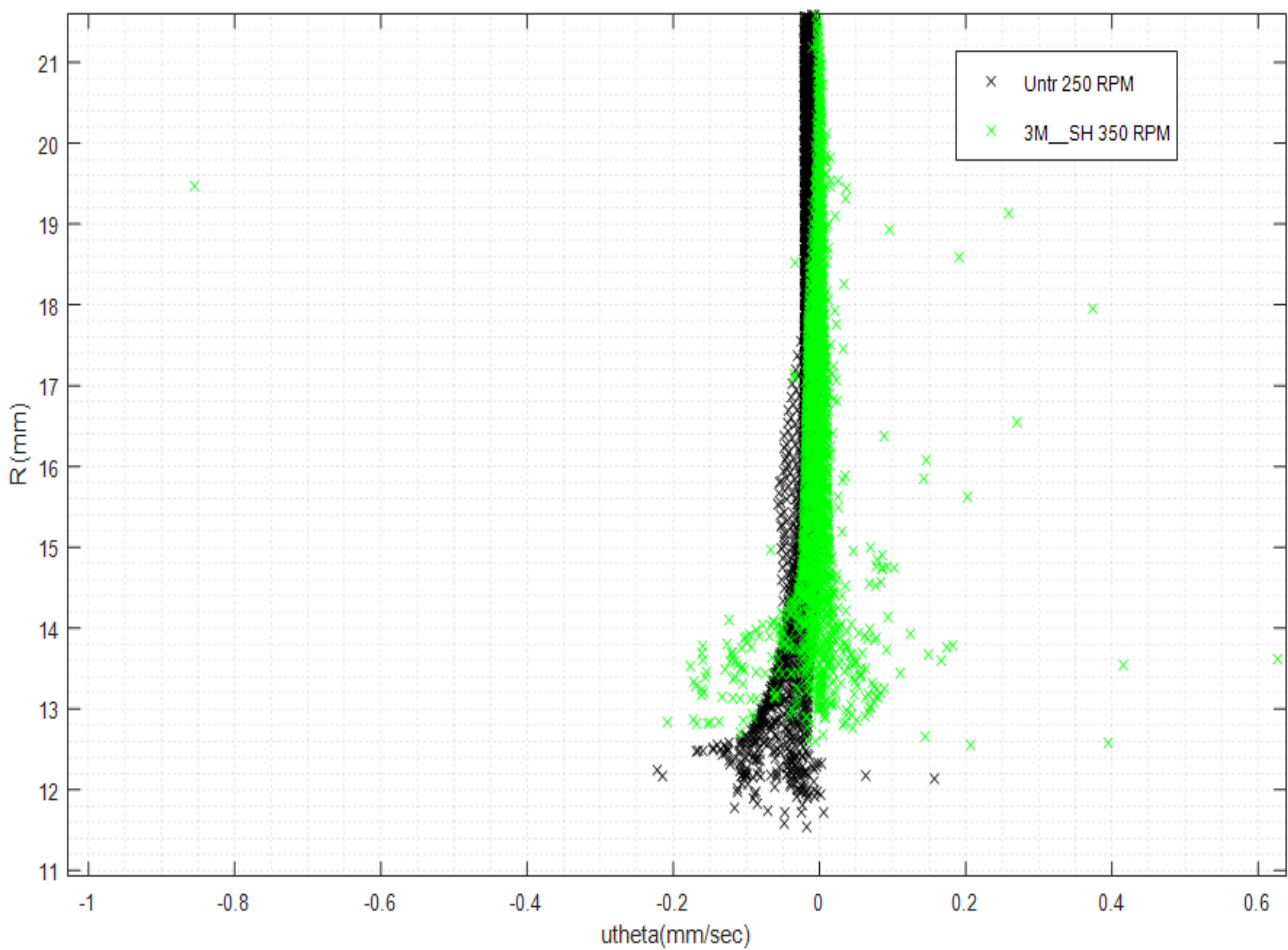
Εικόνα 88. Προφίλ της ταχύτητας u_θ συναρτήση της ακτίνας του κυλίνδρου για τις 100 RPM.



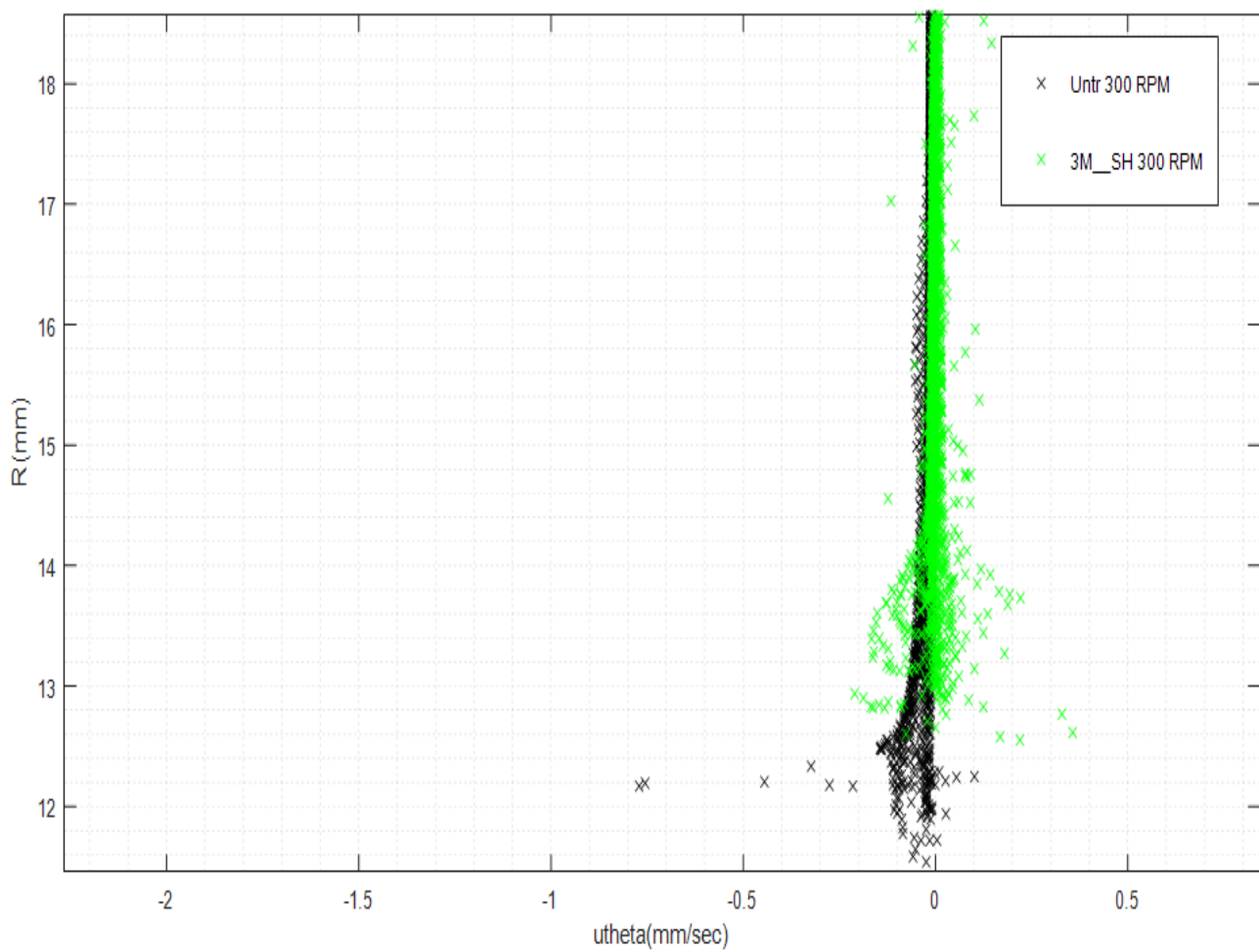
Εικόνα 89. Προφίλ της ταχύτητας u_θ συναρτήση της ακτίνας του κυλίνδρου για τις 150 RPM.



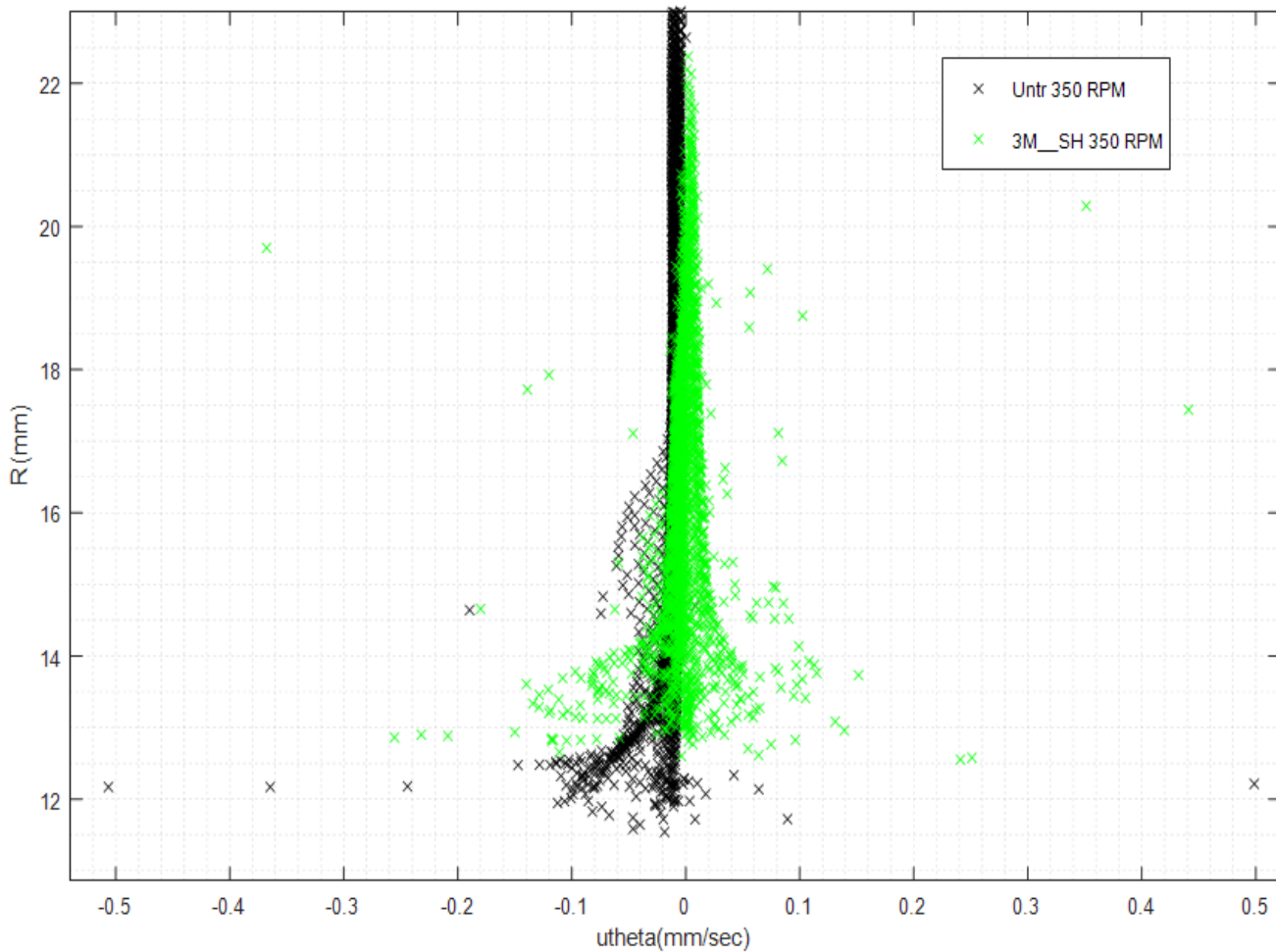
Εικόνα 90. Προφίλ της ταχύτητας u_θ συναρτήση της ακτίνας του κυλίνδρου για τις 200 RPM.



Εικόνα 91. Προφίλ της ταχύτητας u_θ συναρτήση της ακτίνας του κυλίνδρου για τις 250 RPM.



Εικόνα 92. Προφίλ της ταχύτητας u_θ συναρτήση της ακτίνας του κυλίνδρου για τις 300 RPM.



Εικόνα 93. Προφίλ της ταχύτητας u_θ συναρτήση της ακτίνας του κυλίνδρου για τις 350 RPM.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα

Η ταχεία ανάπτυξη υπερυδροφобων επιφανειών τόσο στη σφαίρα καθημερινών εφαρμογών όσο και σαν αυτοτελές κομμάτι της πειραματικής και ερευνητικής διαδικασίας αποτελεί ένα φαινόμενο διαρκούς μελέτης και παρατήρησης. Η αρχή έγινε το 1756 με τον Leidenfrost ο οποίος διαπίστωσε ότι αν μια σταγόνα εναποτεθεί σε μια επιφάνεια υψηλής θερμοκρασίας (>200 °C) τότε η σταγόνα εξαιτίας του στρώματος του νερού που ατμοποιείται λόγω της υψηλής επιφανειακής θερμοκρασίας σχηματίζει ένα φιλμ αέρα στη διεπιφάνεια επαφής υγρού-στερεού το οποίο και αποτρέπει τη διαβροχή της επιφάνειας. Από τότε μέχρι σήμερα ένα σημαντικό κομμάτι της ερευνητικής κοινότητας έχει μελετήσει τις προϋποθέσεις, τις εφαρμογές καθώς και τα όρια που εμφανίζει η παρουσία υπερυδροφобων και γενικότερα υδατο-απωθητικών χαρακτηριστικών σε μια επιφάνεια. Συμπεριλαμβανομένων και των πρόσφατων εξελίξεων στη εφαρμογή αυτού του τύπου των επιφανειών σε μια σειρά περιπτώσεων μπορούμε να καταγράψουμε τους τομείς στους οποίους εμφανίζουν σημαντικά και υποσχόμενα αποτελέσματα. Εξαιρώντας την θεμελιώδη δυνατότητα που παρέχουν οι συγκεκριμένες επιφάνειες να απωθούν το νερό, ερευνητές έχουν αναπτύξει επιτυχώς υπερυδροφобες επιφάνειες με δυνατότητες όπως ο αυτο-καθαρισμός, το antifogging όπου αποτρέπεται η συγκέντρωση σταγονιδίων στην επιφάνεια τα οποία θα μπορούσαν να σχηματίσουν ένα ομιχλώδες φιλμ, η αντιστροφή της διάβρωσης της επιφάνειας, η αντιρρυπαντική, η μείωση της οπισθέλκουσας για υποβρύχιες εφαρμογές καθώς και η δυνατότητα να παρεμποδίζουν την δημιουργία και επικάλυψη πάγου.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η ροή του νερού σε γειτνίαση με την επιφάνεια στρεφόμενου κυλίνδρου για διαφορετικά χαρακτηριστικά τραχύτητας, υπερυδροφобικότητας και υδροφιλικότητας χρησιμοποιώντας τη τεχνική του PIV.

Η πειραματική διαδικασία διεξήχθη σε ένα σύνολο ρυθμών διάτμησης (10-350 RPM) και μελετήθηκε η το προφίλ της ταχύτητας του ρευστού για κάθε περίπτωση.

Ορισμένα συμπεράσματα που μπορούν να διεξαχθούν με ασφάλεια είναι τα εξής

- Με τη χρησιμοποίηση της υπερυδροφобης επιφάνειας δεν παρατηρήθηκε η ύπαρξη σημαντικού μήκους ολίσθησης που να επηρεάζει τη ροή εμφανίζοντας με αυτό το τρόπο μικρότερες ταχύτητες για το ρευστό κοντά στο περιστρεφόμενο στερεό όριο του κυλίνδρου το οποίο θα ήταν και το επιθυμητό, και αναμενόμενο με βάση την θεωρία, αποτέλεσμα. Γενικότερα για το σύνολο σχεδόν των εξεταζόμενων στροφών του κυλίνδρου η υπερυδροφобη παρουσιάζει μεγαλύτερα προφίλ ταχυτήτων από την untreated επιφάνεια. Μοναδική εξαίρεση οι 350 RPM όπου φαίνεται να παρουσιάζουν ίδια ταχύτητα κοντά στο στερεό όριο και σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η συμπεριφορά της, σχετικά με την ταχύτητα που παρουσιάζεται στην untreated, δείχνει να βελτιώνεται όσο αυξάνονται οι στροφές πιθανών να αναμέναμε καλύτερα αποτελέσματα για μεγαλύτερες ταχύτητες περιστροφής. Επίσης παρατηρείται ότι οι υπερυδροφобες επιφάνειες προκαλούν μεγαλύτερες ταχύτητες όχι μόνο κοντά στο στρεφόμενο κύλινδρο αλλά και σε μεγαλύτερη απόσταση προκαλώντας έτσι ένα ισχυρό ανοδικό ρεύμα σε σχέση με τις άλλες επιφάνειες.
- Η επιφάνεια giblet που έχει καταστεί υπερυδροφобη (3M_SH) παρουσιάζει την πιο χαμηλή αδιάστατη ταχύτητα u στις 10 RPM (~58%U) και μέχρι τις 350 RPM έχει αποκτήσει ταχύτητα στο στερεό όριο του κυλίνδρου της τάξης του 13%U. Η συγκεκριμένη επιφάνεια παρουσιάζει χαμηλότερες ταχύτητες για το ρευστό με το οποίο γειτνιάζει κοντά στο κινούμενο όριο

συγκριτικά με την untreated μέχρι τις 250 RPM όμως από τις στροφές αυτές και έπειτα εμφανίζει μεγαλύτερη ταχύτητα από την untreated κοντά στο κύλινδρο.

- Τέλος η 3M riblet φαίνεται να παρουσιάζει συνολικά χαμηλότερη ταχύτητα κοντά στο περιστρεφόμενο κύλινδρο συγκριτικά με την untreated εκτός των περιπτώσεων που ο κύλινδρος στρέφεται με 60 και 300 RPM.

Πιθανή αιτία για την μη επίτευξη ικανοποιητικού αποτελέσματος είναι η απώλεια του πλάστρον κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Ένα σημαντικό μειονέκτημα των συγκεκριμένων επιφανειών όπως επισημαίνεται και από αρκετές ερευνητικές μελέτες είναι ότι δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερη αντοχή στο πέρασμα του χρόνου χάνοντας σταδιακά την υπευδρόφοβη ικανότητά τους.

Μια άλλη παράμετρος που πιθανόν να αποτελεί και αιτία για τα μη ικανοποιητικά αποτελέσματα είναι το ότι η υπευδρόφοβη επιφάνεια κολλήθηκε πάνω στο κύλινδρο από ανθρώπινο χέρι το οποίο πέρα από το γεγονός ότι αυξάνει το κίνδυνο να υπάρξει γενικευμένη επαφή με την επιφάνεια ‘χαλώνοντας’ ουσιαστικά την υπευδρόφοβική της ικανότητα ταυτόχρονα ελλοχεύει και ο κίνδυνος να δημιουργηθούν πτυχώσεις/εσοχές οι οποίες να συσσωρεύσουν ρευστό επηρεάζοντας σημαντικά τη πειραματική διαδικασία. Το συγκεκριμένο ζήτημα εντοπίζεται και στη βιβλιογραφία καθώς ακόμα και αν χρησιμοποιηθούν υψηλής ποιότητας υπευδρόφοβα υλικά, όπως είναι τα ενεργά νανοσωματίδια πυριτίου, είναι αρκετά δύσκολο να προσαρμοστούν σε μια επιφάνεια δίχως να επηρεαστεί η υπευδρόφοβη ικανότητά τους.

Τέλος μια παράμετρος που είναι άξια αναφοράς είναι το ότι ο κύλινδρος έρχεται σε επαφή με το νερό όντας περιστρεφόμενος γεγονός που αποτελεί σημαντική διαφοροποίηση συγκριτικά με πολλές μελέτες που έχουν παρουσιάσει θετικά αποτελέσματα για στατικές ως επί το πλείστον εφαρμογές υπευδρόφοβων επιφανειών. Η συγκεκριμένη παράμετρος ήταν γνωστή εξαρχής και έγινε προσπάθεια να υπερκεραστεί από τη μερική πλήρωση της δεξαμενής με ρευστό ούτως ώστε η υπευδρόφοβη επιφάνεια να έρχεται σε επαφή με τον αέρα πριν βυθιστεί στο νερό.

Μελλοντικές Επεκτάσεις

Το πειραματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε στη παρούσα διπλωματική εργασία μπορεί να λάβει στο μέλλον τις συγκεκριμένες προεκτάσεις

- Πραγματοποίηση μετρήσεων ακόμη πιο κοντά στο περιστρεφόμενο όριο του κυλίνδρου ώστε να επιβεβαιωθεί η πραγματική μείωση της οπισθέλκουσας αντίστασης.
- Για να εστιαστεί ακόμα περισσότερο η περιοχή της μέτρησης και να απομονωθεί η περιοχή όπου μπορεί να υπάρξει συνεισφορά στη μείωση της ταχύτητας ολίσθησης του ρευστού από τις επιφάνειες που φέρουν τραχύτητα ενδείκνυται η χρησιμοποίηση γυάλινου κυλινδρικού περιβλήματος το οποίο θα περιβάλλει το περιστρεφόμενο κύλινδρο έχοντας τον ίδιο δείκτη διάθλασης με το εργαζόμενο μέσο.
- Κατάλληλη τροποποίηση της επιφανειακής τοπογραφίας της υπευδρόφοβης επιφάνειας με τρόπους που συστήνονται από ένα μεγάλο μέρος της βιβλιογραφίας για την όσο το δυνατόν επίτευξη μεγαλύτερου μήκους ολίσθησης καθώς και τρόποι διατήρησης του εγκλωβισμένου αέρα ούτως ώστε να υποδεικνύουν αντοχή με το πέρασμα του χρόνου.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α'

ΚΩΔΙΚΑΣ MATLAB

```
clc
close all
clear

N=350;%rpm
R1=12.6*10^-3;%m
omega=2*pi*N/60;
U1=omega*R1;%m/s
dT=1000;

%%%%% Load files %%%%%
%1
cd('C:\Users\George\Desktop\Rotating cylinder
32x32\14February_3M_32x32\3M_350RPM\Analysis')
fnames1 = dir('*.vec');
start1=1;
end1=500;
sell=start1:1:end1;
numfiles1 = length(sell);
val1 = cell(numfiles1,1);
j=0;
for K = start1:end1
    j=j+1;
    val1{j} = importdata(fnames1(K).name);
end

%%%%% Remove invalid vectors - conversion(mm/sec) %%%%%
n1=zeros(1,5355);
for i=1:5355;
    for K = 1:numfiles1
        if val1{K}.data(i,5)==-1;
            val1{K}.data(i,3)=NaN;
            val1{K}.data(i,4)=NaN;
        else n1(i)=n1(i)+1;
        end

        vec1{K}(i,1)=val1{K}.data(i,1);
        vec1{K}(i,2)=val1{K}.data(i,2);
        vec1{K}(i,3)=val1{K}.data(i,3);
        vec1{K}(i,4)=val1{K}.data(i,4);
    end
end

%%%% Averaging %%%%%
for i=1:5355;
    for j=1:500;
        A(j,1:5,i)=val1{j}.data(i,1:5);
    end
end

for k=1:5355;
    avg(k,3:4)= nanmean(A(:,3:4,k));
    TI (k,3:4)= nanstd(A(:,3:4,k));
    avg(k,1:2)= A(1,1:2,k);
    avg(k,1:2)= A(1,1:2,k);
end

xk=758.5;
yk=1411;
```

```

ratio=52.35; %pixels/mm
xkmm=xk/ratio;
ykmm=yk/ratio;

for i=1:5355
    RR(i)=sqrt((avg(i,2)-yk)^2+(avg(i,1)-xk)^2)/ratio;
% if RR(i)<=12.5; avg(i,3)=0; avg(i,4)=0;
% end
end

x1=vec2mat(avg(:,1),85);
xmm=x1/ratio;
y1=vec2mat(avg(:,2),85);
ymm=y1/ratio;
u1=vec2mat(avg(:,3),85);
v1=vec2mat(avg(:,4),85);
uf=vec2mat(TI(:,3),85);
vf=vec2mat(TI(:,4),85);
umms=u1/(52.35*dT*10^-6);
vmms=v1/(52.35*dT*10^-6);

% % %%% Vector Field %%%
% % figure(1)
% % quiver(xmm,ymm,-umms/(U1*1000),vmms/(U1*1000),15)
% % title('Vector Field');
% % xlabel('x(mm)')
% % ylabel('y(mm)')
% % axis equal

%% %% Velocity Magnitude-U_(theta) %%
for i=1:63
    for j=1:85
        mag1(i,j)=sqrt(umms(i,j)^2+vmms(i,j)^2);

        if vmms(i,j)>0;
            AK1x(i,j)=xkmm-xmm(i,j);
            AK1y(i,j)=ykmm-ymm(i,j);
            AM1y(i,j)=vmms(i,j);
            theta1(i,j)=acosd(dot([AK1x(i,j) AK1y(i,j)], [0 AM1y(i,j)])/(norm([AK1x(i,j)
AK1y(i,j)])*norm([0 AM1y(i,j)]))));

            Utheta1(i,j)=cosd(theta1(i,j))*umms(i,j);
            Utheta2(i,j)=sind(theta1(i,j))*vmms(i,j);
            utheta(i,j)=Utheta1(i,j)-Utheta2(i,j);
        else
            AK1x(i,j)=xmm(i,j)-xkmm;
            AK1y(i,j)=ymm(i,j)-ykmm;
            AM1y(i,j)=vmms(i,j);
            theta1(i,j)=acosd(dot([AK1x(i,j) AK1y(i,j)], [0 AM1y(i,j)])/(norm([AK1x(i,j)
AK1y(i,j)])*norm([0 AM1y(i,j)]))));

            Utheta1(i,j)=cosd(theta1(i,j))*umms(i,j);
            Utheta2(i,j)=sind(theta1(i,j))*vmms(i,j);
            utheta(i,j)=Utheta1(i,j)+Utheta2(i,j);
        end

    end

end

B=reshape(utheta',[5355,1]); % utheta reshape matrix to column%
R=reshape(RR,[5355,1]); %RR reshpaee matrix to column%

figure(4)
contourf(x1,y1,mag1/(U1*1000),[0:0.05:1],'ShowText','on');

```

```

title('Magnitude Contour Aluminum Surface')
xlabel('x')
ylabel('y')
colorbar
colormap jet
axis equal tight

figure(12)
plot(-B/(U1*1000),R,'xk')
grid minor
xlabel('utheta(mm/sec)')
ylabel('R (mm)')
str=sprintf('u_{\theta}- %d RPM:',N);

figure(3)
g1=plot(-umms(44:end,50)/(U1*1000),-(ymm(44:end,50)-ymm(44,50))/12.6,'-
ob','MarkerSize',3);
grid minor
xlabel('u/U')
ylabel('r')
str=sprintf('u/U - %d RPM:',N);
title(str)

```

References

- (1827). Mémoire sur les lois du mouvement des fluides, publisher not identified.
- A Patankar, N. (2010). Consolidation of Hydrophobic Transition Criteria by Using an Approximate Energy Minimization Approach.
- A Wier, K. and T. J McCarthy (2006). Condensation on Ultrahydrophobic Surfaces and Its Effect on Droplet Mobility: Ultrahydrophobic Surfaces Are Not Always Water Repellant.
- A. Barth, C., M. Samaha, H. Tafreshi and M. Gad-el-Hak (2013). Convective Mass Transfer From Submerged Superhydrophobic Surfaces: Turbulent Flow.
- A. Mørch, K. (2007). Reflections on cavitation nuclei in water.
- A. Thompson, P. and S. M. Troian (1997). A General Boundary Condition for Liquid Flow at Solid Surfaces.
- Adera, S., R. Raj, R. Enright and E. N Wang (2013). Non-wetting droplets on hot superhydrophilic surfaces.
- Atchley, A. A. and A. Prosperetti (1989). "The crevice model of bubble nucleation." The Journal of the Acoustical Society of America **86**(3): 1065-1084.
- Bachhuber, C. and C. Sanford (1974). "The rise of small bubbles in water." Journal of Applied Physics **45**(6): 2567-2569.
- Baldoni, F. (1996). "On slippage induced by surface diffusion." Journal of Engineering Mathematics **30**(6): 647-659.
- Barrat, J.-L. and L. Bocquet (1999). "Influence of wetting properties on hydrodynamic boundary conditions at a fluid/solid interface." Faraday Discussions **112**(0): 119-128.
- Basu, B. B. J. and A. K. Paranthaman (2009). "A simple method for the preparation of superhydrophobic PVDF-HMFS hybrid composite coatings." Applied Surface Science **255**(8): 4479-4483.
- Baudry, J., E. Charlaix, A. Tonck and D. Mazuyer (2001). "Experimental Evidence for a Large Slip Effect at a Nonwetting Fluid-Solid Interface." Langmuir **17**(17): 5232-5236.
- Blake, T. D. (1990). "Slip between a liquid and a solid: D.M. Tolstoy's (1952) theory reconsidered." Colloids and Surfaces **47**(Supplement C): 135-145.
- Boinovich, L., A. M. Emelyanenko and A. S. Pashinin (2010). "Analysis of Long-Term Durability of Superhydrophobic Properties under Continuous Contact with Water." ACS Applied Materials & Interfaces **2**(6): 1754-1758.
- Bonaccorso, E., H.-J. Butt and V. Craig (2003). Surface Roughness and Hydrodynamic Boundary Slip of a Newtonian Fluid in a Completely Wetting System.
- Bonaccorso, E., M. Kappl and H.-J. Butt (2002). Hydrodynamic Force Measurements: Boundary Slip of Water on Hydrophilic Surfaces and Electrokinetic Effects.

Bormashenko, E. (2015). "Progress in understanding wetting transitions on rough surfaces." Advances in Colloid and Interface Science **222**(Supplement C): 92-103.

Callies, M. and D. Quere (2005). "On water repellency." Soft Matter **1**(1): 55-61.

Cao, L., H.-H. Hu and D. Gao (2007). "Design and Fabrication of Micro-textures for Inducing a Superhydrophobic Behavior on Hydrophilic Materials." Langmuir **23**(8): 4310-4314.

Cao, L., T. P. Price, M. Weiss and D. Gao (2008). Super Water- and Oil-Repellent Surfaces on Intrinsically Hydrophilic and Oleophilic Porous Silicon Films.

Carambassis, A., L. C. Jonker, P. Attard and M. W. Rutland (1998). "Forces Measured between Hydrophobic Surfaces due to a Submicroscopic Bridging Bubble." Physical Review Letters **80**(24): 5357-5360.

Carlborg, C. and W. Wijngaart (2011). Sustained Superhydrophobic Friction Reduction at High Liquid Pressures and Large Flows.

Ceccio, S. L. (2010). "Friction Drag Reduction of External Flows with Bubble and Gas Injection." Annual Review of Fluid Mechanics **42**(1): 183-203.

Chen, H., F. Rao, X. Shang, D. Zhang and I. Hagiwara (2013). "Biomimetic Drag Reduction Study on Herringbone Riblets of Bird Feather." Journal of Bionic Engineering **10**(3): 341-349.

Cheng, Y.-T., D. E. Rodak, C. A. Wong and C. A. Hayden (2006). Effects of Micro- and Nano-Structures on the Self-Cleaning Behaviour of Lotus Leaves.

Choi, C.-H. and C.-J. Kim (2006). "Large Slip of Aqueous Liquid Flow over a Nanoengineered Superhydrophobic Surface." Physical Review Letters **96**(6): 066001.

Choi, C.-H. and C.-J. Kim (2006). Large Slip of Aqueous Liquid Flow Over a Nanoengineered Superhydrophobic Surface.

Christenson, H. K. and P. M. Claesson (2001). "Direct measurements of the force between hydrophobic surfaces in water." Advances in Colloid and Interface Science **91**(3): 391-436.

Cottin-Bizonne, C., C. Barentin, É. Charlaix, L. Bocquet and J.-L. Barrat (2004). "Dynamics of simple liquids at heterogeneous surfaces: Molecular-dynamics simulations and hydrodynamic description." The European Physical Journal E **15**(4): 427-438.

Cottin-Bizonne, C., S. Jurine, J. Baudry, J. Crassous, F. Restagno and É. Charlaix (2002). "Nanorheology: An investigation of the boundary condition at hydrophobic and hydrophilic interfaces." Eur. Phys. J. E **9**(1): 47-53.

Craig, V., C. Neto and D. R. M. Williams (2001). Shear-Dependent Boundary Slip in an Aqueous Newtonian Liquid.

Daniello, R. J., N. E. Waterhouse and J. P. Rothstein (2009). "Drag reduction in turbulent flows over superhydrophobic surfaces." Physics of Fluids **21**(8): 085103.

Davis, A. M. J. and E. Lauga (2010). "Hydrodynamic friction of fakir-like superhydrophobic surfaces." Journal of Fluid Mechanics **661**: 402-411.

Dorrer, C. and J. R  he (2007). Condensation and Wetting Transitions on Microstructured Ultrahydrophobic Surfaces.

Drelich, J. and E. Chibowski (2010). "Superhydrophilic and Superwetting Surfaces: Definition and Mechanisms of Control." Langmuir **26**(24): 18621-18623.

Du, P., J. Wen, Z. Zhang, D. Song, A. Ouahsine and H. Hu (2017). "Maintenance of air layer and drag reduction on superhydrophobic surface." Ocean Engineering **130**(Supplement C): 328-335.

Eggers, J. and H. A. Stone (2004). "Characteristic lengths at moving contact lines for a perfectly wetting fluid: the influence of speed on the dynamic contact angle." Journal of Fluid Mechanics **505**: 309-321.

Elliott, P., S. Stagon, H. Huang, D. U. Furrer, S. Burlatsky, Thomas and P. Filburn (2015). Combined Hydrophobicity and Mechanical Durability through Surface Nanoengineering.

Emami, B., A. A. Hemeda, M. M. Amrei, A. Luzar, M. Gad-el-Hak and H. V. Tafreshi (2013). "Predicting longevity of submerged superhydrophobic surfaces with parallel grooves." Physics of Fluids **25**(6): 062108.

Emami, B., H. V. Tafreshi, M. Gad-el-Hak and G. C. Tepper (2011). "Predicting shape and stability of air-water interface on superhydrophobic surfaces with randomly distributed, dissimilar posts." Applied Physics Letters **98**(20): 203106.

Flynn, M. R. and J. W. M. Bush (2008). "Underwater breathing: the mechanics of plastron respiration." Journal of Fluid Mechanics **608**: 275-296.

Forsberg, P., F. Nikolajeff and M. Karlsson (2011). "Cassie-Wenzel and Wenzel-Cassie transitions on immersed superhydrophobic surfaces under hydrostatic pressure." Soft Matter **7**(1): 104-109.

Fox, F. E. and K. F. Herzfeld (1954). "Gas Bubbles with Organic Skin as Cavitation Nuclei." The Journal of the Acoustical Society of America **26**(6): 984-989.

Fu, Y. F., C. Q. Yuan and X. Q. Bai (2017). "Marine drag reduction of shark skin inspired riblet surfaces." Biosurface and Biotribology **3**(1): 11-24.

FUJISHIMA, A. (2011). PHOTOCATALYTIC AND SELF-CLEANING FUNCTIONS OF TiO₂ COATINGS. Sustainable Energy and Environmental Technologies, WORLD SCIENTIFIC: 1-5.

Fukagata, K., N. Kasagi and P. Koumoutsakos (2006). "A theoretical prediction of friction drag reduction in turbulent flow by superhydrophobic surfaces." Physics of Fluids **18**(5): 051703.

Gogte, S., P. Vorobieff, R. Truesdell, A. Mammoli, F. v. Swol, P. Shah and C. J. Brinker (2005). "Effective slip on textured superhydrophobic surfaces." Physics of Fluids **17**(5): 051701.

Govardhan-Ankulkar, R., G. S. Srinivas, A. Asthana and M. Bobji (2009). Time dependence of effective slip on textured hydrophobic surfaces.

Groten, J. and J. R  he (2013). "Surfaces with Combined Microscale and Nanoscale Structures: A Route to Mechanically Stable Superhydrophobic Surfaces?" Langmuir **29**(11): 3765-3772.

Hemeda, A. A., M. Gad-el-Hak and H. V. Tafreshi (2014). "Effects of hierarchical features on longevity of submerged superhydrophobic surfaces with parallel grooves." Physics of Fluids **26**(8): 082103.

Henoch, C., T. N. Krupenkin, P. Kolodner, J. A Taylor, M. S Hodes, A. Lyons, C. Peguero and K. Breuer (2006). Turbulent Drag Reduction Using Superhydrophobic Surfaces.

Herminghaus, S. (2000). "Roughness-induced non-wetting." Europhys. Lett. **52**(2): 165-170.

Huang, Y.-X., X.-D. Wang, C.-H. Cheng and D. T.-W. Lin (2013). "Geometry optimization of thermoelectric coolers using simplified conjugate-gradient method." Energy **59**: 689-697.

Ishida, N., T. Inoue, M. Miyahara and K. Higashitani (2000). "Nano Bubbles on a Hydrophobic Surface in Water Observed by Tapping-Mode Atomic Force Microscopy." Langmuir **16**(16): 6377-6380.

Jabbarzadeh, A. (2000). Effect of the wall roughness on slip and rheological properties of hexadecane in molecular dynamics simulation of Couette shear flow between two sinusoidal walls.

Joseph, P., C. Cottin-Bizonne, J. M. Benoît, C. Ybert, C. Journet, P. Tabeling and L. Bocquet (2006). "Slippage of Water Past Superhydrophobic Carbon Nanotube Forests in Microchannels." Physical Review Letters **97**(15): 156104.

Jung, Y. C. and B. Bhushan (2008). "Wetting behaviour during evaporation and condensation of water microdroplets on superhydrophobic patterned surfaces." Journal of Microscopy **229**(1): 127-140.

Jung, Y. C. and B. Bhushan (2009). "Dynamic Effects Induced Transition of Droplets on Biomimetic Superhydrophobic Surfaces." Langmuir **25**(16): 9208-9218.

Kim, J. and C.-J. Kim (2002). Nanostructured surfaces for dramatic reduction of flow resistance in droplet-based microfluidics.

Lafuma, A. and D. Quéré (2003). "Superhydrophobic states." Nature Materials **2**: 457.

Lauga, E. and H. A. Stone (2003). Effective slip in pressure-driven Stokes flow.

Lauga, E. and M. P. Brenner (2004). "Dynamic mechanisms for apparent slip on hydrophobic surfaces." Physical Review E **70**(2): 026311.

Lauga, E. and M. P Brenner (2004). Dynamic mechanisms for apparent slip on hydrophobic surfaces.

Lauga, E. and H. A. Stone (2003). "Effective slip in pressure-driven Stokes flow." Journal of Fluid Mechanics **489**: 55-77.

Lee, S. J. and S. H. Lee (2001). Flow field analysis of a turbulent boundary layer over a riblet surface.

Lei, L., H. Li, J. Shi and Y. Chen (2010). "Diffraction Patterns of a Water-Submerged Superhydrophobic Grating under Pressure." Langmuir **26**(5): 3666-3669.

Li, J., E. Ueda, A. Nallapaneni, L. Li and P. Levkin (2012). Printable Superhydrophilic - Superhydrophobic micropatterns based on supported lipid layers.

Liu, J., X.-Q. Feng, G. Wang and S.-W. Yu (2007). Mechanisms of superhydrophobicity on hydrophilic substrates.

Liu, T. L. and C.-J. C. Kim (2014). "Turning a surface superrepellent even to completely wetting liquids." Science **346**(6213): 1096-1100.

Lou, S.-T., Z.-Q. Ouyang, Y. Zhang, X.-J. Li, J. hu, M.-Q. Li and F.-J. Yang (2000). Nanobubbles on solid surface imaged by atomic force microscopy.

Lv, P., Y. Xue, Y. Shi, H. Lin and H. Duan (2014). Metastable States and Wetting Transition of Submerged Superhydrophobic Structures.

M. Hocking, L. (1976). A Moving Fluid Interface on a Rough Surface.

Ma, M. and R. M. Hill (2006). "Superhydrophobic surfaces." Current Opinion in Colloid & Interface Science **11**(4): 193-202.

Martell, M. B., J. P. Rothstein and J. B. Perot (2010). "An analysis of superhydrophobic turbulent drag reduction mechanisms using direct numerical simulation." Physics of Fluids **22**(6): 065102.

Matin, A., N. Merah and A. Ibrahim (2016). "Superhydrophobic and self-cleaning surfaces prepared from a commercial silane using a single-step drop-coating method." Progress in Organic Coatings **99**(Supplement C): 322-329.

Melling, A. (1999). Tracer particles and seeding for particle image velocimetry.

Min, T. and J. Kim (2004). "Effects of hydrophobic surface on skin-friction drag." Physics of Fluids **16**(7): L55-L58.

N Krupenkin, T., J. Ashley Taylor, E. N Wang, P. Kolodner, M. Hodes and T. Salamon (2007). Reversible Wetting-Dewetting Transitions on Electrically Tunable Superhydrophobic Nanostructured Surfaces.

Neto, C., V. S. J. Craig and D. R. M. Williams (2003). "Evidence of shear-dependent boundary slip in newtonian liquids." The European Physical Journal E **12**(1): 71-74.

Onda, T., S. Shibuichi, N. Satoh and K. Tsujii (1996). "Super-Water-Repellent Fractal Surfaces." Langmuir **12**(9): 2125-2127.

Ou, J., B. Perot and J. P. Rothstein (2004). "Laminar drag reduction in microchannels using ultrahydrophobic surfaces." Physics of Fluids **16**(12): 4635-4643.

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

Patankar, N. A. (2009). "Hydrophobicity of Surfaces with Cavities: Making Hydrophobic Substrates from Hydrophilic Materials?" Journal of Adhesion Science and Technology **23**(3): 413-433.

Philip, J. R. (1972). "Flows satisfying mixed no-slip and no-shear conditions." Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik ZAMP **23**(3): 353-372.

Pit, R., H. Hervet and L. Léger (1999). "Friction and slip of a simple liquid at a solid surface." Tribology Letters **7**(2): 147-152.

Pit, R., H. Hervet and L. Léger (2000). "Direct Experimental Evidence of Slip in Hexadecane: Solid Interfaces." Physical Review Letters **85**(5): 980-983.

Pit, R., H. Hervet and L. Liliane (1999). Friction and slip of a simple liquid at solid surface.

Poetes, R., K. Holtzmann, K. Franze and U. Steiner (2010). "Metastable Underwater Superhydrophobicity." Physical Review Letters **105**(16): 166104.

Priezjev, N. V., A. A. Darhuber and S. M. Troian (2005). "Slip behavior in liquid films on surfaces of patterned wettability: Comparison between continuum and molecular dynamics simulations." Physical Review E **71**(4): 041608.

Rao, A. V., S. S. Latthe, S. A. Mahadik and C. Kappenstein (2011). "Mechanically stable and corrosion resistant superhydrophobic sol-gel coatings on copper substrate." Applied Surface Science **257**(13): 5772-5776.

Reyssat, M., A. Pépin, F. Marty, Y. Chen and D. Quéré (2006). "Bouncing transitions on microtextured materials." Europhys. Lett. **74**(2): 306-312.

Richardson, S. (1973). On the No-Slip Boundary condition.

Roach, P., N. J. Shirtcliffe and M. I. Newton (2008). "Progress in superhydrophobic surface development." Soft Matter **4**(2): 224-240.

Rykaczewski, K., J. H. J. Scott and A. G. Fedorov (2011). "Electron beam heating effects during environmental scanning electron microscopy imaging of water condensation on superhydrophobic surfaces." Applied Physics Letters **98**(9): 093106.

S Wexler, J., I. Jacobi and H. A Stone (2015). Shear-Driven Failure of Liquid-Infused Surfaces.

S. Epstein, P. and M. S. Plesset (1951). On the Stability of Gas Bubbles in Liquid-Gas Solution.

S. Wexler, J., A. Grosskopf, M. Chow, Y. Fan, I. Jacobi and H. A Stone (2015). Robust liquid-infused surfaces through patterned wettability.

Sakai, M., T. Yanagisawa, A. Nakajima, Y. Kameshima and K. Okada (2009). "Effect of Surface Structure on the Sustainability of an Air Layer on Superhydrophobic Coatings in a Water-Ethanol Mixture." Langmuir **25**(1): 13-16.

Sakamoto, M., Y. Kanda, M. Miyahara and K. Higashitani (2002). "Origin of Long-Range Attractive Force between Surfaces Hydrophobized by Surfactant Adsorption." Langmuir **18**(15): 5713-5719.

Samaha, M. A., H. V. Tafreshi and M. Gad-el-Hak (2011). "Modeling drag reduction and meniscus stability of superhydrophobic surfaces comprised of random roughness." Physics of Fluids **23**(1): 012001.

Samaha, M. A., H. V. Tafreshi and M. Gad-el-Hak (2012). "Influence of Flow on Longevity of Superhydrophobic Coatings." Langmuir **28**(25): 9759-9766.

Sbragaglia, M. and A. Prosperetti (2007). "Effective velocity boundary condition at a mixed slip surface." Journal of Fluid Mechanics **578**: 435-451.

Schutzius, T. M., S. Jung, T. Maitra, G. Graeber, M. Köhme and D. Poulikakos (2015). "Spontaneous droplet trampolining on rigid superhydrophobic surfaces." Nature **527**: 82.

Sheng, X. and J. Zhang (2011). "Air layer on superhydrophobic surface underwater." Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects **377**(1): 374-378.

Solomon, B., K. S Khalil and K. K Varanasi (2014). Drag Reduction using Lubricant-Impregnated Surfaces in Viscous Laminar Flow.

Srinivasan, S., J. A. Kleingartner, J. B. Gilbert, R. E. Cohen, A. J. B. Milne and G. H. McKinley (2015). "Sustainable Drag Reduction in Turbulent Taylor-Couette Flows by Depositing Sprayable Superhydrophobic Surfaces." Physical Review Letters **114**(1): 014501.

Strouhal, V. (1878). "Ueber eine besondere Art der Tonerregung." Annalen der Physik **241**(10): 216-251.

Su, Y., B. Ji, K. Zhang, H. Gao, Y. Huang and K. Hwang (2010). Nano to Micro Structural Hierarchy Is Crucial for Stable Superhydrophobic and Water-Repellent Surfaces.

Tolstoj D.M. Molecular theory for slippage of liquids over solid surfaces.

Verho, T., C. Bower, P. Andrew, S. Franssila, O. Ikkala and R. Ras (2011). Mechanically Durable Superhydrophobic Surfaces.

Vinogradova, O. and G. Yakubov (2003). Dynamic Effects on Force Measurements. 2. Lubrication and the Atomic Force Microscope.

Vinogradova, O. I. (1995). "Drainage of a Thin Liquid Film Confined between Hydrophobic Surfaces." Langmuir **11**(6): 2213-2220.

Wang, F., X. Zhang, L. Zhang, M. Cao, Y. Lin and J. Zhu (2016). "Rapid fabrication of angle-independent structurally colored films with a superhydrophobic property." Dyes and Pigments **130**(Supplement C): 202-208.

Watanabe, K., Y. Udagawa and H. Udagawa (1999). Drag reduction of Newtonian fluid in a circular pipe with a highly water-repellent wall.

Watanabe, K., Y. Udagawa and H. Udagawa (1999). "Drag reduction of Newtonian fluid in a circular pipe with a highly water-repellent wall." Journal of Fluid Mechanics **381**: 225-238.

Watts, E. T., J. Krim and A. Widom (1990). "Experimental observation of interfacial slippage at the boundary of molecularly thin films with gold substrates." Physical Review B **41**(6): 3466-3472.

Wen, L., Y. Tian and L. Jiang (2015). Bioinspired Super-Wettability from Fundamental Research to Practical Applications.

Wenzel, R. N. (1936). "RESISTANCE OF SOLID SURFACES TO WETTING BY WATER." Industrial & Engineering Chemistry **28**(8): 988-994.

Wenzel, R. N. (1949). "Surface Roughness and Contact Angle." The Journal of Physical and Colloid Chemistry **53**(9): 1466-1467.

Williamson, C. H. K. (1996). "Vortex Dynamics in the Cylinder Wake." Annual Review of Fluid Mechanics **28**(1): 477-539.

Xiu, Y., D. W. Hess and C. P. Wong (2008). "UV and thermally stable superhydrophobic coatings from sol-gel processing." Journal of Colloid and Interface Science **326**(2): 465-470.

xu, M., G. Sun and C.-J. Kim (2014). Infinite Lifetime of Underwater Superhydrophobic States.

Xue, Y., S. Chu, P. Lv and H. Duan (2012). "Importance of Hierarchical Structures in Wetting Stability on Submersed Superhydrophobic Surfaces." Langmuir **28**(25): 9440-9450.

Ybert, C., C. Barentin, C. Cottin-Bizonne, P. Joseph and L. Bocquet (2007). "Achieving large slip with superhydrophobic surfaces: Scaling laws for generic geometries." Physics of Fluids **19**(12): 123601.

Yong Chae, J. and B. Bharat (2010). "Biomimetic structures for fluid drag reduction in laminar and turbulent flows." Journal of Physics: Condensed Matter **22**(3): 035104.

Yu, Y., Z. H. Zhao and Q.-s. Zheng (2007). Mechanical and Superhydrophobic Stabilities of Two-Scale Surface Structure of Lotus Leaves.

Zhang, J., X. Sheng and L. Jiang (2009). "The Dewetting Properties of Lotus Leaves." Langmuir **25**(3): 1371-1376.

Zhang, X., X. D Zhang, S. T Lou, Z. X Zhang, J.-L. Sun and J. hu (2004). Degassing and Temperature Effects on the Formation of Nanobubbles at the Mica/Water Interface.

Zhu, Y. and S. Granick (2001). Rate-Dependent Slip of Newtonian Liquid at Smooth Surfaces.

Zhu, Y. and S. Granick (2002). "Limits of the Hydrodynamic No-Slip Boundary Condition." Physical Review Letters **88**(10): 106102.

Zhu, Y. and S. Granick (2002). "No-Slip Boundary Condition Switches to Partial Slip When Fluid Contains Surfactant." Langmuir **18**(26): 10058-10063.