



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Ευαγ. Πέππας

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΔΙΑΒΡΟΧΗΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ

Επιβλέπων: Χρ. Παπαδόπουλος, Λέκτορας Ε.Μ.Π.
Μέλη Εξεταστικής επιτροπής: Λ. Καϊκτσής, Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Δ. Παντελής, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2013

Ευχαριστίες

Με την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας ολοκληρώνεται ο κύκλος σπουδών μου στη Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Στο σημείο αυτό έχω την ανάγκη να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα της παρούσας εργασίας, κ. Χρ. Παπαδόπουλο, για την βοήθεια, την υποστήριξή του, την καθοδήγησή του και τις συμβουλές που μου παρείχε, όχι μόνο κατά την εκπόνηση της εργασίας αυτής, αλλά και κατά την διάρκεια των σπουδών μου. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την Δρ. Ειρήνη Ευσταθίου για τη βοήθεια και τη στήριξη που μου παρείχε δίνοντας μου όλες τις πληροφορίες που χρειαζόμουν για να συνεχίσω στην εργασία μου. Επιπροσθέτως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αν. Καθηγητή κ. Λ. Καϊκτσή και τον Καθηγητή κ. Δ. Παντελή ως διδάσκοντες και μέλη της εξεταστικής επιτροπής, καθώς και την κ. Χ. Σαράφογλου και τον συνάδελφο Αθανάσιο Φέλιο για την παροχή υλικών και πληροφοριών σχετικά με τη διπλωματική μου εργασία. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως την οικογένεια μου Ευάγγελο, Μαρία και Σοφία για την ηθική και υλική συμπαράστασή τους καθ' όλο το χρονικό διάστημα των σπουδών μου, και όλους τους φίλους και συναδέλφους, και ιδιαίτερα τον συμπορευτή μου Νικόλαο Κατζουρό, για την άψογη συνεργασία.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	2
Περιεχόμενα.....	3
Σύνοψη.....	5
Abstract.....	6
Όροι και σύμβολα	7
Κατάλογος σχημάτων	8
Κατάλογος πινάκων	11
1 Εισαγωγή	13
1.1 Ιδιότητες διαβροχής επιφανειών	13
1.2 Επισκόπηση της βιβλιογραφίας	14
1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας	15
2 Ανάλυση ιδιοτήτων διαβροχής επιφανειών.....	17
2.1 Εισαγωγή.....	17
2.2 Διεπιφάνειες μεταξύ υγρού στερεού και αερίου	17
2.3 Επιφανειακή τάση	19
2.4 Επαφή μεταξύ τριών φάσεων.....	24
2.5 Γωνία διαβροχής και χαρακτηρισμός επιφανειών	26
2.6 Μέθοδοι μετρήσεως γωνίας επαφής	28
2.6.1 Στατική μέθοδος.....	28
2.6.2 Δυναμική μέθοδος.....	29
2.7 Μελέτη επιφανειών με τραχύτητα	31
2.7.1 Μοντέλο Wenzel.....	31
2.7.2 Μοντέλο Cassie Baxter.....	32
3 Περιγραφή πειραματικής διάταξης.....	34
3.1 Στερεοσκόπιο	36
3.2 Φωτογραφική κάμερα	38
3.3 Φωτισμός.....	39
3.4 Σύριγγα εναπόθεσης υγρού	40
3.5 Λογισμικό που χρησιμοποιείται κατά την εκτέλεση των πειραμάτων.....	40
3.5.1 Λογισμικό καταγραφής και επεξεργασίας.....	40

3.5.2	Λογισμικά μετρήσεως γωνίας επαφής.....	49
4	Παράθεση πειραματικών αποτελεσμάτων.....	57
4.1	Πειραματική διαδικασία.....	57
4.2	Πειραματικά αποτελέσματα.....	59
4.2.1	Μέτρηση διαμέτρου μεταλλικών σφαιρών (επιβεβαίωση ακρίβειας μετρήσεων).....	59
4.2.2	Μετρήσεις γωνιών επαφής.....	61
4.3	Υπολογισμός μέσου σφάλματος μετρήσεων.....	100
5	Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία.....	101
	Βιβλιογραφία.....	103

Σύνοψη

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας σχεδιάστηκε εξ' αρχής και κατασκευάστηκε πειραματική διάταξη για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων διαβροχής στερεών επιφανειών (μεταλλικών, συνθετικών ή ημισυνθετικών). Η λειτουργία της αναπτυχθείσας πειραματικής διάταξης ελέγχθηκε μέσω σειράς πειραμάτων, ώστε να πιστοποιηθεί η εγκυρότητα των λαμβανομένων μετρήσεων. Η πειραματική διάταξη θα χρησιμοποιηθεί μελλοντικά για τη μέτρηση των ιδιοτήτων διαβροχής των επιφανειών ωστικών και ακτινικών εδράνων, με σκοπό τη διερεύνηση της δυνατότητας βελτίωσης των τριβολογικών χαρακτηριστικών τους με χρήση επιφανειών με υδρόφοβη συμπεριφορά. Η διάταξη της παρούσας εργασίας είναι εγκατεστημένη στο Εργαστήριο Ναυτικής Μηχανολογίας (Μονάδα Στοιχείων Μηχανών), το οποίο στεγάζεται στο κτήριο Λ της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Για τη διακρίβωση της πειραματικής διάταξης, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις γωνίας επαφής σταγόνων από υγρά (με διαφορετική πολικότητα) οι οποίες επικάθονται σε επιφάνειες στερεών, είτε γνωστών ως προς τις ιδιότητές τους, όπως το κοινό και το βοριοπυριτικό γυαλί και ο χαλκός, είτε αγνώστων όπως ο υπερυδρόφοβος χαλκός. Οι ληφθείσες μετρήσεις συγκρίθηκαν με δημοσιευμένα στοιχεία της βιβλιογραφίας, και υπολογίστηκε το στατιστικό σφάλμα που χαρακτηρίζει τη παρούσα μετρητική διάταξη. Η μελέτη των ιδιοτήτων διαβροχής επιφανειών αποτελεί ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα μελέτη, καθώς μέσω του πειραματικού προσδιορισμού της γωνίας επαφής, κατά τη διεπαφή στερεού και υγρού, μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την ομοιογένεια, τη μορφολογία και την υδροφοβικότητα της επιφάνειας του υπό μελέτη υλικού.

Abstract

In the present work, an experimental apparatus for the determination of the wetting properties of solid surfaces (metal, synthetic or semi-synthetic) was designed and built. The measurement accuracy of the experimental apparatus was validated through a series of experiments. This facility will be used in future work for measuring the wetting properties of the surfaces of radial and thrust bearings. The ultimate goal will be to explore the possibility of improving the characteristics of tribological contacts by introducing surfaces with hydrophobic behavior. The experimental apparatus is installed in the Laboratory of Marine Engineering, which is located in building L of the School of Naval Architecture and Marine Engineering of NTUA.

The validation of the present experimental setup was achieved through measurements of the contact angle of drops of liquids (with different polarity) that are set on solid surfaces. Different solid surfaces of known properties (such as common and borosilicate glass, and copper), or unknown properties (such as hydrophobic copper) have been utilized. The obtained measurements were validated against published literature data, and the statistical error that characterizes the present measuring device was calculated. The study of wetting properties of surfaces is of particular interest, since, through the experimental determination of the contact angle at the interface of solid and liquid substances, useful conclusions about the homogeneity, morphology and hydrophobicity of the solid surface can be drawn.

Όροι και σύμβολα

A:	Εμβαδό επιφάνειας (m^2)
F:	Δύναμη (N)
L:	Μήκος (m)
γ :	Επιφανειακή τάση (J/m^2)
γ^d :	Όρος διασποράς επιφανειακής τάσης (J/m^2)
γ^p :	Πολικός όρος επιφανειακής τάσης (J/m^2)
γ_{SL} :	Επιφανειακή τάση στερεού/υγρού (J/m^2)
γ_{SV} :	Επιφανειακή τάση στερεού/αέρα (J/m^2)
γ_{VL} :	Επιφανειακή τάση υγρού/αέρα (J/m^2)
γ^{AB} :	Πολική οξεοβασική συνιστώσα επιφανειακής τάσης (J/m^2)
γ^{LW} :	Μη πολική συνιστώσα επιφανειακής τάσης Lifshitz – Van Der Waals (J/m^2)
γ^+ :	Συνιστώσα αποδέκτη ηλεκτρονίων επιφανειακής τάσης (J/m^2)
γ^- :	Συνιστώσα δότη ηλεκτρονίων επιφανειακής τάσης (J/m^2)
θ :	Γωνία επαφής (deg)
W_a :	Έργο συνάφειας (J/m^2)
S:	Παράμετρος διαβροχής (J/m^2)

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1: Διεπιφάνειες αερίου/υγρού, στερεού/υγρού και στερεού/αερίου στην περίπτωση σταγόνας υγρού που επικάθεται σε στερεή επιφάνεια, σε περιβάλλον αέρα.....	19
Σχήμα 2: Σταγόνα υγρού η οποία επικάθεται σε επιφάνεια στερεού. Απεικόνιση των διεπιφανειών στερεού/αερίου, υγρού/αερίου και στερεού/υγρού, και των αντίστοιχων επιφανειακών τάσεων.....	25
Σχήμα 3: Σταγόνα υγρού η οποία επικάθεται σε επιφάνεια στερεού. Περίπτωση ολικής διαβροχής στερεού.....	25
Σχήμα 4: Σταγόνα υγρού η οποία επικάθεται σε επιφάνεια στερεού. Περίπτωση μηδενικής διαβροχής στερεού.....	26
Σχήμα 5: Σταγόνα υγρού η οποία επικάθεται σε επιφάνεια στερεού. Ορισμός γωνίας διαβροχής.....	27
Σχήμα 6: Χαρακτηρισμός επιφανειών ως προς τις ιδιότητες διαβροχής.....	27
Σχήμα 7: Ορισμός στατικής γωνίας επαφής.....	29
Σχήμα 8: Ορισμός γωνιών επαφής κατά τη μέτρηση με τη μέθοδο κεκλιμένου επιπέδου.....	29
Σχήμα 9: Ορισμός προωθούμενης και υποχωρούσας γωνίας επαφής.....	31
Σχήμα 10: Γωνία επαφής σταγόνας που επικάθεται σε επιφάνεια με τραχύτητα σύμφωνα με το μοντέλο Wenzel.....	32
Σχήμα 11: Γωνία επαφής σταγόνας που επικάθεται σε επιφάνεια με τραχύτητα σύμφωνα με το μοντέλο Cassie Baxter.....	33
Σχήμα 12: Πειραματική διάταξη μέτρησης ιδιοτήτων διαβροχής επιφανειών.....	35
Σχήμα 13: Πλάγια όψη πειραματικής διάταξης. Απεικόνιση των επιμέρους τμημάτων. Διαστάσεις σε cm.....	36
Σχήμα 14: Πλάγια όψη πειραματικής διάταξης. Απεικόνιση λεπτομερειών στην περιοχή μέτρησης.....	36
Σχήμα 15: Φωτογραφία στερεοσκοπίου XZ-2.....	37
Σχήμα 16: Φωτογραφία φωτογραφικής κάμερας OPTIKA B5.....	38
Σχήμα 17: Φωτογραφία φωτιστικού στοιχείου CL - 01.....	39
Σχήμα 18: Φωτογραφία σύριγγας Hamilton 1710.....	40
Σχήμα 19: Λογισμικό OPTIKA VISION LITE 2.1.: Αρχικό περιβάλλον προγράμματος.....	41
Σχήμα 20: Λογισμικό OPTIKA VISION LITE 2.1.: Μενού <i>FILE</i>	41
Σχήμα 21: Λογισμικό OPTIKA VISION LITE 2.1.: Μενού <i>TOOLS</i>	43
Σχήμα 22: Λογισμικό OPTIKA VISION LITE 2.1.: Ρυθμίσεις <i>Flip / Rotate Image</i> ..	43
Σχήμα 23: Λογισμικό OPTIKA VISION LITE 2.1.: Εντολή τοποθέτησης βέλους....	44
Σχήμα 24: Λογισμικό OPTIKA VISION LITE 2.1.: Εντολή λήψης μέτρησης.....	44
Σχήμα 25: Λογισμικό OPTIKA VISION LITE 2.1.: Εντολή διενέργειας βαθμονόμησης.....	44
Σχήμα 26: Λογισμικό OPTIKA VISION LITE 2.1.: Μενού <i>Options</i>	45

Σχήμα 27: Λογισμικό OPTIKA VISION LITE 2.1.: Μενού <i>Help</i> .	45
Σχήμα 28: Λογισμικό OPTIKA VISION LITE 2.1.: Διάταξη εικονιδίων στην κύρια επιφάνεια εργασίας του προγράμματος.	46
Σχήμα 29: Λογισμικό OPTIKA VISION LITE 2.1.: Παράθυρο εισαγωγής σημειώσεων.	47
Σχήμα 30: Λογισμικό OPTIKA VISION LITE 2.1.: Παράθυρο καταγραφής και αποθήκευσης εικόνας.	48
Σχήμα 31: Λογισμικό OPTIKA VISION LITE 2.1.: Παράθυρο ρυθμίσεων κάμερας.	49
Σχήμα 32: Λογισμικό IMAGEJ: Βασική οθόνη εργασίας.	50
Σχήμα 33: Λογισμικό IMAGEJ: Επιλογή της μεθόδου <i>DropSnake</i> για την ανάλυση της γεωμετρίας της σταγόνας.	50
Σχήμα 34: Λογισμικό IMAGEJ: Το μενού και η μπάρα εργαλείων που χρησιμοποιούνται κατά την ανάλυση της γεωμετρίας της σταγόνας με τη μέθοδο <i>DropSnake</i> .	50
Σχήμα 35: Λογισμικό IMAGEJ: Δημιουργία καμπύλης που περιβάλλει τη σταγόνα, για τη μέτρηση της γωνίας επαφής.	52
Σχήμα 36: Λογισμικό IMAGEJ: Παράθυρο ρυθμίσεων των παραμέτρων της μεθόδου <i>DropSnake</i> .	52
Σχήμα 37: Λογισμικό IMAGEJ: Οθόνη ρυθμίσεων LBADSA.	54
Σχήμα 38: Λογισμικό IMAGEJ: Πίνακας αποτελεσμάτων.	56
Σχήμα 39: Ληφθείσες φωτογραφίες για τις ανοξειδωτες σφαίρες D1 (αριστερά) και D2 (δεξιά).	60
Σχήμα 40: Ληφθείσες φωτογραφίες για τις ανοξειδωτες σφαίρες D3 (αριστερά) και D4 (δεξιά).	61
Σχήμα 41: Χημικές δομές δοκιμαστικών υγρών που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα μέτρησης γωνίας επαφής.	63
Σχήμα 42: (α) Απεικόνιση σταγόνας απιονισμένου νερού σε υπερυδροφόβη επιφάνεια χαλκού. (β) Επεξεργασία εικόνας για τον υπολογισμό των γωνιών επαφής.	66
Σχήμα 43: (α) Απεικόνιση σταγόνας απιονισμένου νερού σε επιφάνεια χαλκού. (β) Επεξεργασία εικόνας για τον υπολογισμό των γωνιών επαφής.	69
Σχήμα 44: (α) Απεικόνιση σταγόνας απιονισμένου νερού σε επιφάνεια βοριοπυριτικού γυαλιού. (β) Επεξεργασία εικόνας για τον υπολογισμό των γωνιών επαφής.	72
Σχήμα 45: (α) Απεικόνιση σταγόνας διωδομεθανίου σε επιφάνεια βοριοπυριτικού γυαλιού. (β) Επεξεργασία εικόνας για τον υπολογισμό των γωνιών επαφής.	76
Σχήμα 46: (α) Απεικόνιση σταγόνας δεκαεξανίου σε επιφάνεια βοριοπυριτικού γυαλιού. (β) Επεξεργασία εικόνας για τον υπολογισμό των γωνιών επαφής.	79
Σχήμα 47: (α) Απεικόνιση σταγόνας γλυκερόλης σε επιφάνεια βοριοπυριτικού γυαλιού. (β) Επεξεργασία εικόνας για τον υπολογισμό των γωνιών επαφής.	82
Σχήμα 48: (α) Απεικόνιση σταγόνας απιονισμένου νερού σε επιφάνεια γυαλιού. (β) Επεξεργασία εικόνας για τον υπολογισμό των γωνιών επαφής.	85

Σχήμα 49: (α) Απεικόνιση σταγόνας διωδομεθανίου σε επιφάνεια γυαλιού. (β) Επεξεργασία εικόνας για τον υπολογισμό των γωνιών επαφής.	88
Σχήμα 50: α) Απεικόνιση σταγόνας δεκαεξανίου σε επιφάνεια γυαλιού. β) Επεξεργασία εικόνας για τον υπολογισμό των γωνιών επαφής.	91
Σχήμα 51: (α) Απεικόνιση σταγόνας γλυκερόλης σε επιφάνεια γυαλιού. (β) Επεξεργασία εικόνας για τον υπολογισμό των γωνιών επαφής.	94
Σχήμα 52: Υπολογισμός βέλτιστου συνδυασμού των τάσεων διασποράς και πολικότητας, ώστε να ικανοποιούνται οι μετρήσεις γωνίας επαφής του βοριοπυριτικού γυαλιού με τα δοκιμαστικά υγρά της παρούσας εργασίας.....	98
Σχήμα 53: Υπολογισμός βέλτιστου συνδυασμού των τάσεων διασποράς και πολικότητας, ώστε να ικανοποιούνται οι μετρήσεις γωνίας επαφής του κοινού γυαλιού με τα δοκιμαστικά υγρά της παρούσας εργασίας.	99

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1: Πειραματική μέτρηση διαμέτρου μεταλλικών σφαιρών.....	59
Πίνακας 2: Πειραματική μέτρηση διαμέτρου μεταλλικών σφαιρών. Υπολογισμός μέσου σφάλματος μετρήσεων.....	61
Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά δοκιμαστικών υγρών που χρησιμοποιήθηκαν σε πειράματα μέτρησης γωνίας επαφής.....	64
Πίνακας 4: Μετρήσεις δεξιάς γωνίας επαφής για σταγόνα απιονισμένου νερού που επικάθεται σε επιφάνεια υπερυδρόφοβου χαλκού. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων και σύγκριση με στοιχεία της βιβλιογραφίας.....	67
Πίνακας 5: Μετρήσεις αριστερής γωνίας επαφής για σταγόνα απιονισμένου νερού που επικάθεται σε επιφάνεια υπερυδρόφοβου χαλκού. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων και σύγκριση με στοιχεία της βιβλιογραφίας.....	68
Πίνακας 6: Μετρήσεις αριστερής γωνίας επαφής για σταγόνα απιονισμένου νερού που επικάθεται σε επιφάνεια καθαρού χαλκού. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων και σύγκριση με στοιχεία της βιβλιογραφίας.....	70
Πίνακας 7: Μετρήσεις δεξιάς γωνίας επαφής για σταγόνα απιονισμένου νερού που επικάθεται σε επιφάνεια υπερυδρόφοβου χαλκού. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων και σύγκριση με στοιχεία της βιβλιογραφίας.....	71
Πίνακας 8: Μετρήσεις δεξιάς γωνίας επαφής για σταγόνα απιονισμένου νερού που επικάθεται σε επιφάνεια βοριοπυριτικού γυαλιού. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων και σύγκριση με στοιχεία της βιβλιογραφίας.....	73
Πίνακας 9: Μετρήσεις αριστερής γωνίας επαφής για σταγόνα απιονισμένου νερού που επικάθεται σε επιφάνεια βοριοπυριτικού γυαλιού. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων και σύγκριση με στοιχεία της βιβλιογραφίας.....	74
Πίνακας 10: Μετρήσεις δεξιάς γωνίας επαφής για σταγόνα διωδομεθανίου που επικάθεται σε επιφάνεια βοριοπυριτικού γυαλιού. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων και σύγκριση με στοιχεία της βιβλιογραφίας.....	77
Πίνακας 11: Μετρήσεις αριστερής γωνίας επαφής για σταγόνα διωδομεθανίου που επικάθεται σε επιφάνεια βοριοπυριτικού γυαλιού. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων και σύγκριση με στοιχεία της βιβλιογραφίας.....	78
Πίνακας 12: Μετρήσεις δεξιάς γωνίας επαφής για σταγόνα δεκαεξανίου που επικάθεται σε επιφάνεια βοριοπυριτικού γυαλιού. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων και σύγκριση με στοιχεία της βιβλιογραφίας.....	80
Πίνακας 13: Μετρήσεις αριστερής γωνίας επαφής για σταγόνα δεκαεξανίου που επικάθεται σε επιφάνεια βοριοπυριτικού γυαλιού. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων και σύγκριση με στοιχεία της βιβλιογραφίας.....	81
Πίνακας 14: Μετρήσεις δεξιάς γωνίας επαφής για σταγόνα γλυκερόλης που επικάθεται σε επιφάνεια βοριοπυριτικού γυαλιού. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων και σύγκριση με στοιχεία της βιβλιογραφίας.....	83

Πίνακας 15: Μετρήσεις αριστερής γωνίας επαφής για σταγόνα γλυκερόλης που επικάθεται σε επιφάνεια βοριοπυριτικού γυαλιού. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων και σύγκριση με στοιχεία της βιβλιογραφίας.	84
Πίνακας 16: Μετρήσεις δεξιάς γωνίας επαφής για σταγόνα απιονισμένου νερού που επικάθεται σε επιφάνεια γυαλιού. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων και σύγκριση με στοιχεία της βιβλιογραφίας.	86
Πίνακας 17: Μετρήσεις αριστερής γωνίας επαφής για σταγόνα απιονισμένου νερού που επικάθεται σε επιφάνεια γυαλιού. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων και σύγκριση με στοιχεία της βιβλιογραφίας.	87
Πίνακας 18: Μετρήσεις δεξιάς γωνίας επαφής για σταγόνα διωδομεθανίου που επικάθεται σε επιφάνεια γυαλιού. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων και σύγκριση με στοιχεία της βιβλιογραφίας.	89
Πίνακας 19: Μετρήσεις αριστερής γωνίας επαφής για σταγόνα διωδομεθανίου που επικάθεται σε επιφάνεια γυαλιού. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων και σύγκριση με στοιχεία της βιβλιογραφίας.	90
Πίνακας 20: Μετρήσεις δεξιάς γωνίας επαφής για σταγόνα δεκαεξανίου που επικάθεται σε επιφάνεια γυαλιού. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων και σύγκριση με στοιχεία της βιβλιογραφίας.	92
Πίνακας 21: Μετρήσεις αριστερής γωνίας επαφής για σταγόνα δεκαεξανίου που επικάθεται σε επιφάνεια γυαλιού. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων και σύγκριση με στοιχεία της βιβλιογραφίας.	93
Πίνακας 22: Μετρήσεις δεξιάς γωνίας επαφής για σταγόνα γλυκερόλης που επικάθεται σε επιφάνεια γυαλιού. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων και σύγκριση με στοιχεία της βιβλιογραφίας.	95
Πίνακας 23: Μετρήσεις αριστερής γωνίας επαφής για σταγόνα γλυκερόλης που επικάθεται σε επιφάνεια γυαλιού. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων και σύγκριση με στοιχεία της βιβλιογραφίας.	96
Πίνακας 24: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα. Πειραματικές μετρήσεις γωνίας επαφής σταγόνων απιονισμένου νερού, διωδομεθανίου, δεκαεξανίου και γλυκερόλης σε επιφάνειες βοριοπυριτικού και καθαρού γυαλιού.	97
Πίνακας 25: Προσδιορισμός σφάλματος μετρήσεων της σχεδιασθείσας πειραματικής διάταξης.	100

1 Εισαγωγή

1.1 Ιδιότητες διαβροχής επιφανειών

Η μελέτη των ιδιοτήτων διαβροχής διαφόρων υλικών αποτελεί θέμα με ραγδαία εξέλιξη στην εποχή που διανύουμε, και με μεγάλο ενδιαφέρον από την επιστημονική κοινότητα. Στη φύση υπάρχουν φύλλα όπως του λωτού (*lotus flower*) που απωθούν το νερό, αλλά και άλλα υγρά, με αποτέλεσμα τα σταγονίδια των υγρών να κυλούν από τα φύλλα τους, και οι επιφάνειες τους να παραμένουν ξηρές και καθαρές, ακόμη και μετά από μια δυνατή βροχή. Το φαινόμενο αυτό σχετίζεται με την υδροφοβικότητα της επιφάνειας του φύλλου, και συνδέεται άμεσα με τον αυτοκαθαρισμό των επιφανειών. Η μελέτη της ιδιότητας αυτής αποτελεί τον απώτερο σκοπό της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Συγκεκριμένα, μέσω της δημιουργίας κατάλληλης πειραματικής διάταξης, θα είναι δυνατός ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων διαβροχής μεταλλικών και μη επιφανειών.

Πρόσφατες ερευνητικές προσπάθειες έχουν καταδείξει ότι κατάλληλη τροποποίηση των ιδιοτήτων διαβροχής των επιφανειών τριβολογικών ζευγών μηχανών (κυρίως ωστικών και ακτινικών εδράνων) μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση του σχετικού συντελεστή τριβής [26]. Για τη κατασκευή μιας υπερυδροφобης επιφάνειας απαιτείται μια καλά σχεδιασμένη τοπογραφία της επιφάνειας, η οποία αποτελείται από τραχύτητα σε μικρο- και σε νάνο- κλίμακα. Ο συνδυασμός των δύο παραπάνω ιδιοτήτων μπορεί να αυξήσει κατά πολύ τη γωνία επαφής μεταξύ της επιφάνειας του στερεού και της επικαθήμενης σταγόνας υγρού, οδηγώντας σε επιφάνειες στις οποίες το υγρό δεν εισχωρεί στις κοιλάδες της νανοτραχύτητας αλλά στηρίζεται στις κορυφές της και σε στρώμα παγιδευμένου αέρα [24].

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η δημιουργία υδρόφοβων επιφανειών σε τμήμα των επιφανειών των εδράνων μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση του συντελεστή τριβής με συνέπεια τη μείωση της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας τριβής στο έδρανο. Επίσης, μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της ικανότητας παραλαβής φορτίου, και εμμέσως στη μείωση του ρυθμού φθοράς. Στο πλαίσιο μιας μοντέρνας προσέγγισης για τη σχεδίαση στοιχείων μηχανών και οι δύο παραπάνω στόχοι είναι ιδιαίτερα σημαντικοί. Η παρούσα διπλωματική εργασία θα συμβάλει

προς την κατεύθυνση αυτή, παρέχοντας τη δυνατότητα πιστοποίησης της υδροφοβικότητας των επιφανειών των εδράνων, μέσω πειραματικών μετρήσεων.

1.2 Επισκόπηση της βιβλιογραφίας

Από την απαρχή της ενασχόλησης του ανθρώπου με την επιστήμη, κυρίαρχη δύναμη και πηγή έμπνευσής του αποτέλεσε η φύση. Το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών τα τελευταία χρόνια κεντρίστηκε από την καταπληκτική απωθητική συμπεριφορά των φύλλων του λωτού ως προς διάφορα υγρά. Η επιφάνεια ενός στερεού, ως προς τη διαβροχή της, μπορεί να χαρακτηριστεί ως υπερυδρόφιλη, υδρόφιλη, υδρόφοβη ή υπερυδρόφοβη, ανάλογα με τη γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της επιφάνειας και ακίνητης σταγόνας του υγρού, η οποία επικάθεται στην επιφάνεια. Επίσης, από τον προσδιορισμό της γωνίας επαφής μεταξύ του στερεού υποστρώματος και της υγρής σταγόνας μπορεί να προσδιοριστεί η επιφανειακή τάση μεταξύ στερεού και σταγόνας, αν είναι γνωστές οι επιφανειακές τάσεις στερεού-αέρα και σταγόνας-αέρα.

Η ιδέα της μελέτης της διαβροχής των επιφανειών εισήχθη περίπου έξι δεκαετίες πριν από τον A. Cassie, ο οποίος εργαζόταν για το Βρετανικό Συμβούλιο των βιομηχανιών μαλλιού, και ενδιαφέρθηκε για την απώθηση του νερού κατά τη διεπαφή του με συγκεκριμένες επιφάνειες στερεών. Η πρώτη και καθοριστική μικροσκοπική παρατήρηση των καθαρών φύλλων του λωτού έγινε το 1990 από τον Wilhelm Barthlott, έναν βοτανολόγο από το πανεπιστήμιο της Βόννης στην Γερμανία, και τον μαθητή του Christoph Neinhuis, οι οποίοι δημοσίευσαν την έρευνα τους, που περιελάμβανε φωτογραφίες μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (Scanning Electron Microscope, *SEM*) από διάφορα φυτά, μελετώντας την τραχύτητα του φύλλου του κάθε φυτού. Το κάθε φύλλο του λωτού αποτελείται στην επιφάνεια του από μικρά υπερυψώματα με ύψος 5-10 μm , και απόσταση μεταξύ τους περίπου 10-15 μm . Η ιδιότητα της υδροφοβικότητας της ανομοιομόρφης επιφάνειας των φύλλων του λωτού οφείλεται στους υδρόφοβους μικρούς και κηρώδεις κρυστάλλους που απωθούν το νερό και έχουν ακτίνα περίπου 0.5 μm [24].

Ο πρώτος ερευνητής που ασχολήθηκε με την υπολογιστική ανάλυση της μορφολογίας μίας σταγόνας υγρού καθώς επικάθεται πάνω σε μία στερεή επιφάνεια ήταν ο Thomas Young περί το 1800. Η διαφορική εξίσωση που περιγράφει τη

συμπεριφορά της σταγόνας έλαβε το όνομα της από τον ίδιο, και αναλύεται στην ενότητα 2.6.

Οι ιδιότητες διαβροχής μίας επιφάνειας επηρεάζονται άμεσα από την τοπογραφία της. Αρχικά, λύση στο ζήτημα αυτό δόθηκε μέσω δύο βασικών μοντέλων, αυτών του Wenzel και των Cassie-Baxter. Παρά ταύτα πρόσφατα ανακαλύφθηκαν περιπτώσεις οι οποίες δεν μπορούν να περιγραφούν με κανένα από τα δύο προαναφερθέντα μοντέλα.

Τα τελευταία χρόνια σημειώνεται ραγδαία πρόοδος στο ζήτημα της διαβροχής επιφανειών, μέσω της έντονης επιστημονικής ενασχόλησης από πολλές ερευνητικές ομάδες, καθώς και της εισχώρησης ιδιωτικών κατασκευαστικών εταιριών. Οι σημερινές εφαρμογές αφορούν κυρίως στη δημιουργία υδρόφοβων επιφανειών με στόχο τη μείωση της αναπτυσσόμενης τριβής και την προστασία από διάβρωση και ρύπανση.

1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Η δομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ακόλουθη:

Στο 2^ο Κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις γενικές αρχές που διέπουν τα φαινόμενα διαβροχής μεταλλικών και μη μεταλλικών επιφανειών, με σκοπό την ανάλυση του σχετικού θεωρητικού υπόβαθρου και την επεξήγηση των βασικών όρων, ώστε να είναι ευκολότερη για τον αναγνώστη η κατανόηση του πειραματικού μέρους της εργασίας.

Στο 3^ο Κεφάλαιο γίνεται λεπτομερής περιγραφή της πειραματικής διάταξης που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, καθώς και επεξήγηση όλων των επιμέρους τμημάτων της και της συνδεσμολογίας τους. Επιπροσθέτως, γίνεται επεξήγηση της χρήσης των υπολογιστικών προγραμμάτων που συνοδεύουν την εκτέλεση κάθε πειράματος και βοηθούν στην επεξεργασία της εκάστοτε εικόνας, με στόχο την εύκολη χρήση της διάταξης από οποιονδήποτε ενδιαφερόμενο.

Στο 4^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται όλα τα πειραματικά αποτελέσματα που εξήχθησαν με χρήση της πειραματικής διάταξης για τέσσερις μεταλλικές σφαίρες διαφορετικών διαμέτρων, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την πιστοποίηση της

ικανότητας μέτρησης της παρούσας διάταξης. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα μέτρησης της γωνίας επαφής για διαφορετικές στερεές επιφάνειες οι οποίες βρίσκονται σε επαφή με διαφορετικά υγρά γνωστών χαρακτηριστικών με στόχο τον προσδιορισμό του στατιστικού σφάλματος που διέπει την αναπτυχθείσα πειραματική διάταξη.

Τέλος, στο 5^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που απορρέουν από την παρούσα διπλωματική εργασία, και γίνεται αναφορά στις κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα, σε συνέχεια της παρούσας.

2 Ανάλυση ιδιοτήτων διαβροχής επιφανειών

2.1 Εισαγωγή

Η διαβροχή στερεών επιφανειών από σταγόνες υγρού αποτελεί θέμα μελέτης για περισσότερο από διακόσια χρόνια, με πρώτο ερευνητή τον T. Young ο οποίος ανέπτυξε τη βασική θεωρία για την ανάλυση των ιδιοτήτων διαβροχής [2].

Οι ιδιότητες της διαβροχής έχουν μεγάλη σημασία σε πλήθος πρακτικών εφαρμογών της καθημερινότητας. Παρακάτω, παρατίθενται μερικά παραδείγματα:

- Βαφές για υφάσματα.
- Απορρυπαντικές ιδιότητες ουσιών.
- Κατασκευή ηλιακών συλλεκτών.
- Κατασκευή παμπρίζ αυτοκινήτων, ώστε να μην προσκολλώνται σταγόνες και ακαθαρσίες.
- Αυτοκαθαριζόμενες βαφές.

Επίσης, η πειραματική μέτρηση των ιδιοτήτων διαβροχής επιφανειών βρίσκει εφαρμογή μέσω του φαινομένου ηλεκτροδιαβροχής που εκφράζει τη δυνατότητα ελέγχου των ιδιοτήτων διαβροχής αγωγίμων υγρών. Μερικές εφαρμογές είναι:

- Φακοί μεταβλητής εστίασης.
- Ηλεκτρονικό χαρτί (e-paper).
- Μικρό-εργαστηριακές μονάδες (lab-on-a-chip).

Από τα παραπάνω είναι εμφανές πως η τεχνολογία κατασκευής επιφανειών με προσδιορισμένες ιδιότητες διαβροχής έχει εφαρμογές τόσο σε καθημερινές όσο και σε πιο εξειδικευμένες εφαρμογές. Μέσω της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα προσπαθήσουμε να συνεισφέρουμε προς τη κατεύθυνση αυτή, σχεδιάζοντας μία ολοκληρωμένη διάταξη μέτρησης ιδιοτήτων διαβροχής μεταλλικών και μη επιφανειών.

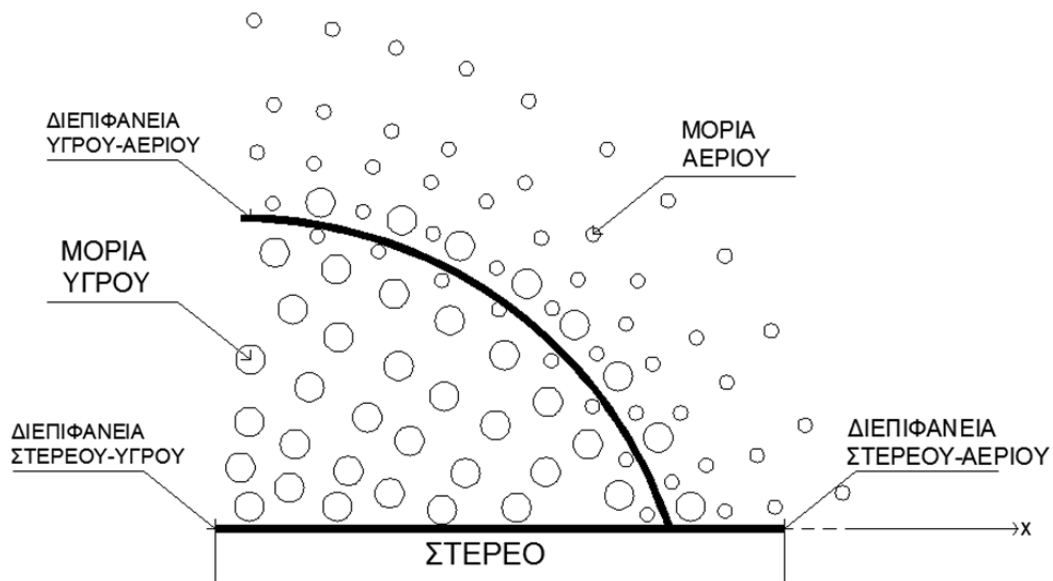
2.2 Διεπιφάνειες μεταξύ υγρού στερεού και αερίου

Ως διεπιφάνεια ορίζουμε το σύνορο επικοινωνίας μιας οντότητας με το περιβάλλον της θεωρώντας πως κάθε τέτοια οντότητα ή υποσύστημα είναι διακριτή

και μπορεί να επιτελέσει ένα σύνολο λειτουργιών. Σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό η διεπιφάνεια είναι μια γεωμετρική ‘μεμβράνη’ μηδενικού πάχους που μπορεί να διαχωρίσει δύο διαφορετικές οντότητες. Γίνεται εύκολα αντιληπτό πως η επιφάνεια ενός ρευστού εξαρτάται άμεσα από τις αλληλεπιδράσεις των μορίων του ρευστού με γειτονικά μόρια (άλλου ρευστού, στερεού ή αερίου). Ως γνωστόν, τα εξωτερικά μόρια έχουν την τάση να κινούνται προς το εσωτερικό του ρευστού, όπου τα ποσά της εσωτερικής ενέργειας είναι μικρότερα, μειώνοντας έτσι την επιφανειακή τους τάση.

Πρέπει να διευκρινίσουμε πως η επαφή της κάθε οντότητας με το περιβάλλον της αποτελεί κάτι αφηρημένο, καθώς δεν γνωρίζουμε πώς μια οντότητα θα αλληλεπιδράσει με κάποια γειτονική της ώστε να επέλθει στατική ή δυναμική ισορροπία.

Σε μικροσκοπική κλίμακα, τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά την αλληλεπίδραση δύο φάσεων είναι ιδιαίτερα πολύπλοκα. Μακροσκοπικά όμως, μπορούμε να φανταστούμε τη διεπιφάνεια ως μια τεντωμένη μεμβράνη στην οποία επιβάλλεται μια τάση και η ίδια αντιτίθεται στη παραμόρφωσή της. Η τάση αυτή αποτελεί την επιφανειακή τάση. Στο Σχ. 1 αναλύεται η συσχέτιση μεταξύ των μορίων αέρα, υγρού, και στερεού και πως αυτά διαχωρίζονται μέσω των διεπιφανειών αερίου/υγρού, στερεού/υγρού και στερεού/αερίου [2].



Σχήμα 1: Διεπιφάνειες αερίου/υγρού, στερεού/υγρού και στερεού/αερίου στην περίπτωση σταγόνας υγρού που επικάθεται σε στερεή επιφάνεια, σε περιβάλλον αέρα.

2.3 Επιφανειακή τάση

Η επιφανειακή τάση αποτελεί μια από τις ιδιότητες της ύλης και παρατηρείται ως φυσικό φαινόμενο στην επιφάνεια των υγρών. Τα μόρια στην επιφάνεια ενός υγρού υπόκεινται σε ισχυρές ελκτικές δυνάμεις από τα μόρια του εσωτερικού του. Σαν συνέπεια αυτών δημιουργείται μια συνολική δύναμη της οποίας η διεύθυνση βρίσκεται σε επίπεδο εφαπτόμενο στην επιφάνεια του υγρού. Λόγω των ελκτικών δυνάμεων, η επιφάνεια του υγρού έχει την τάση να γίνεται όλο και μικρότερη με την πάροδο του χρόνου.

Στη συνέχεια, μέσω των εξισώσεων (1) – (3) περιγράφεται η μαθηματική ανάλυση του προβλήματος υπολογισμού της επιφανειακής τάσης.

Έστω επιφάνεια εμβαδού A , και τμήμα στην περιφέρεια της, μήκους L . Για τη μετατόπιση του τμήματος αυτού κατά dx προς αύξηση του εμβαδού της επιφάνειας κατά dA :

$$dA = Ldx \quad \text{Εξ. (1)}$$

προσδίδουμε δύναμη F .

Η δύναμη αυτή είναι αντίθετη της δύναμης που ασκείται στο επιλεγμένο μήκος L από την ίδια την επιφάνεια προς επαναφορά της στην αρχική της κατάσταση.

Η δύναμη αυτή είναι ανάλογη του μήκους και ισχύει:

$$F = \gamma L \quad \text{Εξ. (2)}$$

Έτσι ορίζεται η επιφανειακή τάση γ , ως η δύναμη ανά μονάδα μήκους επιφάνειας η οποία πρέπει να ασκηθεί ώστε να επιτευχθεί αντιστρεπτή αύξηση του εμβαδού της επιφάνειας κατά μια μονάδα. Εξ' ορισμού οι επιφάνειες των υγρών είναι ισοτροπικές, δηλαδή έχουν στατιστικά τον ίδιο αριθμό μορίων και αλληλεπιδράσεων προς όλες τις κατευθύνσεις. Η επιφανειακή τάση αποτελεί μονόμετρο μέγεθος καθώς είναι ανεξάρτητη από την διεύθυνση κατά την οποία ασκείται η δύναμη [2].

Η επιφανειακή τάση μπορεί να μετρηθεί με διάφορες μεθόδους όπως ο ζυγός Du Noüy, η ειδική πλάκα του Wilhelmy (Wilhelmy plate), το σταλαγμόμετρο Traube και η πτώση σταγόνας με τη μορφή νήματος (spinning drop) [1]. Αναλύοντας μερικές από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται εκτενέστερα, το σταλαγμόμετρο Traube ενδείκνυται για σχετικά μεγάλες τιμές του ιξώδους αλλά και για λεπτόρευστα υγρά χρησιμοποιώντας διαφορετικούς ειδικούς σωλήνες. Η δημιουργία σταγόνας με χρήση σύριγγας προς μέτρηση της επιφανειακής τάσης πραγματοποιείται είτε με διατήρηση της σταγόνας σε συνεχή επαφή με τη σύριγγα (pendant drop), είτε ασκώντας συνεχή πίεση στη υγρό (bubble pressure drop). Η πιο δημοφιλής μέθοδος μετρήσεως της επιφανειακής τάσης είναι αυτή που πραγματοποιείται με ειδικό όργανο που ονομάζεται τασίμετρο. Το τασίμετρο αποτελεί διάταξη που περιλαμβάνει δακτύλιο ο οποίος επιπλέει στην επιφάνεια του δείγματος ενός υγρού, και συνδέεται κατάλληλα με ζυγό ακριβείας. Έτσι, ο υπολογισμός της επιφανειακής τάσης γίνεται με τη μέτρηση της δύναμης που απαιτείται για την απόσπαση του δακτυλίου από την εν λόγω επιφάνεια [1].

Η επιφανειακή τάση ορίζεται εναλλακτικά και ως η αποθηκευμένη δυναμική ενέργεια της συνολικής επιφάνειας ανά μονάδα επιφάνειας. Έτσι όταν μια σταγόνα περιβάλλεται από ένα ρευστό όπως ο αέρας, η συνολική επιφανειακή ενέργεια της, E , δίνεται από τη σχέση:

$$E = \int_A \gamma_{LV} dA' \quad \text{Εξ. (3)}$$

όπου ως dA εκφράζεται το στοιχειώδες εμβαδό της ελεύθερης επιφάνειας της σταγόνας, και γ_{LV} η επιφανειακή τάση στη διεπιφάνεια υγρού/αερίου (LV: Liquid – Vapor), που, σύμφωνα με τον ορισμό της παρούσας παραγράφου έχει μονάδες ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας (J/m^2). Καθώς μια σταγόνα επικάθεται σε ένα στερεό υπόστρωμα και σχηματίζει διεπιφάνειες μεταξύ υγρού/αέρα, στερεού/υγρού και στερεού/αέρα, η αλληλεπίδραση των τριών διεπιφανειακών τάσεων καθορίζει το σχήμα της σταγόνας όπως και προείπαμε στην ενότητα 2.4. Η γωνία επαφής θ που σχηματίζει το υγρό με τη στερεή οριζόντια επιφάνεια μπορεί να υπολογισθεί μέσω της αρχής της εικονικής μετατόπισης [2].

Καθώς μεταβάλλουμε έστω και απειροστά κατά dx το σημείο επαφής στερεού, υγρού και αερίου, προκαλούμε μεταβολή στην ελεύθερη ενέργεια του συστήματος. Η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας υπολογίζεται από το ισοζύγιο επιφανειακών τάσεων στη γραμμή επαφής και σε διαφορική μορφή δίνεται από τη σχέση:

$$dE = \gamma_{SL}dA - \gamma_{LV}dA + \gamma_{LV} \cos \theta dA \quad \text{Εξ. (4)}$$

και
$$dA = 2\pi r dx \quad \text{Εξ. (5)}$$

Όπου r είναι η ακτίνα της γραμμής επαφής στερεού/υγρού, γ_{SL} η επιφανειακή τάση στη διεπιφάνεια στερεού/υγρού (SL: Solid-Liquid) και γ_{SV} η επιφανειακή τάση στη διεπιφάνεια στερεού/αερίου (SV: Solid-Vapor). Με αναδιάταξη των ορών της αρχικής σχέσης έχουμε:

$$\frac{dE}{dA} = \gamma_{SL} - \gamma_{SV} + \gamma_{LV} \cos \theta \quad \text{Εξ. (6)}$$

Για να ισορροπεί όμως το σύστημα και να έχουμε την ελάχιστη ενέργεια προκύπτει ότι:

$$\frac{dE}{dA} = 0 \quad \text{Εξ. (7)}$$

Από τις εξισώσεις (6) και (7) τελικά προκύπτει:

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \quad \text{Εξ. (8)}$$

Η τελευταία εξίσωση είναι γνωστή και ως εξίσωση Young έχοντας πάρει το όνομα της από τον ερευνητή Thomas Young, ο οποίος την εισήγαγε, και ισχύει μόνο όταν η στερεή επιφάνεια που επικάθεται η σταγόνα διαθέτει μηδενική τραχύτητα. Έτσι, συνδέεται η γωνία επαφής, που αποτελεί μακροσκοπικό μέγεθος, με τις τρεις επιφανειακές τάσεις.

Η τάση προσκόλλησης ενός υγρού σε μια στερεή επιφάνεια κατά τη συνύπαρξή τους σε ένα αέριο περιβάλλον μπορεί να μετρηθεί άμεσα χρησιμοποιώντας κατάλληλες μετρήσεις ενέργειας ή μπορεί να εκτιμηθεί, ως το έργο συνάφειας (το έργο ανά μονάδα επιφάνειας που απαιτείται για τον διαχωρισμό στήλης στερεού-υγρού σε δύο στήλες, στερεού-αερίου και υγρού-αερίου) για το οποίο ισχύει ότι [1]:

$$W_a = \gamma_{SV} + \gamma_{LV} - \gamma_{SL} \quad \text{Εξ. (9)}$$

Από τις εξισώσεις (8) και (9), καταλήγουμε για το έργο συνάφειας W_a , στην εξίσωση:

$$W_a = \gamma_{LV}(1 + \cos \theta) \quad \text{Εξ. (10)}$$

Η εξίσωση (10) δεν είναι πάντα έγκυρη για τον προσδιορισμό του έργου συνάφειας. Κάτι τέτοιο συμβαίνει π.χ. όταν η γωνία επαφής θ παίρνει μηδενικές τιμές [1].

Γενικά, η επιφανειακή τάση γ (συνήθως έναντι του αέρα) μπορεί να εκφραστεί και ως το άθροισμα των δυνάμεων διασποράς γ^d (dispersion forces) και των πολικών δυνάμεων γ^p (polar forces).

$$\gamma = \gamma^d + \gamma^p \quad \text{Εξ. (11)}$$

Η επιφανειακή τάση μεταξύ στερεών και υγρών εκφράζεται από τα δύο συστατικά για κάθε φάση από τη σχέση:

$$\gamma_{SL} = \gamma_S + \gamma_L - 2\sqrt{\gamma_S^d \gamma_L^d} - 2\sqrt{\gamma_S^p \gamma_L^p} \quad \text{Εξ. (12)}$$

Δεδομένου ότι για συνηθισμένα υγρά, τα μεγέθη των επιφανειακών τάσεων (γ_L) είναι καταγεγραμμένα στη βιβλιογραφία, καθίσταται δυνατή η χρήση των τιμών των γωνιών επαφής για δυο υγρά με διαφορετική πολικότητα προκειμένου να καθορίσουμε την επιφανειακή τάση για οποιαδήποτε στερεή επιφάνεια. Ωστόσο, δεν είναι αρκετά αξιόπιστο να υπολογίζεται η επιφανειακή τάση από δύο μόνο δοκιμαστικά υγρά. Είναι προτιμότερο να έχουμε μετρήσεις των γωνιών επαφής για τρία ή περισσότερα υγρά, ώστε να καθοριστούν καλύτερα οι παράγοντες γ_s που αφορούν τις δυνάμεις διασποράς και πολικότητας.

Επίσης, πολλές προσεγγίσεις έχουν χρησιμοποιηθεί για να υποδιαιρεθεί η ελεύθερη ενέργεια του υγρού και της στερεής επιφάνειας σε ανεξάρτητες συνιστώσες. Μια από τις πλέον διαδεδομένες μεθόδους είναι αυτή των C. Van Oss και R. Good, οι οποίοι έχουν αποδείξει την ύπαρξη δυο κύριων συνιστωσών της επιφανειακής τάσης, τη μη πολική Lifshitz – van der Waals γ^{LW} , και την πολική οξεοβασική συνιστώσα γ^{AB} . Η διεπιφανειακή τάση μπορεί να εκφραστεί εν συνεχεία ως το άθροισμα των δυο αυτών συνιστωσών [1].

$$\gamma = \gamma^{LW} + \gamma^{AB} \quad \text{Εξ. (13)}$$

Η πρώτη συνιστώσα περιλαμβάνει τη συμβολή λόγω διασποράς (London), λόγω επαγωγής αλλά και λόγω των αλληλεπιδράσεων διπόλου-διπόλου (Keesom), οι οποίες είναι συνήθως μικρές συγκρινόμενες με τις αλληλεπιδράσεις διασποράς. Η δεύτερη συνιστώσα περιλαμβάνει την συνεισφορά του αποδέκτη ηλεκτρονίων, γ^+ , και του δότη ηλεκτρονίων, γ^- , που αποτελούν επίσης παραμέτρους της επιφανειακής τάσης.

Η οξεοβασική συνιστώσα δίνεται από τη σχέση:

$$\gamma^{AB} = 2\sqrt{\gamma^+}\sqrt{\gamma^-} \quad \text{Εξ. (14)}$$

Η συνολική επιφανειακή τάση μεταξύ δυο φάσεων i και j είναι:

$$\gamma_{ij} = (\sqrt{\gamma_i^{LW}} - \sqrt{\gamma_j^{LW}})^2 + 2(\sqrt{\gamma_i^+}\sqrt{\gamma_i^-} + \sqrt{\gamma_j^+}\sqrt{\gamma_j^-} - \sqrt{\gamma_i^+}\sqrt{\gamma_j^-} - \sqrt{\gamma_i^-}\sqrt{\gamma_j^+})^2 \quad \text{Εξ. (15)}$$

Έτσι από τις εξισώσεις (8) και (15) προκύπτει η γενική σχέση:

$$(1 + \cos\theta)\gamma_L = 2(\sqrt{\gamma_S^{LW}}\sqrt{\gamma_L^{LW}} + \sqrt{\gamma_S^+}\sqrt{\gamma_L^-} + \sqrt{\gamma_S^-}\sqrt{\gamma_L^+}) \quad \text{Εξ. (16)}$$

Τελικά, η ελεύθερη ενέργεια της επιφάνειας ενός στερεού μπορεί να εκτιμηθεί από τις γωνιές επαφής ενός συνόλου τουλάχιστον τριών υγρών, από τα οποία τουλάχιστον δύο πρέπει να είναι πολικά, με γνωστές τις επιφανειακές τάσεις των συστατικών τους [1].

Ο C. Van Oss έχει προτείνει, για την εκτίμηση της επιφανειακής τάσης ενός στερεού, ένα σύνολο τιμών για τους συντελεστές της ελεύθερης ενέργειας των δοκιμαστικών υγρών. Ωστόσο, οι Della Volpe και Siboni επισήμαναν πρόσφατα ότι οι συντελεστές της επιφανειακής τάσης, που επιλέγονται για τα υγρά που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο Van Oss, δηλαδή το γ_{s+} , το οποίο παίρνει πολύ μικρές, τιμές και το γ_{s-} , το οποίο παίρνει πολύ μεγάλες τιμές, δεν συμπίπτουν με τις ήδη γνωστές τιμές των συντελεστών επιφανειακής τάσης διαφόρων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στις μελέτες τους, όπως π.χ. για πολυμερή. Επίσης, πιστεύουν πως η επιλογή του C. Van Oss να χρησιμοποιήσει ίδιες τιμές για τις παραμέτρους γ_{L+} και γ_{L-} του νερού επηρεάζει τα μεγέθη των τιμών των υπολοίπων δοκιμαστικών υγρών. Έτσι, χρησιμοποιώντας τις πραγματικές τιμές για όλα τα υγρά, κατάφεραν να παράγουν πιο ακριβή αποτελέσματα για τους παράγοντες της ελεύθερης ενέργειας διαφόρων επιφανειών από πλαστικό ή πολυμερή [1].

2.4 Επαφή μεταξύ τριών φάσεων

Στην ενότητα αυτή θα ασχοληθούμε εκτενέστερα με τις διεπιφάνειες που δημιουργούνται μεταξύ τριών διαφορετικών φάσεων. Η επαφή μεταξύ τριών φάσεων, η οποία αποτελεί ένα από τα κυριότερα θέματα της παρούσας εργασίας, και προσδιορίζεται μέσω των πειραμάτων που ακολουθούν στην ενότητα 4.2, προκύπτει όταν μία σταγόνα υγρού η οποία περιβάλλεται από αέρα, βρίσκεται πάνω σε κάποιο στερεό υπόστρωμα. Δημιουργούνται τότε διεπιφάνειες μεταξύ υγρού/αέρα, στερεού/υγρού και στερεού/αέρα, όπως απεικονίζει το Σχ. 2.

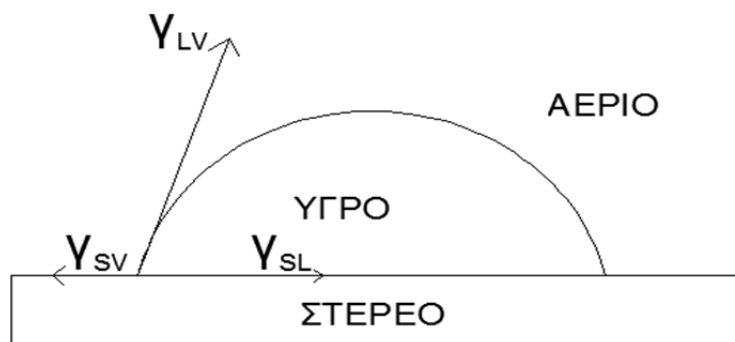
Η μορφή μίας σταγόνας η οποία ισορροπεί σε στερεό υπόστρωμα εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες του στερεού, και του περιβάλλοντος ρευστού, το οποίο τις περισσότερες φορές είναι ο αέρας. Καθώς η σταγόνα έρχεται σε επαφή με τη στερεή επιφάνεια μπορεί να πάρει διαφορετικές μορφές, είτε μορφή τμήματος έλλειψης

(οπότε η διαβροχή χαρακτηρίζεται ως μερική), είτε μορφή λεπτού φιλμ το οποίο διαβρέχει πλήρως τη στερεή επιφάνεια (οπότε η διαβροχή χαρακτηρίζεται ως ολική), είτε μορφή σφαίρας (οπότε έχουμε μηδενική διαβροχή) [2].

Οι τρεις παραπάνω περιπτώσεις θα αναλυθούν εκτενέστερα. Στην περίπτωση μερικής διαβροχής (Σχ. 2) το υγρό διαβρέχει μερικώς τη στερεή επιφάνεια. Η ισορροπία δυνάμεων εκφράζεται μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$\gamma_{SV} = \gamma_{LS} + \gamma_{LV} \cos\theta \quad \text{Εξ. (17)}$$

όπου θ η γωνία διαβροχής, που μπορεί να πάρει τιμές από 0° έως 180° .



Σχήμα 2: Σταγόνα υγρού η οποία επικάθεται σε επιφάνεια στερεού. Απεικόνιση των διεπιφανειών στερεού/αερίου, υγρού/αερίου και στερεού/υγρού, και των αντίστοιχων επιφανειακών τάσεων.

Στην περίπτωση της ολικής διαβροχής (Σχ. 3) η γωνία θ δεν ορίζεται πλέον. Στην περίπτωση αυτή ισχύει ότι:

$$\gamma_{SL} > \gamma_{SV} + \gamma_{LV} \quad \text{Εξ. (18)}$$

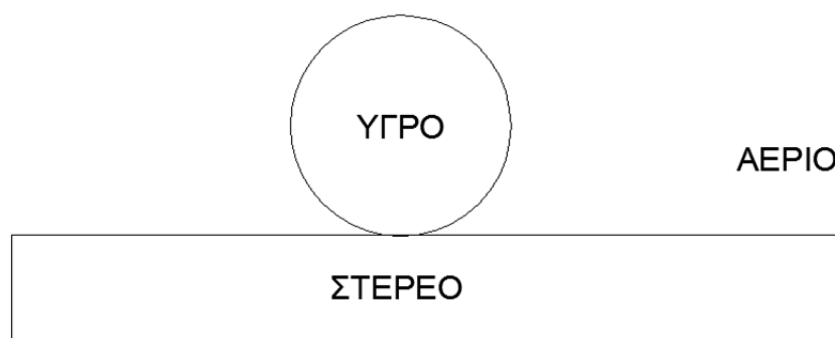


Σχήμα 3: Σταγόνα υγρού η οποία επικάθεται σε επιφάνεια στερεού. Περίπτωση ολικής διαβροχής στερεού.

Στην περίπτωση μηδενικής διαβροχής το υγρό έχει τη μορφή σφαίρας και ισχύει ότι:

$$\gamma_{SL} < \gamma_{SV} + \gamma_{LV} \quad \text{Εξ. (19)}$$

Στο Σχ. 4 απεικονίζεται η μηδενική διαβροχή σταγόνας που επικάθεται σε στερεή επιφάνεια. Είναι εμφανές πως η γωνία επαφής θ είναι 180 μοίρες.



Σχήμα 4: Σταγόνα υγρού η οποία επικάθεται σε επιφάνεια στερεού. Περίπτωση μηδενικής διαβροχής στερεού.

Με βάση τις εξισώσεις (18), (19) ορίζεται η παράμετρος διάβροχής S η οποία μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$S = \gamma_{SL} - (\gamma_{SV} + \gamma_{LV}) \quad \text{Εξ. (20)}$$

Αν η παράμετρος διαβροχής παίρνει θετικές τιμές το υγρό διαβρέχει πλήρως τη στερεή επιφάνεια πάνω στην οποία επικάθεται, ενώ σε αντίθετη περίπτωση το υγρό παίρνει τη μορφή σταγόνας [1].

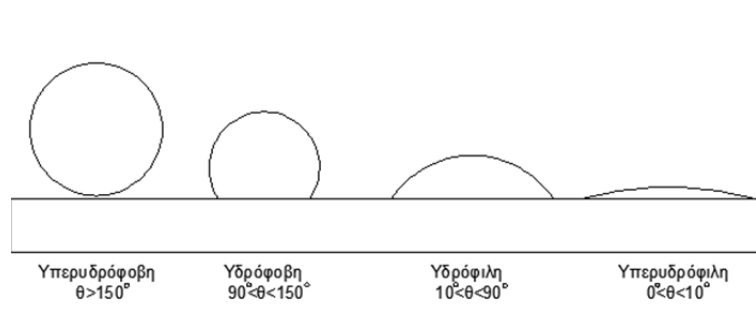
2.5 Γωνία διαβροχής και χαρακτηρισμός επιφανειών

Η γωνία διαβροχής είναι η γωνία που δημιουργείται μεταξύ μίας υγρής σταγόνας που επικάθεται σε στερεή επιφάνεια (Σχ. 5). Η γωνία αυτή είναι συγκεκριμένη για κάθε σύστημα στερεού/υγρού που μελετάται, και αποτελεί μέτρηση η οποία χαρακτηρίζει τις τάσεις που αναπτύσσονται μεταξύ των φάσεων που έρχονται σε επαφή [2].



Σχήμα 5: Σταγόνα υγρού η οποία επικάθεται σε επιφάνεια στερεού. Ορισμός γωνίας διαβροχής.

Η τελική μορφή της σταγόνας εξαρτάται από την ισορροπία των μοριακών δυνάμεων του υγρού και των δυνάμεων αλληλεπίδρασης υγρού και στερεού. Η παράμετρος διαβροχής ενός στερεού εξαρτάται από τη σύσταση (υλικό), την ομοιογένεια και την τραχύτητα της εξωτερικής του επιφάνειας. Η ισχύς της αλληλεπίδρασης με το υγρό εξαρτάται από τη πολικότητα ή μη του υλικού [1]. Κατά τη διεπαφή μίας στερεής επιφάνειας με νερό, στην περίπτωση μερικής διαβροχής, εάν η γωνία επαφής είναι μεταξύ 0° και 10° η επιφάνεια καλείται υπερυδρόφιλη, εάν είναι μικρότερη των 90° , η επιφάνεια χαρακτηρίζεται ως υδρόφιλη, εάν παίρνει τιμές μεταξύ των 90° και των 150° χαρακτηρίζεται ως υδρόφοβη, ενώ για τιμές από 150° έως 180° η επιφάνεια χαρακτηρίζεται ως υπερυδρόφοβη. Στο Σχ. 6 που ακολουθεί φαίνεται η μορφή της σταγόνας για τις τέσσερις προαναφερθείσες περιπτώσεις διαβροχής που αναλύσαμε [25].



Σχήμα 6: Χαρακτηρισμός επιφανειών ως προς τις ιδιότητες διαβροχής.

Γενικά, υγρά με υψηλή επιφανειακή τάση τείνουν να δώσουν πεπερασμένη, μη μηδενική γωνία επαφής. Πρέπει να αναφερθεί ότι η δύναμη αλληλεπίδρασης στην περίπτωση αυτή είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια συνάφειας μεταξύ υγρών και στερεών.

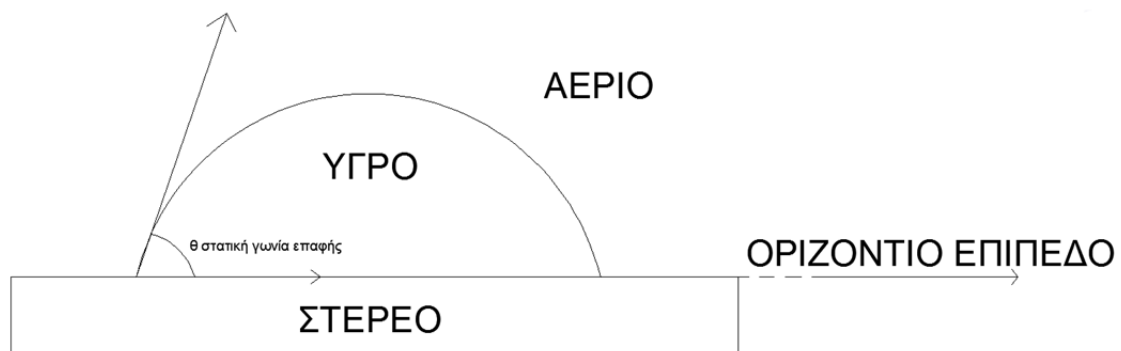
2.6 Μέθοδοι μετρήσεως γωνίας επαφής

Μεγάλο ενδιαφέρον στην περιοχή της ενέργειας των επιφανειών έχουν οι μετρήσεις της γωνίας επαφής μεταξύ μιας στερεής επιφάνειας και μια σταγόνας υγρού. Οι δυο κυριότερες μέθοδοι μετρήσεως είναι αυτές της στατικής και της δυναμικής θέσεως της σταγόνας. Κατά τη στατική μέθοδο, η στερεή επιφάνεια βρίσκεται σε οριζόντια θέση, ενώ κατά τη δυναμική μέθοδο μπορούμε, είτε να μετρήσουμε τη γωνία επαφής μεταξύ υγρού και στερεού έχοντας δώσει μια κλίση στη στερεή επιφάνεια, είτε να χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο της υποχωρούσας και προωθούμενης γωνίας [1].

Καί στις δύο περιπτώσεις της δυναμικής μεθόδου λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της υστέρησης. Η γωνία υστέρησης για την πρώτη περίπτωση ορίζεται ως η απόλυτη διαφορά μεταξύ της δεξιάς και της αριστερής γωνίας επαφής, η οποία οφείλεται στη κλίση της επιφάνειας, ενώ στη δεύτερη περίπτωση ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της προωθούμενης (advancing) και της υποχωρούσας (receding) γωνίας. Στην ενότητα 2.6.2.2 που ακολουθεί επεξηγούνται αναλυτικότερα οι δυο κύριες μέθοδοι μετρήσεως της γωνίας επαφής αλλά και οι υποπεριπτώσεις τους [1], [24].

2.6.1 Στατική μέθοδος

Η στατική μέθοδος αποτελεί τη βασική μέθοδο μετρήσεως γωνιών επαφής. Για τη λήψη των μετρήσεων χρησιμοποιούνται διάφορα μέσα. Ένα από τα κυριότερα είναι το γωνιόμετρο, το οποίο χρησιμοποιεί οπτικό σύστημα που αποτυπώνει το προφίλ της γεωμετρίας στερεού, υγρού και αέρα. Η γωνία με κορυφή το σημείο επαφής στερεού, υγρού και αερίου και σκέλη της διεπαφής υγρού/στερεού και υγρού/αερίου ορίζεται ως γωνία επαφής και παρουσιάζεται στο Σχ.7.



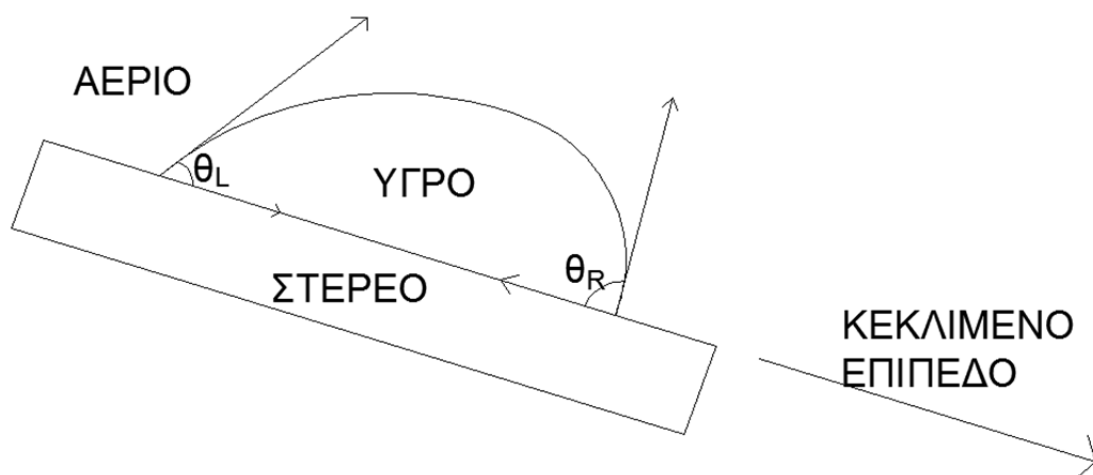
Σχήμα 7: Ορισμός στατικής γωνίας επαφής.

2.6.2 Δυναμική μέθοδος

2.6.2.1 Μέθοδος κεκλιμένου επιπέδου

Η δυναμική μέθοδος μετρήσεως γωνιών επαφής κεκλιμένου επιπέδου είναι παρόμοια με τη στατική μέθοδο καθώς χρησιμοποιείται η ίδια διάταξη, όμως η στερεή επιφάνεια βρίσκεται σε κατάλληλη κεκλιμένη θέση, ώστε η σταγόνα του υγρού να έχει τη μεγαλύτερη δυνατή γωνία επαφής χωρίς να κυλιέται στην επιφάνεια στην οποία επικάθεται (να μην ξεπερνιέται η στατική δύναμη τριβής).

Στο Σχ. 8 παρουσιάζεται η δεξιά (θ_R) και η αριστερή (θ_L) γωνία επαφής που σχηματίζονται κατά την εφαρμογή της δυναμικής μεθόδου μετρήσεως [23].



Σχήμα 8: Ορισμός γωνιών επαφής κατά τη μέτρηση με τη μέθοδο κεκλιμένου επιπέδου.

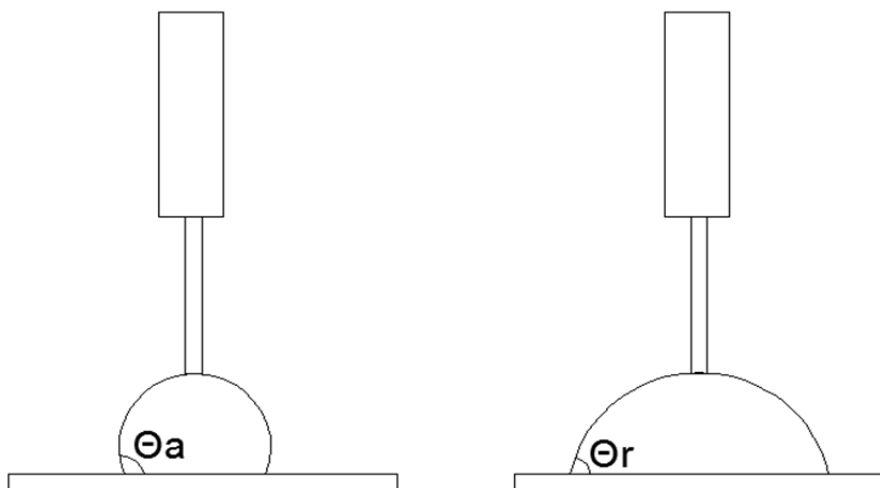
2.6.2.2 Μέθοδος υποχωρούσας και προωθούμενης γωνίας επαφής

Η δεύτερη μέθοδος δυναμικής μετρήσεως των γωνιών επαφής είναι μέσω της μέτρησης της προωθούμενης (advancing) και της υποχωρούσας (receding) γωνίας. Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στο μεγάλο εύρος των ενδιάμεσων καταστάσεων που μπορεί να παρατηρηθούν καθώς η σταγόνα του υγρού επικάθεται στην στερεή επιφάνεια ή απομακρύνεται από αυτήν.

Η προωθούμενη γωνία επαφής μετράται στο σύστημα υγρού, στερεού και αέρα κατά τη φάση της εναπόθεσης της σταγόνας στην επιφάνεια μέσω της σύριγγας. Στη φάση αυτή, η σταγόνα βρίσκεται σε συνεχή επαφή με τη σύριγγα και τη στερεή επιφάνεια, εάν υπάρχει συνεχής εκροή υγρού. Στην αντίθετη περίπτωση, καθώς η σύριγγα έχει εναποθέσει ένα συγκεκριμένο όγκο υγρού πάνω στη στερεή επιφάνεια και ξεκινά να αναρροφά πίσω στη σύριγγα το υγρό, μετράται η υποχωρούσα γωνία (Σχ. 9).

Η τραχύτητα της επιφάνειας έχει πολύ μεγάλη επίδραση στην μετρούμενη γωνία υστέρησης (διαφορά προωθούμενης και υποχωρούσας γωνίας επαφής. Χαμηλότερες τιμές της γωνίας υστέρησης δείχνουν ότι το υλικό είναι πιο ομοιογενές και κάθε σταγόνα που έρχεται σε επαφή με αυτό μπορεί να ολισθήσει ευκολότερα στην επιφάνεια του υλικού (και να παρασύρει σε μεγάλο βαθμό τυχόν ακαθαρσίες που επικάθονται στην επιφάνειά του). [23].

Στο Σχ. 9 παρουσιάζονται οι μέθοδοι μετρήσεων για την προωθούμενη (θ_a) και την υποχωρούσα (θ_r) γωνία επαφής. Η στατική γωνία επαφής σύμφωνα με τον Young βρίσκεται ανάμεσα στις θ_a και θ_r [1], [23].



Σχήμα 9: Ορισμός προωθούμενης και υποχωρούσας γωνίας επαφής.

2.7 Μελέτη επιφανειών με τραχύτητα

Κατά την επικάλυψη σταγόνας υγρού σε επιφάνεια στερεού με τραχύτητα μπορούν να διακριθούν οι ακόλουθες περιπτώσεις:

- Το υγρό διαβρέχει πλήρως την επιφάνεια με τραχύτητα (ολική διαβροχή).
- Το υγρό διαβρέχει μερικώς την επιφάνεια με τραχύτητα, καθώς κατά την επικάλυψη της σταγόνας στη στερεή επιφάνεια παγιδεύεται αέριο μεταξύ του υγρού και του στερεού στα διάκενα που σχηματίζονται λόγω τραχύτητας.
- Το υγρό δεν διαβρέχει την επιφάνεια.

Για κάθε μια από τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις αναπτυχθήκαν διαφορετικές μέθοδοι υπολογισμού της πραγματικής γωνίας επαφής, που περιγράφονται στις επόμενες παραγράφους.

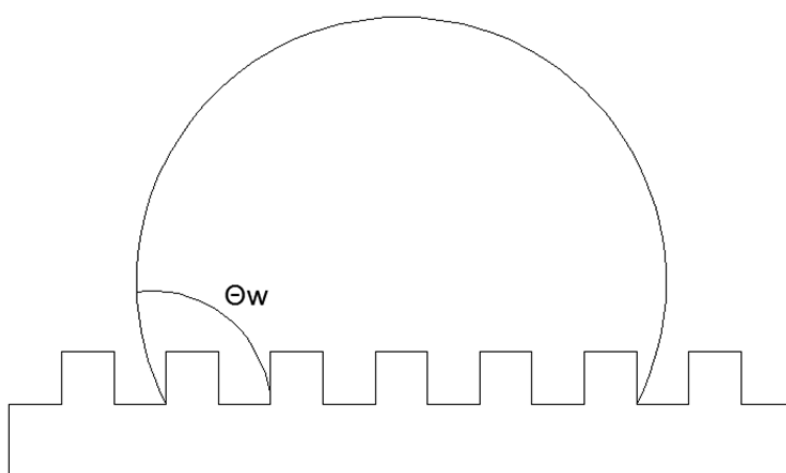
2.7.1 Μοντέλο Wenzel

Για την περίπτωση της ολικής διάβροχης αναπτύχθηκε το μοντέλο Wenzel (1936) το οποίο, μέσω της εξίσωσης που ακολουθεί, περιγράφει την επίδραση της επιφανείας της τραχύτητας στη γωνία επαφής που σχηματίζεται:

$$\cos \theta_w = r \cos \theta \quad \text{Εξ. (21)}$$

όπου θ_w η γωνία επαφής της επιφάνειας με τραχύτητα, θ η γωνία επαφής που θα έχει η ίδια σταγόνα σε λεία επιφάνεια από το ίδιο υλικό με την τραχεία, και r συντελεστής ο οποίος καλείται συντελεστής τραχύτητας. Σε υδρόφοβες επιφάνειες, η αύξηση της τραχύτητας προκαλεί γενικά αύξηση της γωνίας επαφής, ενώ σε υδρόφιλες επιφάνειες η αύξηση της τραχύτητας προκαλεί γενικά μείωση της γωνίας επαφής.

Στο Σχ. 10 παρουσιάζεται η γεωμετρία της σταγόνας υγρού πάνω σε επιφάνεια με τραχύτητα σύμφωνα με το μοντέλο του Wenzel. Η γωνία θ_w περιγράφει τη γωνία επαφής σύμφωνα με το μοντέλο του Wenzel [5],[8].



Σχήμα 10: Γωνία επαφής σταγόνας που επικάθεται σε επιφάνεια με τραχύτητα σύμφωνα με το μοντέλο Wenzel.

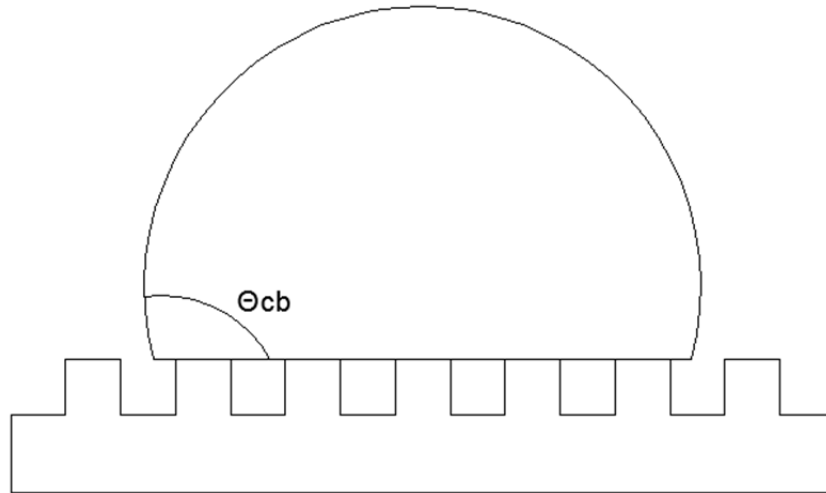
2.7.2 Μοντέλο Cassie Baxter

Για τις περιπτώσεις μερικής διαβροχής αναπτύχθηκε το μοντέλο των Cassie και Baxter (1944), σύμφωνα με το οποίο, μέσω της εξίσωσης [5]:

$$\cos \theta_{cb} = f_1 \cos(\theta_1) - f_2 \quad \text{Εξ. (22)}$$

υπολογίζεται η γωνία επαφής σε περιπτώσεις στις οποίες η σταγόνα επικάθεται στις κορυφές της τραχύτητας και αιωρείται σε αέριο στρώμα το οποίο έχει παγιδευτεί στις κοιλάδες της τραχύτητας (Σχ. 11). Στην εξίσωση (22), θ_{cb} είναι η γωνία επαφής της σταγόνας με τη τραχεία επιφάνεια, f_1 το κλάσμα της επιφάνειας της σταγόνας που έρχεται σε επαφή με τις κορυφές της τραχύτητας (διεπιφάνεια στερεού-υγρού), f_2 το κλάσμα της επιφάνειας της σταγόνας που έρχεται σε επαφή με το αέριο το οποίο είναι

παγιδευμένο στις κοιλάδες της τραχύτητας (διεπιφάνεια υγρού-αερίου), ενώ θ_l είναι η γωνία επαφής της σταγόνας αν αυτή επεκάθετο σε λεία επιφάνεια (μηδενικής τραχύτητας) από το ίδιο υλικό [5],[8].



Σχήμα 11: Γωνία επαφής σταγόνας που επικάθεται σε επιφάνεια με τραχύτητα σύμφωνα με το μοντέλο Cassie Baxter.

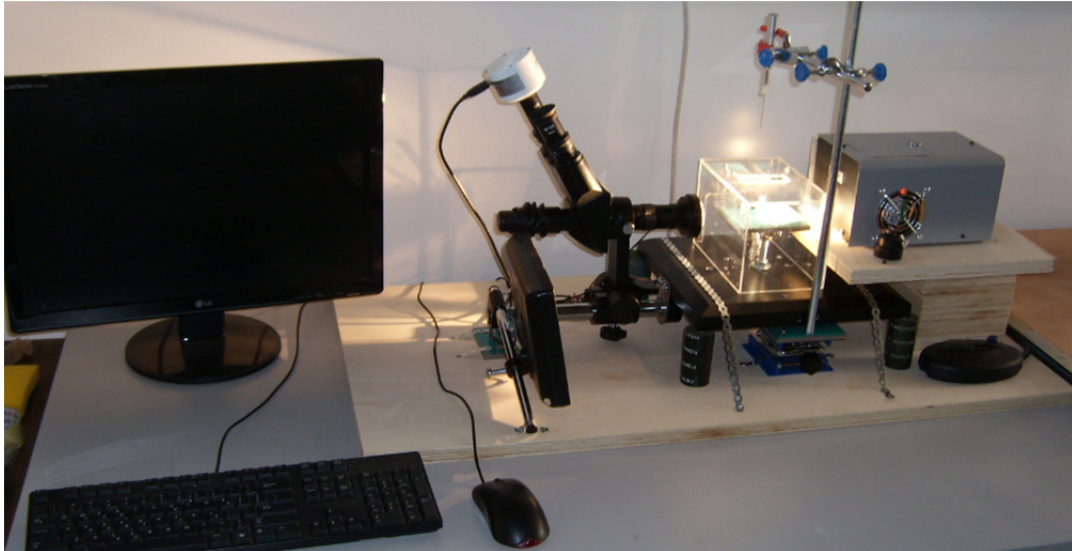
3 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Ο βασικός στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εξ' αρχής σχεδίαση και κατασκευή πειραματικής διάταξης για τη μελέτη διαβροχής επιφανειών. Η πειραματική διάταξη συντίθεται από αριθμό διαφορετικών εξαρτημάτων, τα οποία περιγράφονται στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου. Για όλα τα εξαρτήματα έγινε κατάλληλη επεξεργασία και συναρμολόγηση, ώστε η τελική διάταξη να παρέχει έγκυρες και αξιόπιστες μετρήσεις.

Για την κατασκευή της πειραματικής διάταξης χρησιμοποιήθηκαν ένα στερεοσκόπιο, μία φωτογραφική κάμερα υψηλής ανάλυσης, ένας σταθερός φωτισμός και μία σύριγγα εναπόθεσης υγρού (βλ. Σχήματα 12-14), τα χαρακτηριστικά των οποίων περιγράφονται στις υποενότητες 3.1, 3.2, 3.3 και 3.4 αντίστοιχα.

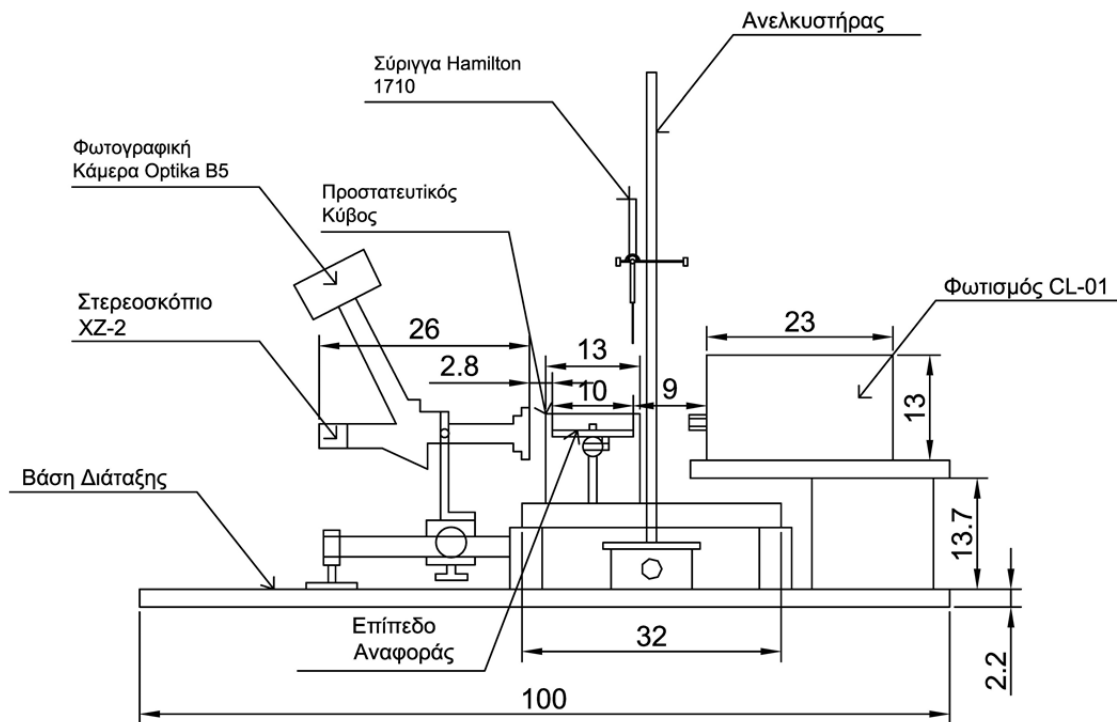
Το στερεοσκόπιο μετασκευάστηκε ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οριζόντια θέση, και συνδέθηκε στην κεντρική βάση της διάταξης, η οποία είναι κατασκευασμένη από αλουμίνιο. Στο προσοφθάλμιο του στερεοσκοπίου τοποθετήθηκε η φωτογραφική κάμερα υψηλής ανάλυσης, η οποία συνδέθηκε μέσω θύρας *USB* στον ηλεκτρονικό υπολογιστή, για την αποστολή δεδομένων. Επίσης, κατασκευάστηκε ειδικό επίπεδο με βάση στηρίξεως διαστάσεων 10 cm x 10 cm, με δυνατότητα περιστροφής μέσω στεφάνης γύρω από μεταλλική σφαίρα, ώστε, κατά τις μετρήσεις, να είναι δυνατή η περιστροφή του επιπέδου. Επίσης, το επίπεδο αναφοράς μπορεί να μετακινείται κατά το διάμηκες (από και προς το στερεοσκόπιο), μέσω ειδικών οπών στη βάση του αλουμινίου, και κατακόρυφα, μέσω κατάλληλου κοχλίου ο οποίος είναι ειδικά προσαρμοσμένος. Τέλος, μπορεί να εκτελέσει περιστροφή περί διάμηκες επίπεδο μέσω ελατηρίου προσαρμοσμένου στην άκρη του επιπέδου. Η περιστροφή αυτή εκτελείται με κατάλληλη περιστροφή περικοχλίου ειδικά προσαρμοσμένου ρυθμιστικού κοχλίου. Εν συνεχεία, για την προστασία των προς μελέτη στερεών επιφανειών, οι οποίες τοποθετούνται στο επίπεδο αναφοράς, κατασκευάστηκε ειδικός προστατευτικός θάλαμος, σχήματος κύβου από πλαστικό (*plexiglass*). Ο θάλαμος είναι διαπερατός από το φως (διαφανής), και έχει διαστάσεις 13cm x 13cm x 13cm. Η σύριγγα στηρίζεται σε ειδικό σφιγκτήρα με ελευθερία τριών κινήσεων ως προς κατακόρυφο άξονα, ενώ μέσω ειδικού ανελκυστήρα, μπορεί να

εκτελεί κινήσεις ακριβείας κατά το κατακόρυφο επίπεδο. Τέλος, κατασκευάστηκε ειδική βάση από κόντρα πλακέ θαλάσσης διαστάσεων 100cm x 50cm x 2.2cm, επί της οποίας συναρμολογήθηκαν όλα τα τμήματα της διάταξης. Στην άκρη της βάσης κατασκευάστηκε ειδική υποδοχή ύψους 15.9 cm από στιβαρό ξύλο για τη στήριξη του φωτισμού. Στο Σχ. 12 παρουσιάζεται φωτογραφία της πειραματικής διάταξης μετά την τελική συναρμολόγηση.

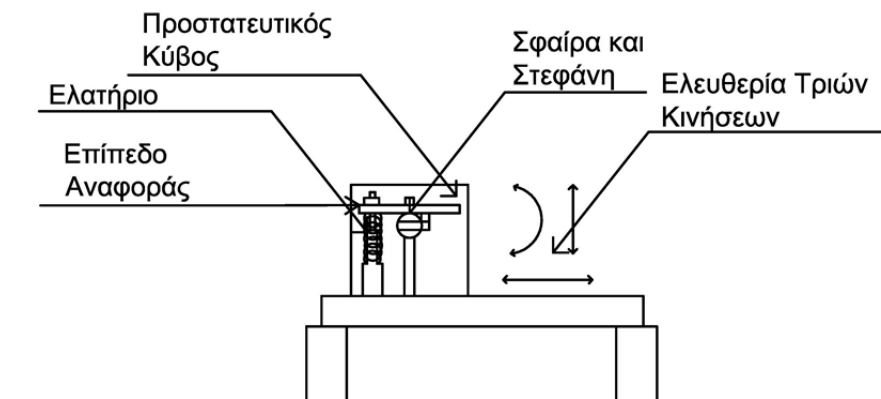


Σχήμα 12: Πειραματική διάταξη μέτρησης ιδιοτήτων διαβροχής επιφανειών.

Στο Σχ. 13 παρουσιάζεται σχέδιο πλάγιας όψης της πειραματικής διάταξης, στο οποίο φαίνονται τα επιμέρους τμήματα τα οποία αναλύθηκαν προηγουμένως. Το Σχ. 14 αποτελεί μεγέθυνση του Σχ. 13 στην περιοχή στην οποία πραγματοποιούνται οι μετρήσεις. Σε αυτό παρουσιάζονται το επίπεδο αναφοράς, ο προστατευτικός κύβος, η σφαίρα περιστροφής, η στεφάνη, οι κοχλίες, και οι δυνατότητες κίνησης του επιπέδου αναφοράς.



Σχήμα 13: Πλάγια όψη πειραματικής διάταξης. Απεικόνιση των επιμέρους τμημάτων. Διαστάσεις σε cm.



Σχήμα 14: Πλάγια όψη πειραματικής διάταξης. Απεικόνιση λεπτομερειών στην περιοχή μέτρησης.

3.1 Στερεοσκόπιο

Το στερεοσκόπιο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία κατασκευάζεται από την εταιρία OPTIKA MICROSCOPES, που έχει ως έδρα την Ιταλία. Το μοντέλο ονομάζεται ΧΖ-2 και πραγματοποιεί μετρήσεις μέσω διοφθαλμικών κιαλιών με κλίμακα εστίασης από 0.7 έως 4.5.



Σχήμα 15: Φωτογραφία στερεοσκοπίου XZ-2.

Αποτελείται από τα εξής μέρη:

- Δακτύλιος LED φωτισμού με ρυθμιστή φωτεινότητας.
- Τροφοδοτικό LED λυχνίας με χαρακτηριστικά 100-240 VAC/50-60 Hz και έξοδο 12 VDC. Μέγιστη απαιτούμενη ισχύς 5 W.
- Τροφοδοτικό κάμερας με χαρακτηριστικά: 100-240 VAC/50-60 Hz και έξοδο 5.5 VDC. Μέγιστη απαιτούμενη ισχύς 3 W.
- LCD οθόνη με χαρακτηριστικά: 100-240 VAC/50-60 Hz και έξοδο 12 VDC. Μέγιστη απαιτούμενη ισχύς 10 W.
- Ειδικά ρυθμιζόμενος οδηγός που μπορεί να μετακινεί όλο το στερεοσκόπιο μπροστά και πίσω με περιστροφή του ειδικού μοχλού. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η σωστή εστίαση.
- Άξονας στηρίξεως του στερεοσκοπίου διαμέτρου 2.5 cm.
- Βάση διαστάσεων 32.5 cm x 26.5 cm x 2 cm, και βάρους 3 kg.
- Διοφθαλμικά κιάλια κλίσεως 30°.
- Διόπτρα προσαρμοζόμενη στα δύο προσοφθάλμια.
- Προσοφθάλμια WF 10X, διαμέτρου 18 mm.
- Χρωματικός στόχος με εύρος ζουμ 0.7x–4.5x, παράγοντας ζουμ 6.42:1, και απόσταση λειτουργίας 96 mm.
- Έγχρωμος LCD αισθητήρας με ανάλυση οθόνης τριακοσίων ογδόντα γραμμών.

- TFT LCD οθόνη 8''.

3.2 Φωτογραφική κάμερα



Σχήμα 16: Φωτογραφία φωτογραφικής κάμερας OPTIKA B5.

Η φωτογραφική κάμερα που χρησιμοποιήθηκε κατασκευάζεται από την εταιρία OPTIKA MICROSCOPES με έδρα την Ιταλία. Το μοντέλο ονομάζεται OPTIKA B5 και πραγματοποιεί λήψη φωτογραφιών και βίντεο μέσω ειδικής συνδεσμολογίας στο στερεοσκόπιο. Τα χαρακτηριστικά της είναι τα εξής:

- Αισθητήρας CMOS 1/2.5''
- Ανάλυση 2592x1944 pixels (5.04 Mpixels).
- Ρυθμός καρέ σε πλήρη ανάλυση: 8 φωτογραφίες / δευτερόλεπτο.
- Ρυθμός καρέ σε ανάλυση VGA: 30 φωτογραφίες / δευτερόλεπτο.
- Οπτική μορφή: 1/2.5''.
- Αναλογία: 4:3.
- S/N ratio 40.5 dB.
- Dynamic range 60 dB.
- Ευαισθησία: 1.0V / Lux - δευτερόλεπτο.
- C-mount.
- Οπτικός προσαρμογέας: 0.5x (για προσοφθάλμιο σωλήνα).
- Προσαρμογέας για στερεοσκόπιο, διαμέτρων 30 mm και 35 mm.

- Βαθμονομημένη διαφάνεια: 76 mm x 24 mm μικρομετρική διαφάνεια βαθμονόμησης.
- Απαιτήσεις συστήματος: Windows XP, Vista/7, 32-64 bit, θύρα USB.
- Λογισμικό: Optika vision lite
- Χαρακτηριστικά λήψης: συνεχής αυτόματη ισορροπία λευκού.
- Καλώδιο USB 1.8 m.
- Διαστάσεις: ύψος 5.5 cm, διάμετρος 7 cm, βάρος 220 gr και ύψος περιλαμβανομένου του οπτικού προσαρμογέα, 10 cm.

3.3 Φωτισμός

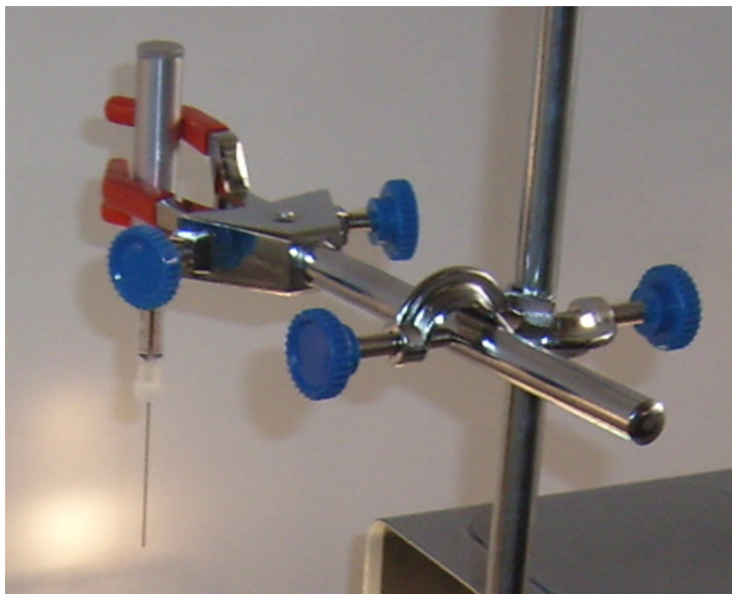


Σχήμα 17: Φωτογραφία φωτιστικού στοιχείου CL - 01.

Το φωτιστικό στοιχείο που χρησιμοποιήθηκε κατασκευάζεται από την εταιρία OPTIKA MICROSCOPES με έδρα την Ιταλία. Το μοντέλο ονομάζεται CL - 01 και παράγει ψυχρό φως με γεννήτρια 100 W με βάση διχρωμική λάμπα αλογόνου. Τα χαρακτηριστικά του είναι τα εξής:

- Πηγή φωτός: διχρωμικός λαμπτήρας αλογόνου 12 V, 100 W.
- Διακόπτης ON/OFF και ρυθμιστής φωτεινότητας από εξωτερικό ελεγκτή.
- Τροφοδοσία εισόδου 230 VAC, 50/60 Hz (προαιρετική είσοδος 110 VAC με ασφάλεια 2 AT).

3.4 Σύριγγα εναπόθεσης υγρού



Σχήμα 18: Φωτογραφία σύριγγας Hamilton 1710.

Η σύριγγα που χρησιμοποιήθηκε κατασκευάζεται από την εταιρία Hamilton που έχει την έδρα της στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής. Το συγκεκριμένο μοντέλο είναι το 1710, και είναι ιδανικό για εφαρμογές με απαιτήσεις εναπόθεσης πολύ μικρής ποσότητας υγρού. Η σύριγγα είναι τύπου LT, και χρησιμοποιεί κόμβο εναπόθεσης KEL-F. Η συγκεκριμένη σύριγγα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιοδήποτε υγρό, και, αν προσαρμοστεί σε κατάλληλη διάταξη, ενδείκνυται για μετρήσεις γωνίας επαφής. Μπορεί να αποθηκεύσει υγρό συνολικού όγκου 100 μL (0.1 mL), και με κάθε περιστροφή της κεφαλής εναποθέτει ποσότητα υγρού 1.32 μL . Τέλος, στηρίζεται σε ειδικό άξονα ύψους 60 cm, στον οποίο είναι στερεωμένος σφιγκτήρας τριών βαθμών ελευθερίας και μέγιστης οριζόντιας μετακίνησης 15 cm. Με τον τρόπο αυτόν, μπορεί να πλησιάζει ή να απομακρύνεται από το επίπεδο εναπόθεσης της σταγόνας.

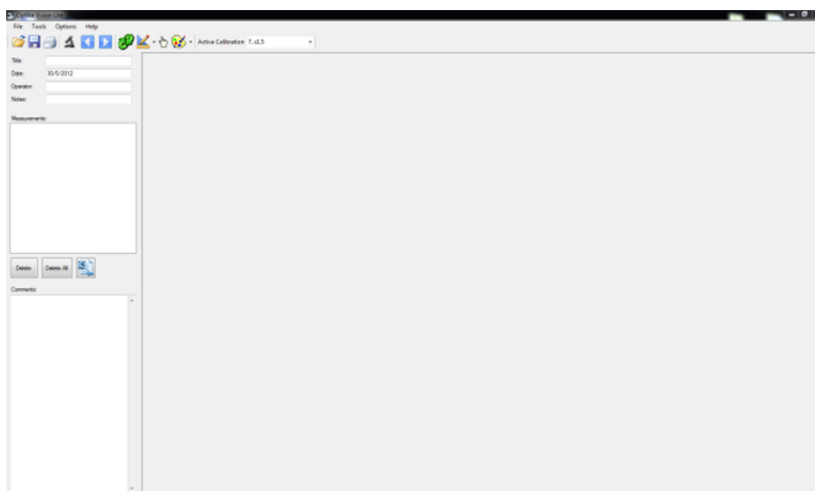
3.5 Λογισμικό που χρησιμοποιείται κατά την εκτέλεση των πειραμάτων

3.5.1 Λογισμικό καταγραφής και επεξεργασίας

Το πρώτο μέρος κατά τη διεξαγωγή ενός πειράματος είναι η λήψη των εικόνων του στερεοσκοπίου, μέσω της κάμερας λήψης φωτογραφιών, και, εν

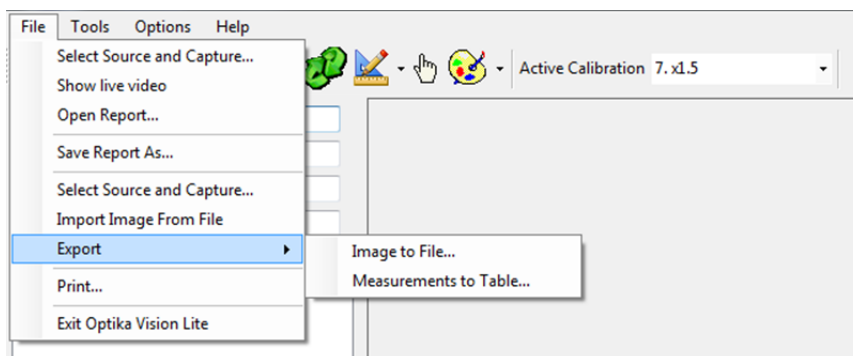
συνεχία, η ανάλυση της φωτογραφίας, ώστε να προσδιοριστούν τα βασικά μεγέθη που είναι απαραίτητα για τους περαιτέρω υπολογισμούς.

Το λογισμικό που χρησιμοποιείται ονομάζεται OPTIKA VISION LITE 2.1, και λαμβάνει αρχικά τις φωτογραφίες της σταγόνας. Το αρχικό περιβάλλον του προγράμματος φαίνεται στο Σχ. 19 παρακάτω.



Σχήμα 19: Λογισμικό OPTIKA VISION LITE 2.1.: Αρχικό περιβάλλον προγράμματος.

Στη συνέχεια, ακολουθεί επεξήγηση όλων των εντολών του προγράμματος και ανάλυση των εικονιδίων.



Σχήμα 20: Λογισμικό OPTIKA VISION LITE 2.1.: Μενού *FILE*.

Μέσω του μενού *FILE* μπορούν να εκτελεστούν οι παρακάτω εντολές.

- *Select source and capture*

Επιλεγούμε την φωτογραφική κάμερα με την οποία θα γίνει η λήψη της φωτογραφίας. Στη παρούσα πειραματική διάταξη η εγκατεστημένη κάμερα είναι η OPTIKA B5.

- *Show live video*

Μέσω αυτής της εντολής μπορούμε, μέσω της κάμερας, να πραγματοποιήσουμε λήψη βίντεο με σκοπό να αποτυπώσουμε τη σταδιακή εξέλιξη του πειράματος. Με ανάλυση των στιγμιοτύπων μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για τη δυναμική της σταγόνας καθώς αυτή αλληλεπιδρά με την επιφάνεια που μελετάται.

- *Open report*

Μέσω της εντολής *open report* μπορούμε να ανοίξουμε οποιοδήποτε αρχείο εικόνας σε μορφή **.jpeg*, και να εκτελέσουμε μετρήσεις στον καμβά του προγράμματος.

- *Save report as*

Μέσω της εντολής *save report as* μπορούμε να αποθηκεύσουμε μια εικόνα σε κάποιον φάκελο του υπολογιστή, σε μορφή **.jpeg*, ούτως ώστε στη συνέχεια να είναι δυνατή η άμεση πρόσβαση για τη περαιτέρω επεξεργασία της.

- *Import image from file*

Με την εντολή *import image from file* μπορούμε να εισάγουμε στο πρόγραμμα μια υπάρχουσα φωτογραφία, με σκοπό την επεξεργασία της.

- *Export > image to file*

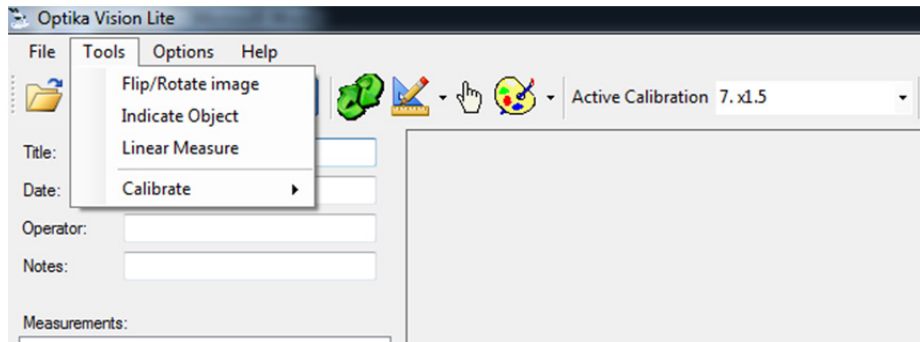
Μετά τη λήψη μιας εικόνας από τη κάμερα, προκειμένου να γίνει η επεξεργασία της και από άλλα προγράμματα, πρέπει να γίνει η αποθήκευση της στον υπολογιστή. Με την παρούσα εντολή, αποθηκεύουμε την εικόνα που έχουμε λάβει σε μορφή **.jpeg*, δίνοντας σε αυτήν το επιθυμητό όνομα. Την εικόνα αυτή μπορούμε στη συνέχεια να την επεξεργαστούμε οποτεδήποτε θελήσουμε με οποιοδήποτε άλλο λογισμικό.

- *Print*

Μέσω αυτής της εντολής, και εφόσον ο ηλεκτρονικός υπολογιστής που χρησιμοποιούμε είναι συνδεδεμένος με κάποιον εκτυπωτή, μπορούμε να εκτυπώσουμε την εικόνα που έχουμε λάβει από την κάμερα.

- *Exit Optika Vision Lite*

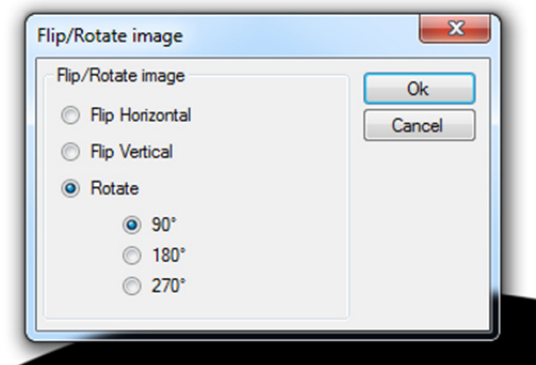
Με αυτή την εντολή πραγματοποιείται η έξοδος από το λογισμικό και η επιστροφή στην επιφάνεια εργασίας του λειτουργικού συστήματος.



Σχήμα 21: Λογισμικό OPTIKA VISION LITE 2.1.: Μενού *TOOLS*.

Μέσω του μενού *TOOLS* μπορούν να εκτελεστούν οι παρακάτω εντολές.

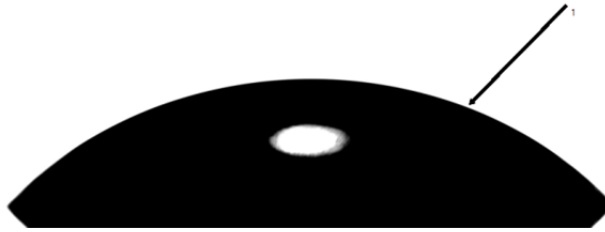
- *Flip / rotate image*



Σχήμα 22: Λογισμικό OPTIKA VISION LITE 2.1.: Ρυθμίσεις *Flip / Rotate Image*.

Με την παραπάνω εντολή μπορούμε να επιτύχουμε οριζόντια ή κατακόρυφη αντιστροφή της εικόνας, ή περιστροφή της κατά 90°, 180° ή 270°.

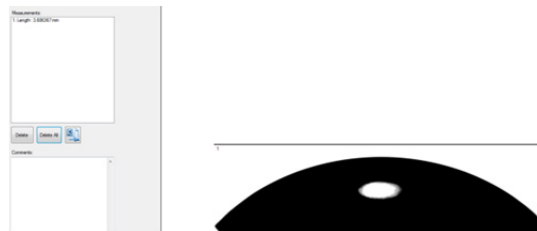
- *Indicate object*



Σχήμα 23: Λογισμικό OPTIKA VISION LITE 2.1.: Εντολή τοποθέτησης βέλους.

Με αυτήν την εντολή μπορούμε να τοποθετήσουμε αριθμημένα βέλη στην εικόνα, με σκοπό να ξεχωρίσουμε τα διάφορα στοιχεία που περιλαμβάνει η φωτογραφία.

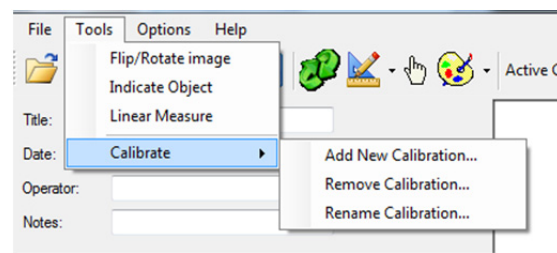
- *Linear measure*



Σχήμα 24: Λογισμικό OPTIKA VISION LITE 2.1.: Εντολή λήψης μέτρησης.

Με αυτή την εντολή μπορούμε να μετρήσουμε ευθύγραμμα τμήματα επί της εικόνας. Για να είναι σωστές οι ληφθείσες μετρήσεις πρέπει να έχει προηγηθεί βαθμονόμηση της διάταξης (βλ. παρακάτω).

- *Calibrate > add a new calibration*



Σχήμα 25: Λογισμικό OPTIKA VISION LITE 2.1.: Εντολή διενέργειας βαθμονόμησης.

Μέσω αυτής της εντολής πραγματοποιούμε τη βαθμονόμηση του προγράμματος, σύμφωνα με έναν ήδη βαθμονομημένο κανόνα. Τοποθετώντας τον βαθμονομημένο κανόνα μπροστά στο στερεοσκόπιο, και για συγκεκριμένη εστίαση

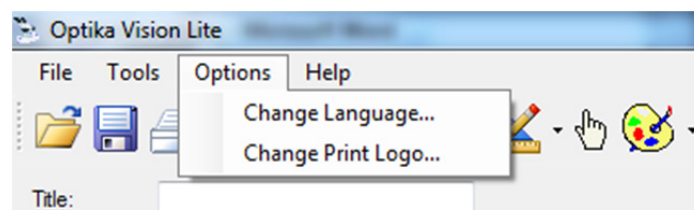
(για τη συγκεκριμένη διάταξη μεταξύ 0.7 και 4.5), εισάγουμε νέα βαθμονόμηση, δίνοντας της κάποιο όνομα. Στη συνέχεια μετρώντας πάνω στον βαθμονομημένο κανόνα, ορίζουμε ευθύγραμμο τμήμα γνωστής διάστασης και εισάγουμε την πραγματική διάσταση στο πρόγραμμα. Έτσι, μπορούμε εύκολα αφού κάνουμε βαθμονόμηση για την εστίαση που χρησιμοποιούμε να πραγματοποιήσουμε, μετρήσεις ακριβείας επί οποιασδήποτε εικόνας.

- *Calibrate > remove calibration*

Με αυτή την εντολή μπορούμε να διαγράψουμε κάποια υπάρχουσα βαθμονόμηση.

- *Calibrate > rename calibration*

Με αυτή την εντολή μπορούμε να μετονομάσουμε κάποια υπάρχουσα βαθμονόμηση.



Σχήμα 26: Λογισμικό OPTIKA VISION LITE 2.1.: Μενού *Options*.

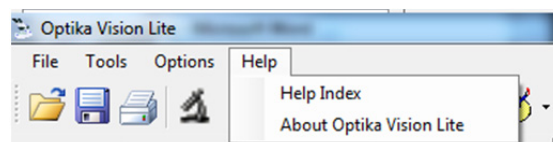
Μέσω του μενού *OPTIONS* μπορούν να εκτελεστούν οι παρακάτω εντολές.

- *Change language*

Με την παραπάνω εντολή μπορούμε να αλλάξουμε τη γλώσσα επικοινωνίας του προγράμματος.

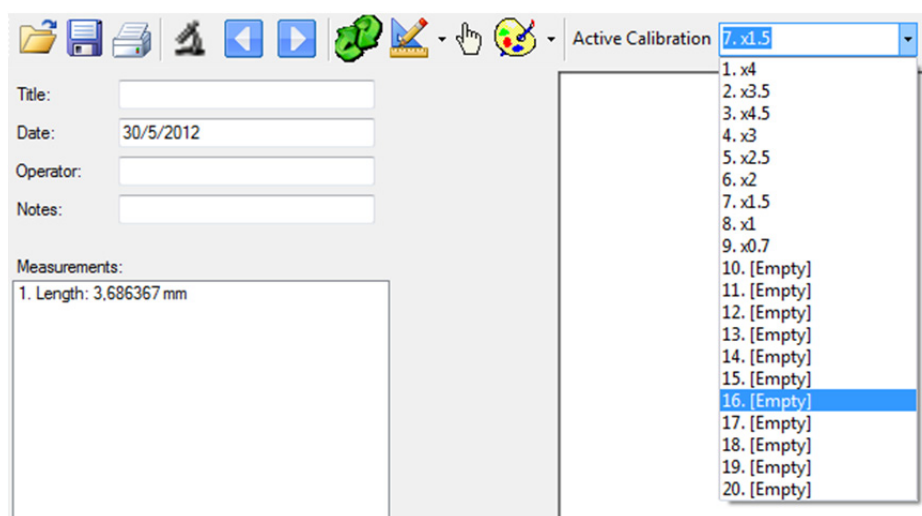
- *Change print logo*

Με αυτή την εντολή μπορούμε να αλλάξουμε την ονομασία που έχουμε δώσει σε κάποια εικόνα.



Σχήμα 27: Λογισμικό OPTIKA VISION LITE 2.1.: Μενού *Help*.

Μέσω του εικονιδίου *HELP* μπορούμε να βρούμε χρήσιμες πληροφορίες για το πρόγραμμα, και απαντήσεις σε τυχόν ερωτήματα που δημιουργούνται κατά τη χρήση.



Σχήμα 28: Λογισμικό OPTIKA VISION LITE 2.1.: Διάταξη εικονιδίων στην κύρια επιφάνεια εργασίας του προγράμματος.

Εν συνεχεία, θα περιγράψουμε τα εικονίδια που βρίσκονται στην κύρια επιφάνεια εργασίας του προγράμματος (Σχ. 28). Η λειτουργικότητα των εικονιδίων αυτών έχει εξηγηθεί παραπάνω, καθώς οι ίδιες εντολές μπορούν να εκτελεστούν και μέσω του μενού του προγράμματος.

- Άνοιγμα αρχείου.
- Αποθήκευση αρχείου εικόνας.
- Εκτύπωση εικόνας.
- Λήψη βίντεο.
- Εισαγωγή αρχείου εικόνας.
- Εξαγωγή αρχείου εικόνας.
- Περιστροφή εικόνας.
- Εκτέλεση μέτρησης ευθύγραμμου τμήματος.
- Καθορισμός διαφορετικών οντοτήτων.
- Χρωματισμός γραμμής μετρήσεως.
- Επιλογή τρέχουσας βαθμονόμησης.

The screenshot shows a software window with the following elements:

- Title:** An empty text input field.
- Date:** A text input field containing "30/5/2012".
- Operator:** An empty text input field.
- Notes:** An empty text input field.
- Measurements:** A list box containing one item: "1. Length: 3,686367 mm".
- Buttons:** Three buttons are located below the list box: "Delete", "Delete All", and a print icon.
- Comments:** A large empty text area at the bottom of the window.

Σχήμα 29: Λογισμικό OPTIKA VISION LITE 2.1.: Παράθυρο εισαγωγής σημειώσεων.

Παράθυρο σημειώσεων

Title: Τίτλος εργασίας.

Date: Ημερομηνία αποτύπωσης εικόνας.

Operator: Όνομα χειριστή.

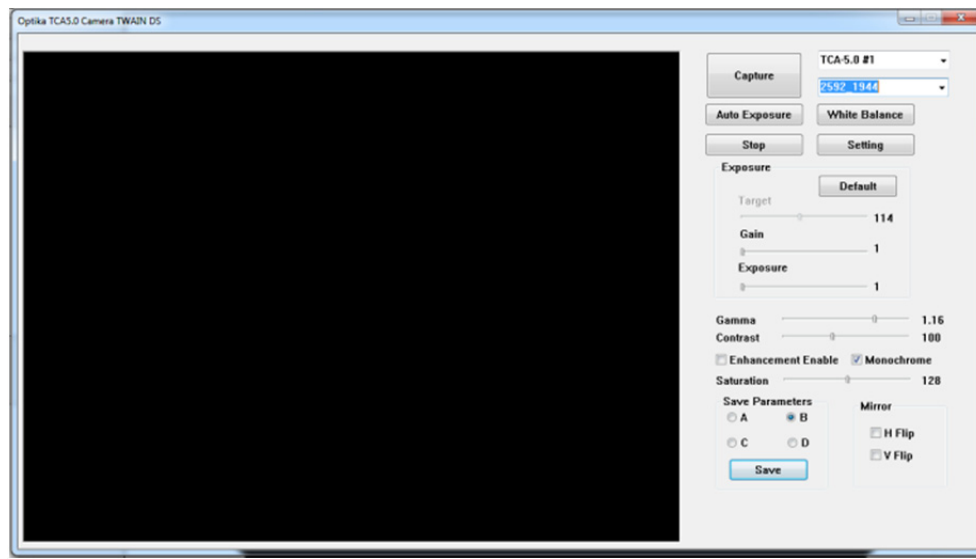
Notes: Χρήσιμες σημειώσεις.

Measurements: Μετρήσεις που ελήφθησαν πάνω στην εικόνα.

Delete / delete all: Διαγραφή στοιχείων που δεν χρειαζόμαστε.

Comments: Σχόλια που αφορούν τις μετρήσεις που έχουμε πραγματοποιήσει.

Παράθυρο καταγραφής και αποθήκευσης εικόνας.

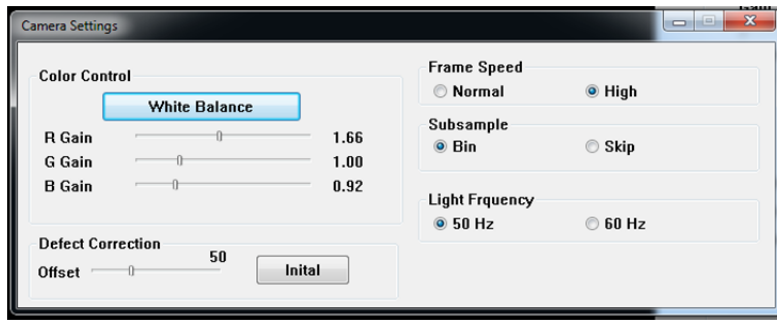


Σχήμα 30: Λογισμικό OPTIKA VISION LITE 2.1.: Παράθυρο καταγραφής και αποθήκευσης εικόνας.

Η καταγραφή μιας εικόνας πραγματοποιείται ακολουθώντας τις εντολές *File > Select Source and Capture > OPTIKA B5*. Αφού εκτελεστούν αυτά τα βήματα, εμφανίζεται το παράθυρο του Σχ. 30, με χρήση του οποίου μπορεί να γίνει η καταγραφή της εικόνας μέσω της εντολής *CAPTURE*, αλλά και να ρυθμιστεί ο τρόπος λήψης της. Μερικές από τις ιδιότητες που μπορούν να οριστούν είναι:

- Αυτόματη έκθεση.
- Ορισμός ανάλυσης σε pixels.
- Ισορροπία λευκού φόντου.
- Αντίθεση χρωμάτων.
- Συντελεστής γάμα.
- Έγχρωμη / μονόχρωμη εικόνα.
- Οριζόντια / κατακόρυφη Περιστροφή.

Επίσης, μέσα από το ίδιο περιβάλλον μπορούμε να ορίσουμε και τις ιδιότητες της κάμερας, επιλέγοντας την εντολή *Settings*.



Σχήμα 31: Λογισμικό OPTIKA VISION LITE 2.1.: Παράθυρο ρυθμίσεων κάμερας.

Κάποιες από τις ιδιότητες που μπορούν να οριστούν είναι οι παρακάτω:

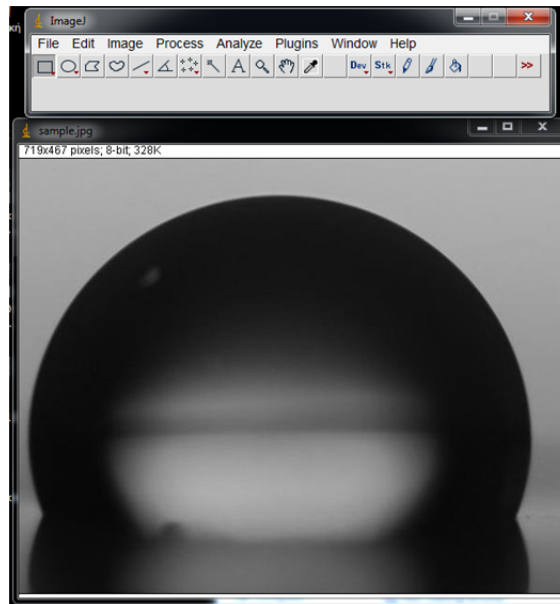
- Ταχύτητα λήψης καρέ.
- Υποδείγματα.
- Συχνότητα φωτός.
- Διορθώσεις ελαττωμάτων.

3.5.2 Λογισμικά μετρήσεως γωνίας επαφής

3.5.2.1 Λογισμικό DropSnake

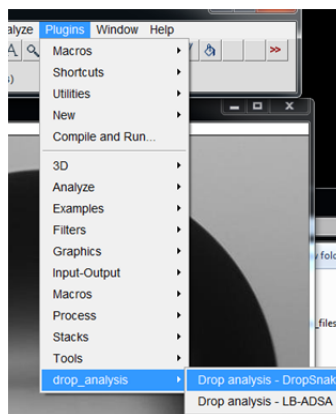
Το λογισμικό DropSnake [3], είναι ελεύθερο λογισμικό (<http://bigwww.epfl.ch/demo/dropanalysis>), και χρησιμοποιεί μια γενική μέθοδο για τη μέτρηση γωνιών επαφής. Επειδή δεν εισάγει κάποιες παραδοχές σχετικά με τη γεωμετρία της σταγόνας, είναι κατάλληλο και για αξονοσυμμετρικές σταγόνες και για σταγόνες γενικής μορφολογίας. Η γωνία επαφής μιας σταγόνας υγρού που επικάθεται σε στερεή επιφάνεια μετράται μέσω κατάλληλου τμηματικού πολυωνύμου.

Αρχικά, η εκτέλεση του προγράμματος γίνεται με εκκίνηση του εκτελέσιμου με ονομασία *ImageJ*, και μέσω των εντολών *File > Open* ανοίγουμε μια μονόχρωμη εικόνα σε μορφή *.jpeg, όπως φαίνεται στο Σχ. 32.

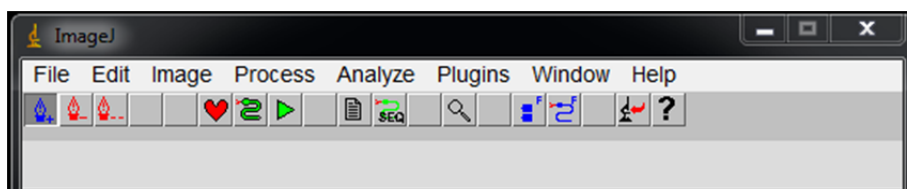


Σχήμα 32: Λογισμικό IMAGEJ: Βασική οθόνη εργασίας.

Εν συνεχεία, επιλέγουμε από το μενού *Plugins* > *Drop analysis* > *DropSnake* (Σχ. 33), και εμφανίζεται η οθόνη του Σχ. 34.



Σχήμα 33: Λογισμικό IMAGEJ: Επιλογή της μεθόδου *DropSnake* για την ανάλυση της γεωμετρίας της σταγόνας.



Σχήμα 34: Λογισμικό IMAGEJ: Το μενού και η μπάρα εργαλείων που χρησιμοποιούνται κατά την ανάλυση της γεωμετρίας της σταγόνας με τη μέθοδο *DropSnake*.



Επεξήγηση εικονιδίων του Σχ. 34:




Τα εικονίδια του Σχ. 34 από αριστερά προς τα δεξιά, συμβολίζουν:

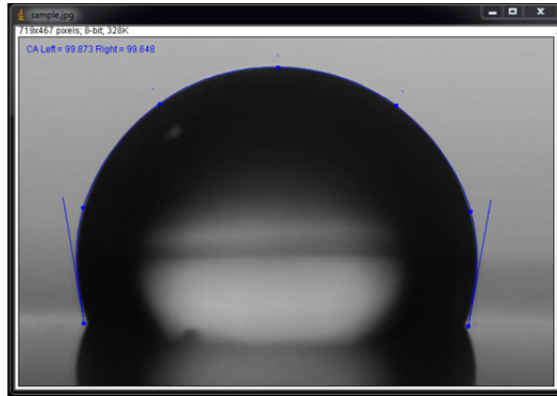
- Πρόσθεση ή μετακίνηση σημείων.
- Διαγραφή ενός σημείου.
- Διαγραφή όλων των σημείων και των καμπυλών.
- Ρυθμίσεις μενού.
- Εμφάνιση της μπλε (αρχικής) καμπύλης και διαμόρφωση της.
- Αποδοχή της καμπύλης, και ταυτοποίηση της μπλε (αρχικής) με την κόκκινη (τελική) καμπύλη.
- Αποθήκευση των θέσεων των σημείων.
- Αυτόματη εκτέλεση αλληλουχίας εντολών σε ένα σύνολο εικόνων.
- Εστίαση.
- Αυτόματη αρχικοποίηση και επιλογή νέων σημείων προς διαμόρφωση της νέας καμπύλης.
- Επαναφορά των αρχικών (εξ ορισμού) ρυθμίσεων του προγράμματος και εκτέλεσή του.
- Έξοδος από το πρόγραμμα.
- Χρήσιμες βοήθειες.

Πρέπει να σημειωθεί πως, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, για τη γρήγορη λειτουργία του προγράμματος, ο προκαθορισμένος αριθμός των κόμβων δεν τροποποιήθηκε. Η ποιότητα των καμπυλών που προέκυψαν ήταν για όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν ικανοποιητική.

Τυπική διαδικασία εκτέλεσης προγράμματος IMAGEJ:

- 1) Άνοιγμα προγράμματος *ImageJ*.
- 2) Άνοιγμα μονόχρωμης εικόνας σε μορφή **.jpeg*.
- 3) Άνοιγμα του *plugin > DropSnake*.
- 4) Σχηματισμός καμπύλης.
- 5)  Εκτέλεση γρήγορης αυτόματης αρχικοποίησης, ή, μέσω του εικονιδίου , επιλέγουμε από αριστερά προς τα δεξιά τη θέση των σημείων που ορίζουν την καμπύλη η οποία θα περικλείει τη σταγόνα.

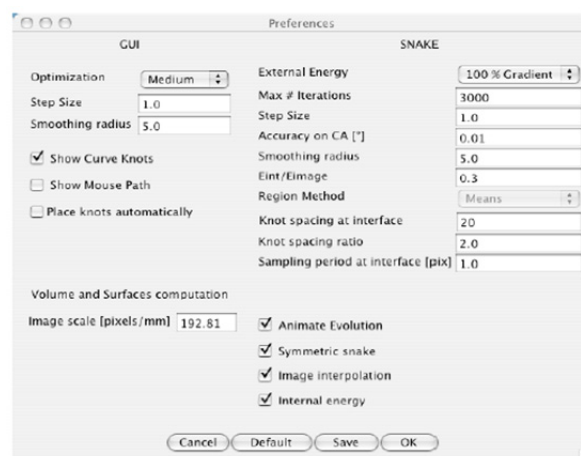
- 6) Μέσω του εικονιδίου , βελτιώνεται η μορφή της καμπύλης.
- 7) Αποδοχή της καμπύλης μέσω του  (η μπλε καμπύλη αντικαθίσταται από τη κόκκινη).
- 8) Εξελίσσουμε τη μπλε καμπύλη ώστε να εφάπτεται πλήρως στην επιφάνεια της σταγόνας επανατοποθετώντας τα σημεία, μέσω της εντολής .



Σχήμα 35: Λογισμικό IMAGEJ: Δημιουργία καμπύλης που περιβάλλει τη σταγόνα, για τη μέτρηση της γωνίας επαφής.

- 9) Εμφάνιση του πίνακα με τα αποτελέσματα της μέτρησης:

- Αριστερή γωνία επαφής.
- Δεξιά γωνία επαφής.
- Όγκος σταγόνας.
- Εμβαδόν επιφάνειας μέσης τομής.
- Διάμετρος σταγόνας.
- Κλίση επαφής.
- Θέσεις κόμβων σε *pixels*.



Σχήμα 36: Λογισμικό IMAGEJ: Παράθυρο ρυθμίσεων των παραμέτρων της μεθόδου *DropSnake*.

Διαμόρφωση ρυθμίσεων

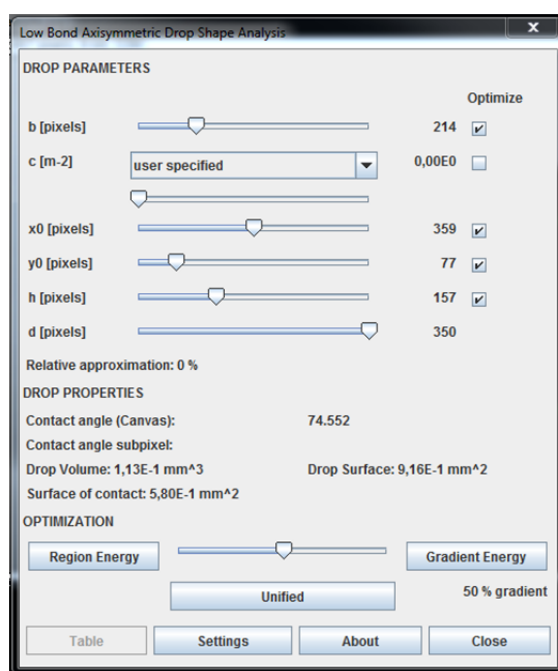
Παράθυρο ρυθμίσεων των παραμέτρων της μεθόδου *DropSnake* (Σχ. 36).

- *Optimization*: Βελτιστοποίηση της θέσης των κόμβων.
- *Step size*: Απόσταση μεταξύ γειτονικών κόμβων.
- *Smoothing radius*: Ακτίνα εξομαλυμένης καμπύλης.
- *Show curve knots*: Εμφάνιση ή όχι των κόμβων στην εικόνα.
- *Show mouse path*: Αυτόματη ή όχι πρόσθεση κόμβων από το ποντίκι.
- *Image scale*: Καθορισμός μεγέθους εικόνας μέσω της ρυθμίσεως *pixel/mm*. Ισχύει ότι $1 \text{ mm} = 3.779527559 \text{ pixels}$ και ανάλογα $1 \text{ pixel} = 0.26458 \text{ mm}$.
- *External energy*: Παράμετρος που επηρεάζει την ελαστικότητα της καμπύλης.
- *Max iterations*: Μέγιστος αριθμός των επαναλήψεων κατά τον εντοπισμό της καμπύλης.
- *Accuracy on CA*: Αποτελεί κριτήριο ακρίβειας υπολογισμού της γωνίας επαφής.
- *Eint/image*: Εκφράζει την ισορροπία μεταξύ της ελαστικότητας της γραμμής και της ακρίβειας αποτύπωσης των ορίων της σταγόνας.
- *Region method*: Ορίζει την μέση απόσταση μεταξύ των κόμβων.
- *Sampling period at interface*: Ορισμός της ελάχιστης απόστασης μεταξύ γειτονικών κόμβων. Τα αποτελέσματα με τη μεγαλύτερη ακρίβεια λαμβάνονται για απόσταση 1 pixel . Αυξάνοντας αυτή την τιμή, αυξάνεται η ταχύτητα, αλλά υπάρχουν απώλειες στην ακρίβεια προσδιορισμού της καμπύλης.
- *Animate evolution*: Εμφάνιση κόμβων σε κάθε στάδιο της διαδικασίας εύρεσης της θέσης των κόμβων της καμπύλης.
- *Symmetric snake*: Έχοντας ενεργοποιήσει την επιλογή αυτή, ορίζεται συμμετρία μεταξύ του αριστερού και του δεξιού τμήματος της σταγόνας.
- *Image interpolation*: Χρήση κυβικής *spline* για τη παρεμβολή.
- *Internal energy*: Ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση υπολογισμού της εσωτερικής ενέργειας της παραγόμενης καμπύλης, η οποία επηρεάζει την ελαστικότητά της.

3.5.2.2 Μέθοδος *Low Band Axisymmetric Dropshape Analysis (LBADSA)*

Η μέθοδος *LBADSA* [3] είναι κατάλληλη για σταγόνες πάνω σε οριζόντιο υπόστρωμα, στις οποίες ασκείται μόνο η δύναμη της βαρύτητας. Γενικά, η μέθοδος αυτή είναι η ενδεικνύμενη μέθοδος της διεθνούς βιβλιογραφίας για τη μέτρηση της γωνίας επαφής, καθώς επιτυγχάνει μεγάλη ακρίβεια.

Όπως και στη μέθοδο *DropSnake*, αρχικά ανοίγουμε το πρόγραμμα *ImageJ*, και από τις εντολές *File > Open* ανοίγουμε μια μονόχρωμη εικόνα σε μορφή **.jpeg*. Στη συνέχεια, από το μενού των *plugins* επιλεγούμε *drop analysis > LBADSA*. Έτσι εμφανίζεται το παράθυρο του Σχ. 37 που περιλαμβάνει τα εξής:



Σχήμα 37: Λογισμικό IMAGEJ: Οθόνη ρυθμίσεων LBADSA.

- *Drop parameters*: Με ρύθμιση των παραμέτρων της καρτέλας αυτής επιτυγχάνεται η βελτιστοποίηση του προφίλ της καμπύλης το οποίο προσεγγίζει τη μορφή της σταγόνας. Οι παράμετροι αυτές παρατίθενται ακολούθως:
 - *b*: Η ακτίνα καμπυλότητας της σταγόνας στη κορυφή (σε *pixels*).
 - *c*: Σταθερά που σχετίζεται με το υγρό που χρησιμοποιείται κατά τη διαδικασία της μέτρησης. Επιλέγεται από κατάλογο με τιμές για διαφορετικά υγρά (όπως το απιονισμένο νερό, το διωδομεθάνιο και το δεκαεξάνιο).

- X_o, Y_o : Καθορισμός των καρτεσιανών συντεταγμένων των καμπύλων.
- h : Ορισμός του ύψους της σταγόνας σε *pixel* μετρώντας τη κάθετη απόσταση από το βασικό επίπεδο μέχρι τη κορυφή της σταγόνας.
- d : Ύψος ανάκλασης. Για το μέγεθος αυτό, επιλέγεται πάντα η τιμή του ύψους της σταγόνας, εκτός αν παρατηρούνται σφάλματα στη ληφθείσα γεωμετρία της σταγόνας.
- *Drop properties*
 - *Contact angle*: Η γωνία επαφής που προκύπτει από απευθείας μέτρηση στον καμβά.
 - *Contact angle subpixel*: Η γωνία επαφής που προκύπτει μετά τη βελτιστοποίηση του προφίλ της καμπύλης.
 - *Drop volume*: Ο όγκος της σταγόνας.
 - *Drop surface*: Η συνολική επιφάνεια της σταγόνας.
 - *Surface of contact*: Η επιφάνεια επαφής μεταξύ στερεού και σταγόνας.
- *Settings*
 - *Smoothing sigma*: Εκφράζει τη τυπική απόκλιση του *Gaussian* φίλτρου που εφαρμόζεται στην εικόνα.
 - *Scale*: Ορίζει τη κλίμακα της εικόνας. Η παράμετρος αυτή χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης, και θα πρέπει να έχει οριστεί σωστά εξ αρχής για την εξαγωγή αποτελεσμάτων με ακρίβεια.
 - *Convergence criterion on CA*: Ρύθμιση για τη βελτίωση της μέτρησης της γωνίας επαφής.

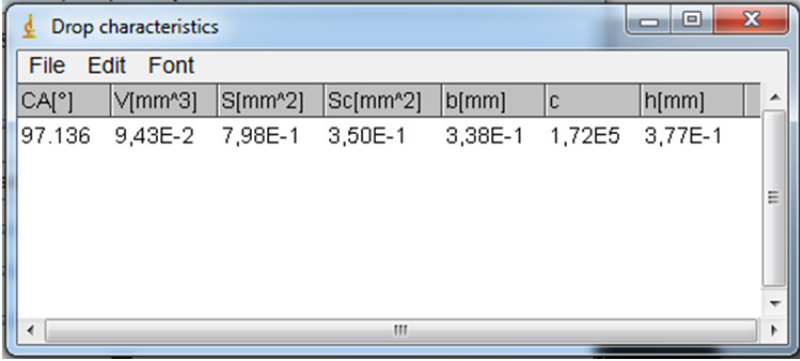
Τυπική διαδικασία εκτέλεσης προγράμματος

1. Αρχικά πραγματοποιούνται τα βήματα όπως υποδείχθηκαν στην αρχή του κεφαλαίου έως ότου εκκινηθεί το πρόγραμμα *LBADSA*.
2. Στη συνέχεια ρυθμίζεται από το μενού των ρυθμίσεων η κλίμακα της εικόνας σε *pixels/mm*, σύμφωνα με την αντιστοιχία που έχει δοθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο.
3. Ρυθμίζονται οι παράμετροι b , c , X_o , Y_o , h και d , όπως έχουν οριστεί σε προηγούμενη ενότητα.
4. Γίνεται βελτιστοποίηση της ληφθείσας καμπύλης μέσω της επιλογής *gradient energy*.

5. Έχοντας ολοκληρώσει τη διαδικασία, μέσω της επιλογής *table* του καμβά, εμφανίζονται σε πίνακα τα μεγέθη τα οποία χαρακτηρίζουν τη γεωμετρία της σταγόνας.

Ο πίνακας αυτός περιλαμβάνει:

- Τη γωνία επαφής.
- Τον όγκο της σταγόνας του υγρού.
- Την επιφάνεια επαφής με τον αέρα.
- Την επιφάνεια της μέσης τομής της σταγόνας.
- Τις παραμέτρους b , και c που έχουν οριστεί από τον χρήστη σε προηγούμενο στάδιο.



CA[°]	V[mm ³]	S[mm ²]	Sc[mm ²]	b[mm]	c	h[mm]
97.136	9,43E-2	7,98E-1	3,50E-1	3,38E-1	1,72E5	3,77E-1

Σχήμα 38: Λογισμικό IMAGEJ: Πίνακας αποτελεσμάτων.

Πρέπει να σημειωθεί πως, κατά τη λήψη της φωτογραφίας, το στερεό υπόστρωμα πρέπει να είναι οριζόντιο, και το στερεοσκόπιο σωστά ευθυγραμμισμένο (τυχόν αποκλίσεις μπορεί να οδηγήσουν σε ανακριβή αποτελέσματα). Η οριζοντιότητα του στερεού υποστρώματος ελέγχεται μέσω δύο αλφαδιών, στερεωμένων επί της επιφάνειας. Το στερεοσκόπιο έχει ευθυγραμμιστεί κατά τη συναρμολόγηση, και δεν απαιτείται περαιτέρω ευθυγράμμιση κατά τη χρήση. Επίσης, συνιστάται ιδιαίτερα να χρησιμοποιούνται γνωστά υγρά, ώστε να επιτυγχάνεται ο αυτόματος συντονισμός της παραμέτρου c του προγράμματος, και η καμπύλη να εφάπτεται πλήρως με το περίγραμμα της σταγόνας. Έτσι, επιτυγχάνεται αυξημένη ακρίβεια στις μετρήσεις, και ιδιαίτερα στη μέτρηση της γωνίας επαφής.

4 Παράθεση πειραματικών αποτελεσμάτων

4.1 Πειραματική διαδικασία

Η πειραματική διαδικασία περιλαμβάνει την εκτέλεση συγκεκριμένων βημάτων, με σκοπό τη μέτρηση των χαρακτηριστικών της αλληλεπίδρασης σταγόνας και στερεού για διάφορους συνδυασμούς στερεών επιφανειών και υγρών. Σε κάθε πείραμα πρέπει να ακολουθηθούν τα παρακάτω βήματα: (α) κατάλληλη τοποθέτηση της σταγόνας, (β) ρύθμιση των διαφόρων εξαρτημάτων, (γ) λήψη της φωτογραφίας, και (δ) ακριβής υπολογισμός της γωνίας επαφής και των ιδιοτήτων διαβροχής της επιφάνειας. Αναλυτικά η διαδικασία περιλαμβάνει τα ακόλουθα:

1. Καθαρισμός της μεταλλικής επιφάνειας και τοποθέτηση της σε κατάλληλο ύψος ώστε να είναι δυνατή η ευθυγράμμιση με το στερεοσκόπιο.
2. Τοποθέτηση συγκεκριμένης ποσότητας υγρού επάνω στη μεταλλική επιφάνεια με χρήση κατάλληλης σύριγγας.
3. Δημιουργία κατάλληλης αντίθεσης φωτισμού μέσω του ειδικού λαμπτήρα.
4. Εστίαση του στερεοσκοπίου για βελτίωση της ποιότητας της φωτογραφίας.
5. Λήψη της φωτογραφίας μέσω της ειδικής κάμερας, και αποθήκευσή της στον ηλεκτρονικό υπολογιστή.
6. Χρήση του λογισμικού *IMAGEJ*. Άνοιγμα της φωτογραφίας. Διαχωρισμός των τριών φάσεων με χρήση των εργαλείων του προγράμματος, και υπολογισμός της γωνίας επαφής.
7. Χρήση ειδικού προγράμματος σε μορφή *excel* για τον υπολογισμό των επιφανειακών τάσεων μεταξύ των τριών καταστάσεων ισορροπίας, καθώς και του έργου συνάφειας (*work of adhesion*), το οποίο χαρακτηρίζει τις επιφάνειες ως προς τη διαβροχή τους.

Ο καθαρισμός και η προετοιμασία της επιφάνειας η οποία πρόκειται να μετρηθεί είναι ιδιαίτερα σημαντική και επηρεάζει την ακρίβεια των μετρήσεων. Επομένως, είναι σκόπιμο να ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα κατά την προετοιμασία των επιφανειών:

1. Καθαρισμός των δοχείων υποδοχής του υγρού με το οποίο θα γίνει η κάθε μέτρηση.

2. Χρήση του ειδικού λουτρού υπερήχων (*ultrasonic bath*) του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας.
3. Τοποθέτηση απιονισμένου νερού σε ένα από τα δοχεία που έχουν καθαριστεί και τοποθέτηση στο δοχείο της επιφάνειας προς καθαρισμό.
(Μέσα στο λουτρό υπερήχων επιτυγχάνεται διαχωρισμός και απομάκρυνση τυχόν επικείμενων στρώσεων ακαθαρσιών ή φιλμ από την προς μέτρηση επιφάνεια, με σκοπό η επιφάνεια να είναι ομοιογενής, χωρίς να έχουν επηρεαστεί οι ιδιότητές της. Το λουτρό υπερήχων επιτυγχάνει μέσω δονήσεων την απομάκρυνση των επικαθήμενων στρώσεων χωρίς να φθείρεται η επιφάνεια που θέλουμε να μελετήσουμε. Τυχόν καθαρισμός με άλλου είδους δραστικά υγρά θα προκαλούσε φθορά στην επιφάνεια του υλικού.)
4. Θέση σε λειτουργία του λουτρού, ορίζοντας τον συνολικό χρόνο λειτουργίας και τον ρυθμό των δονήσεων, ώστε να επιτευχθεί σωστός καθαρισμός.
5. Στέγνωμα των επιφανειών.
6. Καθαρισμός της θέσης στην οποία θα τοποθετηθεί το υπό μελέτη στερεό, και τοποθέτηση του προστατευτικού κουτιού.

Μετά το πέρας της προετοιμασίας του δοκιμίου, προχωρούμε με τα παρακάτω βήματα:

- Τίθεται σε λειτουργία ο φωτισμός.
- Εκκινείται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή το πρόγραμμα *Optika Vision Lite*, και, σύμφωνα με τη διαδικασία που έχει αναλυθεί σε προηγούμενη ενότητα, γίνεται προετοιμασία για τη λήψη κατάλληλης φωτογραφίας.
- Ρυθμίζεται η εστίαση στο στερεοσκόπιο ώστε να επιτευχθεί ικανοποιητική ευκρίνεια στην εικόνα και ορίζεται κατάλληλη βαθμονόμηση στο πρόγραμμα.
- Λαμβάνεται και αποθηκεύεται η εικόνα και μετρώνται οι διαστάσεις της.
- Εκκινείται το πρόγραμμα *ImageJ* (σύμφωνα με διαδικασία που έχει εξηγηθεί σε προηγούμενη ενότητα), ορίζεται η ρύθμιση *scale*, και πραγματοποιούνται όλα τα υπολειπόμενα βήματα ολοκλήρωσης της διαδικασίας έως τη μέτρηση της γωνίας επαφής.

4.2 Πειραματικά αποτελέσματα

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας διαχωρίστηκαν σε δυο κατηγορίες. Η πρώτη αφορά τη μέτρηση της διαμέτρου μεταλλικών σφαιρών με τη διαδικασία που περιγράφηκε στην Ενότητα 4.1, και η ταυτοποίηση των αποτελεσμάτων μέσω σύγκρισης με μετρήσεις της διαμέτρου των σφαιρών οι οποίες ελήφθησαν με χρήση μικρομέτρου. Η δεύτερη κατηγορία αφορά μετρήσεις γωνιών επαφής μεταξύ διαφόρων προκαθορισμένων στερεών επιφανειών και υγρών με γνωστές ιδιότητες.

4.2.1 Μέτρηση διαμέτρου μεταλλικών σφαιρών (επιβεβαίωση ακρίβειας μετρήσεων)

Οι μεταλλικές σφαίρες που μετρήθηκαν ήταν τεσσάρων διαφορετικών διαστάσεων, με σκοπό τη ταυτοποίηση της βαθμονόμησης που πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό πρόγραμμα *Optika Vision Lite*. Στον Πίνακα 1 παρατίθενται οι πραγματικές διαστάσεις των διαμέτρων των τεσσάρων σφαιρών (μέτρηση με μικρόμετρο), καθώς και οι μετρήσεις που ελήφθησαν από την πειραματική διάταξη της παρούσας εργασίας.

Πίνακας 1: Πειραματική μέτρηση διαμέτρου μεταλλικών σφαιρών.

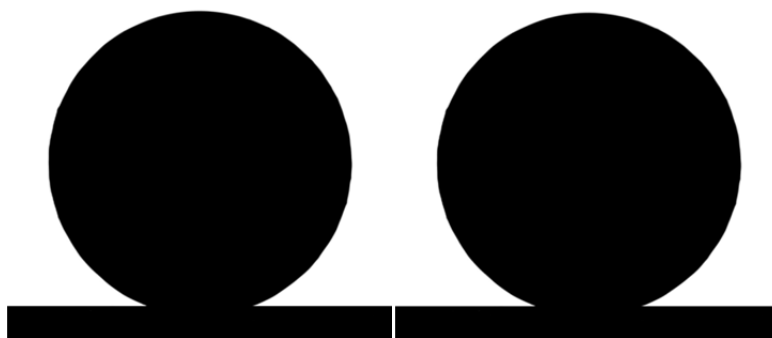
ΔΙΑΜΕΤΡΟΙ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΩΝ ΣΦΑΙΡΩΝ	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ (mm)	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ (mm)
<i>D1</i>	3.494751	3.5
<i>D2</i>	3.989473	4
<i>D3</i>	4.495607	4.5
<i>D4</i>	4.992956	5

Οι ανοξειδωτες σφαίρες έχουν ονοματιστεί κατάλληλα προς διευκόλυνση του αναγνώστη. Έτσι, ως *D1* έχει ονοματιστεί η σφαίρα με πραγματική διάμετρο 3.5 mm, ως *D2* έχει ονοματιστεί η σφαίρα με πραγματική διάμετρο 4 mm, ως *D3* έχει ονομαστεί η σφαίρα με πραγματική διάμετρο 4.5 mm και ως *D4* η σφαίρα με πραγματική διάμετρο 5 mm. Στη μεσαία στήλη του ανωτέρω πίνακα έχουν τοποθετηθεί οι τιμές των διαμέτρων όπως αυτές μετρήθηκαν από το πρόγραμμα

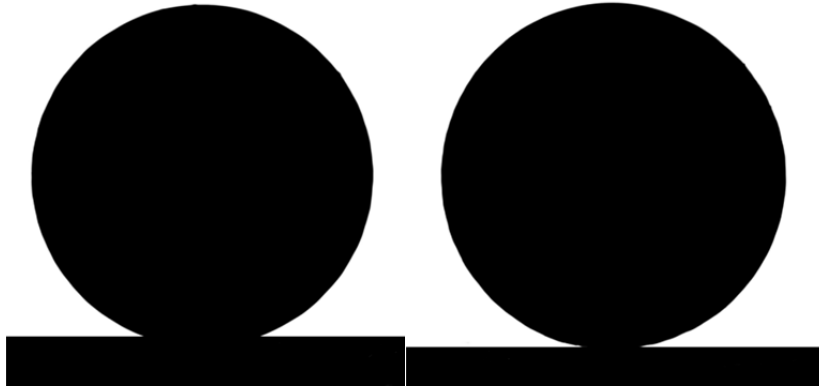
Optika Vision Lite, μέσω της εντολής *Linear Measure*, αφού είχε πρώτα γίνει η κατάλληλη βαθμονόμηση σύμφωνα με την εντολή *Active Calibration*. Κατά τη διαδικασία μετρήσεων ακολουθήθηκαν τα παρακάτω βήματα:

- Τοποθέτηση της κάθε σφαίρας στο βασικό επίπεδο μετρήσεων.
- Εκκίνηση του προγράμματος λήψης εικόνας, και ρύθμισης του φωτισμού, για τη δημιουργία κατάλληλης αντίθεσης χρώματος.
- Θέση σε λειτουργία του προγράμματος λήψης εικόνας μέσω της επιλογής *File* → *Select Source and Capture* → *Select*.
- Τοποθέτηση της εκάστοτε σφαίρας στην κατάλληλη θέση ώστε να ευθυγραμμιστεί με το στερεοσκόπιο, και ρύθμιση της εστίασης για την αποτύπωση της εικόνας με την καλύτερη δυνατή ποιότητα.
- Λήψη της εικόνας μέσω της εντολής *Capture*, και επιστροφή στο αρχικό περιβάλλον του προγράμματος επιλέγοντας την κατάλληλη βαθμονόμηση μέσω της εντολής *Active Calibration*.
- Μέτρηση μέσω μιας ευθείας γραμμής της διαμέτρου της σφαίρας, μέσω της εντολής *Linear Measure*.

Στη συνέχεια ακολουθούν οι εικόνες όπως ελήφθησαν για τις τέσσερις σφαίρες που μετρήθηκαν στο εργαστήριο.



Σχήμα 39: Ληφθείσες φωτογραφίες για τις ανοξειδωτες σφαίρες D1 (αριστερά) και D2 (δεξιά).



Σχήμα 40: Ληφθείσες φωτογραφίες για τις ανοξείδωτες σφαίρες D3 (αριστερά) και D4 (δεξιά).

Μέσω των μετρήσεων των διαμέτρων των σφαιρών υπολογίστηκε το στατιστικό σφάλμα σε σχέση με τις πραγματικές τιμές. Στον πίνακα 2 παρατίθενται τα σχετικά αποτελέσματα.

Πίνακας 2: Πειραματική μέτρηση διαμέτρου μεταλλικών σφαιρών. Υπολογισμός μέσου σφάλματος μετρήσεων.

<i>No.</i>	<i>Μετρήσεις Dropsnake (X) (mm)</i>	<i>Πραγματικές Μετρήσεις (Y) (mm)</i>	<i>Διάφορα (Z=X-Y) (mm)</i>	<i>Σφάλμα (%)</i>
<i>D1</i>	<i>3.494751</i>	<i>3.5</i>	<i>-0.005249</i>	<i>-0.14997</i>
<i>D2</i>	<i>3.989473</i>	<i>4</i>	<i>-0.010527</i>	<i>-0.26318</i>
<i>D3</i>	<i>4.495607</i>	<i>4.5</i>	<i>-0.004393</i>	<i>-0.09762</i>
<i>D4</i>	<i>4.992956</i>	<i>5</i>	<i>-0.007044</i>	<i>-0.14088</i>
<i>Μέσο σφάλμα</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-0.0068</i>	<i>-0.16291</i>

Σύμφωνα με τον Πίνακα 2, το σφάλμα κατά τη μέτρηση της διαμέτρου των μεταλλικών σφαιρών είναι πάρα πολύ μικρό, επομένως η διαδικασία βαθμονόμησης της διάταξης θεωρείται κατάλληλη, και η προτεινόμενη διαδικασία μέτρησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μετρήσεις με πολύ μεγάλη ακρίβεια.

4.2.2 Μετρήσεις γωνιών επαφής

Οι μετρήσεις της γωνίας επαφής πραγματοποιήθηκαν για επιφάνειες κοινού και βοριοπυριτικού γυαλιού (*borosilicate glass*), με τέσσερα διαφορετικά δοκιμαστικά υγρά, με σκοπό τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων διαβροχής των επιφανειών. Οι μετρήσεις της γωνίας επαφής είναι ευκολότερο να εκτελεστούν σε λείες επιφάνειες.

Οι τεχνικές που είναι διαθέσιμες για τον προσδιορισμό της γωνίας επαφής είναι αρκετές, και η τεχνική που κάθε φορά επιλέγεται εξαρτάται από τη φύση του συστήματος. Οι δύο πιο συνηθισμένες μέθοδοι μέτρησης είναι η στατική και η δυναμική. Στη παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η στατική μέθοδος. Εδώ, η στερεή επιφάνεια τοποθετείται σε οριζόντια θέση, και η σταγόνα του υγρού εναποτίθεται από σύριγγα η οποία βρίσκεται σε διεύθυνση κάθετη ως προς την επιφάνεια. Η σταγόνα έρχεται κατ' αρχάς οριακά σε επαφή με τη σύριγγα και το στερεό, εν συνεχεία αποκολλάται από τη σύριγγα και επικάθεται στη στερεή επιφάνεια. Κατά την εναπόθεση προκαλείται μικρή παραμόρφωση, η οποία συνήθως δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων και μπορεί να αμεληθεί.

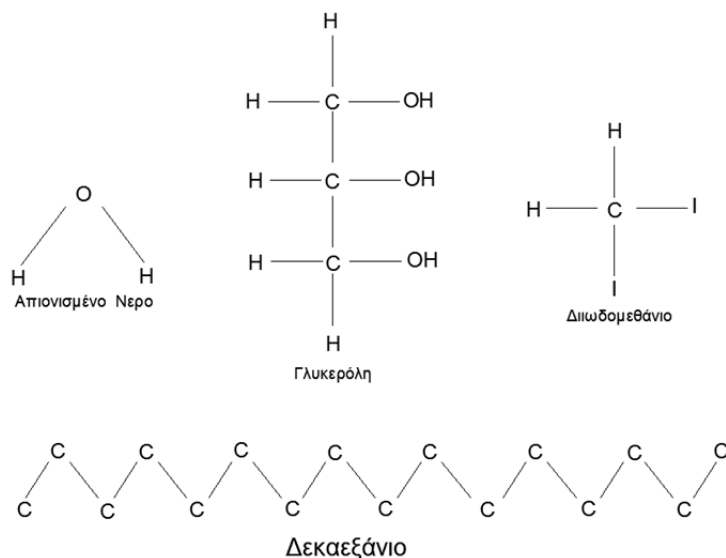
Με τη διαδικασία που περιγράφηκε, προσδιορίζεται η γωνία επαφής της σταγόνας με την στερεή επιφάνεια, κατά τη φάση της προώθησης της σταγόνας από τη σύριγγα. Με αντίστοιχο τρόπο μπορεί να μετρηθεί η γωνία επαφής κατά τη φάση της αναρρόφησης της σταγόνας από τη σύριγγα, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα.

Για επιφάνειες λείες, ομοιογενείς ως προς τη σύστασή τους και καθαρές αναμένεται υψηλή επαναληψιμότητα των πειραματικών μετρήσεων με μικρές αποκλίσεις μεταξύ των διαφορετικών πειραμάτων. Ωστόσο, μπορεί να παρατηρηθούν μικρές διαφορές οι οποίες συνήθως οφείλονται στην κατάσταση της σταγόνας (φάση προώθησης ή αναρρόφησης). Γενικά, η επαναληψιμότητα των μετρήσεων επηρεάζεται επίσης από παράγοντες όπως η ανομοιομορφία της τραχύτητας, η ετερογένεια της στερεής επιφανείας, οι μεταβολές της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος και οι ακαθαρσίες που τυχόν επικάθονται στις επιφάνειες που πρόκειται να μετρηθούν [1].

Οι σταγόνες που εναποτίθενται στις επιφάνειες προς μέτρηση της γωνίας επαφής κατά τη φάση προώθησης της σταγόνας, είναι κάθε φορά όγκου περίπου 5 μL , και εξαπλώνονται έως ότου επέλθει ισορροπία στο σύστημα υγρού, στερεού και αέρα. Ο όγκος μετά την εναπόθεση της σταγόνας παραμένει σταθερός. Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ήταν 24 $^{\circ}\text{C}$, ενώ το κάθε πείραμα διήρκεσε περίπου 15 λεπτά, ώστε να βεβαιωθούμε πως δεν μεταβάλλεται η γεωμετρία της σταγόνας με την πάροδο του χρόνου.

Τα υγρά που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα επιλέχθηκαν με κριτήριο την πολικότητα τους (περισσότερο ή λιγότερο πολικά). Συγκεκριμένα, τα υγρά που χρησιμοποιήθηκαν είναι, το δεκαεξάνιο, η γλυκερόλη, το διωδομεθάνιο και το απιονισμένο νερό. Ως προς την πολικότητα, το πλέον δραστικό υγρό είναι η γλυκερόλη και ακολουθούν κατά σειρά το απιονισμένο νερό, το διωδομεθάνιο και το δεκαεξάνιο, το οποίο είναι μη πολικό υγρό. Οι χημικές δομές των δοκιμαστικών υγρών που χρησιμοποιήθηκαν αποτυπώνονται στο Σχ. 41. Η μέτρηση της γωνίας επαφής δεν ήταν πάντα εφικτή, καθώς σε κάποιες περιπτώσεις, είτε το υγρό εξατμιζόταν αρκετά γρήγορα, είτε, λόγω του μεγάλου ιξώδους του ρευστού, δεν μπορούσε να πληρωθεί εύκολα η σύριγγα.

Τα πολικά υγρά, όπως το απιονισμένο νερό, χαρακτηρίζονται από ισχυρές μοριακές αλληλεπιδράσεις, οι οποίες δημιουργούν ισχυρές επιφανειακές τάσεις. Κάθε παράγοντας που οδηγεί σε μείωση των μοριακών δυνάμεων αλληλεπίδρασης του υγρού οδηγεί παράλληλα και σε μείωση της επιφανειακής του τάσης. Έτσι μια πιθανή αύξηση της θερμοκρασίας του συστήματος ή μια οποιαδήποτε πρόσμιξη του υγρού με ξένα συστατικά θα μπορούσε να μεταβάλει την επιφανειακή τάση και συνεπακόλουθα τη μετρούμενη γωνία επαφής, με αποτέλεσμα οι μετρήσεις να αποκλίνουν από τις μετρήσεις της βιβλιογραφίας [1].



Σχήμα 41: Χημικές δομές δοκιμαστικών υγρών που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα μέτρησης γωνίας επαφής.

Στον Πίνακα 3 που ακολουθεί παρατίθενται οι προμηθευτές των δοκιμαστικών υγρών που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις των γωνιών επαφής και η καθαρότητά τους. Όλα τα υγρά χρησιμοποιήθηκαν όπως παρελήφθησαν χωρίς να υποβληθούν σε κάποια περαιτέρω επεξεργασία.

Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά δοκιμαστικών υγρών που χρησιμοποιήθηκαν σε πειράματα μέτρησης γωνίας επαφής.

Όνομασία	Καθαρότητα	Κατασκευαστής
<i>Δεκαεξάνιο</i>	<i>99%</i>	<i>Fisher Chemical</i>
<i>Γλυκερόλη</i>	<i>99.5%</i>	<i>Carlo Erba</i>
<i>Διωδομεθάνιο</i>	<i>99+%</i>	<i>Acros Organics</i>

Τα πειράματα εκτελέστηκαν σύμφωνα με τη διαδικασία και τα βήματα (που περιγράφηκαν σε προηγούμενη ενότητα). Συγκεκριμένα αποτυπώθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος *Optika Vision Lite* οι φωτογραφίες κάθε ενός από τα τέσσερα δοκιμαστικά υγρά στις στερεές επιφάνειες που προαναφέρθηκαν, δηλαδή αυτές του καθαρού γυαλιού, του βοριοπυριτικού γυαλιού, του χαλκού, και του υπερυδρόφοβου χαλκού. Ο χαλκός αποτελεί μέταλλο με σημαντικές εφαρμογές, αφού μπορεί να δημιουργήσει πολλαπλά επίπεδα διασύνδεσης σε εξαιρετικά μικρής κλίμακας ολοκληρωμένα κυκλώματα, έχοντας υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα και αντίσταση σε διάβρωση. Η επιφάνεια υπερυδρόφοβου χαλκού που μελετήθηκε δημιουργήθηκε στο πλαίσιο της Διπλωματικής Εργασίας του Α. Φέλιου [27] με ειδική επεξεργασία του χαλκού έτσι ώστε να τροποποιηθεί η επιφανειακή τραχύτητα του και αντίστοιχα η απωθητικότητα των υδάτων από την επιφάνειά του. Για την κατασκευή της υδρόφοβης επιφάνειας ακολουθήθηκαν τα παρακάτω βήματα [27]:

1. Στίλβωση της επιφάνειας με χρήση λειαντικών φύλλων με κόκκους καρβιδίου του πυριτίου.
2. Καθαρισμός με ακετόνη και απιονισμένο νερό. Στέγνωμα.
3. Τοποθέτηση σε διάλυμα HNO_3 για 30 δευτερόλεπτα, για την αφαίρεση οξειδίων του χαλκού.
4. Πλύση με απιονισμένο νερό και καθαρή αιθανόλη.
5. Εμβάπτιση σε διάλυμα n-δεκατετρανικού οξέος (μυριστικού οξέος) σε αιθανόλη για 10 ημέρες.
6. Πλύση με απιονισμένο νερό και καθαρή αιθανόλη. Στέγνωμα.

Για διάφορους συνδυασμούς στερεών και δοκιμαστικών υγρών μετρήθηκε η γωνία επαφής μέσω του προγράμματος *imageJ*. Για κάθε εικόνα που ελήφθη η γωνία επαφής υπολογίστηκε με δυο διαφορετικά προγράμματα, τα *Dropsnake* και *LBADSA*, για επαλήθευση και σύγκριση των αποτελεσμάτων. Η διαδικασία μέτρησης της γωνίας επαφής με κάθε ένα από τα προγράμματα αυτά έχει αναλυθεί στην Ενότητα 3.5.

Κάθε πείραμα επαναλήφθηκε δέκα φορές ώστε να συλλέγει ικανό πλήθος μετρήσεων, και να προσδιοριστεί με ακρίβεια το στατιστικό σφάλμα και η τυπική απόκλιση κατά τις μετρήσεις με τη παρούσα πειραματική διάταξη. Οι πίνακες με τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα παρατίθενται παρακάτω.

Αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων σε επιφάνειες υπερυδροφόβου χαλκού και μη επεξεργασμένου χαλκού που ήρθαν σε επαφή με σταγόνες απιονισμένου νερού. Για τις περιπτώσεις αυτές, θα γίνει σύγκριση των μετρημένων τιμών της γωνίας επαφής με αντίστοιχες μετρήσεις στα ίδια δοκίμια που πραγματοποιήθηκαν σε ειδική διάταξη μετρήσεως γωνιών επαφής του Ερευνητικού Κέντρου ‘ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ’. Καί για τις δυο επιφάνειες μετρήθηκαν ξεχωριστά η δεξιά και η αριστερή γωνία επαφής [1].

Η μέση τιμή των μετρούμενων μεγεθών για κάθε ζεύγος στερεού- υγρού προκύπτει ως εξής:

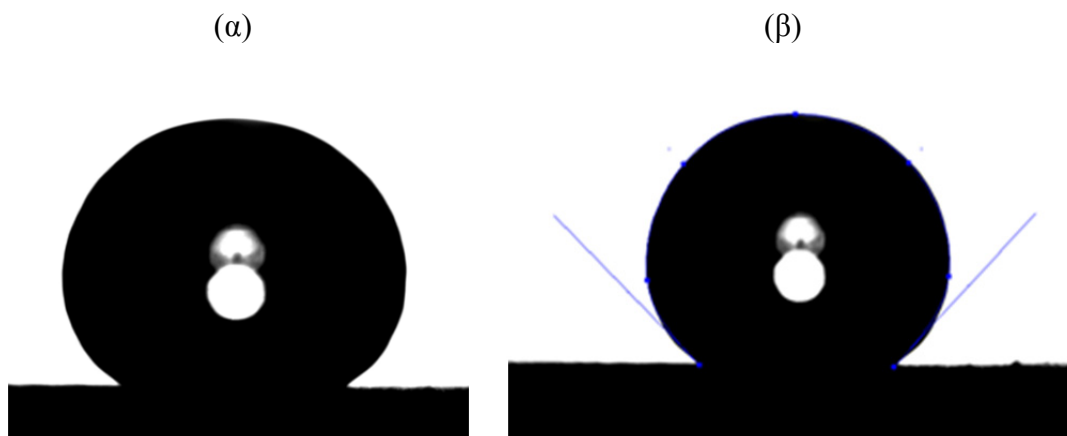
$$\text{Μέση τιμή} = \text{άθροισμα των μετρήσεων} / \text{πλήθος των μετρήσεων}$$

Η αντίστοιχη τυπική απόκλιση προκύπτει από την παρακάτω εξίσωση:

$$\text{Τυπική απόκλιση}^2 = \Sigma (\text{εκάστοτε μέτρηση-μέση τιμή μετρήσεων}) / (\text{πλήθος μετρήσεων}-1)$$

Πείραμα: Απιονισμένο νερό σε επιφάνεια υπερυδρόφοβου χαλκού.

Στο Σχ. 42 απεικονίζεται η σταγόνα του απιονισμένου νερού καθώς επικάθεται στην υπερυδρόφοβη επιφάνεια του χαλκού.



Σχήμα 42: (α) Απεικόνιση σταγόνας απιονισμένου νερού σε υπερυδρόφοβη επιφάνεια χαλκού. (β) Επεξεργασία εικόνας για τον υπολογισμό των γωνιών επαφής.

Το δοκίμιο του υπερυδρόφοβου χαλκού που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των πειραμάτων έχει διαστάσεις 2 cm x 2 cm x 0.6 cm. Κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων αποτέλεσε τροχοπέδη η σταθεροποίηση της σταγόνας του υγρού στην επιφάνεια του υλικού. Για την εξασφάλιση σωστών αποτελεσμάτων εκτελέστηκαν πολλές επαναλήψεις πειραμάτων με συνεχή ευθυγράμμιση του επιπέδου αναφοράς. Τέλος ο χρόνος διεξαγωγής του κάθε πειράματος ήταν μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο χρόνο των υπολοίπων πειραμάτων, λόγω των απαιτήσεων σταθεροποίησης του δοκιμαστικού υγρού, και περίπου ίσος με τριάντα δευτερόλεπτα. Στους Πίνακες 4 και 5 αναλύονται τα αποτελέσματα για την αριστερή και δεξιά γωνία επαφής.

Πίνακας 4: Μετρήσεις δεξιάς γωνίας επαφής για σταγόνα απιονισμένου νερού που επικάθεται σε επιφάνεια υπερυδρόφοβου χαλκού. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων και σύγκριση με στοιχεία της βιβλιογραφίας.

Ημερομηνία μετρήσεων	18/08/2012
Υλικό επιφάνειας	Υπερυδρόφοβη επιφάνεια από κατεργασμένο χαλκό
Υγρό	Απιονισμένο νερό
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	27 °C
Γωνία επαφής	Δεξιά

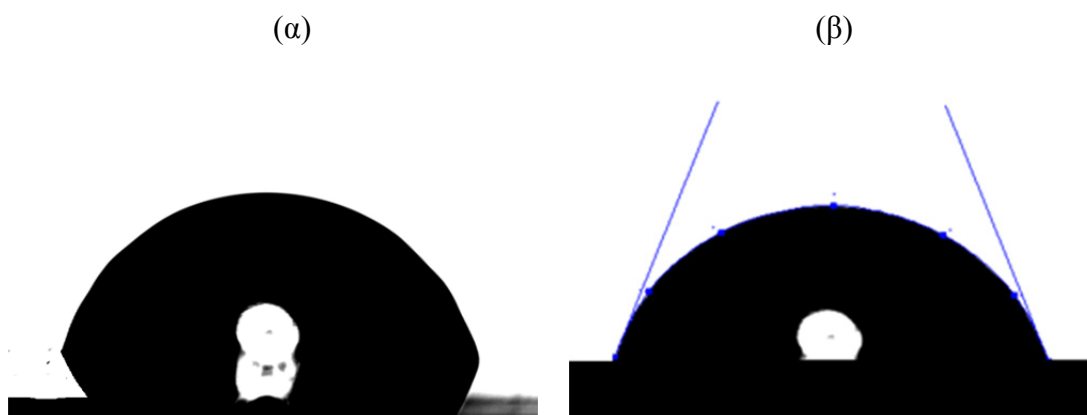
No.	Πειραματικές Μετρήσεις			Υπολογισμός Ακρίβειας Μέτρησης	
	Γωνία επαφής, μέθοδος Dropsnake (deg)	Γωνία επαφής, μέθοδος LBADSA (deg)	Γωνία επαφής, μέση τιμή (deg)	Γωνία επαφής, από βιβλιογραφία (deg)	Διαφορά (deg)
	(X)	(Y)	(Z=(X+Y)/2)	(U)	(Δ=U-Z)
1	160.434	160.509	160.472	161.1[27]	0.624
2	161.254	160.303	160.779		0.322
3	160.565	160.592	160.579		0.522
4	159.752	159.889	159.821		1.280
5	160.989	161.223	161.106		-0.006
6	160.052	160.105	160.079		1.022
7	160.545	160.352	160.449		0.652
8	161.232	161.352	161.292		-0.192
9	161.105	161.112	161.109		-0.009
10	160.454	161.565	161.010		0.091
Μέση τιμή	160.391	160.700	160.669	161.1	0.430
Τυπική Απόκλιση	0.478	0.544	0.454	-	0.454

Πίνακας 5: Μετρήσεις αριστερής γωνίας επαφής για σταγόνα απιονισμένου νερού που επικάθεται σε επιφάνεια υπερυδρόφοβου χαλκού. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων και σύγκριση με στοιχεία της βιβλιογραφίας.

Ημερομηνία μετρήσεων	18/08/2012
Υλικό επιφάνειας	Υπερυδρόφοβη επιφάνεια από κατεργασμένο χαλκό
Υγρό	Απιονισμένο νερό
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	27 °C
Γωνία επαφής	Αριστερή

No.	Πειραματικές Μετρήσεις			Υπολογισμός Ακρίβειας Μέτρησης	
	Γωνία επαφής, μέθοδος Dropsnake (deg)	Γωνία επαφής, μέθοδος LBADSA (deg)	Γωνία επαφής, μέση τιμή (deg)	Γωνία επαφής, από βιβλιογραφία (deg)	Διαφορά (deg)
	(X)	(Y)	(Z=(X+Y)/2)	(U)	(Δ=U-Z)
1	160.443	160.509	160.476	160.3 [27]	-0.176
2	160.252	160.303	160.278		0.023
3	160.858	160.592	160.725		-0.425
4	160.325	159.889	160.107		0.193
5	160.974	161.223	161.099		-0.799
6	159.856	160.105	159.981		0.320
7	159.976	160.352	160.164		0.136
8	160.276	161.352	160.814		-0.514
9	160.135	161.112	160.624		-0.324
10	160.454	161.565	161.010		-0.710
Μέση τιμή	160.355	160.700	160.528	160.3	-0.228
Τυπική Απόκλιση	0.334	0.544	0.369	-	0.369

Πείραμα: Απιονισμένο νερό σε επιφάνεια χαλκού.



Σχήμα 43: (α) Απεικόνιση σταγόνας απιονισμένου νερού σε επιφάνεια χαλκού. (β) Επεξεργασία εικόνας για τον υπολογισμό των γωνιών επαφής.

Το δοκίμιο του χαλκού είχε διαστάσεις 2 cm x 2 cm x 0.5 cm. Οι μετρήσεις εκτελέστηκαν χωρίς κάποια δυσκολία, καθώς η γωνία επαφής της σταγόνας του απιονισμένου νερού με την επιφάνεια του χαλκού κυμάνθηκε σε όλο το εύρος των μετρήσεων σε πολύ λογικά πλαίσια. Η λήψη της κάθε μέτρησης είχε διάρκεια περίπου είκοσι δευτερόλεπτα. Παρατηρήθηκαν πολύ μικρές αποκλίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων των διαφορετικών πειραμάτων. Στους Πίνακες 6 και 7 καταγράφονται και αναλύονται τα αποτελέσματα για την αριστερή και δεξιά γωνία επαφής.

Πίνακας 6: Μετρήσεις αριστερής γωνίας επαφής για σταγόνα απιονισμένου νερού που επικάθεται σε επιφάνεια καθαρού χαλκού. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων και σύγκριση με στοιχεία της βιβλιογραφίας.

Ημερομηνία μετρήσεων	19/08/2012
Υλικό επιφάνειας	Καθαρός χαλκός
Υγρό	Απιονισμένο νερό
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	29 °C
Γωνία επαφής	Αριστερή

No.	Πειραματικές Μετρήσεις			Υπολογισμός Ακρίβειας Μέτρησης	
	Γωνία επαφής, μέθοδος Dropsnake (deg)	Γωνία επαφής, μέθοδος LBADSA (deg)	Γωνία επαφής, μέση τιμή (deg)	Γωνία επαφής, από βιβλιογραφία (deg)	Διαφορά (deg)
	(X)	(Y)	(Z=(X+Y)/2)	(U)	(Δ=U-Z)
1	58.203	60.332	59.268	62.37 [27]	3.103
2	58.985	60.541	59.763		2.607
3	58.506	60.662	59.854		2.786
4	59.232	59.809	59.251		2.850
5	59.023	58.898	58.961		3.410
6	59.842	60.123	59.983		2.388
7	60.132	60.004	60.068		2.302
8	60.454	59.706	60.080		2.290
9	60.213	59.253	59.733		2.637
10	60.356	59.462	59.909		2.461
Μέση τιμή	59.495	59.879	59.687	62.37	2.683
Τυπική Απόκλιση	0.768	0.538	0.344	-	0.344

Πίνακας 7: Μετρήσεις δεξιάς γωνίας επαφής για σταγόνα απιονισμένου νερού που επικάθεται σε επιφάνεια υπερυδροφόβου χαλκού. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων και σύγκριση με στοιχεία της βιβλιογραφίας.

Ημερομηνία μετρήσεων	19/08/2012
Υλικό επιφάνειας	Καθαρός χαλκός
Υγρό	Απιονισμένο νερό
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	29 °C
Γωνία επαφής	Δεξιά

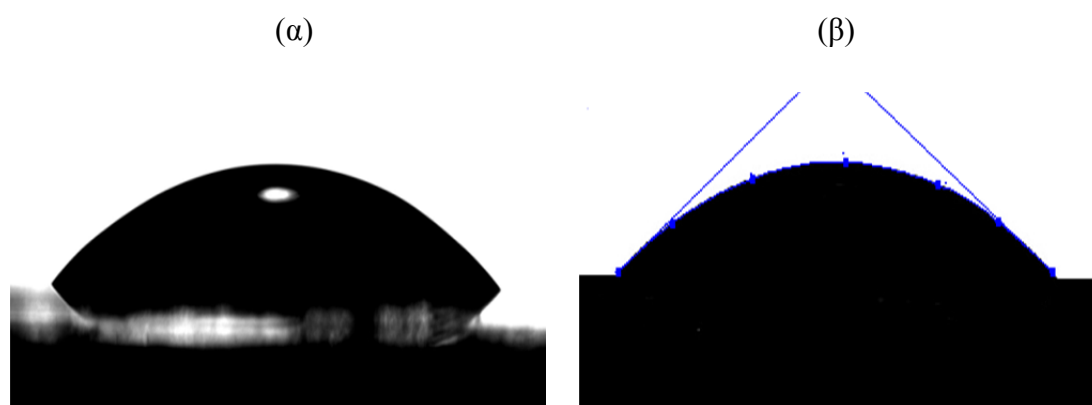
No.	Πειραματικές Μετρήσεις			Υπολογισμός Ακρίβειας Μέτρησης	
	Γωνία επαφής, μέθοδος Dropsnake (deg)	Γωνία επαφής, μέθοδος LBADSA (deg)	Γωνία επαφής, μέση τιμή (deg)	Γωνία επαφής, από βιβλιογραφία (deg)	Διαφορά (deg)
	(X)	(Y)	(Z=(X+Y)/2)	(U)	(Δ=U-Z)
1	60.822	60.332	60.577	59.33 [27]	-1.247
2	60.556	60.541	60.549		-1.219
3	60.343	60.662	60.503		-1.173
4	59.345	59.809	59.577		-0.247
5	59.212	58.898	59.055		0.275
6	58.989	60.123	59.556		-0.226
7	59.343	60.004	59.674		-0.344
8	60.013	59.706	59.860		-0.530
9	60.213	59.253	59.733		-0.403
10	59.422	59.462	59.442		-0.112
Μέση τιμή	59.826	59.897	59.852	59.33	-0.052
Τυπική Απόκλιση	0.607	0.538	0.495	-	0.495

Στη συνέχεια στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι μετρήσεις και η ανάλυσή τους για τις επιφάνειες του καθαρού και του βοριοπυριτικού γυαλιού σε συνδυασμό με τα τέσσερα δοκιμαστικά υγρά (απιονισμένο νερό, διωδομεθάνιο, δεκαεξάνιο και γλυκερόλη). Ο προσδιορισμός των γωνιών επαφής μέσω του προγράμματος Dropsnake έχει ως αποτέλεσμα τον υπολογισμό διαφορετικής δεξιάς και αριστερής γωνίας επαφής με μικρή διαφορά μεταξύ τους. Στη βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων αναφέρεται μια μόνο κοινή τιμή για τη δεξιά και αριστερή γωνία επαφής. Αντίστοιχα αποτελέσματα προέκυψαν με τη χρήση του προγράμματος LBADSA. Όπως και προηγουμένως, υπολογίστηκαν στη συνέχεια το σφάλμα μέτρησης και η τυπική απόκλιση.

Το δοκίμιο του βοριοπυριτικού γυαλιού είναι διαστάσεων 2.4 cm x 2.4 cm x 0.3 mm και κατασκευάζεται από την εταιρία *Knittel Glaser* σύμφωνα με το πρότυπο *ISO 8255/1*, χωρίς ίνες και κενά φυλακισμένου αέρα. Τα κύρια χαρακτηριστικά και η δομή των δοκιμαστικών υγρών που χρησιμοποιήθηκαν έχουν παρουσιαστεί σε προηγούμενη ενότητα της εργασίας.

Αρχικά έγιναν οι μετρήσεις με απιονισμένο νερό (το οποίο είναι το δεύτερο πιο πολικό μετά τη γλυκερόλη και δημιουργεί δυσκολίες κατά τη μέτρηση λόγω της γρήγορης εξάτμισής του κατά την εναπόθεσή του σε μια στερεή επιφάνεια). Στο Σχ. 44 παρουσιάζεται απεικόνιση της σταγόνας στην επιφάνεια του βοριοπυριτικού γυαλιού.

Πείραμα: Απιονισμένο νερό σε επιφάνεια βοριοπυριτικού γυαλιού.



Σχήμα 44: (α) Απεικόνιση σταγόνας απιονισμένου νερού σε επιφάνεια βοριοπυριτικού γυαλιού. (β) Επεξεργασία εικόνας για τον υπολογισμό των γωνιών επαφής.

Πίνακας 8: Μετρήσεις δεξιάς γωνίας επαφής για σταγόνα απιονισμένου νερού που επικάθεται σε επιφάνεια βοριοπυριτικού γυαλιού. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων και σύγκριση με στοιχεία της βιβλιογραφίας.

Ημερομηνία μετρήσεων	15/08/2012
Υλικό επιφάνειας	Βοριοπυριτικό γυαλί
Υγρό	Απιονισμένο νερό
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	26 °C
Γωνία επαφής	Δεξιά

No.	Πειραματικές Μετρήσεις			Υπολογισμός Ακρίβειας Μέτρησης			
	Γωνία επαφής, μέθοδος Dropsnake (deg)	Γωνία επαφής, μέθοδος LBADSA (deg)	Γωνία επαφής, μέση τιμή (deg)	Γωνία επαφής, από βιβλιογραφία (deg)		Διαφορά (deg)	
	(X)	(Y)	(Z=(X+Y)/2)	(U ₁ ,U ₂)		(Δ _{1,2} =U _{1,2} -Z)	
1	32.521	33.536	33.029	U ₁ =32±2 [10] U ₂ =37±1.7 [16]		-1.029	3.972
2	32.488	33.261	32.875			-0.875	4.123
3	32.561	33.824	33.193			-1.193	3.808
4	32.337	32.973	32.655			-0.655	4.345
5	32.455	33.119	32.787			-0.787	4.213
6	32.364	32.657	32.511			-0.511	4.490
7	32.894	32.456	32.675			-0.675	4.325
8	32.963	33.249	33.106			-1.106	3.894
9	32.545	33.987	33.266			-1.266	3.734
10	32.018	32.687	32.353			-0.353	4.648
Μέση τιμή	32.515	33.175	32.845	32	37	-0.845	4.155
Τυπική Απόκλιση	0.256	0.479	0.287	-	-	0.287	

Πίνακας 9: Μετρήσεις αριστερής γωνίας επαφής για σταγόνα απιονισμένου νερού που επικάθεται σε επιφάνεια βοριοπυριτικού γυαλιού. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων και σύγκριση με στοιχεία της βιβλιογραφίας.

Ημερομηνία μετρήσεων	16/08/2012
Υλικό επιφάνειας	Βοριοπυριτικό γυαλί
Υγρό	Απιονισμένο νερό
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	27 °C
Γωνία επαφής	Αριστερή

No.	Πειραματικές Μετρήσεις			Υπολογισμός Ακρίβειας Μέτρησης			
	Γωνία επαφής, μέθοδος Dropsnake (deg)	Γωνία επαφής, μέθοδος LBADSA (deg)	Γωνία επαφής, μέση τιμή (deg)	Γωνία επαφής, από βιβλιογραφία (deg)		Διαφορά (deg)	
	(X)	(Y)	(Z=(X+Y)/2)	(U ₁ ,U ₂)		(Δ _{1,2} =U _{1,2} -Z)	
1	32.354	33.536	32.945	U ₁ =32±2 [10] U ₂ =37±1.7 [16]		-0.945	4.055
2	32.126	33.261	32.694			-0.694	4.307
3	32.787	33.824	33.306			-1.306	3.695
4	32.531	32.973	32.752			-0.752	4.248
5	31.965	33.119	32.542			-0.542	4.458
6	31.923	32.657	32.290			-0.290	4.710
7	32.645	32.456	32.551			-0.551	4.450
8	32.773	33.249	33.011			-1.011	3.989
9	32.868	33.987	33.428			-1.428	3.573
10	31.867	32.687	32.277			-0.277	4.723
Μέση τιμή	32.384	33.175	32.779	32	37	-0.779	4.221
Τυπική Απόκλιση	0.369	0.479	0.372	-	-	0.372	

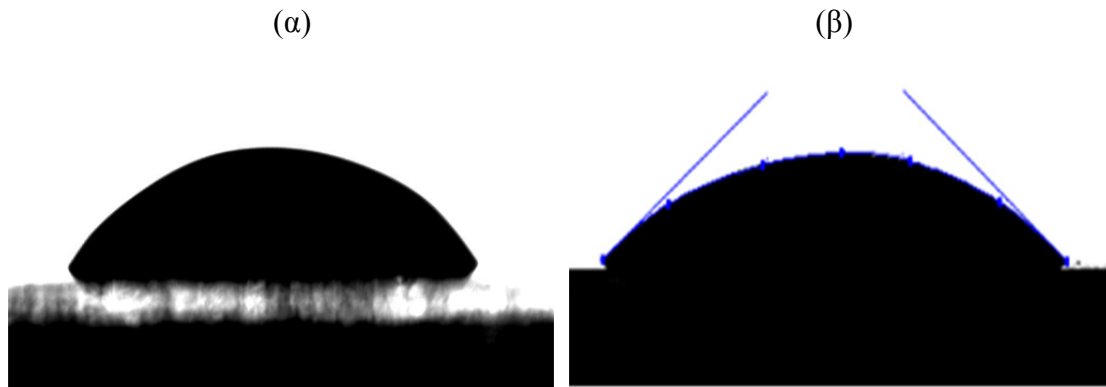
Στους Πίνακες 8 και 9 καταγράφονται και αναλύονται οι μετρήσεις της γωνίας επαφής του βοριοπυριτικού γυαλιού με το απιονισμένο νερό τόσο για τη δεξιά όσο και για την αριστερή γωνία. Η λήψη της κάθε μέτρησης για τα πειράματα των Πινάκων 8 και 9 είχε διάρκεια μεταξύ είκοσι και εικοσιπέντε δευτερολέπτων.

Από τους δύο παραπάνω πίνακες εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι μετρήσεις κυμάνθηκαν σε μικρό εύρος γύρω από τη μέση τιμή και για τα δύο υπολογιστικά προγράμματα. Συγκρίνοντας με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας παρατηρούμε ότι οι παρούσες μετρήσεις συμφωνούν περισσότερο με τις μετρήσεις της εργασίας [10] ενώ μεγαλύτερη απόκλιση παρατηρείται κατά τη σύγκριση με τα αποτελέσματα της εργασίας [16]. Οι μετρήσεις με το απιονισμένο νερό παρατηρήθηκε πως παρουσιάζουν χρονική μεταβολή, καθώς παρατηρήθηκε μείωση της επιφάνειας της διεπαφής του στερεού με το υγρό με την πάροδο του χρόνου. Ο ρυθμός της μείωσης δεν ήταν σταθερός σε όλα τα πειράματα, κάτι που ίσως οφείλεται σε διαφορετικό επίπεδο μόλυνσης της κάθε σταγόνας λόγω της αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον, ή λόγω της εξάτμισης της σταγόνας.

Τέλος, συμπεραίνεται ότι όταν εναποτίθεται σταγόνα απιονισμένου νερού σε επιφάνεια βοριοπυριτικού γυαλιού, τότε το βοριοπυριτικό γυαλί συμπεριφέρεται ως ιδιαίτερος υδρόφιλο, αφού η γωνία επαφής βρίσκεται μεταξύ του εύρους των 10° και 90° ($\sim 33^\circ$).

Στη συνέχεια ακολουθούν οι μετρήσεις γωνίας επαφής για διωδομεθάνιο επί επιφάνειας βοριοπυριτικού γυαλιού. Το διωδομεθάνιο είναι οργανική ένωση, η οποία θεωρείται μη πολική και η οξεοβασική του συνιστώσα να είναι σχεδόν μηδενική. Είναι υγρό άχρωμο και ελαφρώς διαλυτό στο νερό. Η λήψη της κάθε μέτρησης είχε διάρκεια περίπου είκοσι δευτερολέπτων. Στο Σχ. 45 παρουσιάζεται η απεικόνιση της σταγόνας διωδομεθανίου στην επιφάνεια του βοριοπυριτικού γυαλιού.

Πείραμα: Διωδομεθάνιο σε επιφάνεια βοριοπυριτικού γυαλιού.



Σχήμα 45: (α) Απεικόνιση σταγόνας διωδομεθανίου σε επιφάνεια βοριοπυριτικού γυαλιού. (β) Επεξεργασία εικόνας για τον υπολογισμό των γωνιών επαφής.

Στους Πίνακες 10 και 11 καταγράφονται και αναλύονται τα πειραματικά αποτελέσματα για τη δεξιά και την αριστερή γωνία επαφής, και υπολογίζονται τα σχετικά μεγέθη. Από τα πειραματικά αποτελέσματα των Πινάκων 10 και 11 προκύπτει ικανοποιητική ταύτιση των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας με αυτά της σχετικής βιβλιογραφίας [16].

Πίνακας 10: Μετρήσεις δεξιάς γωνίας επαφής για σταγόνα διωδομεθανίου που επικάθεται σε επιφάνεια βοριοπυριτικού γυαλιού. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων και σύγκριση με στοιχεία της βιβλιογραφίας.

Ημερομηνία μετρήσεων	01/09/2012
Υλικό επιφάνειας	Βοριοπυριτικό γυαλί
Υγρό	Διωδομεθάνιο
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	25 °C
Γωνία επαφής	Δεξιά

No.	Πειραματικές Μετρήσεις			Υπολογισμός Ακρίβειας Μέτρησης	
	Γωνία επαφής, μέθοδος Dropsnake (deg)	Γωνία επαφής, μέθοδος LBADSA (deg)	Γωνία επαφής, μέση τιμή (deg)	Γωνία επαφής, από βιβλιογραφία (deg)	Διαφορά (deg)
	(X)	(Y)	(Z=(X+Y)/2)	(U)	(Δ=U-Z)
1	45.223	45.559	45.391	45±2.2 [16]	-0.391
2	45.545	46.365	45.955		-0.955
3	44.887	45.591	45.239		-0.239
4	44.324	44.743	44.534		-0.467
5	46.159	45.010	45.585		-0.585
6	46.004	45.300	45.652		-0.652
7	45.682	46.092	45.887		-0.887
8	45.555	45.877	45.716		-0.716
9	44.863	45.661	45.262		-0.262
10	46.157	45.368	45.763		-0.763
Μέση τιμή	45.440	45.557	45.498	45	-0.498
Τυπική Απόκλιση	0.580	0.460	0.397	-	0.397

Πίνακας 11: Μετρήσεις αριστερής γωνίας επαφής για σταγόνα διωδομεθανίου που επικάθεται σε επιφάνεια βοριοπυριτικού γυαλιού. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων και σύγκριση με στοιχεία της βιβλιογραφίας.

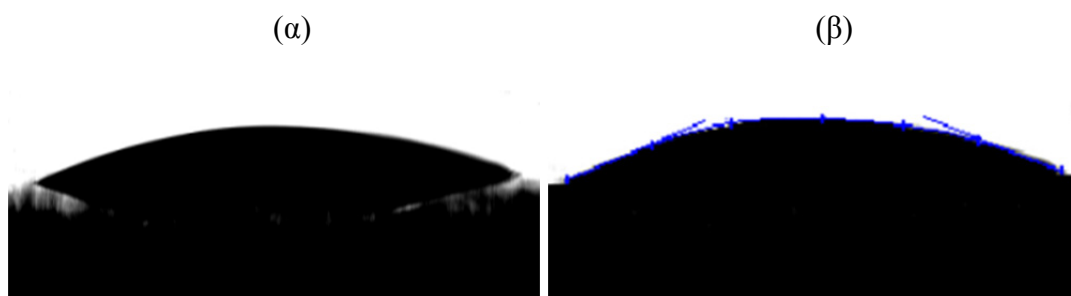
Ημερομηνία μετρήσεων	02/09/2012
Υλικό επιφάνειας	Βοριοπυριτικό γυαλί
Υγρό	Διωδομεθάνιο
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	24 °C
Γωνία επαφής	Αριστερή

No.	Πειραματικές Μετρήσεις			Υπολογισμός Ακρίβειας Μέτρησης	
	Γωνία επαφής, μέθοδος Dropsnake (deg)	Γωνία επαφής, μέθοδος LBADSA (deg)	Γωνία επαφής, μέση τιμή (deg)	Γωνία επαφής, από βιβλιογραφία (deg)	Διαφορά (deg)
	(X)	(Y)	(Z=(X+Y)/2)	(U)	(Δ=U-Z)
1	45.621	45.559	45.590	45±2.2 [16]	-0.590
2	45.200	46.365	45.783		-0.783
3	45.331	45.591	45.461		-0.461
4	46.245	44.743	45.494		-0.494
5	46.784	45.010	45.897		-0.897
6	45.989	45.300	45.645		-0.645
7	45.648	46.092	45.870		-0.870
8	45.011	45.877	45.444		-0.444
9	44.765	45.661	45.213		-0.213
10	45.575	45.368	45.472		-0.472
Μέση τιμή	45.617	45.557	45.587	45	-0.587
Τυπική Απόκλιση	0.570	0.460	0.204	-	0.204

Πείραμα: Δεκαεξάνιο σε επιφάνεια βοριοπυριτικού γυαλιού

Στη συνέχεια ακολουθούν οι μετρήσεις γωνίας επαφής βοριοπυριτικού γυαλιού. Το δεκαεξάνιο είναι ένα μη πολικό υγρό, έτσι αναμένεται κατά τη διεπαφή του με τις συγκεκριμένες επιφάνειες που μελετώνται να παρουσιάζει μικρές τιμές της γωνίας επαφής.

Στο Σχ. 46 που ακολουθεί παρουσιάζεται η απεικόνιση της σταγόνας δεκαεξανίου στην επιφάνεια του βοριοπυριτικού γυαλιού.



Σχήμα 46: (α) Απεικόνιση σταγόνας δεκαεξανίου σε επιφάνεια βοριοπυριτικού γυαλιού. (β) Επεξεργασία εικόνας για τον υπολογισμό των γωνιών επαφής.

Στους Πίνακες 12 και 13 που ακολουθούν καταγράφονται τα πειραματικά αποτελέσματα δέκα επαναλήψεων για τη δεξιά και την αριστερή γωνία επαφής, και υπολογίζονται τα σχετικά στατιστικά στοιχεία (μέση τιμή και τυπική απόκλιση). Για το συγκεκριμένο ζεύγος στερεού – υγρού δεν βρέθηκαν δημοσιευμένες τιμές της γωνίας επαφής, επομένως δεν παρουσιάζονται οι σχετικές συγκρίσεις. Παρατηρούμε ότι η διακύμανση των τιμών μεταξύ διαφορετικών πειραμάτων είναι πολύ μικρή, γεγονός που οδηγεί σε πολύ μικρή τιμή της τυπικής απόκλισης. Η γωνία επαφής είναι πολύ μικρή ($\sim 8^\circ$) και επιβεβαιώνει την ιδιότητά της μη πολικότητας του δεκαεξανίου, και την τάση του να καταλαμβάνει μεγάλη επιφάνεια καθώς επικάθεται στη υπό μελέτη επιφάνεια από βοριοπυριτικό γυαλί.

Πίνακας 12: Μετρήσεις δεξιάς γωνίας επαφής για σταγόνα δεκαεξανίου που επικάθεται σε επιφάνεια βοριοπυριτικού γυαλιού. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων και σύγκριση με στοιχεία της βιβλιογραφίας.

Ημερομηνία μετρήσεων	03/09/2012
Υλικό επιφάνειας	Βοριοπυριτικό γυαλί
Υγρό	Δεκαεξάνιο
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	24 °C
Γωνία επαφής	Δεξιά

No.	Πειραματικές Μετρήσεις			Υπολογισμός Ακρίβειας Μέτρησης	
	Γωνία επαφής, μέθοδος Dropsnake (deg)	Γωνία επαφής, μέθοδος LBADSA (deg)	Γωνία επαφής, μέση τιμή (deg)	Γωνία επαφής, από βιβλιογραφία (deg)	Διαφορά (deg)
	(X)	(Y)	(Z=(X+Y)/2)	(U)	(Δ=U-Z)
1	7.531	8.321	7.926	-	-
2	7.421	8.452	7.937		-
3	7.868	8.169	8.019		-
4	8.145	8.475	8.310		-
5	8.026	8.687	8.357		-
6	8.055	8.995	8.525		-
7	7.692	9.134	8.413		-
8	7.265	9.025	8.145		-
9	7.468	8.536	8.002		-
10	7.134	8.504	7.819		-
Μέση τιμή	7.661	8.630	8.145	-	-
Τυπική Απόκλιση	0.334	0.306	0.229	-	-

Πίνακας 13: Μετρήσεις αριστερής γωνίας επαφής για σταγόνα δεκαεξανίου που επικάθεται σε επιφάνεια βοριοπυριτικού γυαλιού. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων και σύγκριση με στοιχεία της βιβλιογραφίας.

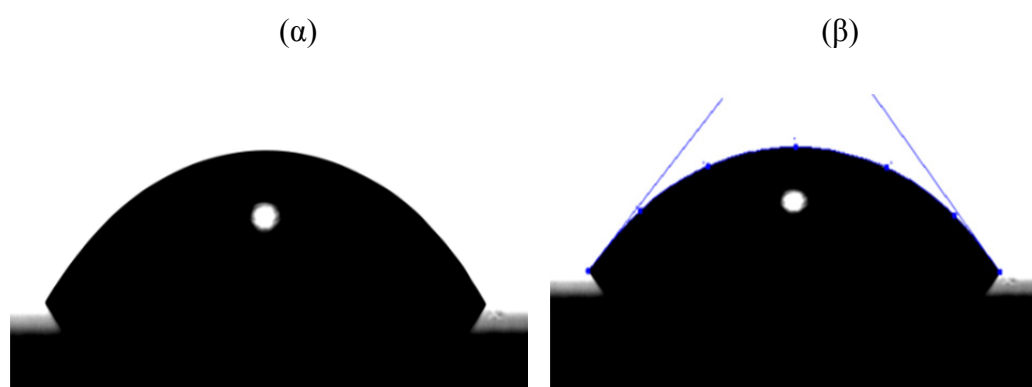
Ημερομηνία μετρήσεων	04/09/2012
Υλικό επιφάνειας	Βοριοπυριτικό γυαλί
Υγρό	Δεκαεξάνιο
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	24 °C
Γωνία επαφής	Αριστερή

No.	Πειραματικές Μετρήσεις			Υπολογισμός Ακρίβειας Μέτρησης	
	Γωνία επαφής, μέθοδος Dropsnake (deg)	Γωνία επαφής, μέθοδος LBADSA (deg)	Γωνία επαφής, μέση τιμή (deg)	Γωνία επαφής, από βιβλιογραφία (deg)	Διαφορά (deg)
	(X)	(Y)	(Z=(X+Y)/2)	(U)	(Δ=U-Z)
1	7.243	8.321	7.782	-	-
2	7.136	8.452	7.794		-
3	6.987	8.169	7.578		-
4	7.269	8.475	7.872		-
5	7.023	8.687	7.855		-
6	6.768	8.995	7.882		-
7	7.434	9.134	8.284		-
8	7.359	9.025	8.192		-
9	7.015	8.536	7.776		-
10	7.068	8.504	7.786		-
Μέση τιμή	7.130	8.630	7.880	-	-
Τυπική Απόκλιση	0.189	0.306	0.197	-	-

Ο κύκλος των μετρήσεων που σχετίζεται με το βοριοπυριτικό γυαλί ολοκληρώνεται με τη μέτρηση των γωνιών επαφής στην περίπτωση της γλυκερόλης η οποία επικάθεται σε δοκίμιο βοριοπυριτικού γυαλιού. Η γλυκερόλη αποτελεί το πιο πολικό από τα υγρά που χρησιμοποιήθηκαν, και περιέχει τρεις πολικές ομάδες υδροξυλίου υπεύθυνες για τη διαλυτότητά της στο νερό και την υγροσκοπική της φύση. Επίσης είναι άχρωμη, άοσμη και παχύρρευστη, δίνοντας γενικά μεγάλες τιμές γωνίας επαφής κατά τη διεπαφή της με στερεές επιφάνειες. Κάθε πείραμα είχε διάρκεια περίπου είκοσι δευτερολέπτων, προς εναπόθεση της σταγόνας στην επιφάνεια. Η γεωμετρία της σταγόνας δεν φάνηκε να επηρεάζεται ιδιαίτερος από τις μεταβολές του περιβάλλοντος.

Πείραμα: Γλυκερόλη σε επιφάνεια βοριοπυριτικού γυαλιού.

Στο Σχ. 47 που ακολουθεί παρουσιάζεται απεικόνιση της σταγόνας γλυκερόλης στην επιφάνεια του βοριοπυριτικού γυαλιού.



Σχήμα 47: (α) Απεικόνιση σταγόνας γλυκερόλης σε επιφάνεια βοριοπυριτικού γυαλιού. (β) Επεξεργασία εικόνας για τον υπολογισμό των γωνιών επαφής.

Στους Πίνακες 14 και 15 καταγράφονται τα πειραματικά αποτελέσματα δέκα επαναλήψεων για τη δεξιά και την αριστερή γωνία επαφής. Οι παρούσες μετρήσεις της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης των γωνιών επαφής βρίσκονται αρκετά κοντά στις τιμές της βιβλιογραφίας. Παρατηρούμε ότι η διακύμανση των τιμών μεταξύ διαφορετικών πειραμάτων είναι πολύ μικρή, γεγονός που οδηγεί σε πολύ μικρή τιμή της τυπικής απόκλισης. Επίσης, τα παρόντα αποτελέσματα είναι πολύ κοντά στα αντίστοιχα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας. Η διεπαφή βοριοπυριτικού γυαλιού - γλυκερόλης χαρακτηρίζεται από τη μεγαλύτερη γωνία επαφής σε σχέση με τα υπόλοιπα υγρά που δοκιμάστηκαν γεγονός που ήταν αναμενόμενο, λόγω της υψηλής πολικότητάς της.

Πίνακας 14: Μετρήσεις δεξιάς γωνίας επαφής για σταγόνα γλυκερόλης που επικάθεται σε επιφάνεια βοριοπυριτικού γυαλιού. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων και σύγκριση με στοιχεία της βιβλιογραφίας.

Ημερομηνία μετρήσεων	05/09/2012
Υλικό επιφάνειας	Βοριοπυριτικό γυαλί
Υγρό	Γλυκερόλη
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	24 °C
Γωνία επαφής	Δεξιά

No.	Πειραματικές Μετρήσεις			Υπολογισμός Ακρίβειας Μέτρησης	
	Γωνία επαφής, μέθοδος Dropsnake (deg)	Γωνία επαφής, μέθοδος LBADSA (deg)	Γωνία επαφής, μέση τιμή (deg)	Γωνία επαφής, από βιβλιογραφία (deg)	Διαφορά (deg)
	(X)	(Y)	(Z=(X+Y)/2)	(U)	(Δ=U-Z)
1	44.511	45.326	44.919	47±2.1 [16]	2.082
2	44.326	45.836	45.081		1.919
3	44.695	46.104	45.400		1.601
4	44.974	45.938	45.456		1.544
5	44.656	45.697	45.177		1.824
6	45.173	45.362	45.268		1.733
7	45.235	45.169	45.202		1.798
8	44.956	46.287	45.622		1.379
9	44.109	46.039	45.074		1.926
10	44.055	45.963	45.009		1.991
Μέση τιμή	44.669	45.772	45.221	47	1.780
Τυπική Απόκλιση	0.398	0.354	0.207	-	0.208

Πίνακας 15: Μετρήσεις αριστερής γωνίας επαφής για σταγόνα γλυκερόλης που επικάθεται σε επιφάνεια βοριοπιριτικού γυαλιού. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων και σύγκριση με στοιχεία της βιβλιογραφίας.

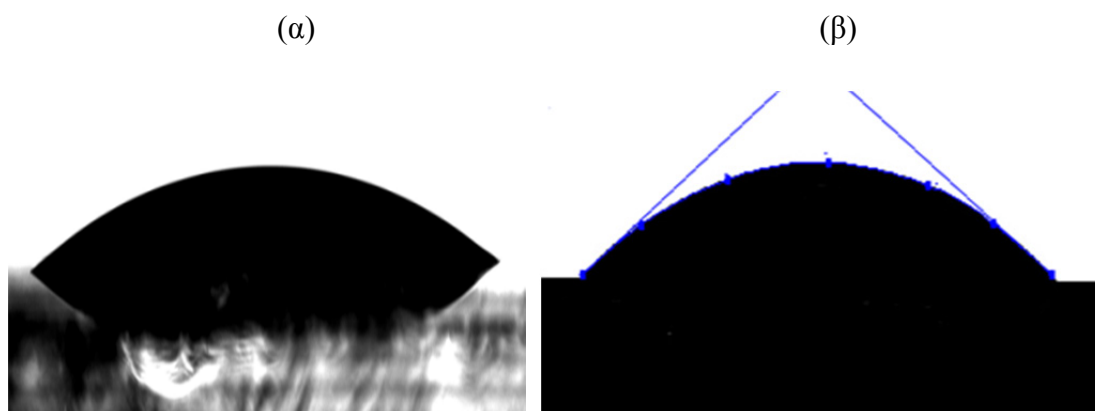
Ημερομηνία μετρήσεων	06/09/2012
Υλικό επιφάνειας	Βοριοπιριτικό γυαλί
Υγρό	Γλυκερόλη
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	25 °C
Γωνία επαφής	Αριστερή

No.	Πειραματικές Μετρήσεις			Υπολογισμός Ακρίβειας Μέτρησης	
	Γωνία επαφής, μέθοδος Dropsnake (deg)	Γωνία επαφής, μέθοδος LBADSA (deg)	Γωνία επαφής, μέση τιμή (deg)	Γωνία επαφής, από βιβλιογραφία (deg)	Διαφορά (deg)
	(X)	(Y)	(Z=(X+Y)/2)	(U)	(Δ=U-Z)
1	44.162	45.326	44.744	47±2.1 [16]	2.256
2	43.878	45.836	44.857		2.143
3	44.039	46.104	45.072		1.929
4	44.269	45.938	45.104		1.897
5	44.384	45.697	45.041		1.960
6	43.963	45.362	44.663		2.338
7	43.652	45.169	44.411		2.590
8	43.589	46.287	44.938		2.062
9	44.328	46.039	45.184		1.817
10	44.029	45.963	44.996		2.004
Μέση τιμή	44.029	45.772	44.901	47	2.099
Τυπική Απόκλιση	0.256	0.354	0.225	-	0.224

Οι μετρήσεις που ακολουθούν αντιστοιχούν σε κοινό γυαλί με τέσσερα διαφορετικά δοκιμαστικά υγρά. Το γυαλί που χρησιμοποιήθηκε έχει διαστάσεις, 3 cm x 3 cm x 5 mm, είναι μη κρυσταλλικό στερεό, εύθραυστο και οπτικά διαφανές. Στην επιφάνεια του γυαλιού τοποθετείται απιονισμένο νερό, διωδομεθάνιο, δεκαεξάνιο και γλυκερόλη. Το κοινό γυαλί θεωρείται ως μια από τις πλέον υδρόφιλες επιφάνειες και, επομένως, αναμένονται μικρές τιμές της γωνίας επαφής.

Πείραμα: Απιονισμένο νερό σε επιφάνεια γυαλιού.

Στο Σχ. 48 που ακολουθεί απεικονίζεται ο σχηματισμός της σταγόνας του νερού στην επιφάνεια του κοινού γυαλιού.



Σχήμα 48: (α) Απεικόνιση σταγόνας απιονισμένου νερού σε επιφάνεια γυαλιού. (β) Επεξεργασία εικόνας για τον υπολογισμό των γωνιών επαφής.

Στους Πίνακες 16 και 17 καταγράφονται τα πειραματικά αποτελέσματα δέκα επαναλήψεων τόσο για τη δεξιά και την αριστερή γωνία επαφής. Για την ολοκλήρωση του κάθε πειράματος απαιτήθηκαν περίπου είκοσι με εικοσιπέντε δευτερόλεπτα. Στη συνέχεια αναλύθηκαν με τα δυο υπολογιστικά προγράμματα, *Dropsnake* και *LBADSA*. Παρατηρούμε ότι η διακύμανση των τιμών μεταξύ διαφορετικών πειραμάτων είναι πολύ μικρή, γεγονός που οδηγεί σε πολύ μικρή τιμή της τυπικής απόκλισης. Οι μετρήσεις της παρούσας εργασίας συμπίπτουν πολύ ικανοποιητικά με τα δημοσιευμένα στοιχεία της εργασίας [9] ενώ παρατηρείται μικρή απόκλιση από τα αποτελέσματα της εργασίας [22]. Το γυαλί κατά τη διεπαφή του με το νερό συμπεριφέρεται οριακά ως υδρόφιλο, τείνοντας προς την υπερυδρόφιλη περιοχή αφού η μέση τιμή της γωνίας επαφής ξεπερνά οριακά τις 10° .

Πίνακας 16: Μετρήσεις δεξιάς γωνίας επαφής για σταγόνα απιονισμένου νερού που επικάθεται σε επιφάνεια γυαλιού. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων και σύγκριση με στοιχεία της βιβλιογραφίας.

Ημερομηνία μετρήσεων	07/09/2012
Υλικό επιφάνειας	Γυαλί
Υγρό	Απιονισμένο νερό
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	23 °C
Γωνία επαφής	Δεξιά

No.	Πειραματικές Μετρήσεις			Υπολογισμός Ακρίβειας Μέτρησης			
	Γωνία επαφής, μέθοδος Dropsnake (deg)	Γωνία επαφής, μέθοδος LBADSA (deg)	Γωνία επαφής, μέση τιμή (deg)	Γωνία επαφής, από βιβλιογραφία (deg)		Διαφορά (deg)	
	(X)	(Y)	(Z=(X+Y)/2)	(U ₁ ,U ₂)		(Δ _{1,2} =U _{1,2} -Z)	
1	10.645	10.963	10.804	U ₁ =9.73±1.37[22] U ₂ =10.6±1.9 [9]		-1.074	-0.204
2	10.984	10.857	10.921			-1.191	-0.321
3	10.369	10.632	10.501			-0.771	0.100
4	10.128	11.028	10.578			-0.848	0.022
5	10.569	10.523	10.546			-0.816	0.054
6	10.875	10.489	10.682			-0.952	-0.082
7	9.963	11.164	10.564			-0.834	0.037
8	9.896	11.008	10.452			-0.722	0.148
9	10.036	10.943	10.490			-0.760	0.111
10	10.608	10.735	10.672			-0.942	-0.072
Μέση τιμή	10.407	10.834	10.621	9.73	10.6	-0.891	-0.021
Τυπική Απόκλιση	0.368	0.217	0.142	-	-	0.142	

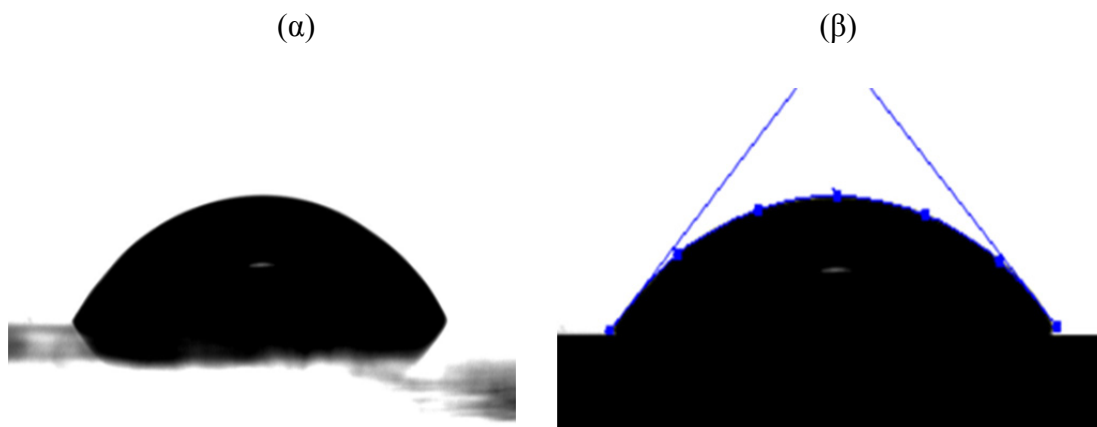
Πίνακας 17: Μετρήσεις αριστερής γωνίας επαφής για σταγόνα απιονισμένου νερού που επικάθεται σε επιφάνεια γυαλιού. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων και σύγκριση με στοιχεία της βιβλιογραφίας.

Ημερομηνία μετρήσεων	08/09/2012
Υλικό επιφάνειας	Γυαλί
Υγρό	Απιονισμένο νερό
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	23 °C
Γωνία επαφής	Αριστερή

No.	Πειραματικές Μετρήσεις			Υπολογισμός Ακρίβειας Μέτρησης			
	Γωνία επαφής, μέθοδος Dropsnake (deg)	Γωνία επαφής, μέθοδος LBADSA (deg)	Γωνία επαφής, μέση τιμή (deg)	Γωνία επαφής, από βιβλιογραφία (deg)		Διαφορά (deg)	
	(X)	(Y)	(Z=(X+Y)/2)	(U ₁ ,U ₂)		(Δ _{1,2} =U _{1,2} -Z)	
1	10.321	10.963	10.642	U ₁ =9.73±1.37[22] U ₂ =10.6±1.9 [9]		-0.912	-0.042
2	10.056	10.857	10.457			-0.727	0.144
3	10.189	10.632	10.411			-0.681	0.190
4	9.898	11.028	10.463			-0.733	0.137
5	10.458	10.523	10.491			-0.761	0.110
6	10.566	10.489	10.528			-0.798	0.073
7	10.457	11.164	10.811			-1.081	-0.211
8	10.006	11.008	10.507			-0.777	0.093
9	10.678	10.943	10.811			-1.081	-0.211
10	9.898	10.735	10.317			-0.587	0.284
Μέση τιμή	10.253	10.834	10.544	9.73	10.6	-0.814	0.057
Τυπική Απόκλιση	0.269	0.217	0.155	-	-	0.155	

Πείραμα: Διωδομεθάνιο σε επιφάνεια γυαλιού.

Στ Σχ. 49 απεικονίζεται η γεωμετρία της σταγόνας του διωδομεθανίου στην επιφάνεια του κοινού γυαλιού.



Σχήμα 49: (α) Απεικόνιση σταγόνας διωδομεθανίου σε επιφάνεια γυαλιού. (β) Επεξεργασία εικόνας για τον υπολογισμό των γωνιών επαφής.

Στους Πίνακες 18 και 19 καταγράφονται τα πειραματικά αποτελέσματα δέκα επαναλήψεων για τη μέτρηση της δεξιάς και της αριστερής γωνίας επαφής. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με δημοσιευμένα στοιχεία της βιβλιογραφίας. Παρατηρούμε ότι η διακύμανση των τιμών μεταξύ διαφορετικών πειραμάτων είναι πολύ μικρή, γεγονός που οδηγεί σε πολύ μικρή τιμή της τυπικής απόκλισης. Οι μετρήσεις της παρούσας εργασίας συμπίπτουν πολύ ικανοποιητικά με τα δημοσιευμένα στοιχεία των εργασιών [9] και [22]. Η μικρή απόκλιση που παρατηρείται μεταξύ της αριστερής και της δεξιάς γωνίας επαφής οφείλεται πιθανώς στη μη τέλεια ευθυγράμμιση του επιπέδου αναφοράς, ή στην ύπαρξη ετερογένειας του δοκιμίου ή στη τραχύτητα της επιφάνειας του γυαλιού, ή σε συνδιασμό των παραγόντων αυτών.

Πίνακας 18: Μετρήσεις δεξιάς γωνίας επαφής για σταγόνα διωδομεθανίου που επικάθεται σε επιφάνεια γυαλιού. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων και σύγκριση με στοιχεία της βιβλιογραφίας.

Ημερομηνία μετρήσεων	09/09/2012
Υλικό επιφάνειας	Γυαλί
Υγρό	Διωδομεθάνιο
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	24 °C
Γωνία επαφής	Δεξιά

No.	Πειραματικές Μετρήσεις			Υπολογισμός Ακρίβειας Μέτρησης			
	Γωνία επαφής, μέθοδος Dropsnake (deg)	Γωνία επαφής, μέθοδος LBADSA (deg)	Γωνία επαφής, μέση τιμή (deg)	Γωνία επαφής, από βιβλιογραφία (deg)		Διαφορά (deg)	
	(X)	(Y)	(Z=(X+Y)/2)	(U ₁ ,U ₂)		(Δ _{1,2} =U _{1,2} -Z)	
1	43.915	44.567	44.241	U ₁ =43.01±3.87[22] U ₂ =43.3±6.8 [9]		-1.231	-0.941
2	41.853	43.896	42.875			0.136	0.426
3	44.256	44.251	44.254			-1.144	-0.954
4	42.567	45.220	43.894			-0.884	-0.594
5	43.268	45.009	44.139			-1.129	-0.839
6	41.695	42.856	42.276			0.735	1.025
7	45.056	43.287	44.172			-1.162	-0.872
8	45.321	45.234	45.278			-2.268	-1.978
9	44.217	44.395	44.306			-1.296	-1.006
10	45.098	42.991	44.045			-1.035	-0.745
Μέση τιμή	43.725	44.171	43.948	43.01	43.3	-0.938	-0.648
Τυπική Απόκλιση	1.263	0.844	0.783	-	-	0.783	

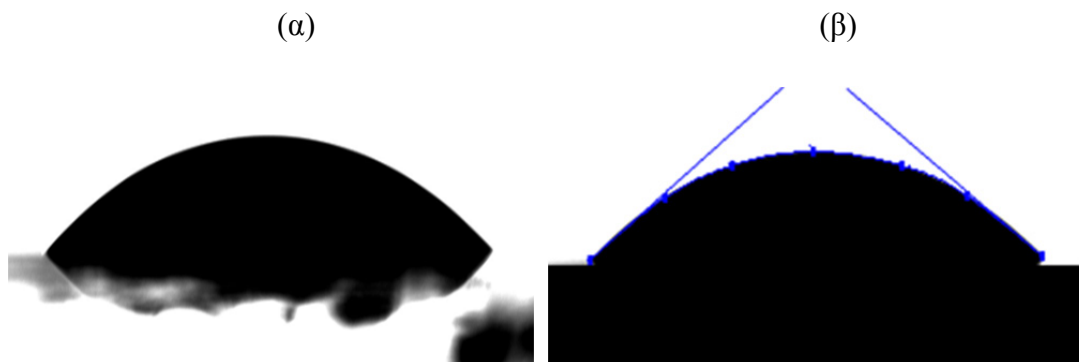
Πίνακας 19: Μετρήσεις αριστερής γωνίας επαφής για σταγόνα διωδομεθανίου που επικάθεται σε επιφάνεια γυαλιού. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων και σύγκριση με στοιχεία της βιβλιογραφίας.

Ημερομηνία μετρήσεων	10/09/2012
Υλικό επιφάνειας	Γυαλί
Υγρό	Διωδομεθάνιο
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	23 °C
Γωνία επαφής	Αριστερή

No.	Πειραματικές Μετρήσεις			Υπολογισμός Ακρίβειας Μέτρησης			
	Γωνία επαφής, μέθοδος Dropsnake (deg)	Γωνία επαφής, μέθοδος LBADSA (deg)	Γωνία επαφής, μέση τιμή (deg)	Γωνία επαφής, από βιβλιογραφία (deg)	Διαφορά (deg)		
	(X)	(Y)	(Z=(X+Y)/2)	(U ₁ ,U ₂)	(Δ _{1,2} =U _{1,2} -Z)		
1	42.565	44.567	43.566	U ₁ =43.01±3.87[22] U ₂ =43.3±6.8 [9]	-0.556	-0.266	
2	43.965	43.896	43.931		-0.921	-0.631	
3	41.858	44.251	43.055		-0.045	0.246	
4	43.234	45.220	44.227		-1.217	-0.927	
5	44.965	45.009	44.987		-1.977	-1.687	
6	43.234	42.856	43.045		-0.035	0.255	
7	42.011	43.287	42.649		0.361	0.651	
8	41.993	45.234	43.614		-0.604	-0.314	
9	44.008	44.395	44.202		-1.192	-0.902	
10	42.543	42.991	42.767		0.243	0.533	
Μέση τιμή	43.038	44.171	43.604	43.01	43.3	-0.594	-0.304
Τυπική Απόκλιση	0.980	0.844	0.707			0.707	

Πείραμα: Δεκαεξάνιο σε επιφάνεια γυαλιού.

Στο Σχ. 50 που ακολουθεί παρουσιάζεται απεικόνιση της σταγόνας δεκαεξανίου στην επιφάνεια ενός δοκιμίου από κοινό γυαλί.



Σχήμα 50: α) Απεικόνιση σταγόνας δεκαεξανίου σε επιφάνεια γυαλιού. β) Επεξεργασία εικόνας για τον υπολογισμό των γωνιών επαφής.

Στους Πίνακες 20 και 21 που ακολουθούν συγκεντρώνονται τα πειραματικά αποτελέσματα δέκα επαναλήψεων για τη μέτρηση της γωνίας επαφής, δεξιάς και αριστερής, και υπολογίζονται το σχετικά στατιστικά μεγέθη (σφάλμα και τυπική απόκλιση). Η ταύτιση των μετρήσεων με σχετικά στοιχεία της βιβλιογραφίας [1] είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική. Επίσης, παρατηρείται μικρή διακύμανση των ληφθέντων τιμών μεταξύ πειραμάτων και πολύ μικρή τιμή της τυπικής απόκλισης των μετρήσεων.

Πίνακας 20: Μετρήσεις δεξιάς γωνίας επαφής για σταγόνα δεκαεξανίου που επικάθεται σε επιφάνεια γυαλιού. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων και σύγκριση με στοιχεία της βιβλιογραφίας.

Ημερομηνία μετρήσεων	11/09/2012
Υλικό επιφάνειας	Γυαλί
Υγρό	Δεκαεξάνιο
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	22 °C
Γωνία επαφής	Δεξιά

No.	Πειραματικές Μετρήσεις			Υπολογισμός Ακρίβειας Μέτρησης	
	Γωνία επαφής, μέθοδος Dropsnake (deg)	Γωνία επαφής, μέθοδος LBADSA (deg)	Γωνία επαφής, μέση τιμή (deg)	Γωνία επαφής, από βιβλιογραφία (deg)	Διαφορά (deg)
	(X)	(Y)	(Z=(X+Y)/2)	(U)	(Δ=U-Z)
1	23.547	23.867	23.707	23.3±0.6 [1]	-0.407
2	23.698	24.121	23.910		-0.610
3	24.069	24.036	24.053		-0.753
4	24.187	23.561	23.874		-0.574
5	23.521	23.423	23.472		-0.172
6	23.147	24.356	23.752		-0.452
7	23.069	23.964	23.517		-0.217
8	24.129	23.552	23.841		-0.641
9	23.509	23.888	23.699		-0.399
10	23.762	24.010	23.886		-0.586
Μέση τιμή	23.664	23.878	23.771	23.3	-0.471
Τυπική Απόκλιση	0.334	0.544	0.171	-	0.171

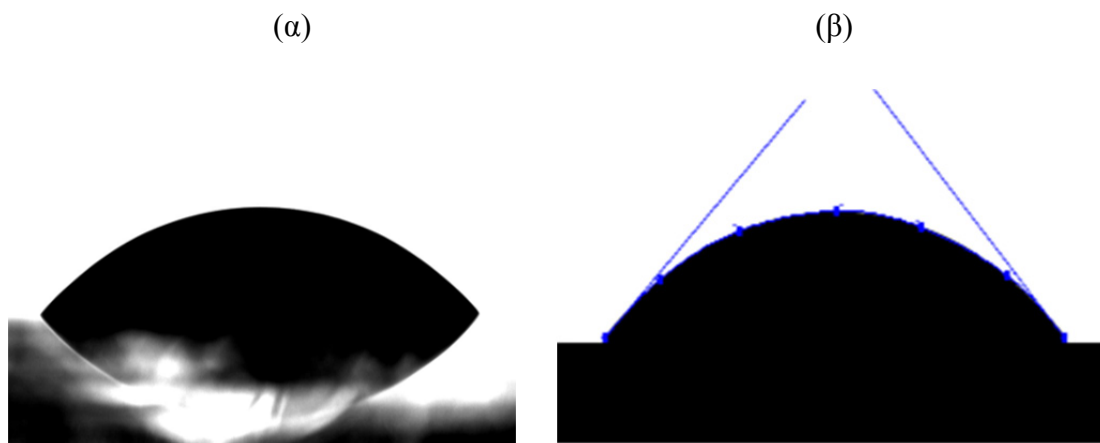
Πίνακας 21: Μετρήσεις αριστερής γωνίας επαφής για σταγόνα δεκαεξανίου που επικάθεται σε επιφάνεια γυαλιού. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων και σύγκριση με στοιχεία της βιβλιογραφίας.

Ημερομηνία μετρήσεων	12/09/2012
Υλικό επιφάνειας	Γυαλί
Υγρό	Δεκαεξάνιο
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	23 °C
Γωνία επαφής	Αριστερή

No.	Πειραματικές Μετρήσεις			Υπολογισμός Ακρίβειας Μέτρησης	
	Γωνία επαφής, μέθοδος Dropsnake (deg)	Γωνία επαφής, μέθοδος LBADSA (deg)	Γωνία επαφής, μέση τιμή (deg)	Γωνία επαφής, από βιβλιογραφία (deg)	Διαφορά (deg)
	(X)	(Y)	(Z=(X+Y)/2)	(U)	(Δ=U-Z)
1	23.282	23.867	23.575	23.3±0.6 [1]	-0.275
2	24.123	24.121	24.122		-0.822
3	24.534	24.036	24.285		-0.985
4	23.221	23.561	23.391		-0.091
5	24.111	23.423	23.767		-0.467
6	24.232	24.356	24.294		-0.994
7	23.726	23.964	23.845		-0.545
8	23.333	23.552	23.443		-0.143
9	24.100	23.888	23.994		-0.694
10	24.009	24.010	24.010		-0.710
Μέση τιμή	23.867	23.878	23.872	23.3	-0.573
Τυπική Απόκλιση	0.429	0.544	0.310	-	0.310

Πείραμα: Γλυκερόλη σε επιφάνεια γυαλιού.

Στο Σχ. 51 απεικονίζεται σταγόνα γλυκερόλης σε επιφάνεια κοινού γυαλιού.



Σχήμα 51: (α) Απεικόνιση σταγόνας γλυκερόλης σε επιφάνεια γυαλιού. (β) Επεξεργασία εικόνας για τον υπολογισμό των γωνιών επαφής.

Στους Πίνακες 22 και 23 έχει καταχωρηθεί το σύνολο των μετρήσεων που ελήφθησαν, και υπολογίστηκαν τα σχετικά στατιστικά στοιχεία. Σε αντίθεση με προηγούμενες περιπτώσεις, εδώ παρατηρείται μεγάλη απόκλιση σε σχέση με μετρήσεις της βιβλιογραφίας. Αυτό οφείλεται κυρίως στη δυσκολία εκτέλεσης των συγκεκριμένων πειραμάτων στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, καθώς η γλυκερόλη είναι ένα αρκετά παχύρευστο και δύσκολο στη χρήση υγρό. Για τη βελτίωση των συνθηκών του πειράματος απαιτείται σύριγγα μεγαλύτερου μεγέθους και βελόνα μεγαλύτερης διαμέτρου, τα οποία δεν ήταν διαθέσιμα κατά την εκτέλεση των πειραμάτων.

Πίνακας 22: Μετρήσεις δεξιάς γωνίας επαφής για σταγόνα γλυκερόλης που επικάθεται σε επιφάνεια γυαλιού. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων και σύγκριση με στοιχεία της βιβλιογραφίας.

Ημερομηνία μετρήσεων	13/09/2012
Υλικό επιφάνειας	Γυαλί
Υγρό	Γλυκερόλη
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	24 °C
Γωνία επαφής	Δεξιά

No.	Πειραματικές Μετρήσεις			Υπολογισμός Ακρίβειας Μέτρησης			
	Γωνία επαφής, μέθοδος Dropsnake (deg)	Γωνία επαφής, μέθοδος LBADSA (deg)	Γωνία επαφής, μέση τιμή (deg)	Γωνία επαφής, από βιβλιογραφία (deg)		Διαφορά (deg)	
	(X)	(Y)	(Z=(X+Y)/2)	(U ₁ ,U ₂)		(Δ _{1,2} =U _{1,2} -Z)	
1	32.726	32.965	32.846	U ₁ =25±4 [16] U ₂ =48.9±6.8 [9]		-7.846	16.055
2	35.691	33.698	34.695			-9.695	14.206
3	30.721	33.545	32.133			-7.133	16.767
4	28.967	32.014	30.491			-5.491	18.410
5	36.127	34.300	35.214			-10.214	13.687
6	35.003	35.187	35.095			-10.095	13.805
7	33.258	33.221	33.240			-8.240	15.661
8	32.694	33.908	33.301			-8.301	15.599
9	37.357	31.880	34.619			-9.619	14.282
10	38.421	34.257	36.339			-11.339	12.561
Μέση τιμή	34.097	33.498	33.797	25	48.9	-8.797	15.103
Τοπική Απόκλιση	2.812	0.973	1.637	-	-	1.637	

Πίνακας 23: Μετρήσεις αριστερής γωνίας επαφής για σταγόνα γλυκερόλης που επικάθεται σε επιφάνεια γυαλιού. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων και σύγκριση με στοιχεία της βιβλιογραφίας.

Ημερομηνία μετρήσεων	14/09/2012
Υλικό επιφάνειας	Γυαλί
Υγρό	Γλυκερόλη
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	25 °C
Γωνία επαφής	Αριστερή

No.	Πειραματικές Μετρήσεις			Υπολογισμός Ακρίβειας Μέτρησης			
	Γωνία επαφής, μέθοδος Dropsnake (deg)	Γωνία επαφής, μέθοδος LBADSA (deg)	Γωνία επαφής, μέση τιμή (deg)	Γωνία επαφής, από βιβλιογραφία (deg)		Διαφορά (deg)	
	(X)	(Y)	(Z=(X+Y)/2)	(U ₁ ,U ₂)		(Δ _{1,2} =U _{1,2} -Z)	
1	33.851	32.965	33.408	U ₁ =25±4 [16] U ₂ =48.9±6.8 [9]		-8.408	15.492
2	34.967	33.698	34.333			-9.333	14.568
3	32.514	33.545	33.030			-8.030	15.871
4	31.084	32.014	31.549			-6.549	17.351
5	33.687	34.300	33.994			-8.994	14.907
6	33.545	35.187	34.366			-9.366	14.534
7	35.947	33.221	34.584			-9.584	14.316
8	35.110	33.908	34.509			-9.509	14.391
9	33.824	31.880	32.850			-7.852	16.048
10	32.045	34.257	33.151			-8.151	15.749
Μέση τιμή	33.657	33.498	33.577	25	48.9	-8.578	15.323
Τυπική Απόκλιση	1.403	0.973	0.916	-	-	0.916	

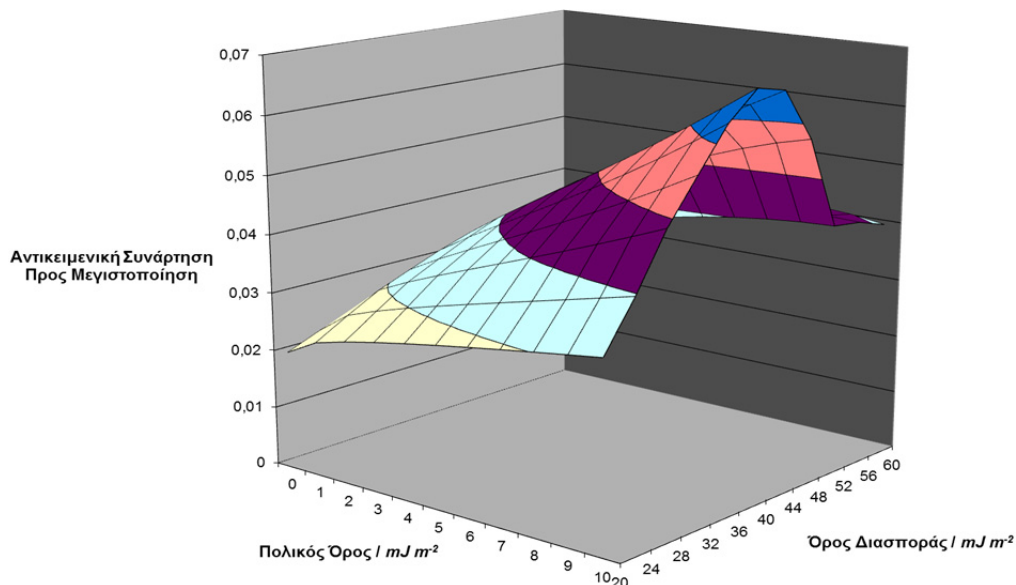
Στον Πίνακα 24 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά αποτελέσματα των μέσων τιμών των γωνιών επαφής των δύο στερεών επιφανειών από γυαλί που χρησιμοποιήθηκαν στη παρούσα εργασία με καθένα από τα τέσσερα δοκιμαστικά υγρά. Παρατηρείται ότι στα πολικά υγρά (απιονισμένο νερό και γλυκερόλη), η γωνία επαφής είναι μεγαλύτερη κατά την τοποθέτησή τους σε βοριοπυριτικό γυαλί, ενώ είναι μικρότερη κατά την τοποθέτησή τους σε κοινό γυαλί. Σχετικά με το διωδομεθάνιο, η γωνία επαφής του παραμένει περίπου η ίδια και στους δυο τύπους γυαλιού, ενώ για το μη πολικό δεκαεξάνιο, η γωνία επαφής με το κοινό γυαλί είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη με το βοριοπυριτικό γυαλί.

Πίνακας 24: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα. Πειραματικές μετρήσεις γωνίας επαφής σταγόνων απιονισμένου νερού, διωδομεθανιού, δεκαεξανίου και γλυκερόλης σε επιφάνειες βοριοπυριτικού και καθαρού γυαλιού.

<i>Δοκιμαστικό Υγρό</i>	<i>Γωνία Επαφής $\theta(deg)$</i>	
	<i>Βοριοπυριτικό Γυαλί</i>	<i>Καθαρό Γυαλί</i>
<i>Απιονισμένο Νερό</i>	32.8°	10.6°
<i>Διωδομεθάνιο</i>	45.4°	43.8°
<i>Δεκαεξάνιο</i>	8.0°	23.8°
<i>Γλυκερόλη</i>	45.1°	33.7°

Τα αποτελέσματα του Πίνακα 24 χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της επιφανειακής τάσης των δύο στερεών επιφανειών από γυαλί. Συγκεκριμένα, με χρήση ενός φύλλου Excel [1], υπολογίστηκαν οι βέλτιστοι συνδυασμοί του πολικού όρου (γ_p) και του όρου διασποράς (γ_d) της επιφανειακής τάσης ώστε, για κάθε επιφάνεια, να προσεγγίζονται ταυτόχρονα οι μετρήσεις με όλα τα δοκιμαστικά υγρά. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι η μέθοδος του Van Oss, και ο αναγνώστης μπορεί να αναζητήσει περισσότερες πληροφορίες στο [1] και στις αναφορές του. Με τη μέθοδο αυτή, ορίζεται μια αντικειμενική συνάρτηση, η τιμή της οποίας μικραίνει καθώς απομακρυνόμαστε από τον βέλτιστο συνδυασμό των δυο όρων (πολικού και διασποράς). Επομένως, απαιτείται μεγιστοποίησή της ώστε να βρεθεί ο βέλτιστος συνδυασμός. Για τον σκοπό αυτόν διακριτοποιείται το πεδίο ορισμού των γ_p και γ_d (γ_p μεταξύ 0 mJ/m² και 10 mJ/m² και γ_d μεταξύ 20 mJ/m² και 60 mJ/m²) με έναν κλίμακα 10 x 10. Η αντικειμενική συνάρτηση υπολογίζεται για κάθε συνδυασμό γ_p και γ_d , και εντοπίζεται η μέγιστη τιμή της.

Στο Σχ. 52 απεικονίζονται σε τρισδιάστατη μορφή όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί για τα μεγέθη γ_p και γ_d που αναφέρονται στο βοριοπυριτικό γυαλί.



Σχήμα 52: Υπολογισμός βέλτιστου συνδυασμού των τάσεων διασποράς και πολικότητας, ώστε να ικανοποιούνται οι μετρήσεις γωνίας επαφής του βοριοπυριτικού γυαλιού με τα δοκιμαστικά υγρά της παρούσας εργασίας.

Η αντικειμενική συνάρτηση λαμβάνει τη μέγιστη τιμή 0.0673 για τον συνδυασμό του πολικού όρου και του όρου διασποράς της επιφανειακής τάσης, $\gamma_p=10 \text{ mJ/m}^2$ και $\gamma_d=40 \text{ mJ/m}^2$ αντίστοιχα.

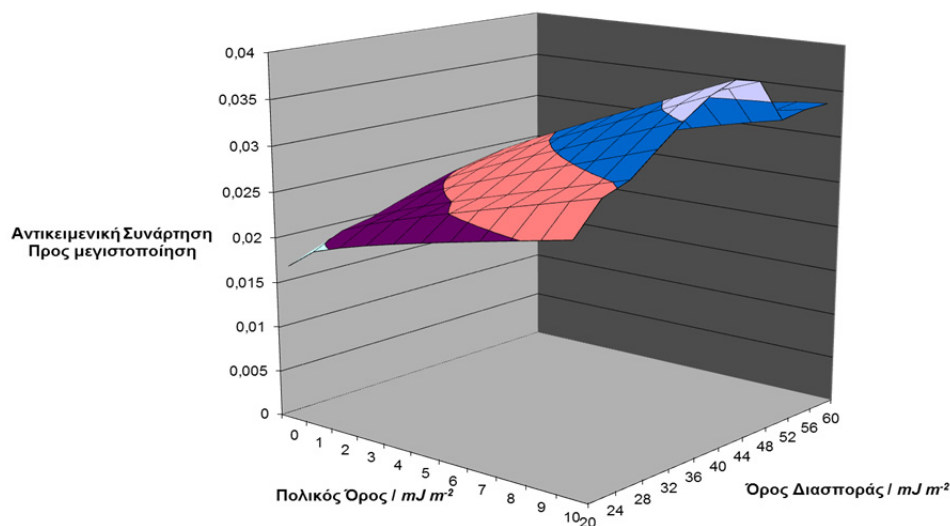
Αντίστοιχα, στο Σχ. 53 απεικονίζονται οι πιθανοί συνδυασμοί των μεγεθών γ_p και γ_d για τη περίπτωση των δοκιμών από κοινό γυαλί.

Η αντικειμενική συνάρτηση λαμβάνει τη μέγιστη τιμή 0.0382 για τον συνδυασμό των όρων της επιφανειακής τάσης, $\gamma_p=10 \text{ mJ/m}^2$ και $\gamma_d=44 \text{ mJ/m}^2$.

Τα αποτελέσματα της παραπάνω μεθόδου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της επιφανειακής τάσης ενός στερεού, καθώς αυτή προκύπτει ως το άθροισμα του πολικού όρου και του όρου διασποράς (μέσω της Εξίσωσης (12)).

Τα παραπάνω μεγέθη αποτελούν απαραίτητα στοιχεία για τον προσδιορισμό και την πρόβλεψη της διαβροχής και της πρόσφυσης ενός υγρού, όταν αυτό επικάθεται σε στερεή επιφάνεια. Επίσης, μέσω των στοιχείων αυτών μπορούν να

προσδιοριστούν τυχόν επιστρώσεις από κατεργασίες στην επιφάνεια, υποστρώματα ή άλλα επιχρίσματα. Χαμηλές τιμές της επιφανειακής τάσης ενός στερεού σημαίνουν συνήθως μεταβολές στη σύσταση του υλικού και προβλήματα διαβροχής.



Σχήμα 53: Υπολογισμός βέλτιστου συνδυασμού των τάσεων διασποράς και πολικότητας, ώστε να ικανοποιούνται οι μετρήσεις γωνίας επαφής του κοινού γυαλιού με τα δοκιμαστικά υγρά της παρούσας εργασίας.

Για το κοινό και το βοριοπυριτικό γυαλί που μελετήθηκαν στη παρούσα εργασία παρατηρείται μεγάλη διαφορά μεταξύ των όρων πολικότητας και διασποράς της επιφανειακής τάσης. Επικρατέστερες είναι οι πολικές δυνάμεις, με αποτέλεσμα τα δύο υλικά να χαρακτηρίζονται από μεγάλη πολικότητα. Έτσι, εξηγείται και η συμπεριφορά τους κατά την αλληλεπίδραση τους με τα τέσσερα πολικά ή μη πολικά δοκιμαστικά υγρά. Τέλος οι τιμές των όρων της επιφανειακής τάσης για τα δύο υλικά δεν διαφέρουν σημαντικά. Αυτό οφείλεται στη παρόμοια σύστασή τους, ενώ η μικρή διαφορά που παρατηρείται στον όρο των δυνάμεων διασποράς εξηγείται από την περιεκτικότητα σε οξείδιο του βορίου που έχει το βοριοπυριτικό γυαλί σε αντίθεση με το κοινό γυαλί, το οποίο αποτελείται κυρίως από ανθρακικό νάτριο, με προσμίξεις χαλαζιακής άμμου.

4.3 Υπολογισμός μέσου σφάλματος μετρήσεων

Με χρήση των μετρήσεων που διεξήχθησαν στην παρούσα εργασία μπορεί να προσδιοριστεί το μέσο σφάλμα της σχεδιασθείσας διάταξης. Για τον υπολογισμό αυτόν χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις γωνίας επαφής για τις περιπτώσεις για τις οποίες υπήρχαν συγκριτικά στοιχεία στη βιβλιογραφία. Ο Πίνακας 25 παρουσιάζει τα σχετικά δεδομένα, και τον προσδιορισμό του μέσου σφάλματος, το οποίο υπολογίστηκε ως **1.796%**.

Πίνακας 25: Προσδιορισμός σφάλματος μετρήσεων της σχεδιασθείσας πειραματικής διάταξης.

	Μετρήσεις γωνίας επαφής (deg)		Απόλυτη τιμή διαφοράς μετρήσεων	Σφάλμα (%)
	Πειραματική διάταξη	Βιβλιογραφία		
	X	Y	$Z= X-Y $	$Z= X-Y /Y*100$
Νερό σε υπερυδρόφοβο χαλκό (δ.γ.)	160.669	161.1	0.431	0.268
Νερό σε υπερυδρόφοβο χαλκό (α.γ.)	160.528	160.3	0.228	0.142
Νερό σε χαλκό (δ.γ.)	59.852	59.33	0.522	0.880
Νερό σε χαλκό (α.γ.)	59.687	62.37	2.683	4.302
Νερό σε βοριοπυριτικό γυαλί (δ.γ.)	32.845	32	0.845	2.641
Νερό σε βοριοπυριτικό γυαλί (α.γ.)	32.779	32	0.779	2.434
Διωδομεθάνιο σε βοριοπυριτικό γυαλί (δ.γ.)	45.498	45	0.498	1.107
Διωδομεθάνιο σε βοριοπυριτικό γυαλί (α.γ.)	45.587	45	0.587	1.304
Γλυκερόλη σε βοριοπυριτικό γυαλί (δ.γ.)	45.221	47	1.779	3.785
Γλυκερόλη σε βοριοπυριτικό γυαλί (α.γ.)	44.901	47	2.099	4.466
Νερό σε γυαλί (δ.γ.)	10.621	10.6	0.021	0.198
Νερό σε γυαλί (α.γ.)	10.544	10.6	0.056	0.528
Διωδομεθάνιο σε γυαλί (δ.γ.)	43.948	43.3	0.648	1.497
Διωδομεθάνιο σε γυαλί (α.γ.)	43.604	43.3	0.304	0.702
Δεκαεξάνιο σε γυαλί (δ.γ.)	23.771	23.3	0.471	2.022
Δεκαεξάνιο σε γυαλί (α.γ.)	23.872	23.3	0.572	2.455
	Μέσο σφάλμα πειραματικής διάταξης		-	1.796%

δ.γ.: δεξιά γωνία, α.γ.: αριστερή γωνία.

5 Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε πειραματικά το φαινόμενο της διαβροχής στερεών επιφανειών από σταγόνες υγρών. Κατ' αρχάς, παρουσιάστηκε το θεωρητικό υπόβαθρο και η μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος, και επεξηγήθηκε η ορολογία που χρησιμοποιείται για την περιγραφή προβλημάτων διαβροχής στερεών επιφανειών από υγρά, σε περιβάλλον κάποιου αερίου. Στη συνέχεια, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε εξ' αρχής κατάλληλη πειραματική διάταξη, με την οποία μπορούν να πραγματοποιηθούν μετρήσεις γωνίας επαφής. Πραγματοποιήθηκε λεπτομερής περιγραφή της πειραματικής διάταξης, με επεξήγηση (α) των επιμέρους εξαρτημάτων τα οποία χρησιμοποιήθηκαν, και των βημάτων που απαιτούνται για τη λήψη φωτογραφιών σταγόνων επί στερεών επιφανειών, και (β) του λογισμικού το οποίο είναι απαραίτητο για τον προσδιορισμό της γεωμετρίας της σταγόνας, και τον υπολογισμό της γωνίας επαφής. Στη συνέχεια, η σχεδιασθείσα διάταξη χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των γωνιών επαφής τεσσάρων επιφανειών από διαφορετικά υλικά, στις οποίες τοποθετήθηκαν σταγόνες από τέσσερα δοκιμαστικά υγρά διαφορετικής πολικότητας. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων συγκρίθηκαν με αντίστοιχα δημοσιευμένα στοιχεία και μετρήσεις πιστοποιημένων εργαστηρίων. Τέλος, με ανάλυση του συνόλου των μετρήσεων εκτιμήθηκε το στατιστικό σφάλμα μέτρησης της πειραματικής διάταξης.

Η παρούσα πειραματική διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για περαιτέρω αναλύσεις, και να αποτελέσει τη βάση για περαιτέρω βελτιώσεις και προσθήκες. Κατ' αρχάς, οι μετρήσεις που έγιναν στην παρούσα εργασία μπορούν να επεκταθούν ώστε να συμπεριλάβουν μεγάλο αριθμό από διαφορετικά λιπαντικά ή καύσιμα, ώστε να δημιουργηθεί μία βάση δεδομένων που να περιέχει τις ιδιότητες διαβροχής των υγρών αυτών επί διαφόρων στερεών επιφανειών, οι οποίες χρησιμοποιούνται σε μηχανολογικές κατασκευές. Επίσης, πέραν των μετρήσεων σε λείες επιφάνειες, μπορούν να πραγματοποιηθούν μετρήσεις σε τροποποιημένες επιφάνειες, με διαφορετικά μεγέθη τραχύτητας ή διάφορες επιστρώσεις, ώστε να εκτιμηθεί η επίδραση των χαρακτηριστικών αυτών στις ιδιότητες διαβροχής. Επιπλέον, η προσθήκη κατάλληλου θαλάμου ελέγχου θερμοκρασίας και πίεσης, μέσα στον οποίο θα τοποθετούνται η στερεή επιφάνεια και η σταγόνα του υγρού, θα μπορούσε να

επεκτείνει σημαντικά το εύρος των δυνατοτήτων μέτρησης της παρούσας διάταξης. Συγκεκριμένα, θα είναι εφικτή η μελέτη των ιδιοτήτων διαβροχής σε συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης πιο κοντά στις πραγματικές συνθήκες που αναμένονται κατά τη λειτουργία των μηχανών. Τέλος, με πρόσθεση δυνατότητας κλίσης του βασικού επιπέδου αναφοράς, η παρούσα διάταξη θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη διεξαγωγή δυναμικών μετρήσεων της γωνίας επαφής.

Βιβλιογραφία

1. Ευσταθίου Ε., *Προσρόφηση / Προσκόλληση Νέων Προσθετικών Λιπαντικών από Δωδεκάνιο σε Στερεές Επιφάνειες*, Διαδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Hull Ηνωμένου Βασιλείου, Σχολή Φυσικών Επιστημών, Τμήμα Χημείας, 2007.
2. Χαμάκος Θ.Ν., *Υπολογιστική Ανάλυση Διαβροχής Στερεών Επιφανειών από Σταγόνες*, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών, 2011.
3. Stalder A., *Dropsnake and LB – ADSA User Manual*, Biomedical Imaging Group, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, 2006.
4. Goclawski J., Urbaniak–Domagała W., *The measurement of Wetting Angle by Applying an ADSA Model of Sessile Drop on Selected Textile Surfaces*, *Fibers and Textiles in Eastern Europe*, 67(2), pp. 84-88, 2008.
5. Stacy R., *Contact Angle Measurment Technique for Rough Surfaces*, M.Sc. Thesis, Michigan Technological University, Department of Mechanical Engineering, 2009.
6. Guillaume L., Ahmed H., Buvailo A., Xing Y., Keuleyan S., Prakash V., Eftekhari-Bafrooei A., Borguet E., *Contact Angle Measurments Using a Simplified Experimental Setup*, *Journal of Chemical Education*, 87(12), pp. 1401-1407, 2010.
7. Tiago F., Wayne R., *ImageJ User Guid IJ 1.45m*, 2011.
8. Konduru V., *Static and Dynamic Contact Angle Measurment on Rough Surfaces Using Sessile Drop Profile Analysis with Application to Water Management in Low Temperature Fuel Cells*, M.Sc. Thesis, Michigan Technological University, Department of Mechanical Engineering, 2010.
9. Hanna A., Berg M., Stout V., Razatos A., *Role of Capsular Acid in Adhension of Uropathogenic Eschericia coli*, *American Society for Microbiology, Applied and Environmental Microbiology*, 69(8), pp. 4474 – 4481, 2003.
10. Sumner A., Menke E., Dubowski Y., Newberg J., Penner R., Hemminger J., Brauers T., Finlayson-Pitts B., *The Nature of Water on Surfaces of Laboratory Systems and Implications for Heterogeneous Chemistry in the troposphere*, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 6, pp. 604-613, 2004
11. Srinivasan S., Mckinley G., Cohen R., *Assesing the Accuracy of Contact Angle Measurements for Sessile Drop on Liquid – Repellent Surfaces*, *Langmuir*, 27(22), pp. 13582-13589, 2012.

12. Roero C., *Contact Angle Measurements of Sessile Drops Deformed by a DC Electric Field*, Swiss Federal Institute of Technology, High Voltage Laboratory, 2012.
13. Baikun L., Bruce L., *The Impact of Ultraviolet Light on Bacterial Adhesion to Glass and Metal Oxide – Coated Surfac*, Colloids and Surfaces B: Biointerfaces 41, pp. 153 – 161, 2005.
14. LI L., Kang W., Ye D., *A Contact Angle Measurement Mthod for the Droplets in EWOD – Based Chip*, Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, Bangkok, Thailand, 2007.
15. Stalder A., Melchior T., Muller M., Sage D., Blu T., Unser M., *LBADSA for Surface Tension and Contact Angle Measurements of Sessile Drops*, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 364, pp.72-81, 2010.
16. Bower M., Bank T., Giese R., Van Ross C., *Nanoscale Forces oof Interaction Between Glass in Aqueous and Non – Aqueous Media: A Theoritical and Empirical Study*, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 362, pp. 90-96, 2004.
17. Stalder A., Kulik G., Sage D., Barbieri L., Hoffmann P., *A Snake – Based Approach to Accurate Determination of Boh Contact Points and Contact Angles*, Colloids and Surfaces A: Physiochemical and Engineering Aspects, 286, pp. 92-103, 2006.
18. Paul H., *Physical and Thermal Behaviors of Dynamic Three – Phase Contact Lines*, M.Sc. Thesis, University of Wisconsin, Madison, Department of Mechanical Engineering, 2007.
19. Vijaayanand K., Pattanayak D., Rama Mohan T., Banerjee R., *Interpreting Blood – Biomaterial Interactions from Surface Free Energy and Work of Adhension*, Trends Biomater Artif. Organs, 18(2), 2005.
20. Bayouth S., Ponsonnet L., Ben Ouada H., Bakhrouf A., Othmane A., *Bacterial Detachment from Hydrophilic and Hydrophobic Surfaces Using a Microjet Impigemen*, 266(1-3), pp. 160-167, 2005.
21. Gadelmawla E., Koura M., Maksoud T., Elewa I., Soliman H., *Roughness Parameters*, Journal of Materials Processing Technology 123, pp. 133-145, 2002.
22. Morrow J., Smets B. and Grasso D., *Perceived Substratum Characteristics as a Function of AFM Probe and Imaging Fluid Properties*, Langmuir, 19(15), pp. 6151 – 6159, 2003.
23. Crick C., Ivan P., *Preparation and Characterisation of Super-Hydrophobic Surfaces*, Chemistry - A European Journal, 16(12), pp. 3568 – 3588, 2010.

24. Έλληνας Κ., *Κατασκευή σταθερών διπλής κλίμακας τραχειών υπερυδρόφοβων και υπερυδρόφιλων επιφανειών με λιθογραφία κολλοειδών σωματιδίων και εγχάραξη με πλάσμα*, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, 2009.
25. Σάββας Α., *Μελέτη της επίδρασης του μεγέθους των νανοσωματιδίων στην υπερυδροφοβικότητα σύνθετων υμενίων πολυμερών – νανοσωματιδίων*, Διπλωματική Εργασία, ΑΠΘ, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, 2010.
26. Stachowiak G., Batchelor A., *Engineering Tribology*, Butterworth Heinemann, Australia, 2009.
27. Felios A., *Corrosion Behavior of Super – Hydrophobic Film on Copper in Seawater*, Diploma Thesis, National Technical University of Athens, School of Naval Architecture and Marine Engineering, Athens, 2012.