



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΣΧΕΔΙΑΣΗ, ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΟΡΓΑΝΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΤΑΣΗΣ**

Υπό τους
ΓΟΥΛΑΣ ΣΩΚΡΑΤΗΣ, ΠΕΤΡΗΣ ΒΑΪΟΣ

Διπλωματική Εργασία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για
την απόκτηση του Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, 2025

© 2025

All rights reserved. The approval of the present D Thesis by the Department of Mechanical Engineering, School of Engineering, University of Thessaly, does not imply acceptance of the views of the author (Law 5343/32 art. 202).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής Δρ. Γεώργιος Χαραλάμπους
(Επιβλέπων) Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Αναστάσιος Σταματέλλος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Παναγιώτης Τσιακάρας
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο νιώσαμε την ανάγκη να ευχαριστήσουμε όλους όσους μας βοήθησαν και μας στήριξαν στο διάστημα της εκπόνησης αυτής της διπλωματικής. Αρχικά θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον καθηγητή μας, κύριο Γεώργιο Χαραλάμπους καθώς μας έδωσε αρχικά την ευκαιρία να ασχοληθούμε με το συγκεκριμένο επιστημονικό πεδίο, μας δίδαξε επί της θεωρίας αλλά και μέσα στο εργαστήριο. Στην συνέχεια θα ήταν παράβλεψη μας να μην ευχαριστήσουμε τον κύριο Εμμανουήλ Μπουζάκη και κατ' επέκταση τον Χρήστο Καραγιάννη για την παροχή του 3D εκτυπωτή του Εργαστηρίου Αντοχής και Μηχανικής Υλικών για την εκτύπωση της βάσης του μετρικού οργάνου.

Γούλας Σωκράτης, Πετρήs Βάιος

Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Επιβλέπων καθηγητής: Δρ. Χαραλάμπους Γεώργιος

Αναπληρωτής Καθηγητής, Πειραματική Θερμορυστοδυναμική με Ενεργειακές Εφαρμογές

Περίληψη

Ο κύριος σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση και ανάλυση διαφορετικών μεθόδων μέτρησης επιφανειακής τάσης. Αφού αποφασιστεί ποια μέθοδος είναι η καλύτερη από τις μεθόδους που αναφέρθηκαν σε αυτή την εργασία με βάση τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε μεθόδου, το επόμενο βήμα είναι η ανάλυση, ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός οργάνου μέτρησης που θα βασίζεται σε αυτήν. Η κύρια μέθοδος που θα αναλυθεί σε βάθος αργότερα σε αυτήν την διπλωματική είναι η μέθοδος της κρεμάμενης σταγόνας (Pendant Drop), και έτσι το όργανο θα βασίζεται σε αυτή. Τα προβλήματα που αντιμετωπίζονται στην ανάπτυξη του μετρικού οργάνου οφείλονται στις γεωμετρικές ιδιότητες των σταγόνων αφού απαιτείται ο ακριβής υπολογισμός της μέγιστης διαμέτρου τους. Για αυτό τον λόγο, είναι υποχρεωτικό να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στο σχήμα και μέγεθός τους. Για την πειραματική διαδικασία, ήταν υψίστης σημασίας η ύπαρξη κάμερας, συρίγγων, και φυσικά μιας βάσης που θα εδράζονται όλα τα παραπάνω. Το επόμενο βήμα είναι η λήψη φωτογραφιών των σταγόνων που ισορροπούν, και στην συνέχεια η επεξεργασία τους με τη βοήθεια ενός λογισμικού που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο, για τη μέτρηση της επιφανειακής τάσης αρκετών υγρών και μιγμάτων.

Λέξεις κλειδιά: επιφανειακή τάση, μέθοδος κρεμάμενης σταγόνας (pendant drop), μετρικό όργανο, Python, μηχανική ρευστών, πειράματα

DESIGN, MANUFACTURING AND ASSESSMENT OF SURFACE TENSION MEASURING INSTRUMENTS

Goulas Sokratis, Petris Vaios

Department of Mechanical Engineering, University of Thessaly

Supervisor: Dr. Georgios Charalambous

Associate Professor, Experimental Thermofluids with Energy Applications

Abstract

The main purpose of this thesis is to investigate and analyze different methods of measuring surface tension. After deciding which method is the best among the methods mentioned in this thesis based on the advantages and disadvantages of each method, the next step is the analysis, design and construction of a measuring instrument based on it. The main method that will be analyzed in depth later in this thesis is the Pendant Drop method, and thus the instrument will be based on it. The problems encountered in the development of the measuring instrument are due to the geometric properties of the drops since the accurate calculation of their maximum diameter is required. For this reason, it is mandatory to pay special attention to their shape and size. For the experimental process, the existence of a camera, syringes, and of course a base on which all of the above will be based was of utmost importance. The next step is to take photographs of the equilibrating drops, and then process them with the help of software developed in the Laboratory, to measure the surface tension of several liquids and mixtures.

Key words: surface tension, pendant drop method, measuring instrument, Python, fluid mechanics, experiments, design

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Ευχαριστίες iv

Περίληψη v

Κεφάλαιο 1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Κατανοώντας την επιφανειακή τάση.....	7
1.2 Μέθοδοι μέτρησης επιφανειακής τάσης	13
1.2.1 Η μέθοδος Pendant drop.....	13
1.2.2 Η μέθοδος της μέγιστης πίεσης σταγόνας.....	16
1.2.3 Η πλάκα Wilhelmy.....	17
1.2.4 Η μέθοδος Du Noüy ring.....	19
1.2.5 Η μέθοδος ανύψωσης στομίου	19
1.2.6 Η μέθοδος Jaeger	22
1.3 Τα χαρακτηριστικά της μεθόδου pendant drop.....	23
Κεφάλαιο 2.ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ	25
2.1 Τα εξαρτήματα του πειράματος.....	25
2.2 Η διαδικασία της μελέτης και του σχεδιασμού της βάσης στήριξης.....	30
2.3 Η ανάπτυξη του λογισμικού επεξεργασίας εικόνας.....	34
2.4 Ανάλυση της πειραματικής διάταξης.....	42
Κεφάλαιο 3.ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	43
Κεφάλαιο 4.ΣΥΖΗΤΗΣΗ	47
Κεφάλαιο 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	52
5.1 Συμπεράσματα	52
5.2 Προτάσεις βελτίωσής για το μέλλον	52
5.3 Οικονομική ανάλυση της πειραματικής διάταξης	53
Βιβλιογραφία.....	54

Πίνακας Συμβόλων

Σύμβολο	Ονομασία	Μονάδες μέτρησης
We	Αδιάστατος αριθμός Weber	Αδιάστατο
r	Ακτίνα	m
R	Ακτίνα καμπυλότητας	m ⁻¹
β	Αριθμός Bond	Αδιάστατο
N	Αριθμός σωματιδίων	Αδιάστατο
F	Δύναμη	N
A	Ελεύθερη ενέργεια Helmholtz	Joule
g	Επιτάχυνση βαρύτητας	m/s ²
σ	Επιφανειακή τάση	N/m
φ	Κλίση	Αδιάστατο
V	Όγκος	m ³
t	Πάχος	m
Per	περίμετρος	m
P	Πίεση	Pa
w	Πλάτος	m
ρ	Πυκνότητα	kg/m ³
cos	Συνημίτονο	Αδιάστατο
α	Συνολική επιφάνεια	m ²
f	Συντελεστής βελτίωσης	Αδιάστατο
U	Ταχύτητα	m/s
h	Ύψος	m
μ	Χημικό δυναμικό	Joule/mole
W _{ring}	Ωφέλιμο βάρος	kg

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Εξήγηση της επίδρασης της επιφανειακής τάσης	3
Εικόνα 2: Επίδραση του αριθμού Weber	4
Εικόνα 3: Έντομο που περπατάει στο νερό	5
Εικόνα 4: Δυνάμεις που ασκούνται πάνω σε μια βελόνα λόγω επιφανειακής τάσης	6
Εικόνα 5: Μια σφαιρική σταγόνα.....	8
Εικόνα 6: Ένα απλό spray.....	9
Εικόνα 7: Ιονικό υγρό για αποθήκευση ενέργειας.....	10
Εικόνα 8: Γραμμή παραγωγής από εργοστάσιο παραγωγής τροφίμων.....	11
Εικόνα 9: Χάπια με coating	12
Εικόνα 10: Το φαινόμενο Marangoni	12
Εικόνα 11: Η μέθοδος pendant drop όπως χρησιμοποιείται στην διπλωματική.....	16
Εικόνα 12: Η μέθοδος μέτρησης με την μέγιστη πίεση της σταγόνας	17
Εικόνα 13: Η μέθοδος Wilhelmy	19
Εικόνα 14: Η μέθοδος Du Noüy Ring	20
Εικόνα 15: Η μέθοδος ανύψωσης στομίου	21
Εικόνα 16: Η μέθοδος Jaeger	23
Εικόνα 17: Το σκαρίφημα της πειραματικής διάταξης	26
Εικόνα 18: Ο διαχύτης φωτός	27
Εικόνα 19 Το φως.....	27
Εικόνα 20: Η κάμερα.....	28
Εικόνα 21: Η συνολική πειραματική διάταξη.....	29
Εικόνα 22: Ο εκτυπωτής Qidi XMAX 3	31
Εικόνα 23: Ο πύρος συναρμολόγησης.....	32
Εικόνα 24: Η κάτω στήριξη της βάσης	32
Εικόνα 25: Η βάση όπου κρέμεται το φως	32
Εικόνα 26: Τα πλάγια τμήματα της βάσης στήριξης.....	33
Εικόνα 27: Στήριξη της σύριγγας	33
Εικόνα 28: Η βάση του διαχύτη φωτός.....	33
Εικόνα 29: Το μετρικό όργανο Kruss Bubble Pressure Tensiometer BP50	34
Εικόνα 30: Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου σε ορθοκανονικό σύστημα αξόνων	36
Εικόνα 31: 1ο στάδιο-η λήψη της φωτογραφίας	40
Εικόνα 32: 2ο στάδιο- μετατροπή σε binary	40
Εικόνα 33: 3ο στάδιο-εφαρμογή threshold	41
Εικόνα 34: 4ο στάδιο-υπολογισμός των διαμέτρων	41

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: διάγραμμα επιφανειακής τάσης με ποσοστό μάζας μεθανόλης με 18G.....	44
Διάγραμμα 2: Διάγραμμα επιφανειακής τάσης με ποσοστό μάζας μεθανόλης με 21G.....	45
Διάγραμμα 3: οι νέες μετρήσεις σε σύγκριση με τις παλιές.....	46
Διάγραμμα 4: μεταβολή της διαμέτρου de και της μετρούμενης επιφανειακής τάσης	49
Διάγραμμα 5: διάμετροι βελόνας με σχετικά σφάλματα	50

Κεφάλαιο 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η **επιφανειακή τάση** περιγράφεται ως η απαιτούμενη ενέργεια για την αύξηση της επιφάνειας ενός υγρού. Πιο αναλυτικά, είναι μια φυσική ιδιότητα των υγρών που περιγράφει τη "δύναμη" που δρα στην επιφάνεια ενός υγρού, ώστε αυτή να παραμένει όσο το δυνατόν πιο μικρή σε έκταση. Σαν αποτέλεσμα αυτών των δυνάμεων, τα μόρια συνωστίζονται ώστε τελικά η επιφάνεια να γίνει η ελάχιστη δυνατή. Η ιδιότητα αυτή επιτρέπει στο υγρό να συμπεριφέρεται σαν ένα σύνολο από πολλά στρώματα και όχι ανεξάρτητα. Η μονάδα μέτρησης της επιφανειακής τάσης είναι N/m ή J/m^2 .

Η επιφανειακή τάση οφείλεται στο σύνολο των διαμοριακών δυνάμεων που δρουν στην επιφάνεια του υγρού. Αυτές είναι οι εξής [1]:

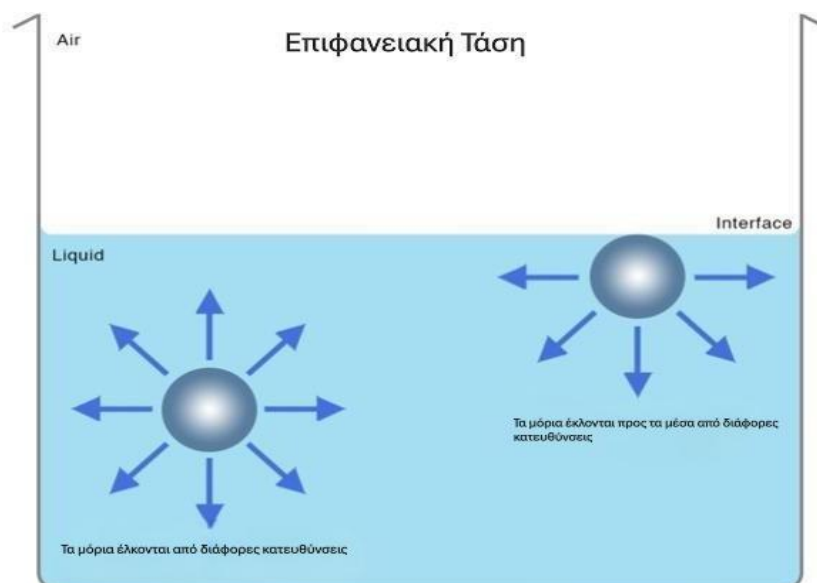
- Δυνάμεις **Van Der Waals (London, Keesom, Debye)**: Οι δυνάμεις αυτές ασκούνται ανάμεσα σε ουδέτερα φορτισμένα άτομα.
 - Δυνάμεις **London (διασποράς)** : Οι δυνάμεις αυτές είναι οι λιγότερο ισχυρές από τις 3 δυνάμεις. Αναπτύσσονται ανάμεσα σε άτομα των οποίων τα ηλεκτρόνια κατανέμονται ομοιόμορφα γύρω από τον πυρήνα τους.
 - Δυνάμεις **Keesom (διπόλου-διπόλου)**: Οι δυνάμεις αυτές είναι αλληλεπιδράσεις ηλεκτροστατικής φύσης και αναπτύσσονται ανάμεσα σε μόρια που διαθέτουν μόνιμα δίπολα. Οι αλληλεπιδράσεις αυτές είναι ισχυρότερες από τις δυνάμεις London.
 - Δυνάμεις **Debye (επαγωγής)**: Οι αλληλεπιδράσεις αυτές είναι σχετιζόμενες με την περιστροφή των μόνιμων διπόλων.
- Δεσμοί **υδρογόνου** [2]: Οι δυνάμεις αυτές είναι πολύ ισχυρές αλληλεπιδράσεις οι οποίες αναπτύσσονται ανάμεσα σε δίπολο και σε δίπολο. Υφίστανται εξαιτίας της

ένωσης ενός ατόμου υδρογόνου ομοιοπολικά συνδεδεμένο με ένα αρκετά ηλεκτραρνητικό άτομο.

Στο εσωτερικό του υγρού, κάθε μόριο δέχεται ίσες δυνάμεις έλξης από όλες τις κατευθύνσεις, οπότε αυτές οι δυνάμεις αλληλοεξουδετερώνονται. Στην επιφάνεια, όμως, τα μόρια δεν έχουν άλλα πάνω από αυτά, οπότε δέχονται μεγαλύτερη έλξη από εκείνα που βρίσκονται κάτω και στο πλάι τους. Αυτή η ανισορροπία στις δυνάμεις προκαλεί τη συστολή της επιφάνειας του υγρού, δημιουργώντας μια μεμβράνη με ελαστικές ιδιότητες [3]. Οι ασκούμενες δυνάμεις φαίνονται στην **Εικόνα 1**.

Οι διαμοριακές δυνάμεις καθορίζουν πολλά χαρακτηριστικά των ουσιών, μεταξύ αυτών και την φάση στην οποία βρίσκονται. Στα στερεά οι δυνάμεις αυτές είναι πιο ισχυρές από ότι είναι στα υγρά, και στα υγρά πιο ισχυρές από ότι είναι στα αέρια [4].

Ο πρώτος που ξεκίνησε την μελέτη αυτών των φαινομένων σε μικροσκοπική κλίμακα χωρίς βέβαια να ξέρει ότι η θεωρία του βρίσκει εφαρμογή σε ατομικό επίπεδο ήταν ο Νεύτωνας, και ύστερα πάνω στην θεωρία της βαρύτητας που ανέπτυξε στηρίχθηκαν όλες οι μοντέρνες θεωρίες περί ατόμων και γενικά της πυρηνικής επιστήμης θεωρώντας ότι υπάρχει μια αναλογία ανάμεσα στις 2 αυτές κλίμακες [5].



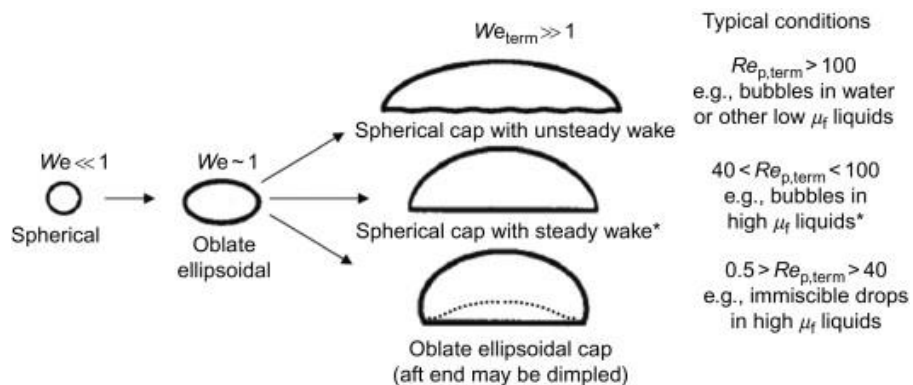
Εικόνα 1: Εξήγηση της επίδρασης της επιφανειακής τάσης [4]

Η επιφανειακή τάση επηρεάζει σημαντικά διάφορα προβλήματα στη ρευστομηχανική, όπως η μελέτη της ροής σε πορώδη μέσα, η κίνηση στο έδαφος, η ροή σε λεπτά φιλμ, καθώς και ο σχηματισμός σταγόνων, φυσαλίδων και άλλων δομών. Τα φαινόμενα που σχετίζονται με την επιφάνεια και τη διεπαφή μεταξύ υγρών και αερίων, υγρών μεταξύ τους, ή υγρών με στερεά, είναι εξαιρετικά περίπλοκα.

Στην διαστατική ανάλυση, καθιερώθηκε ένας αδιάστατος αριθμός ο οποίος συσχετίζει τις δυνάμεις αδρανείας με την επιφανειακή τάση. Ο αριθμός αυτός ονομάζεται Weber και υπολογίζεται ως εξής:

$$We = \frac{\rho U^2 L}{\sigma} \quad (1)$$

Για πολύ μικρές τιμές του αριθμού Weber ($\ll 1$) και κατά συνέπεια μεγάλη τιμή της επιφανειακής τάσης ως προς τις αδρανειακές δυνάμεις, το σχήμα της σταγόνας τείνει να γίνει σφαιρικό. Για τιμές κοντά στην μονάδα το σχήμα της σταγόνας γίνεται πεπλατυσμένο ελλειψοειδές, ενώ για πολύ μεγαλύτερες τιμές ($\gg 1$) το σχήμα της σταγόνας μπορεί να γίνει είτε ομοιόμορφα σφαιρικό, μη-ομοιόμορφα σφαιρικό είτε πεπλατυσμένο ελλειψοειδές με εσωτερική ανύψωση. Η συσχέτιση του αριθμού Weber με το σχήμα της σταγόνας φαίνεται αναλυτικά στην **Εικόνα 2**.



Εικόνα 2: Επίδραση του αριθμού Weber [5]

Σε πολλά πρακτικά προβλήματα, η επιφανειακή τάση επηρεάζει ελάχιστα τη συμπεριφορά του συστήματος, καθώς οι εσωτερικές, βαρυτικές και συνεκτικές δυνάμεις είναι κατά πολύ ισχυρότερες. Με άλλα λόγια, ο αριθμός Weber καθορίζει πότε η επιφανειακή τάση παίζει καθοριστικό ρόλο ή όχι.

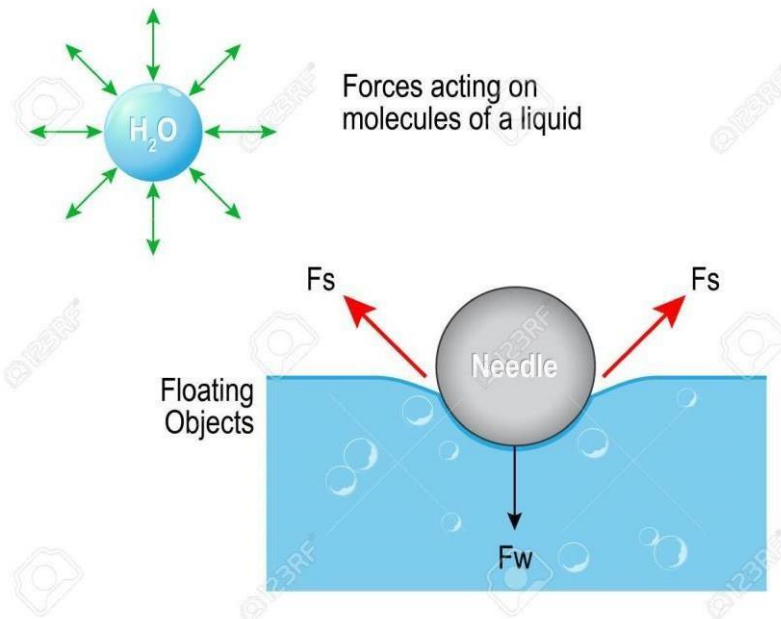
Πολλά έντομα εκμεταλλευόμενα την επιφανειακή τάση, είναι ικανά να περπατάνε πάνω στην επιφάνεια του νερού χωρίς να βυθίζονται. Τα έντομα έχουν πολλά ζευγάρια πόδια. Τα μεσαία τους πόδια δημιουργούν στροβίλους ελάχιστα χιλιοστά κάτω από την επιφάνεια του νερού, όπου και εισχωρεί το συγκεκριμένο ζεύγος ποδιών, με αποτέλεσμα να μεταφέρεται η ορμή προς τα πίσω. Σαν αποτέλεσμα, εξαιτίας του 3^{ου} νόμου του Νεύτωνα, τα έντομα συνεχίζουν να περπατάνε πάνω στην επιφάνεια του νερού (**Εικόνα 3**), γεγονός που εκ πρώτης όψεως θα έμοιαζε σε πολλούς ανθρώπους αφύσικο [6].



Εικόνα 3: Έντομο που περπατάει στο νερό [7]

Στο παρελθόν πολλοί ερευνητές, μεταξύ αυτών και ο ίδιος ο Αριστοτέλης, ο οποίος ήταν από τους πρώτους που παρατήρησαν ότι ένα κομμάτι σίδηρο μπορούσε να μείνει στην επιφάνεια του νερού χωρίς να βυθίζεται, όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 4**, προσπάθησαν να επινοήσουν ένα μαθηματικό μοντέλο που να περιγράφει πλήρως την επιφανειακή τάση.

SURFACE TENSION



Εικόνα 4: Δυνάμεις που ασκούνται πάνω σε μια βελόνα λόγω επιφανειακής τάσης [8]

Για την επιφανειακή τάση, από τα πιο γνωστά σχήματα που έχουν προταθεί είναι του Gibbs [9], το οποίο αναλύει την θερμοδυναμική της επιφάνειας. Για απλά ρευστά έχει προταθεί η θεωρία των Kirkwood και Buff. Οι Kirkwood και Buff ήρθαν στο συμπέρασμα ότι η παρακάτω εξίσωση:

$$A = \mu N - PV + \sigma a \quad (2)$$

Όπου:

A : η ελεύθερη ενέργεια Helmholtz, η οποία εκφράζει το μέγιστο ποσοστό χρήσιμης ενέργειας που μπορεί να παραχθεί από το σύστημα στις συγκεκριμένες συνθήκες

μ : το χημικό δυναμικό, το οποίο περιγράφει την ενέργεια προσθήκης ενός σωματιδίου στο σύστημα

N : ο αριθμός των σωματιδίων

P : η πίεση του συστήματος

V : ο όγκος του συστήματος

σ : η επιφανειακή τάση

α : η συνολική επιφάνεια του συστήματος. Είναι δηλαδή το συνολικό εμβαδόν διεπαφής ανάμεσα στις φάσεις (υγρό-αέριο, υγρό-υγρό κ.λπ.)

ουσιαστικά, η εξίσωση αυτή συνδέει τη μακροσκοπική θερμοδυναμική του συστήματος με τη μικροσκοπική φύση των αλληλεπιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στην επιφάνεια.

Στα απλά ρευστά, οι Kirkwood και Buff επεκτείνουν την ανάλυση μέσω μοριακής στατιστικής, περιγράφοντας την επιφανειακή τάση ως αποτέλεσμα της άνισης κατανομής των μοριακών δυνάμεων στην επιφάνεια. Σύμφωνα με την θεωρία τους, στην περιοχή της διεπιφάνειας, οι μοριακές δυνάμεις είναι διαφορετικές από αυτές στο εσωτερικό του ρευστού, κάτι που οδηγεί σε μια καθαρή ενέργεια επιφάνειας.

Επιπλέον, η εξίσωση αυτή δείχνει ότι η ελεύθερη ενέργεια Helmholtz επηρεάζεται από τη συνολική επιφάνεια του συστήματος. Αυτό σημαίνει ότι τα χαρακτηριστικά της διεπιφάνειας, όπως η καμπυλότητα ή η παρουσία προσμίξεων κ.λπ., μπορούν να μεταβάλλουν τη θερμοδυναμική συμπεριφορά του συστήματος.

Από πρακτικής πλευράς, η εξίσωση αυτή χρησιμοποιείται συχνά για την πρόβλεψη και τον υπολογισμό ιδιοτήτων όπως η σταθερότητα των γαλακτωμάτων, η διασπορά νανοσωματιδίων ή η μελέτη φαινομένων όπως η δημιουργία σταγόνων.

1.1 Κατανοώντας την επιφανειακή τάση

Εξαιτίας της επιφανειακής τάσης, οι σταγόνες έχουν το σχήμα σφαίρας. Βασιζόμενοι στην εξίσωση η οποία περιγράφει την μέθοδο pendant drop, η οποία θα αναλυθεί εκτενώς σε επόμενη ενότητα, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η παρουσία της επιφανειακής τάσης αυξάνει την πίεση μέσα στην σταγόνα. Αυτή είναι η απάντηση στην ερώτηση γιατί οι σταγόνες είναι σφαιρικές. **(Εικόνα 5)**. Η ισορροπία αυτή οδηγεί στην σφαιροποίηση της

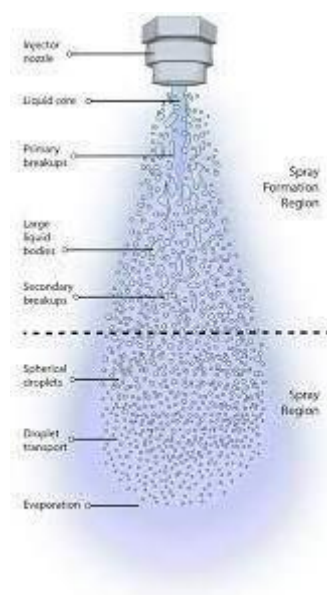
σταγόνες, μιας και σε αυτήν την κατάσταση μόνο επιτυγχάνεται η ελάχιστη επιφάνεια της σταγόνας.



Εικόνα 5: Μια σφαιρική σταγόνα [10]

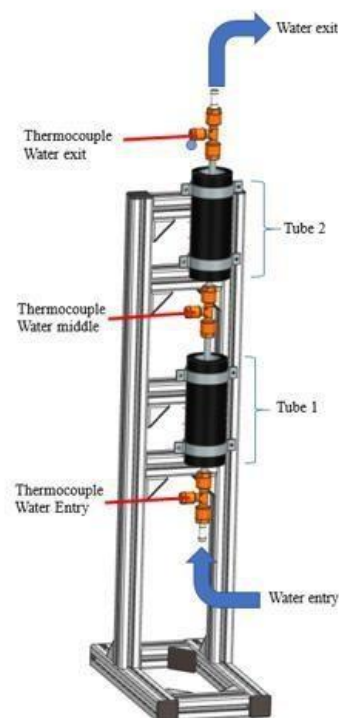
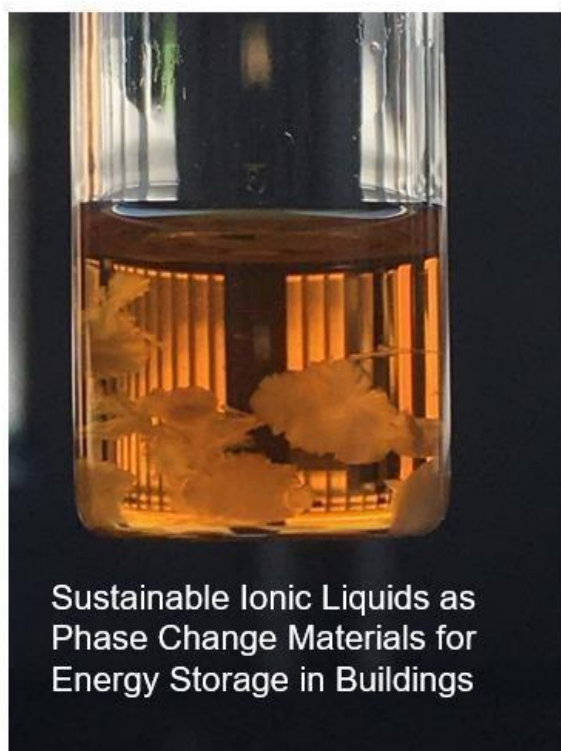
Πολλοί ερευνητές στο παρελθόν προσπάθησαν να αναπτύξουν μια μέθοδο για την μέτρηση της επιφανειακής τάσης. Πολλές εφαρμογές της επιφανειακής τάσης παρατηρούνται στον τομέα της ανάπτυξης υλικών, στην βιομηχανία τροφίμων κ.λπ. Αξίζει να σημειωθεί ότι η επιφανειακή τάση βρίσκει εφαρμογές και στον κλάδο της ιατρικής και της παθολογίας.

Σπουδαία εφαρμογή της επιφανειακής τάσης που βρίσκει εφαρμογή και στον χώρο της Μηχανολογίας είναι τα διάφορα sprays (**Εικόνα 6**). Μετά από σειρά πειραμάτων, τα οποία έγιναν με την χρήση 3 διαφορετικών ειδών ακροφυσίων, παρατηρήθηκε ότι η επιφανειακή τάση επηρεάζει τα χαρακτηριστικά τους [11].



Εικόνα 6: Ένα απλό spray [12]

Σύγχρονοι επιστήμονες λόγω των αναγκών της εποχής μας, κλήθηκαν να βρουν εναλλακτικούς τρόπους παροχής ενέργειας στις παραγωγικές μονάδες. Ένας τρόπος είναι τα λεγόμενα ιοντικά υγρά, τα οποία στην ουσία είναι ένα απλό άλας με σημείο τήξης κάτω των 100°C (**Εικόνα 7**). Για την εφαρμογή αυτών των υγρών σε διάφορες παραγωγικές διεργασίες, όπως οι στήλες κλασματικής απόσταξης και οι εναλλάκτες θερμότητας, έπρεπε να γίνουν γνωστές διάφορες παράμετροι του υγρού, εκ των οποίων και η επιφανειακή τάση [13].



Εικόνα 7: Ιονικό υγρό για αποθήκευση ενέργειας [14]

Σημαντική εφαρμογή της επιφανειακής τάσης βρίσκεται με έναν όχι και τόσο παραδοσιακό τρόπο αλλά κάπως μοντέρνο και ταυτόχρονα διασκεδαστικό αλλά παράξενο σε μια συσκευή, η οποία λειτουργεί καθαρά και μόνο με την επαφή (απτική), που ανέπτυξαν επιστήμονες στο Πανεπιστήμιο της Κωνσταντινούπολης, στην προσπάθεια τους να βελτιώσουν τις συνθήκες εκπαίδευσης των νέων μηχανικών στο πανεπιστήμιο και να τους κινήσουν το ενδιαφέρον. Στην ουσία οι φοιτητές έπρεπε να μελετήσουν το φαινόμενο της επιφανειακής τάσης το οποίο δεν είναι απλό για να επιτευχθεί. Οι φοιτητές ήταν μέρος της έρευνας, καθώς από τους 48 φοιτητές, ορισμένοι μάθανε για το φαινόμενο της επιφανειακής τάσης μέσω της ανάπτυξης της εφαρμογής για την προαναφερθείσα συσκευή, και οι άλλοι μάθανε με τον παραδοσιακό τρόπο [15].

Ακόμα μια ενδιαφέρουσα εφαρμογή της επιφανειακής τάσης λαμβάνει χώρα στον τομέα της επιστήμης των τροφίμων. Πιο συγκεκριμένα, στην προσπάθεια των διαφόρων εταιριών που δραστηριοποιούνται στον κλάδο αυτό να μειώσουν κατά πολύ το κόστος διαδικασίας της

συσκευασίας των τελικών προϊόντων, αλλά ταυτόχρονα να πετύχουν καλή στεγανότητα για να μην έρχεται σε επαφή το τρόφιμο με το περιβάλλον ώστε να έχει ο καταναλωτής την καλύτερη δυνατή εμπειρία, η γνώση της επιφανειακής τάσης των διαφόρων πολυμερών που αποτελούν την πρώτη ύλη της συσκευασίας είναι ζωτικής σημασίας [16] **(Εικόνα 8)**.



Εικόνα 8: Γραμμή παραγωγής από εργοστάσιο παραγωγής τροφίμων [17]

Μια ακόμη αξιοσημείωτη εφαρμογή της επιφανειακής τάσης βρίσκει χώρο στον κλάδο της Ιατρικής . Πιο αναλυτικά, στο σάλιο του ανθρώπου έχει πολλά επιφανειοδραστικά μόρια. Η γνώση της επιφανειακής τάσης του σάλιου καθώς και άλλων σωματικών υγρών μπορεί να ανοίξει νέους δρόμους στην ανάπτυξη νέων μεθόδων διάγνωσης διαφόρων ασθενειών [18].

Επιπλέον, διάφοροι ερευνητές ανέπτυξαν τεχνικές για να αναπτύξουν ιατρικές πλάκες, τα γνωστά μας χάπια. Τα χάπια αυτά στην εξωτερική τους επιφάνεια είχαν μια επικάλυψη, σαν μεμβράνη, αποτελούμενη από διάφορα πολυμερή και άλλα υλικά **(Εικόνα 9)**. Για να επιτευχθεί η καλύτερη σύνδεση της μεμβράνης αυτής με το χάπι, είναι απαραίτητη η γνώση των ιδιοτήτων των μερών που την συνθέτουν, κυρίως για λόγους ποιότητας, μεταξύ αυτών

και της επιφανειακής τάσης. Για τον σκοπό αυτό, οι διάφορες φαρμακευτικές εταιρίες ξεκίνησαν την ανάπτυξη διαφόρων μεθόδων για τον υπολογισμό της [19].



Εικόνα 9: Χάπια με coating [20]

Τέλος, ακόμα ένα όχι και τόσο άγνωστο φαινόμενο το οποίο βρίσκει την εξήγηση του στην επιφανειακή τάση είναι το φαινόμενο Marangoni [21]. Πίνοντας κανείς ένα ποτήρι κρασί, άμα κάνει με το ποτήρι του περιστροφικές κινήσεις, η στάθμη του κρασιού θα αυξηθεί στα τοιχώματά του. Στην συνέχεια όμως, αφού “ηρεμήσει” το κρασί, δημιουργούνται δάκρυα από αυτήν την κίνηση που έγινε (**Εικόνα 10**). Αυτά είναι ροή η οποία έγινε εξαιτίας της διαφοράς της κλίσης (gradient) της επιφανειακής τάσης.



Εικόνα 10: Το φαινόμενο Marangoni [22]

1.2 Μέθοδοι μέτρησης επιφανειακής τάσης

Έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι υπολογισμού της επιφανειακής τάσης. Παραδείγματα αυτών των μεθόδων είναι οι εξής:

- η μέθοδος Pendant drop
- η μέθοδος της Μέγιστης πίεσης σταγόνας
- η ισορροπία Wilhelmy
- τη μέθοδος Du Nouy ring
- η μέθοδος Jaeger

Όλες οι παραπάνω μέθοδοι μέτρησης έχουν τα θετικά τους, έχουν και τα αρνητικά τους. Άλλες υπερτερούν έναντι άλλων μεθόδων, άλλες υστερούν. Πολλές είναι δυναμικές, άλλες πάλι είναι στατικές, και μας δίνουν συμπεράσματα για την κατάσταση ισορροπίας του συστήματος [23].

Παρακάτω θα αναλυθούν αρκετές από αυτές τις μεθόδους, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους και θα αναλυθεί γιατί έγινε επιλογή της μεθόδου κρεμάμενης σταγόνας (Pendant drop)

1.2.1 Η μέθοδος Pendant drop

Η μέθοδος Pendant drop, χρησιμοποιεί τις εξισώσεις του προφίλ της σταγόνας για τον υπολογισμό της επιφανειακής τάσης. Η σταγόνα, υπακούει στην εξίσωση Young-Laplace [17] για τον υπολογισμό του σχήματός της. Η εξίσωση η οποία περιγράφει την διαφορά πίεσης ανάμεσα στην εσωτερική και εξωτερική επιφάνεια της σταγόνας, λαμβάνοντας υπόψιν και την διαφορά πίεσης κατά τον άξονα z λόγω υψομετρικής διαφοράς σύμφωνα με τον νόμο του Pascal ($\Delta P(z) = \Delta P_0 \pm \Delta \rho g z$) είναι η εξής:

$$-\sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \Delta P = \Delta P_0 - \Delta \rho g z \quad (3)$$

Όπου:

σ : η επιφανειακή τάση

R_1, R_2 : οι αρχικές ακτίνες καμπυλότητας

ΔP : η διαφορά πίεσης ανάμεσα μεταξύ του εσωτερικού της σταγόνας με την εξωτερική

Η συγκεκριμένη εξίσωση, η οποία έχει μελετηθεί από αρκετούς επιστήμονες στο παρελθόν, μπορεί να εκφραστεί και στον τρισδιάστατο χώρο, έχει χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια πολλών ερευνών. Με την ανάπτυξη του χώρου της επιστήμης και της τεχνολογίας γίνονται προτάσεις για πιο αναλυτικούς και σύνθετους μαθηματικούς αλγορίθμους [24].

Ουσιαστικά, ταιριάζοντας την εξίσωση Laplace [23] στο προφίλ της σταγόνας μέσω αριθμητικής ανάλυσης γίνεται ο υπολογισμός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της σταγόνας, και στη συνέχεια της επιφανειακής τάσης. Η συγκεκριμένη διαδικασία αναλύεται εκτενώς σε επόμενα κεφάλαια.

Για την διεξαγωγή των πειραμάτων, επιλέχθηκε η συγκεκριμένη μέθοδος, καθώς είναι πιο απλή στην διενέργεια των πειραμάτων, και τα αποτελέσματα που βγάζει είναι έγκυρα [25]. Ένα ακόμα θετικό της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ότι θεωρείται ότι μας δίνει αποτελέσματα όχι μόνο έγκυρα, αλλά και υψηλής ακρίβειας.

Η ιδέα για τον υπολογισμό της επιφανειακής τάσης μέσω των παραμορφώσεων που προκαλούνται εξαιτίας της επίδρασης των δυνάμεων της βαρύτητας πάνω στην σταγόνα προτάθηκε για πρώτη φορά από τον Worthington πριν από 100 χρόνια περίπου [26]. Μετά από αυτό το σημαντικό γεγονός στον προς μελέτη κλάδο, ήρθαν οι Bashford και Adams [23] το 1883, οι οποίοι διατύπωσαν σε έναν πίνακα αριθμητικές λύσεις της εξίσωσης Young-Laplace, πληροφορία πολύ σημαντική καθώς ακόμα και στις μέρες μας βρίσκει εφαρμογή από πολλούς επιστήμονες ανά τον κόσμο. Μέσω των πειραμάτων τους, αποδείχθηκε ότι το σχήμα της **συμμετρικής σταγόνας** καθορίζεται από την εξής ποσότητα, την οποία ονόμασαν β :

$$\beta = \frac{\Delta \rho g R_0^2}{\sigma} \quad (4)$$

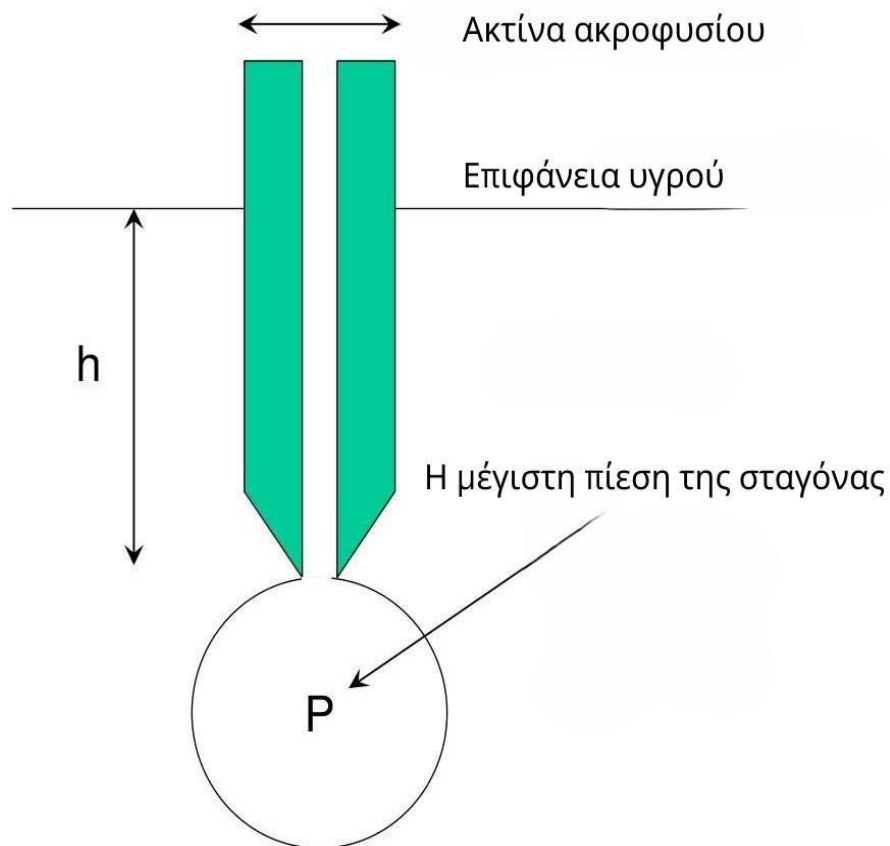
Στην συνέχεια, οι ερευνητές Merrington και Richardson ονόμασαν την ποσότητα αυτή αδιάστατο αριθμό Bond, προς τιμήν του Wilfrid Bond [3].

Ο αριθμός Bond από μόνος του δεν μπορεί να φανεί χρήσιμος για τον καθορισμό του σχήματος της σταγόνας. Για αυτό, σε συνδυασμό και με τους υπολογισμούς των Andreas et al, ολοκληρώνουν αριθμητικά την εξίσωση Young-Laplace και σαν αποτέλεσμα υπολογίζεται ένα θεωρητικό σχήμα σταγόνας, το οποίο συγκρίνεται με το σχήμα από τα πειράματα. Αυτό επαναλαμβάνεται αλγοριθμικά, έως ότου να επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια όσον αφορά το σχήμα της σταγόνας, για να είναι τα αποτελέσματα πιο έγκυρα και ακριβή [13].

Για την συγκεκριμένη μέθοδο έχουν προταθεί πολλοί αριθμητικοί αλγόριθμοι επίλυσης της εξίσωσης Young-Laplace. Ο πιο ευρέως διαδεδομένος αριθμητικός αλγόριθμος είναι ο αλγόριθμος Axisymmetric Drop Shape Analysis (ADSA). Μετά από αυτόν προτάθηκαν και άλλοι αλγόριθμοι βελτιωμένοι, οι οποίοι μπορούν να εφαρμοστούν και σε άλλα σχήματα πέραν των σφαιρικών με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Μέσω του αλγορίθμου ADSA μετρήθηκε η επιφανειακή τάση μιας σταγόνας νερού. Η επιφανειακή τάση μέσω του αλγορίθμου αυτού υπολογίστηκε ότι είναι 72.4 mN/m, ενώ η αντίστοιχη τιμή που υπάρχει στην βιβλιογραφία είναι 72.28 mN/m. Με αυτήν την σημαντική απόκλιση, οι ερευνητές ήρθαν στο συμπέρασμα ότι υπάρχουν φυσικοί περιορισμοί για την εφαρμογή του προαναφερθέντος αλγορίθμου. Μετά από πολλά πειράματα, οι επιστήμονες ήρθαν στο συμπέρασμα ότι η ελάχιστη τιμή του αριθμού Bond για την οποία ο συγκεκριμένος αλγόριθμος δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα είναι η τιμή 0.2 [27].

P: η μέγιστη πίεση της σταγόνας για αποκοπή της. [Pa]

Κύριο μειονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι το γεγονός ότι η προσρόφηση των ενεργών επιφανειών πιθανότατα να είναι αργή[7].



Εικόνα 12: Η μέθοδος μέτρησης με την μέγιστη πίεση της σταγόνας [31]

Με δεδομένα τα r, d, h και P μπορούμε να υπολογίσουμε την επιφανειακή τάση. Η συγκεκριμένη μέθοδος αναπτύχθηκε για να επιβεβαιωθεί η ισχύς της εξίσωσης Young-Laplace[23].

1.2.3 Η πλάκα Wilhelmy

Ακόμα μια μέθοδος υπολογισμού της επιφανειακής τάσης είναι η **πλάκα Wilhelmy** [32]. Σε αυτή την μέθοδο γίνεται χρήση μιας μεταλλικής πλάκας μικρών διαστάσεων, η οποία πρώτα

καυτηριάζεται για να απομακρυνθούν τυχόν ακαθαρσίες. Αφού καυτηριαστεί, δένεται πάνω σε ένα σχοινί και στην συνέχεια βυθίζεται στο προς μελέτη υγρό. Οι δυνάμεις που ασκούνται στην περίμετρο της περιβρεχόμενης πλάκας υφίστανται λόγω της επιφανειακής τάσης **(Εικόνα 13)**. Η επιφανειακή τάση έχει την εξίσωση:

$$\sigma = \frac{F}{Per} \quad (6)$$

όπου F είναι η μετρούμενη δύναμη και Per η περιβρεχόμενη περίμετρος.

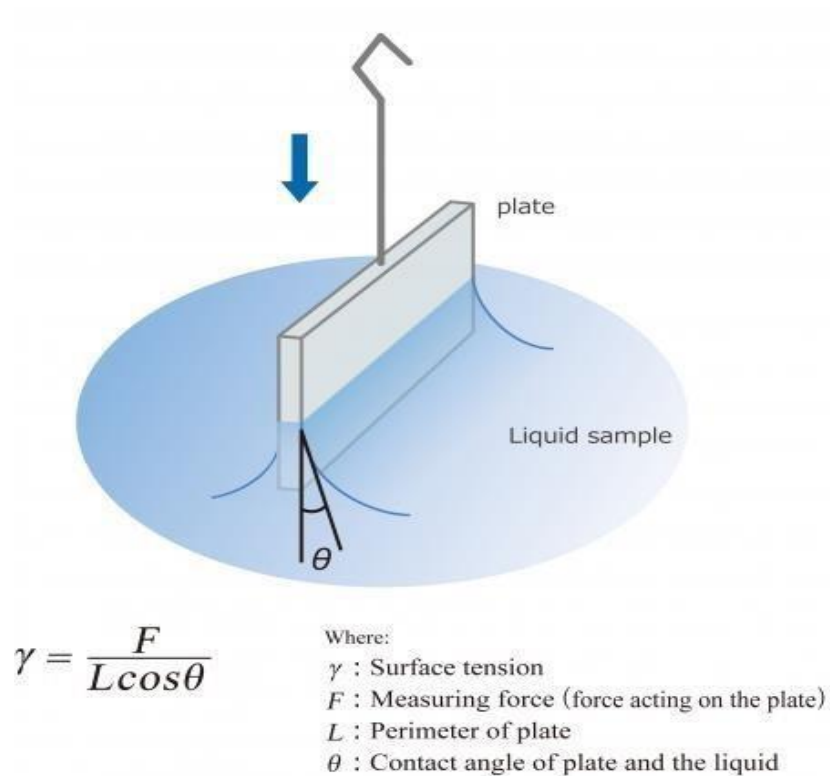
Με δεδομένο ότι η πλάκα είναι ορθογωνικής διατομής, προκύπτει ότι:

$$Per = 2(w + t) \quad (7)$$

Σε αρκετές περιπτώσεις δεν είναι λάθος να αγνοήσουμε το πάχος της πλάκας σε σύγκριση με το πλάτος, και να θεωρήσουμε ότι:

$$P \approx 2w \quad (8)$$

Με την γνώση λοιπόν των 2 αυτών παραμέτρων (F,P) ο υπολογισμός της επιφανειακής τάσης καθίσταται εύκολος. Η συγκεκριμένη μέθοδος παρόλα αυτά, έχει ένα πολύ σημαντικό μειονέκτημα σε αντίθεση με τις υπόλοιπες. Για να εξάγει σωστά αποτελέσματα, πρέπει η πλάκα να είναι τελείως αποστειρωμένη, γεγονός που σε αρκετές περιπτώσεις είναι δύσκολο, καθώς οι τυχόν ακαθαρσίες που υπάρχουν πάνω στην πλάκα μπορεί να επηρεάσουν σε πολύ σημαντικό βαθμό τα αποτελέσματα.



Εικόνα 13: Η μέθοδος Wilhelmy [33]

1.2.4 Η μέθοδος Du Noüy ring

Από τις πιο γνωστές μεθόδους υπολογισμού μέτρησης επιφανειακής τάσης είναι **η μέθοδος Du Noüy ring** [34]. Η συγκεκριμένη μέθοδος, για τον υπολογισμό χρησιμοποιεί την διείδυση ενός δαχτυλιδιού στο υπό μελέτη υγρό. Το συγκεκριμένο δαχτυλίδι συνήθως είναι κατασκευασμένο από πλατίνα (**Εικόνα 14**). Η δύναμη που απαιτείται για την ανύψωση του από τον πυθμένα του υγρού δίνεται από την εξίσωση:

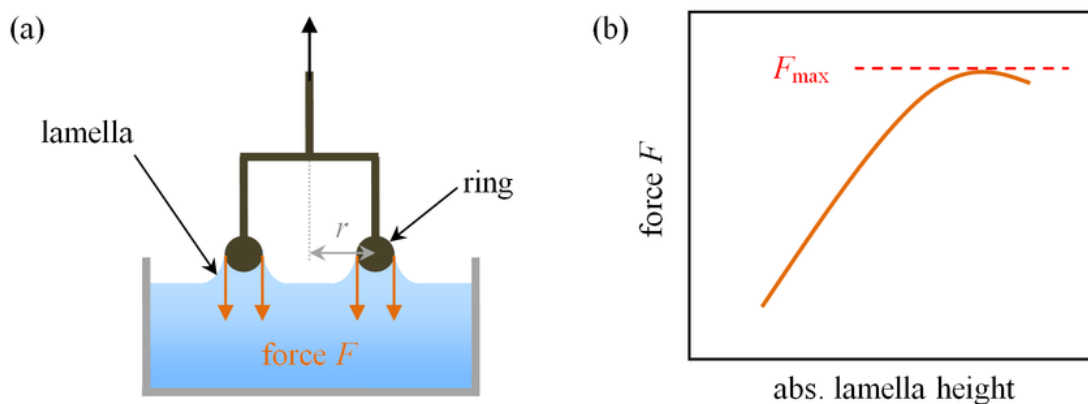
$$F = w_{ring} + 2\pi(r_i + r_a)\sigma \quad (9)$$

Όπου:

r_i : η εσωτερική ακτίνα του δαχτυλιδιού.[m]

r_a : η εξωτερική ακτίνα του δαχτυλιδιού.[m]

w_{ring} : το ωφέλιμο βάρος του δαχτυλιδιού (δηλαδή το βάρος του βυθισμένου μέρους του αφαιρούμενο από το κανονικό του βάρος).[N]



Εικόνα 14: Η μέθοδος Du Noüy Ring [35]

Εάν αγνοήσουμε το πάχος του, προκύπτει:

$$F = w_{ring} + 4\pi R\sigma \quad (10)$$

Όπου R η μέση ακτίνα :

$$R = \frac{r_i + r_a}{2} \quad (11)$$

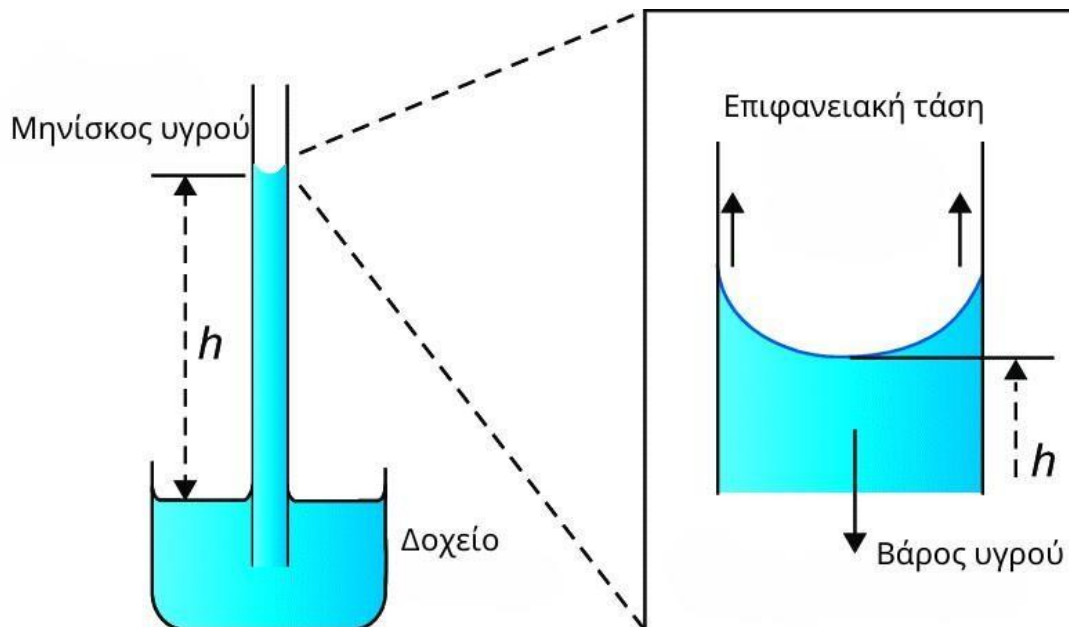
Η συγκεκριμένη μέθοδος προτάθηκε από τον Γάλλο φυσικό Pierre Lecomte du Noüy το 1925. Για τους υπολογισμούς είναι απαραίτητη η μέγιστη δύναμη. Άρα είναι επιτακτική η χρήση ενός συντελεστή βελτίωσης f , και η εξίσωση παίρνει την μορφή:

$$F = w_{ring} + 4\pi R\sigma f \Leftrightarrow \sigma = \frac{F}{4\pi R} f \quad (12)$$

1.2.5 Η μέθοδος ανύψωσης στομίου

Ακόμη μια μέθοδος που αξίζει να αναφερθεί για την μέτρηση της επιφανειακής τάσης είναι η **μέθοδος ανύψωσης στομίου (capillary rise method)**. Η μέθοδος αυτή υπολογίζει την επιφανειακή τάση σε συνάρτηση της εφαρμοσμένης πίεσης στο στόμιο. Έχει παρατηρηθεί όμως ότι παρουσιάζει σημαντικά προβλήματα, καθώς για να εξαχθούν έγκυρα αποτελέσματα πρέπει ο μηνίσκος του υγρού στον τριχοειδή σωλήνα να είναι εφαπτόμενος στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα αυτού.

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην καταγραφή των γωνιών της αντανάκλασης των ακτινών φωτός που περιλούζουν την γυάλινη επιφάνεια του σωλήνα και του υγρού [36]. Στην **Εικόνα 15** γίνεται προφανής η επίδραση της επιφανειακής τάσης, καθώς λόγω των δυνάμεων συνοχής των μορίων εξισορροπείται η δύναμη του βάρους του υγρού.



Εικόνα 15: Η μέθοδος ανύψωσης στομίου [37]

Η εξίσωση που λύνοντας την βρίσκουμε το ύψος του υγρού μέσα στον σωλήνα δίνεται από την εξής εξίσωση:

$$h = 2\sigma \cos\theta / \rho r g \quad (13)$$

όπου:

$\cos\theta$: το συνημίτονο της γωνίας επαφής στο ανώτατο σημείο του υγρού στον σωλήνα

r : η ακτίνα του σωλήνα.[m]

ρ : η πυκνότητα του προς μελέτη υγρού.[kg/m³]

Με γνωστό το ύψος του υγρού στον σωλήνα, ένα μέγεθος που μπορεί πολύ εύκολα να υπολογιστεί ακόμα και με ένα απλό μέτρο, μπορεί πολύ εύκολα να βρεθεί η επιφανειακή τάση.

1.2.6 Η μέθοδος Jaeger

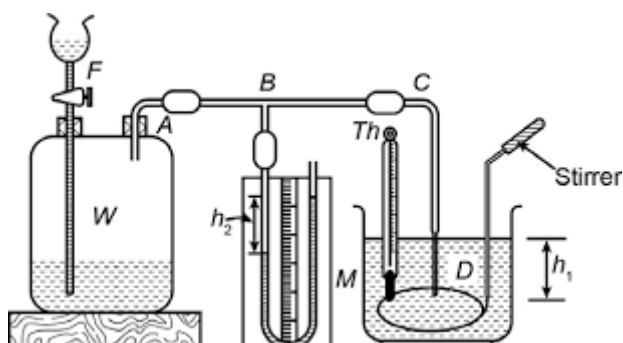
Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι μια παραλλαγή της μεθόδου ανύψωσης στομίου [38]. Η βασική διαφορά αυτών των 2 μεθόδων είναι το γεγονός ότι στην μέθοδο Jaeger για την υπολογιστική διαδικασία είναι αναγκαίο να μεταβάλλονται πολλές παράμετροι ταυτόχρονα, με αποτέλεσμα να μπορεί κανείς να εξαγάγει σωστά αποτελέσματα και έγκυρα. Η βασική πειραματική διάταξη για την διενέργεια πειραμάτων με βάση την συγκεκριμένη μέθοδο βασίζεται σε έναν απλό σωλήνα σε σχήμα C. Πιο αναλυτικά, το ένα άκρο του σωλήνα αυτού είναι βυθισμένο μέσα σε μια δεξαμενή με νερό, ενώ στην απόληξη του άλλου άκρου είναι τοποθετημένο ένα εξάρτημα που ονομάζεται μπουκάλι Would [39]. Το συγκεκριμένο εξάρτημα είναι χρήσιμο καθώς συμβάλει στην ροή αέρα μέσα στην πειραματική διάταξη **(Εικόνα 16)**. Αυτό το εξάρτημα προκαλεί αύξηση της πίεσης μέσα στην διάταξη. Σαν αποτέλεσμα, σχηματίζεται μια σταγόνα, μέσω της οποίας μπορεί να υπολογιστεί η πίεση της με την βοήθεια του μανομέτρου μέσω της εξίσωσης:

$$P_1 = P_{atm} + \rho g h \quad (14)$$

Στην συνέχεια, μια άλλη σταγόνα σχηματίζεται, της οποίας η πίεση μπορεί να γραφεί ως:

$$P_1 = P_{atm} + \rho_{water} x g \quad (15)$$

$$\Delta P = P_1 - P_2 = g(h\rho - x\rho) = \frac{2\sigma}{r} \quad (16)$$



Εικόνα 16: Η μέθοδος Jaeger [40]

1.3 Τα χαρακτηριστικά της μεθόδου pendant drop

Όλες οι μέθοδοι που έχουν αναφερθεί νωρίτερα, σαν σκοπό έχουν τον υπολογισμό της επιφανειακής τάσης. Αλλά ο τρόπος που γίνεται ο συγκεκριμένος υπολογισμός διαφέρει ανάλογα με την μέθοδο, και σαν αποτέλεσμα, η ευκολία, η δυσκολία αντίστοιχα, η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων όλα είναι συνάρτηση της επιλεγμένης μεθόδου [27].

Η μέθοδος pendant drop σαν βασικό χαρακτηριστικό της είναι η απλότητα της μεθόδου, καθώς η μέθοδος αυτή δεν απαιτεί δυσεύρετο εξοπλισμό όπως πχ εξειδικευμένα μηχανήματα, αλλά μια απλή σύριγγα, μια κάμερα για τις φωτογραφίες, μια αντλία έγχυσης σταγόνας και σωληνάκια για την κίνηση του προς μελέτη υγρού.

Επιπρόσθετο πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η ακρίβεια, καθώς παρέχει αποτελέσματα ακριβή και συγκρίσιμα με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας.

Επιπλέον αξίζει να αναφερθεί ότι με την επιλογή της μεθόδου αυτής, επιτυγχάνεται μια ευελιξία, καθώς μπορούμε να πάρουμε τιμές για πολλές διεπιφάνειες, όπως υγρό-υγρό, υγρό-αέριο και διάφορα γαλακτώματα.

Τέλος, επιτρέπει τη μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς της επιφανειακής τάσης με την πάροδο του χρόνου, πχ, για να παρατηρηθεί η δράση επιφανειοδραστικών ουσιών.

Παρόλα τα θετικά της μεθόδου αυτής, δεν γίνεται να μην αναφερθεί κανείς στα μειονεκτήματά της. Για να επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια, πρέπει να καταγραφεί το προφίλ της σταγόνας όσο καλύτερα γίνεται. Για να γίνει αυτό, απαιτείται κάμερα υψηλής ακρίβειας η οποία δεν επηρεάζεται από τυχόν κινήσεις της σταγόνας. Οπότε γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι ναι μεν η μέθοδος αυτή είναι απλή με μια πρωταρχική ματιά, αλλά η απλότητα δυστυχώς δεν συνεπάγεται πάντα με ευκολίες. Για τον υπολογισμό της επιφανειακής τάσης, οι μέθοδοι που περιλαμβάνουν την γεωμετρία των σταγόνων έχει παρατηρηθεί ότι βρίσκουν ευρεία χρήση στον χώρο της επιστήμης και των πειραμάτων γενικά. Αν και μας δίνουν καλά αποτελέσματα και γενικά είναι ευρέως διαδεδομένα, έχει παρατηρηθεί ότι όσο το σχήμα της σταγόνας τείνει να γίνει σφαιρικό, τα αποτελέσματα τείνουν να αποκλίνουν [41], [42].

Οι άλλες μέθοδοι, όπως πχ η μέθοδος Du Noüy ring απαιτεί το ειδικό δαχτυλίδι [43], πράγμα που την καθιστά την συγκεκριμένη μέθοδο όχι τόσο απλή για την διενέργεια των πειραμάτων. Η μέθοδος ανύψωσης στομίου σαν βασικό μειονέκτημα έχει το γεγονός ότι για την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων απαιτεί ο μηνίσκος του υγρού να είναι εφαιπτόμενος στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα [44].

Κεφάλαιο 2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζονται αναλυτικά τα εξαρτήματα της πειραματικής διάταξης, καθώς και η συνολική πειραματική διαδικασία. Τα πειράματα έλαβαν χώρα στον Εργαστήριο Ρευστομηχανικής και Στροβιλομηχανών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας απαιτήθηκε η δημιουργία μιας σταγόνας, η οποία θα σχηματίζεται με την βοήθεια μιας απλής σύριγγας. Η διάταξη που περιγράφεται είναι στηριζόμενη πάνω σε μια βάση κατασκευασμένη από 3D printer στο εργαστήριο Μηχανικής και Αντοχής των Υλικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Για τις φωτογραφίες, γίνεται χρήση μιας κάμερας. Στην συνέχεια, για την ανάλυση της εικόνας και κατ' επέκταση του τελικού αποτελέσματος γίνεται ανάπτυξη λογισμικού με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Python.

Για τις βελόνες, επειδή η απόληξη τους είναι μυτερή καθώς προορίζονται για φαρμακευτική χρήση, κρίθηκε απαραίτητο σε πρώτη φάση να κοπούν οι άκρες τους για να είναι κάθετη η τρύπα και κατ' επέκταση να σχηματίζονται σωστά οι σταγόνες για την καλύτερη επεξεργασία τους. Εξίσου σημαντικό είναι το γεγονός ότι απέξω είναι εμποτισμένες με διάφορες ουσίες οι οποίες απλώνουν ένα πέπλο ανακρίβειας στα αποτελέσματα, οπότε καθίσταται σαφές ότι λόγω των ουσιών αυτών, οι μετρήσεις αυτές επηρεάζονται, καθώς αλλάζουν οι διαμοριακές δυνάμεις του εκάστοτε υγρού. Για τον λόγο αυτό, οι βελόνες τοποθετήθηκαν σε διάλυμα ακετόνης και έμειναν εκεί για μια μέρα.

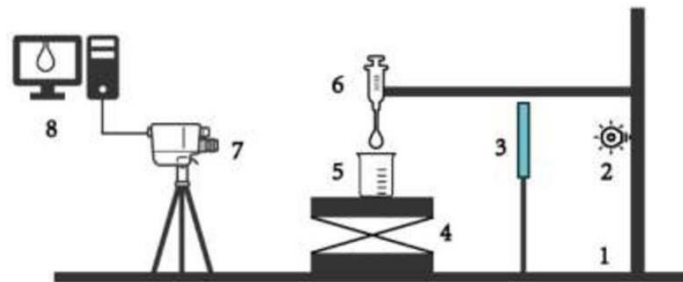
2.1 Τα εξαρτήματα του πειράματος

Η πειραματική διάταξη στην τελική της μορφή αποτελείται από τα εξής μέρη-εξαρτήματα:

- 1 κάμερα
- 1 προβολέα φωτός
- 1 σύριγγα

- 1 βάση στήριξης
- 1 διαχύτη φωτός

Το σκαρίφημα της πειραματικής διάταξης εμφανίζεται αναλυτικά στην **Εικόνα 17**:



Εικόνα 17: Το σκαρίφημα της πειραματικής διάταξης [45]

Παρακάτω παρατίθενται φωτογραφίες των εξαρτημάτων της πειραματικής διάταξης:



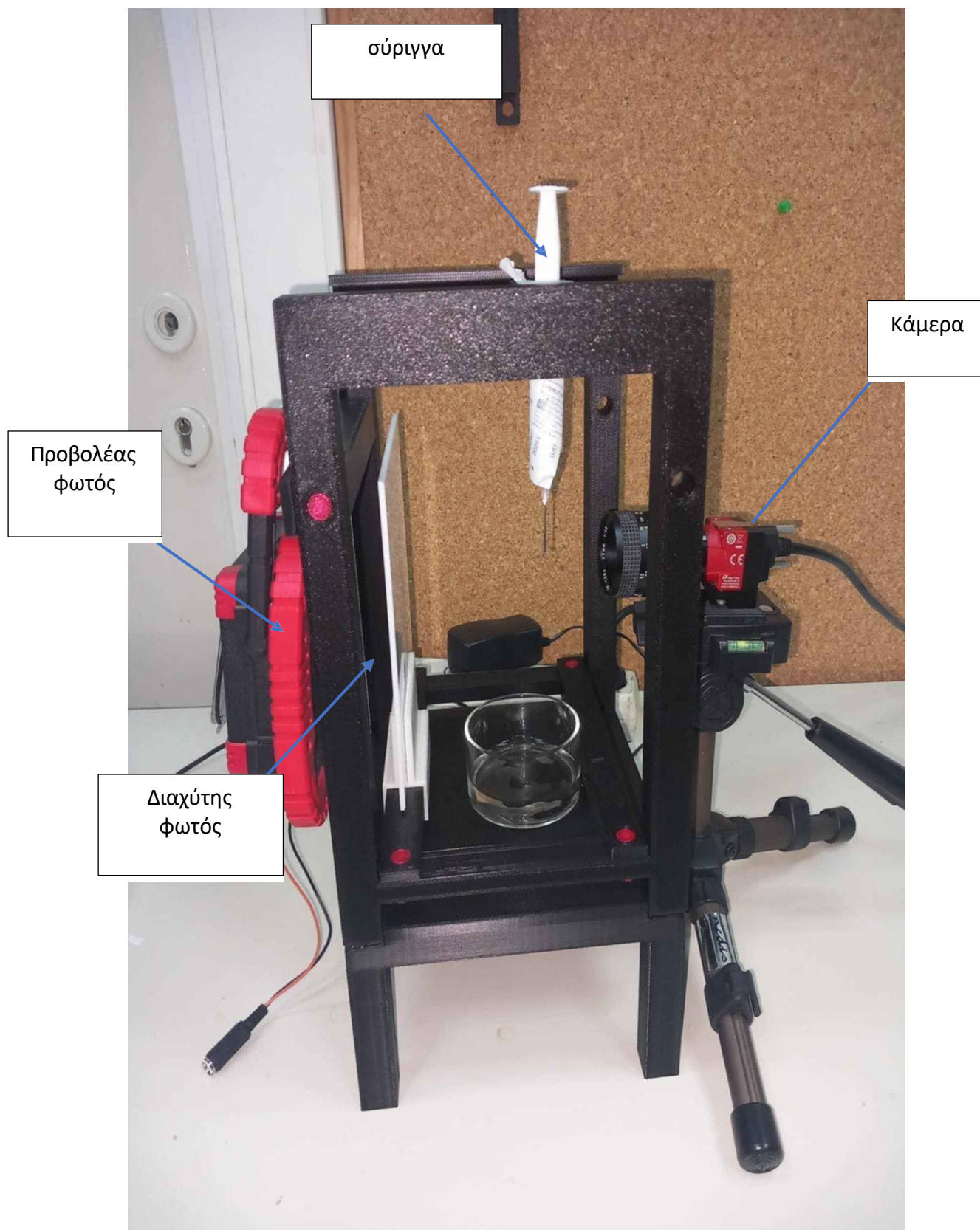
Εικόνα 18: Ο διαχύτης φωτός



Εικόνα 19: Ο προβολέας φωτός



Εικόνα 20: Η κάμερα



Εικόνα 21: Η συνολική πειραματική διάταξη

2.2 Η διαδικασία της μελέτης και του σχεδιασμού της βάσης στήριξης

Για την στήριξη της πειραματικής διάταξης, κρίθηκε απαραίτητη η μελέτη και ο σχεδιασμός μιας βάσης όπου πάνω της θα περιεχόταν όλα τα προαναφερθέντα εξαρτήματα. Η βάση ήταν καθοριστικής σημασίας να είναι καταρχάς πρακτική στην χρήση για να διευκολύνονται τα πειράματα, αλλά ταυτόχρονα μικρή σε μέγεθος και ελαφριά για να μπορεί να γίνεται εύκολα η μεταφορά της.

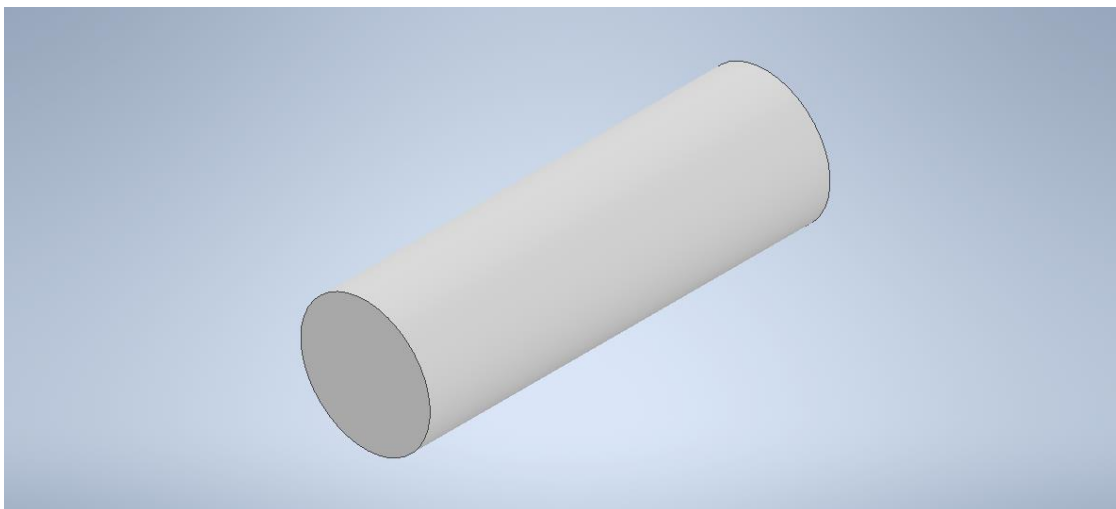
Πριν την ανάπτυξη της βάσης, έπρεπε να υπολογιστούν οι απαραίτητες διαστάσεις της, με σκοπό να σχεδιαστεί. Για το ύψος της βάσης, καθώς και για την απόσταση της κάμερας από την σύριγγα και το φως, έπρεπε οι διαστάσεις να είναι τέτοιες ώστε να απαθανατίζονται όσο το δυνατόν καλύτερες φωτογραφίες γίνεται.

Ο σχεδιασμός της βάσης έγινε με τη χρήση σχεδιαστικού λογισμικού. Η κατασκευή έγινε με 3D εκτύπωση στο εργαστήριο Μηχανικής και Αντοχής των Υλικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Το μοντέλο του εκτυπωτή είναι ο QIDI XMAM 3 (**Εικόνα 22**). Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι PLA (πολυγαλακτικό οξύ). Παρακάτω παρατίθεται μια φωτογραφία του:

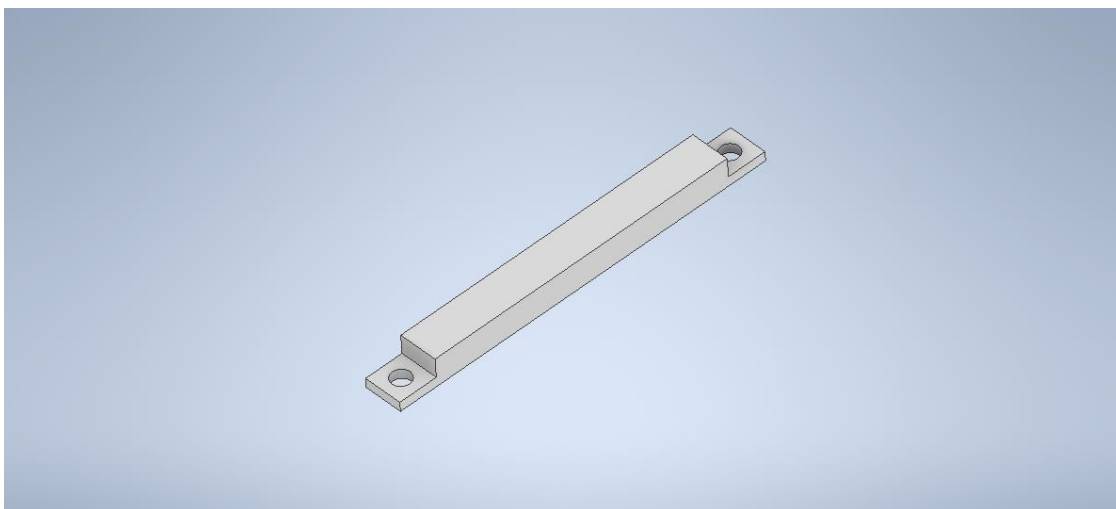


Εικόνα 22: Ο εκτυπωτής Qidi XMAX 3 [46]

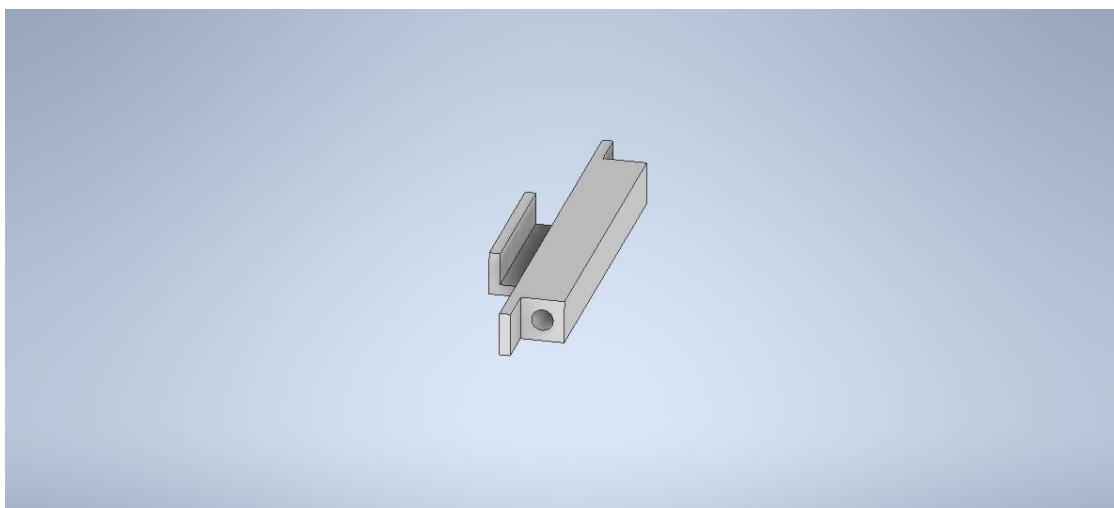
Επειδή οι διαστάσεις της βάσης δεν καθιστούσαν ικανή την εκτύπωση της ως ένα ενιαίο σύνολο, ήταν αναγκαίο να χωριστεί σε επιμέρους τμήματα, τα οποία θα τυπώνονταν ξεχωριστά και στην συνέχεια θα συναρμολογούνταν με την βοήθεια πέρων. Καθώς δεν ήταν γνωστή η ανοχή του εκτυπωτή για τέτοιου είδους συναρμολογήσεις, έγιναν πρώτα δοκιμές με μικρότερα δοκίμια για να κριθούν οι βέλτιστες διαστάσεις. Παρακάτω παρατίθενται οι εικόνες των επιμέρους τμημάτων της βάσης μέσα από το σχεδιαστικό λογισμικό:



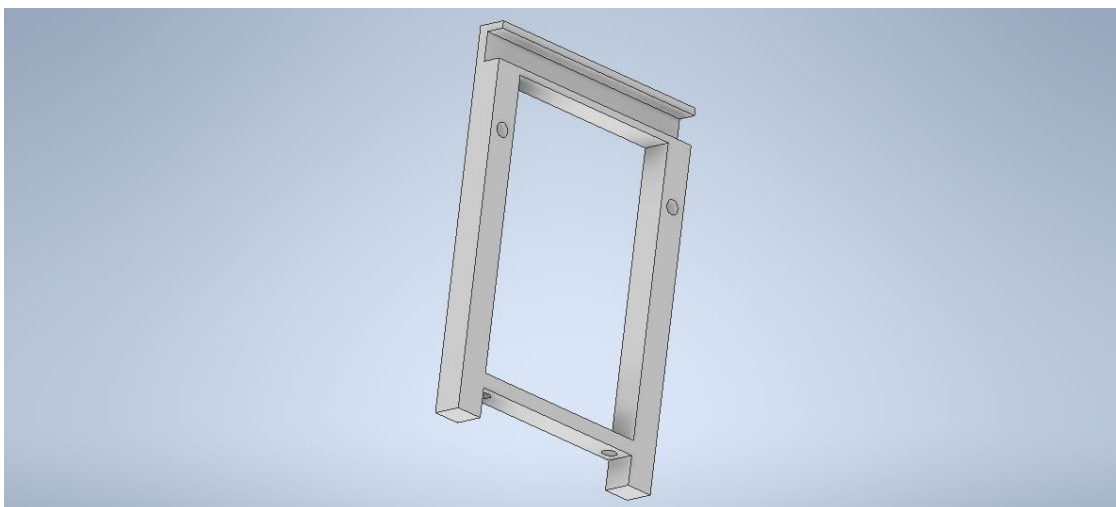
Εικόνα 23: Ο πείρος συναρμολόγησης



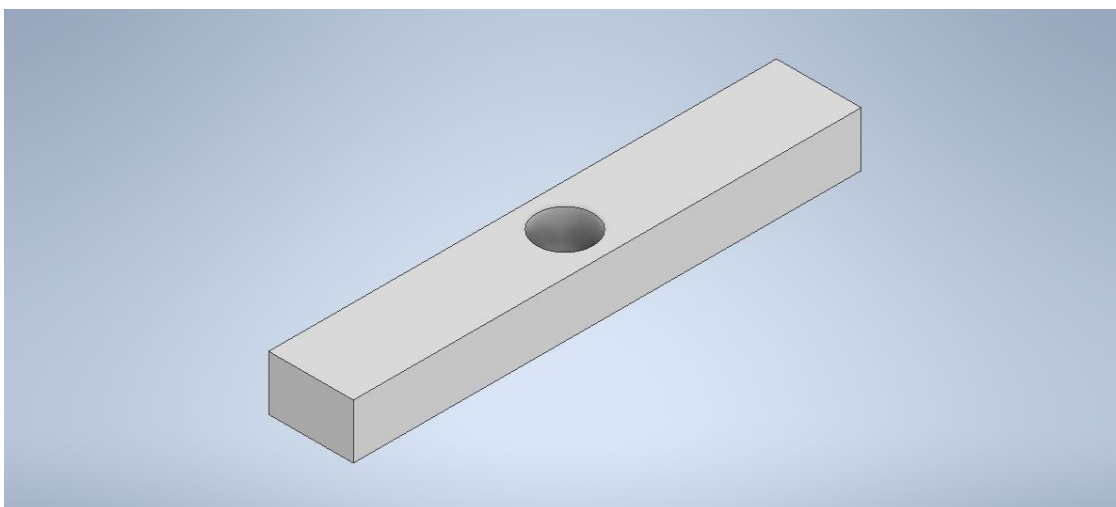
Εικόνα 24: Η κάτω στήριξη της βάσης



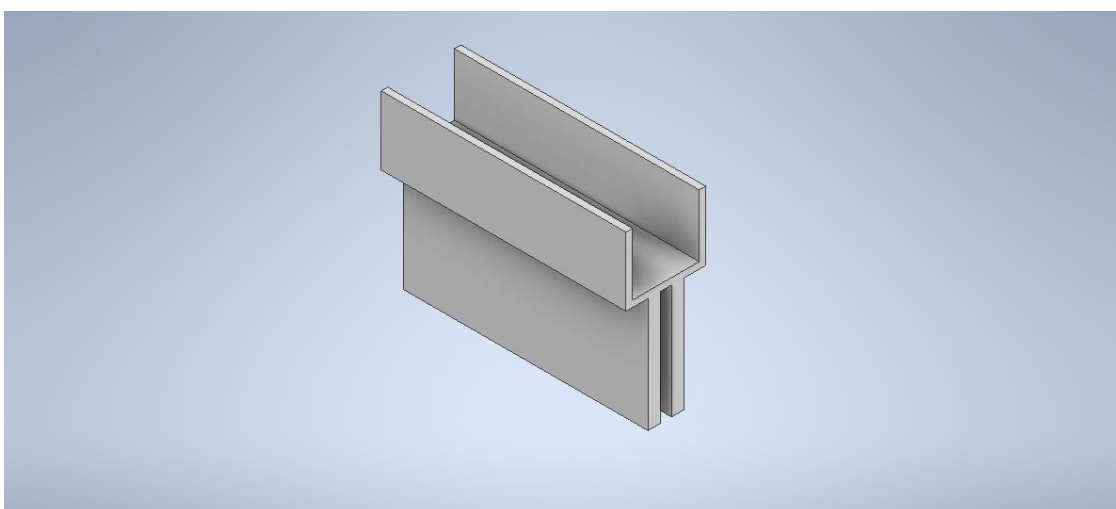
Εικόνα 25: Η βάση όπου κρέμεται το φως



Εικόνα 26: Τα πλάγια τμήματα της βάσης στήριξης



Εικόνα 27: Στήριξη της σύριγγας



Εικόνα 28: Η βάση του διαχύτη φωτός

2.3 Η ανάπτυξη του λογισμικού επεξεργασίας εικόνας

Για την ανάπτυξη του κώδικα, καθώς και για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων, σαν σημείο αναφοράς πέραν της βιβλιογραφίας ήταν και το μετρικό όργανο KRUSS Bubble Pressure Tensiometer BP50 (**Εικόνα 29**). Το συγκεκριμένο εμπορικό μετρικό όργανο έχει και ένα λογισμικό, με βάση το οποίο υπολογίζεται η επιφανειακή τάση. Η μέθοδος που χρησιμοποιεί το συγκεκριμένο όργανο για να υπολογίσει την επιφανειακή τάση είναι η μέθοδος της μέγιστης πίεσης της σταγόνας. Αξίζει να σημειωθεί ότι καθώς τα προς μελέτη υγρά αλλάζουν, θα πρέπει να καθαρίζεται σχολαστικά, όπως επίσης και να αλλάζει το πλαστικό στόμιο για καλύτερα, πιο έγκυρα αποτελέσματα.



Εικόνα 29: Το μετρικό όργανο Kruss Bubble Pressure Tensiometer BP50 [47]

Στα αρχικά στάδια της πειραματικής διαδικασίας για την ανάπτυξη του οργάνου για τα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής, έγιναν μετρήσεις με νερό. Το συγκεκριμένο υγρό επιλέχθηκε καθώς έχει γνωστές ιδιότητες, μεταξύ αυτών και η επιφανειακή του τάση.

Για την διενέργεια του πειράματος μας ήταν απαραίτητη μια φωτογραφική μηχανή. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας χρησιμοποιήθηκε η κάμερα 1800 U-052m-08GTL, και για λογισμικό κάμερας χρησιμοποιήθηκε το Vimba viewer 2.5.0.

Η σύριγγα που έλαβε μέρος στο πείραμα διαθέτει βελόνες μεγέθους 18G και 21G. Για τις ανάγκες της συγκεκριμένης διπλωματικής και για λόγους ασφαλείας, η βελόνα έπρεπε να λειανθεί αφού είχε κοπεί .

Η ανάπτυξη του υπολογιστικού λογισμικού έγινε στο Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Τα χαρακτηριστικά του υπολογιστή που χρησιμοποιήθηκε είναι τα εξής:

Επεξεργαστής: Intel(R) Core i7-8700 CPU 3.2 GHz,

Εγκατεστημένη μνήμη: 1,00 TB(D), 100 GB (C)

Λογισμικό: Windows 10 Professional 64-bit.

Η ανάπτυξη του λογισμικού έγινε με την χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Python. Η επεξεργασία της φωτογραφίας έγινε με την χρήση της βιβλιοθήκης OpenCV στο JetBrains PyCharm Community Edition 2024.1. Για την πλήρη λειτουργικότητα του προγράμματος κρίθηκε απαραίτητη η χρήση του Microsoft Excel.

Στην αρχή μελετήθηκε η έρευνα του S. Fordham [48], με σκοπό να γίνει αντιληπτή η διαδικασία του υπολογισμού της επιφανειακής τάσης, αφού η συγκεκριμένη μεθοδολογία κρίθηκε καλύτερη στα αποτελέσματα και πιο πρακτική στις διάφορες μετρήσεις. Στο συγκεκριμένο άρθρο, η μελετώμενη μέθοδος είναι η Pendant drop (μέθοδος κρεμάμενης σταγόνας). Η εξίσωση που περιγράφει το προφίλ της σταγόνας μπορεί να γραφεί ως:

$$\frac{1}{R} + \frac{\sin \varphi}{x} = 2 + \beta z \quad (17)$$

όπου:

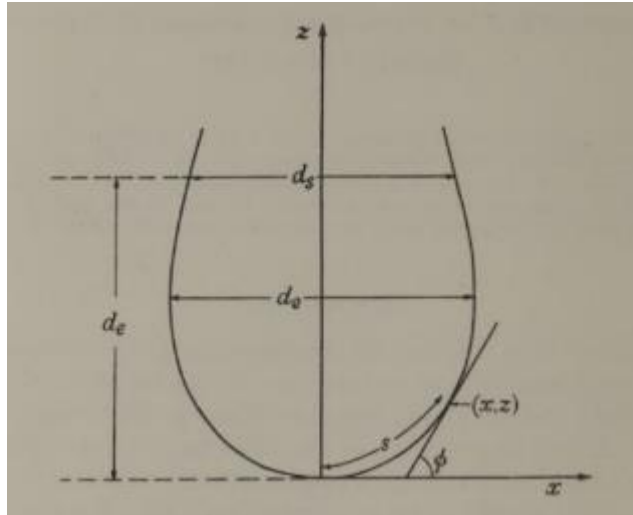
R: η ακτίνα καμπυλότητας στο σημείο (x,z)

φ: η κλίση της καμπύλης στο σημείο (x,z)

$$\beta = - \frac{g\rho R_0^2}{\sigma}$$

σ : την επιφανειακή τάση

R_0 : η ακτίνα καμπυλότητας στο σημείο (0,0)



Εικόνα 30: Σχηματική αναπαράσταση σε ορθοκανονικό σύστημα αξόνων [48]

Αξίζει να σημειωθεί ότι η **Εξίσωση 17** προκύπτει από το ισοζύγιο δυνάμεων εφαρμοσμένο πάνω στην σταγόνα. Επιπλέον, η συμμετρία της σταγόνας παίζει σημαντικό ρόλο, καθώς το σύστημα συντεταγμένων (x,z) είναι έτσι τοποθετημένος ώστε ο άξονας z να είναι άξονας συμμετρίας της σταγόνας.

Η διάμετρος d_e είναι η μέγιστη διάμετρος της σταγόνας, και η διάμετρος d_s είναι η διάμετρος σε απόσταση d_e από το κατώτερο σημείο της σταγόνας. Ορίζεται σαν S ο λόγος των 2 αυτών διαμέτρων ως:

$$S = \frac{d_s}{d_e} \quad (18)$$

Από την εξίσωση (1) προκύπτει τότε με αντικατάσταση:

$$\sigma = \frac{g\rho d_e^2}{H} \quad (19)$$

όπου:

$$\frac{1}{H} = \frac{1}{\beta \left(\frac{de}{b} \right)^2} = \frac{1}{4\beta x e^2} \quad (20)$$

Σε κάθε σημείο (x,z):

$$\frac{d\varphi}{ds} = \frac{1}{\rho} \quad (21)$$

Με αντικατάσταση στην (1) μέσω της (4) προκύπτει ότι:

$$\frac{d\varphi}{ds} = 2 + \beta z - \frac{\sin \varphi}{x} \quad (22)$$

$$\frac{dx}{ds} = \cos \varphi \quad (23)$$

$$\frac{dz}{ds} = \sin \varphi \quad (24)$$

Όπου s το μήκος τόξου του σημείου (x,z) από το (0,0).

Μέσω πειραμάτων που διενεργήθηκαν, εξήχθησαν τιμές για τις παραμέτρους

$$S, \frac{1}{H}$$

Οι τιμές αυτές αποθηκευμένες σε ένα αρχείο .xlsx, χρησιμοποιήθηκαν στον κώδικα για την αριθμητική επίλυση για την εύρεση της επιφανειακής τάσης.

Οι εικόνες που βγάζει η κάμερα είναι ασπρόμαυρες. Μέσω του κώδικα, μετατρέπονται σε gray-scale γιατί έτσι είναι πιο εύκολη η επεξεργασία τους. Καθοριστικής σημασίας είναι η σχετική γωνία του οπτικού πεδίου και της απόληξης της σύριγγας για την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων. Αρχικά, μέσω κατωφλίσωσης (threshold) απομονώνεται η σταγόνα από το

υπόλοιπο σύνολο της φωτογραφίας (η σταγόνα γίνεται άσπρη και το υπόλοιπο περιβάλλον μαύρο). Έπειτα, μέσω της χρωματικής διαφοράς στα pixels που δημιουργήθηκε λόγω του threshold, υπολογίζονται οι διάμετροι d_e και d_s . Ύστερα υπολογίζεται ο λόγος S και μέσω αυτού η τιμή του H . Για τον υπολογισμό του H , χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα του σχετικού πίνακα [48]. Με την χρήση του Microsoft Excel μέσω παρεμβολής εξάχθηκε η παρακάτω εξίσωση:

$$H = 3.2183 \times S^{2.6722} \quad (25)$$

Πίνακας 1: Βιβλιογραφικές τιμές των S, H

S	H	S	H
0.66781	1.09934	0.84437	2.03997
0.68174	1.16068	0.85601	2.11546
0.69540	1.22277	0.86759	2.19255
0.70881	1.28566	0.87911	2.27117
0.72195	1.34934	0.89057	2.34598
0.73489	1.41306	0.90201	2.43368
0.74763	1.47931	0.9134	2.51781
0.76019	1.54566	0.92476	2.60409
0.77259	1.61298	0.93612	2.69287
0.78484	1.68129	0.94741	2.78427
0.79697	1.75067	0.95869	2.87869
0.80898	1.82116	0.96993	2.97663
0.82086	1.89282	0.98115	3.07891
0.83266	1.96571	0.99213	3.18643
0.84190	1.98576	1.0000	3.30152

Τέλος, με αντικατάσταση στην **Εξίσωση 19**, υπολογίζεται η τιμή της επιφανειακής τάσης.

Η ανάπτυξη του λογισμικού αυτού δεν ήταν μια εύκολη διαδικασία, καθώς απαιτήθηκε ένα μεγάλο χρονικό διάστημα. Η αρχική προσέγγιση για τον υπολογισμό των διαμέτρων που είναι απαραίτητες για τον υπολογισμό της επιφανειακής τάσης ήταν με edge detection, δηλαδή υπολογίζονταν οι συντεταγμένες των σημείων που αποτελούν το σύνορο της σταγόνας. Το

κύριο μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης ήταν ότι δεν ήταν λειτουργική σε όλες τις φωτογραφίες, καθώς ορισμένες φωτογραφίες απαιτούσαν μεγάλο αριθμό σημείων, πράγμα το οποίο αυξάνει σημαντικά την υπολογιστική ισχύ. Οπότε γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η συγκεκριμένη μέθοδος έπρεπε να αλλάξει για να αναπτυχθεί ένα λογισμικό ευρείας χρήσης.

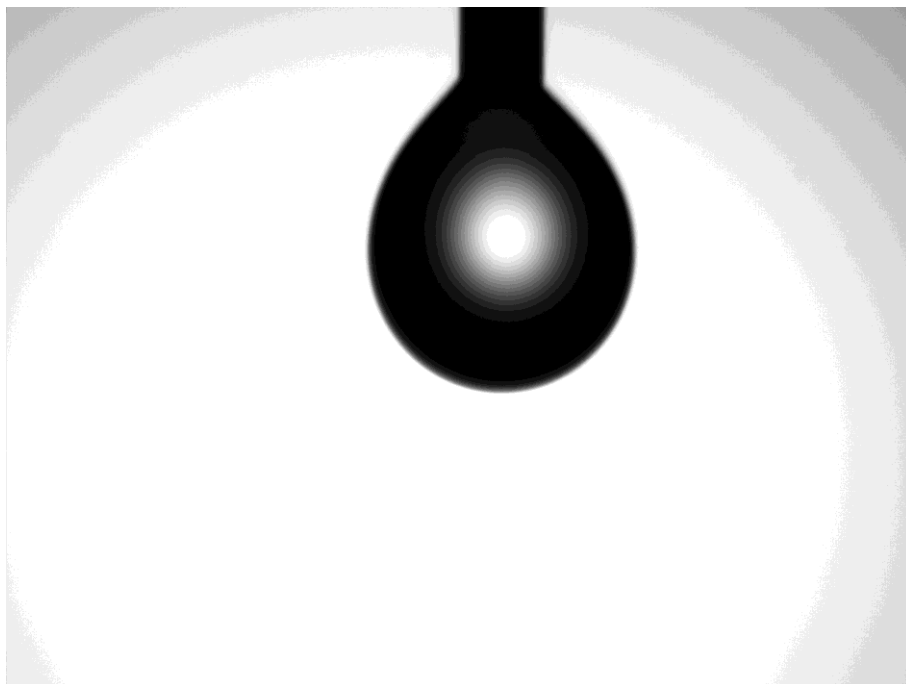
Στα πρώτα πειράματα που έγιναν, μετρήθηκε η επιφανειακή τάση του νερού [49] με την προαναφερθείσα διαδικασία. Μετά τα αποτελέσματα, παρατηρήθηκε ότι μεταξύ του μετρικού οργάνου KRUSS και του πειράματος υπήρχε μια απόκλιση της τάξης του 2%.

Αρχικά ήταν επιθυμητή η μέτρηση καθαρών ουσιών με περιβάλλον αέρα, για να γίνουν τυχόν βελτιώσεις στον κώδικα σε περίπτωση λαθών.

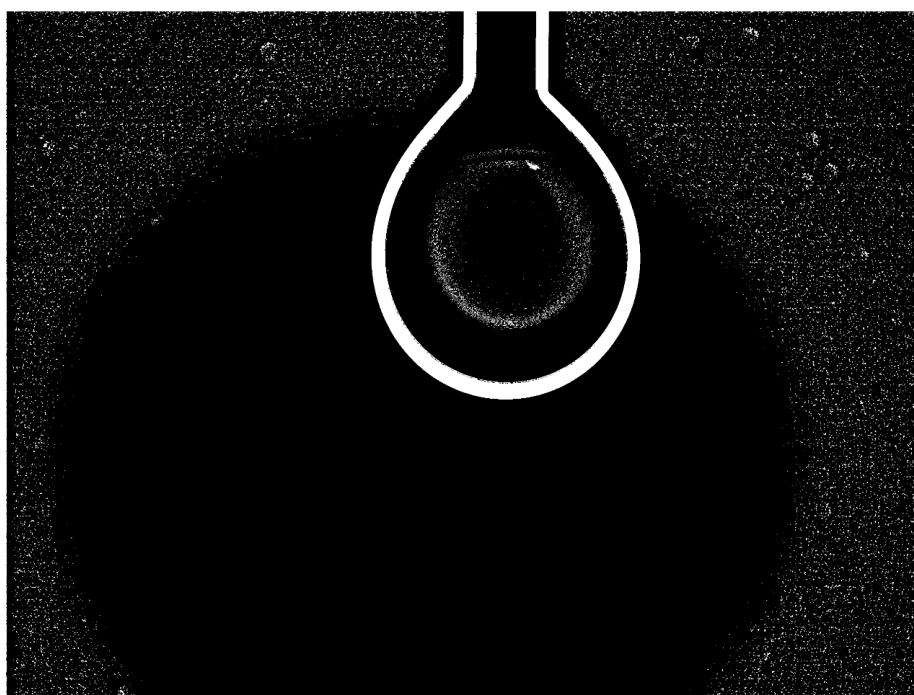
Επιπρόσθετα, έγιναν μετρήσεις επιφανειακής τάσης μεθανόλης για περαιτέρω έλεγχο της ορθότητας του κώδικα.

Επόμενο βήμα στην πειραματική διαδικασία για την βελτίωση του μετρικού οργάνου είναι η μέτρηση της επιφανειακής τάσης σε μείγματα υγρών.

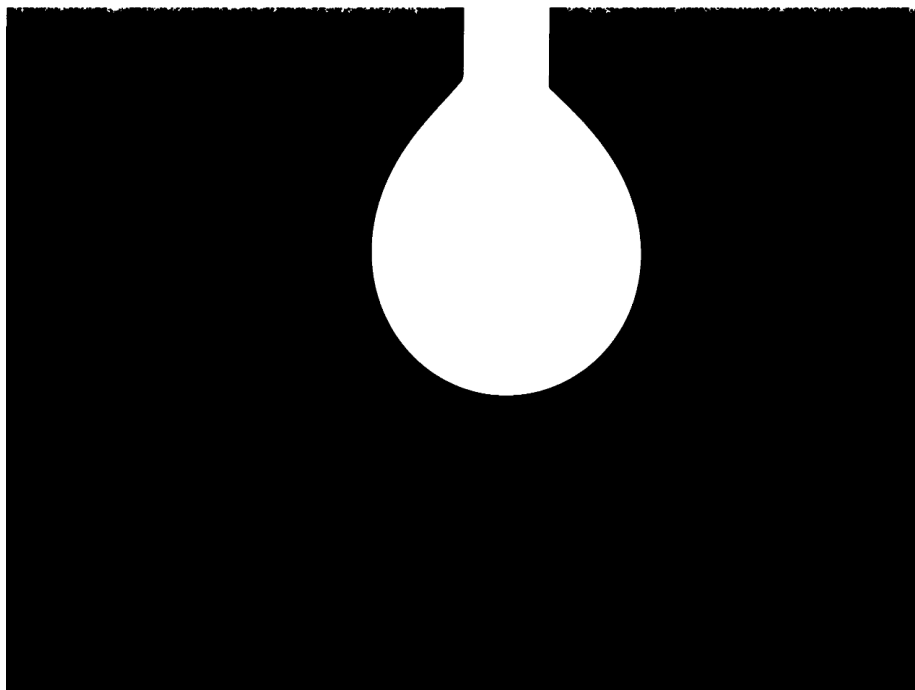
Παρακάτω παρατίθενται βήμα-βήμα η διαδικασία της επεξεργασίας στην οποία υποβάλλονται οι εικόνες για την εξαγωγή του τελικού αποτελέσματος όπως τις επεξεργάζεται το λογισμικό:



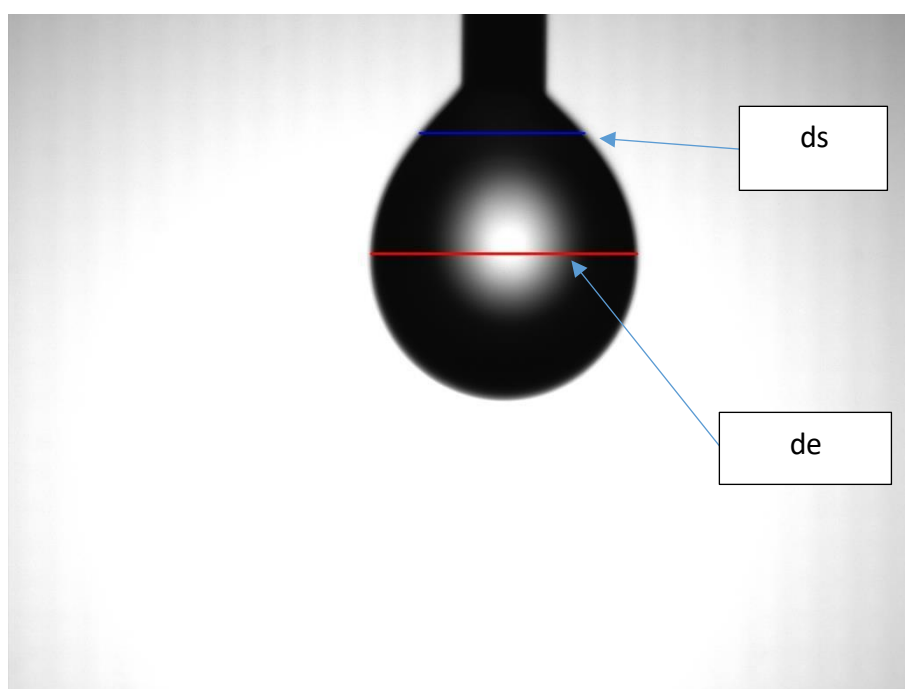
Εικόνα 31: 1ο στάδιο-η λήψη της φωτογραφίας



Εικόνα 32: 2ο στάδιο- μετατροπή σε binary



Εικόνα 33: 3ο στάδιο-εφαρμογή threshold



Εικόνα 34: 4ο στάδιο-υπολογισμός των διαμέτρων

2.4 Ανάλυση της πειραματικής διάταξης

Για να διενεργηθούν τα πειράματα, σε πρώτη φάση πρέπει να συνδεθεί το φως στο ρεύμα με στόχο τον φωτισμό της διάταξης για να γίνει δυνατή η λήψη και η επεξεργασία των φωτογραφιών. Στην συνέχεια, η σταγόνα δημιουργείται μέσω της σύριγγας όπου είναι τοποθετημένη πάνω στην βάση μεταξύ του φωτός και της κάμερας. Ύστερα, με την βοήθεια της κάμερας και του λογισμικού χρήσης της, λαμβάνονται οι φωτογραφίες του προς μελέτη υγρού. Τέλος, με την βοήθεια του λογισμικού για τον υπολογισμό της επιφανειακής τάσης, λαμβάνονται οι πειραματικές μετρήσεις. Η διαδικασία απαιτεί μεγάλη προσοχή και συγκέντρωση κατά την διενέργεια της, καθώς όπως θα αναλυθεί και παρακάτω, μια λάθος κίνηση μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά μετρικά σφάλματα.

Για την δημιουργία των διαφόρων μειγμάτων, των οποίων μετρήθηκε η επιφανειακή τάση, έγινε χρήση ενός ογκομετρικού σωλήνα. Οι διάφορες αναλογίες έγιναν αρχικά μετρούμενες κατ' όγκο, και στην συνέχεια με την βοήθεια του προγράμματος Microsoft Excel και της παρακάτω εξίσωσης:

$$V_2 = \frac{V_1 \rho_2 (1 - x)}{x \rho_1}$$

(26)

όπου:

V_1, V_2 : οι όγκοι των συστατικών του μείγματος

ρ_1, ρ_2 : οι πυκνότητες των συστατικών του μείγματος

x : το ποσοστό μάζας του 2^{ου} συστατικού

έγινε η αναγωγή σε αναλογίες μαζών.

Για δεδομένο όγκο μεθανόλης (V_1) υπολογίστηκε ο απαιτούμενος όγκος νερού (V_2) ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή αναλογία μάζας στο διάλυμα (x).

Κεφάλαιο 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται τα αποτελέσματα της διπλωματικής, καθώς και τα συμπεράσματα που μπορεί να εξάγει κανείς μέσω της προαναφερθείσας διαδικασίας.

Στα πρώτα στάδια των μετρήσεων που διενεργήθηκαν στο εργαστήριο, για να γίνει αντιληπτό εάν το λογισμικό λειτουργούσε ικανοποιητικά, έγιναν μετρήσεις με νερό. Το νερό έχει γνωστές ιδιότητες, οπότε με την μέθοδο της δοκιμής και του σφάλματος το λογισμικό πήρε την μορφή που έχει σήμερα ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια.

Αξίζει να σημειωθεί ότι όλες οι μετρήσεις λάβανε χώρα σε θερμοκρασίες δωματίου και ατμοσφαιρική πίεση. Γενικά παρατηρήθηκε ότι οι θερμοκρασίες που γίνανε τα πειράματα δεν επηρέαζαν σημαντικά τα αποτελέσματα.

Για να ελεγχθεί η ακρίβεια και η συνέπεια του οργάνου, κρίθηκε σημαντικό να γίνουν μετρήσεις με το εμπορικό όργανο Kruss. Στην συνέχεια αυτών των μετρήσεων, έγιναν μετρήσεις με το προς μελέτη όργανο. Αφού τα αποτελέσματα για το νερό ήταν τα επιθυμητά, για την συνέχεια των πειραμάτων έγιναν μετρήσεις με μείγματα νερού με μεθανόλη. Οι μετρήσεις και τα αποτελέσματα για τις διάφορες αναλογίες του συγκεκριμένου μείγματος με χρήση της βελόνας **18G** παρουσιάζονται στον πίνακα 2. Το σφάλμα 1 (Σ1) αναφέρεται ως προς την βιβλιογραφία, ενώ το σφάλμα 2 (Σ2) ως προς το Kruss [50]:

Πίνακας 2: Μελέτη μείγματος νερού-μεθανόλης με 18G

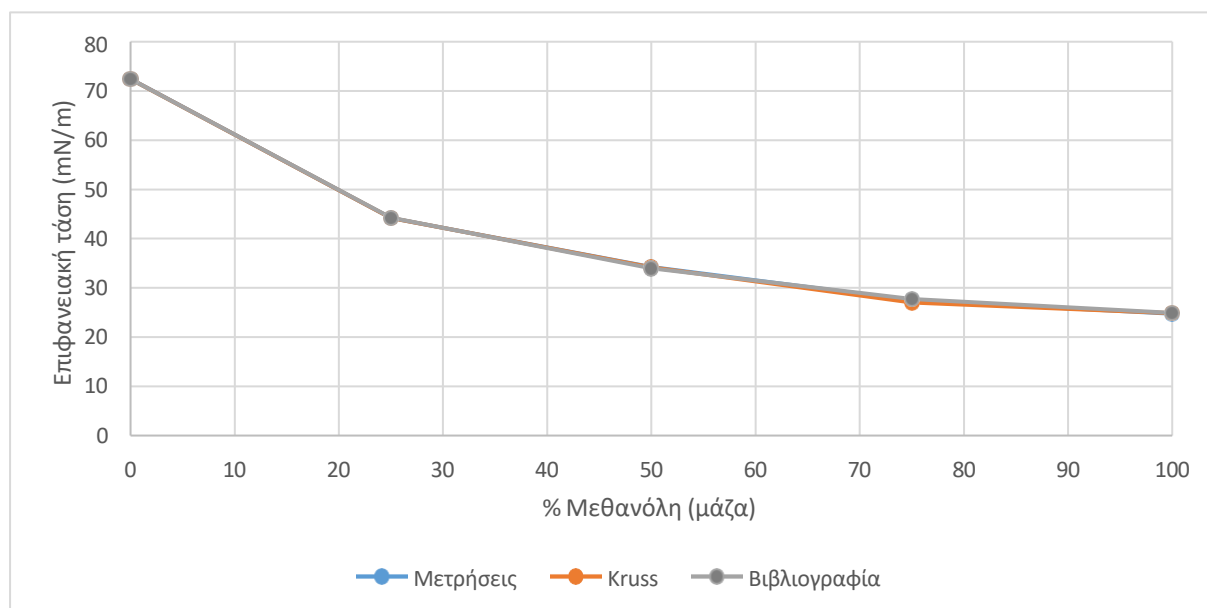
Μάζα (% μεθανόλη)	Μετρήσεις (mN/m)	Βιβλιογραφία (mN/m)	Kruss (mN/m)	Σφάλμα 1 (%)	Σφάλμα2 (%)
0	72.45	72.4	72.45	0.069	0.069
25	44.16	44.25	44.2	0.113	0.113
50	34.26	34	34.3	0.882	0.292
75	27.5	27.75	27.5	0.901	1.852
100	24.75	24.92	24.75	0.682	0.442

Το μέσο σφάλμα 1 ισούται με 0.524%, ενώ το αντίστοιχο μέσο σφάλμα 2 ισούται με 0.530%.

Εύκολα μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι με βάση τον πίνακα 2 ότι η επιφανειακή τάση του μείγματος μειώνεται καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα του σε μεθανόλη. Αυτό ισχύει και είναι λογικό, καθώς η μεθανόλη επιδρά σαν επιφανειοδραστική ουσία και μειώνει την επιφανειακή τάση των διαλυμάτων [51].

Οι τιμές από τις μετρήσεις είναι κοντά με εκείνες της βιβλιογραφίας και του εμπορικού οργάνου, πράγμα το οποίο τονίζει την συνέπεια των αποτελεσμάτων. Οι αποκλίσεις των μετρήσεων μπορεί να οφείλονται σε πειραματικά σφάλματα, όπως για παράδειγμα στην μη-καθαρότητα του εξοπλισμού και των υλικών της πειραματικής διάταξης, καθώς και στην ακρίβεια των οργάνων. Όσο η περιεκτικότητα της μεθανόλης αυξάνεται στα μείγματα, τόσο το σχετικό σφάλμα αυξάνεται, γεγονός που επιδεικνύει την δυσκολία των μετρήσεων μειγμάτων με χαμηλή τιμή επιφανειακής τάσης.

Παρακάτω παρατίθενται τα προαναφερθέντα αποτελέσματα σε μορφή διαγράμματος:



Διάγραμμα 1: διάγραμμα επιφανειακής τάσης με ποσοστό μάζας μεθανόλης με 18G

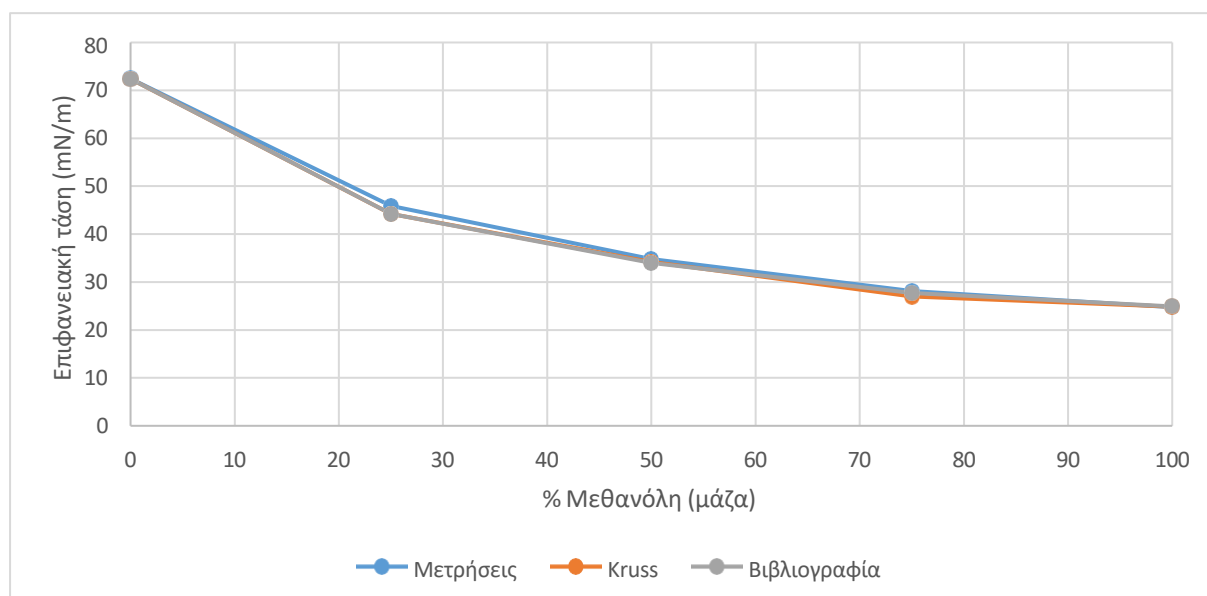
Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας καθώς και οι αντίστοιχες τιμές που μετρήθηκαν με την βοήθεια του Kruss, όπως επίσης και τα σχετικά σφάλματα σε μορφή πίνακα για την βελόνα **21G**:

Πίνακας 3: Μελέτη μείγματος νερού-μεθανόλης με 21G

Μάζα (% μεθανόλη)	Μετρήσεις (mN/m)	Βιβλιογραφία (mN/m)	Kruss (mN/m)	Σ 1 (%)	Σ 2 (%)
0	72.4	72.4	72.45	0.069	0.069
25	45.46	44.25	45.87	2.734	0.113
50	34.82	34	34.82	2.412	1.813
75	28.1	27.75	28.1	1.261	4.074
100	24.75	24.92	24.75	0.682	0.442

Το μέσο σφάλμα 1 ισούται με 1.43%, ενώ το αντίστοιχο μέσο σφάλμα 2 ισούται με 1.3%.

Παρακάτω παρατίθενται τα παραπάνω αριθμητικά αποτελέσματα σε διάγραμμα:

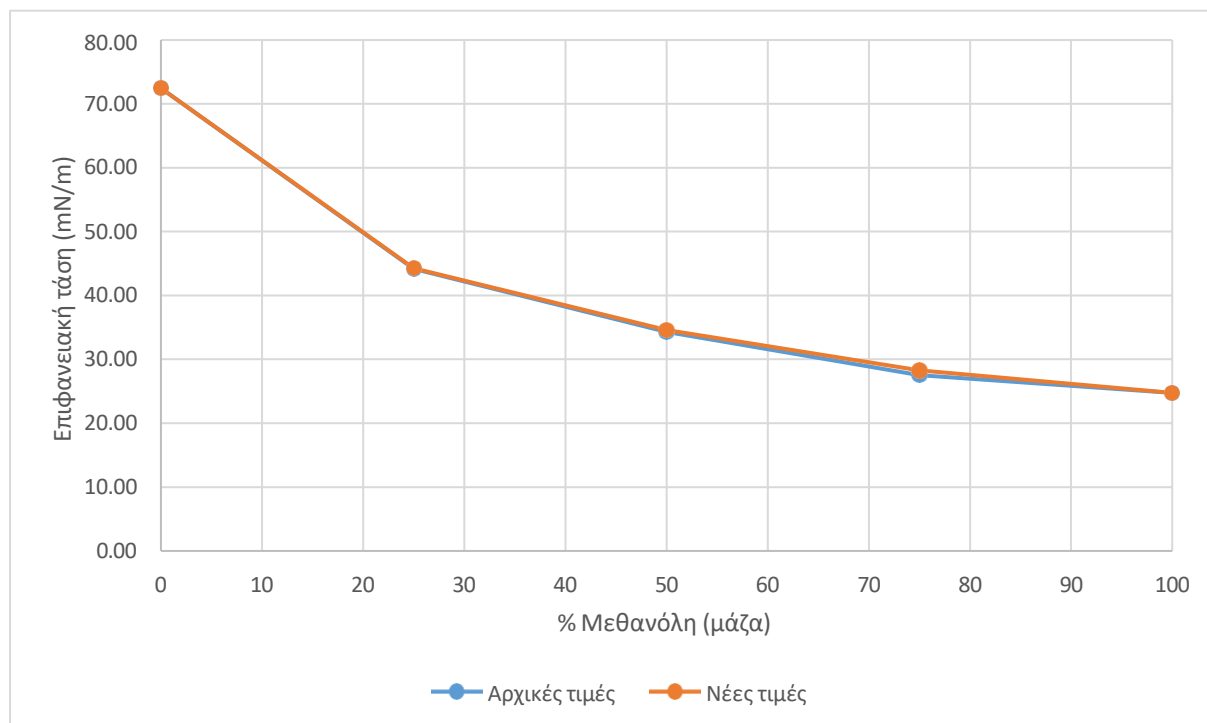


δ

Διάγραμμα 2: Διάγραμμα επιφανειακής τάσης με ποσοστό μάζας μεθανόλης με 21G

Για να εξεταστεί η ακρίβεια του οργάνου που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας, κρίθηκε απαραίτητη η λήψη νέων μετρήσεων με την εκ νέου

δημιουργία των προς μελέτη μιγμάτων. Τα πειράματα έγιναν με την βελόνα 18G και το νέο διάγραμμα με τις νέες τιμές παρατίθεται παρακάτω:



Διάγραμμα 3: οι νέες μετρήσεις σε σύγκριση με τις παλιές

Με μια πρώτη ματιά εύκολα μπορεί κανείς να αντιληφθεί την ακρίβεια του οργάνου, καθώς οι μετρήσεις που λήφθηκαν τις διαφορετικές ημέρες δεν έχουν μεγάλη απόκλιση μεταξύ τους. Αυτή η υπάρχουσα απόκλιση υπάρχει εξαιτίας του γεγονότος ότι τα διαλύματα δημιουργήθηκαν εκ νέου, με αποτέλεσμα να μην έχουν την ίδια σύσταση τις μέρες των μετρήσεων αλλά να είναι ελάχιστα διαφορετική σε σχέση με τα προηγούμενα και οι φωτογραφίες πιθανώς να είναι διαφορετικές από μέρα σε μέρα. Μετά το πέρας αυτών των μετρήσεων έγινε ο βαθμός ακρίβειας και συνέπειας του οργάνου κατανοητός.

Κεφάλαιο 4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται τα συμπεράσματα από τις διάφορες μετρήσεις που έγιναν στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

Καθ' όλη την διάρκεια των πειραμάτων ορισμένες φορές παρουσιάζονταν διάφορα ζητήματα με τις φωτογραφίες. Το πρόβλημα ήταν κυρίως στην γεωμετρία της σταγόνας αλλά και στην κίνηση του αέρα. Πιο συγκεκριμένα, η κίνηση του αέρα επηρέαζε την σταγόνα, με αποτέλεσμα οι εικόνες να ήταν παραμορφωμένες και κατ' επέκταση οι τιμές να ήταν λάθος. Για αυτό κρίθηκε απαραίτητη η απόκτηση μιας κάμερας με global shutter για την εξάλειψη αυτής της δυσκολίας.

Μια εκτίμηση της συμβολή της κάμερας με global shutter είναι ότι ήταν καθοριστική, καθώς μέσω του global shutter οι διάφορες ταλαντώσεις οι οποίες επηρέαζαν την σταγόνα μπορούσαν να μειωθούν δραστικά. Αυτό καθίσταται δυνατό καθώς το rolling shutter δεν διαβάζει την φωτογραφία γραμμή-γραμμή, αλλά όλη μαζί σε σύνολο [36], με αποτέλεσμα να βελτιωθεί σε σημαντικό βαθμό η ποιότητα των φωτογραφιών και κατ' επέκταση τα αποτελέσματα να βελτιωθούν σημαντικά.

Παρατηρήθηκε ότι η μέγιστη διάμετρος της σταγόνας επηρεάζει σημαντικά τα τελικά αποτελέσματα (διάγραμμα 4). Πιο αναλυτικά, όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, για να υπολογίσουμε την επιφανειακή τάση, θέλουμε 2 γεωμετρικά χαρακτηριστικά, την μέγιστη διάμετρο της σταγόνας καθώς και την διάμετρο στο ύψος όπου είναι σε απόσταση ίση με την τιμή της μέγιστης διαμέτρου από το χαμηλότερο σημείο της σταγόνας. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι άμα η μέγιστη διάμετρος είναι υπερβολικά μεγάλη, η 2η απαραίτητη διάμετρος θα είναι εκτός του ορίου που ορίζει η σταγόνα. Επομένως και το αποτέλεσμα θα είναι λάθος. Αυτή η παρατήρηση ήρθε να θέσει έναν περιορισμό στον υπολογισμό που γίνεται με την συγκεκριμένη μέθοδο.

Με βάση τα 2 διαγράμματα (διάγραμμα 1 και διάγραμμα 2) όπου απεικονίζουν και τα σχετικά σφάλματα, γίνεται αντιληπτό ότι τα καλύτερα αποτελέσματα της τιμής της επιφανειακής τάσης επιτυγχάνονται με την βελόνα με την μεγαλύτερη διάμετρο, δηλαδή η 18G. Αυτό ισχύει

γιατί με την μεγαλύτερη βελόνα σχηματίζονται μεγαλύτερες σταγόνες, με επακόλουθο να μειώνεται η αβεβαιότητα στον υπολογισμό των διαμέτρων και κατ' επέκταση της επιφανειακής τάσης. Με βάση μια ανάλυση αβεβαιότητας [36] η οποία παρατίθεται παρακάτω, εξάγονται τα εξής αποτελέσματα:

$$\sigma = \frac{\rho g d e^2}{H}$$

$$\text{όπου: } H = a s^\beta = a \left(\frac{ds}{de} \right)^\beta$$

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{\rho g d e^2}{a d s^\beta d e^{-\beta}} = \frac{\rho g d e^{2+\beta}}{a d s^\beta} \Rightarrow \\ \frac{d\sigma}{\sigma} &= \frac{\frac{\rho g}{a} \frac{(2+\beta) d_e^2 d(d_e)}{d_s^\beta} + \frac{\rho g d_e^{2+\beta} - \beta}{a} \frac{d(d_s)}{d_s^{\beta+1}}}{\frac{\rho g d_e^{2+\beta}}{a d_s^\beta}} = (2+\beta) \frac{d(d_e)}{d_e} + \frac{-\beta d(d_s)}{d_s} \\ \frac{\Delta\sigma}{\sigma} &= (2+\beta) \frac{\Delta(de)}{de} + \beta \frac{\Delta(ds)}{ds} \end{aligned} \quad (27)$$

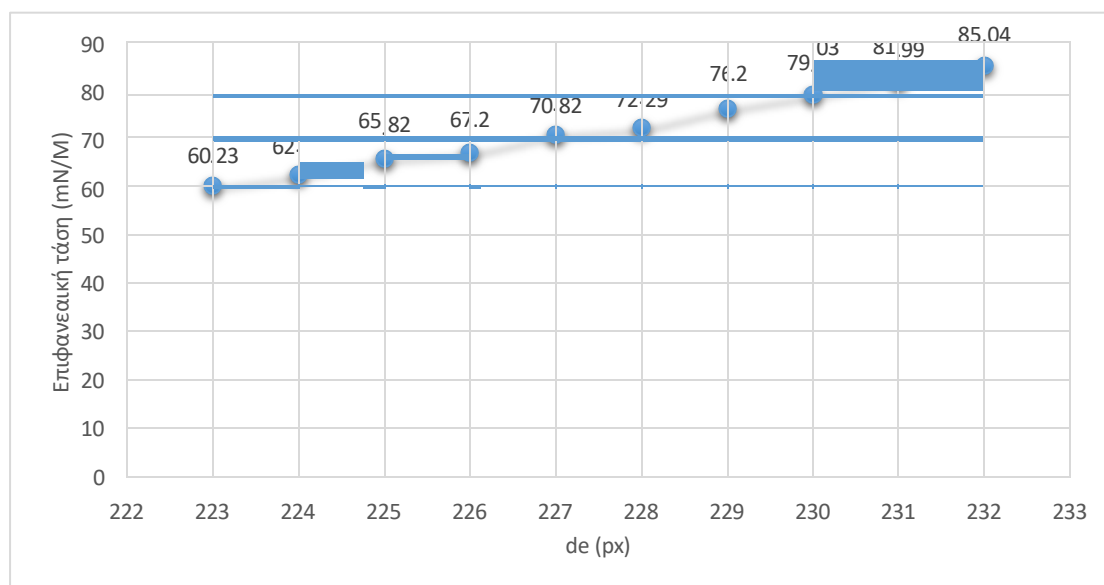
Με βάση τα παραπάνω, επειδή μαθηματικά ισχύει ότι:

$$(2+\beta) > \beta$$

προκύπτει ότι η επίδραση της de είναι πολύ σημαντικότερη από εκείνη της ds . Αυτό δεν χρειάζεται μαθηματική απόδειξη για να το καταλάβει κανείς, καθώς η σταγόνα στο ανώτερο σημείο της έχει απότομη κλίση. Με δεδομένο ότι η μέθοδος υπολογισμού απαιτεί την μέγιστη διάμετρο της σταγόνας για να υπολογίσει την άλλη διάμετρο η οποία είναι σε σημείο με απότομη κλίση, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι έστω και 1 pixel μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τον τελικό υπολογισμό για την επιφανειακή τάση, και σαν αποτέλεσμα στην

αβεβαιότητα (διάγραμμα 4). Για αυτό και ο περιορισμός που τέθηκε νωρίτερα στο κεφάλαιο 3 στην ουσία “επέλεγε” της φωτογραφίες με τις οποίες θα μπορούσε να γίνει ο υπολογισμός της επιφανειακής τάσης. Σε περίπτωση όπου η σταγόνα έχει μεγάλη διάμετρο d_e , το λογισμικό μπορεί να αναλύσει την εικόνα της καλύτερα, καθώς η ανάλυση της καθιστά ικανό τον σωστό υπολογισμό της. Επιπρόσθετα, εάν το μέγεθος της σταγόνας είναι μεγάλο εξαιτίας του d_e , το d_s δεν υπολογίζεται στα όρια της βελόνας αλλά μέσα στα όρια σε περιοχή όπου η κλίση είναι πιο ομαλή. Για αυτό και στην συγκεκριμένη υπολογιστική μεθοδολογία απαιτείται μεγάλη προσοχή κατά την διάρκεια του σχηματισμού της σταγόνας.

Για να γίνει κατανοητή η σημαντικότητα του ορθού υπολογισμού της d_e και κατ’ επέκταση του μεγέθους της σταγόνας στον υπολογισμό της επιφανειακής τάσης, έγινε ανάλυση μιας εικόνας νερού όπου το πειραματικό αποτέλεσμα είχε σχεδόν μηδενική απόκλιση από εκείνο της βιβλιογραφίας. Στην αρχή, υπολογίστηκε σε αυτήν την εικόνα το d_e , το d_s και στην συνέχεια της επιφανειακής τάσης. Για να εξαχθούν συμπεράσματα, υπολογίστηκε η d_s και η επιφανειακή τάση στην περίπτωση όπου η d_e είχε απόκλιση $\pm 2\%$. Παρακάτω παρατίθεται ένα σχετικό διάγραμμα:



Διάγραμμα 4: μεταβολή της διαμέτρου d_e και της μετρούμενης επιφανειακής τάσης

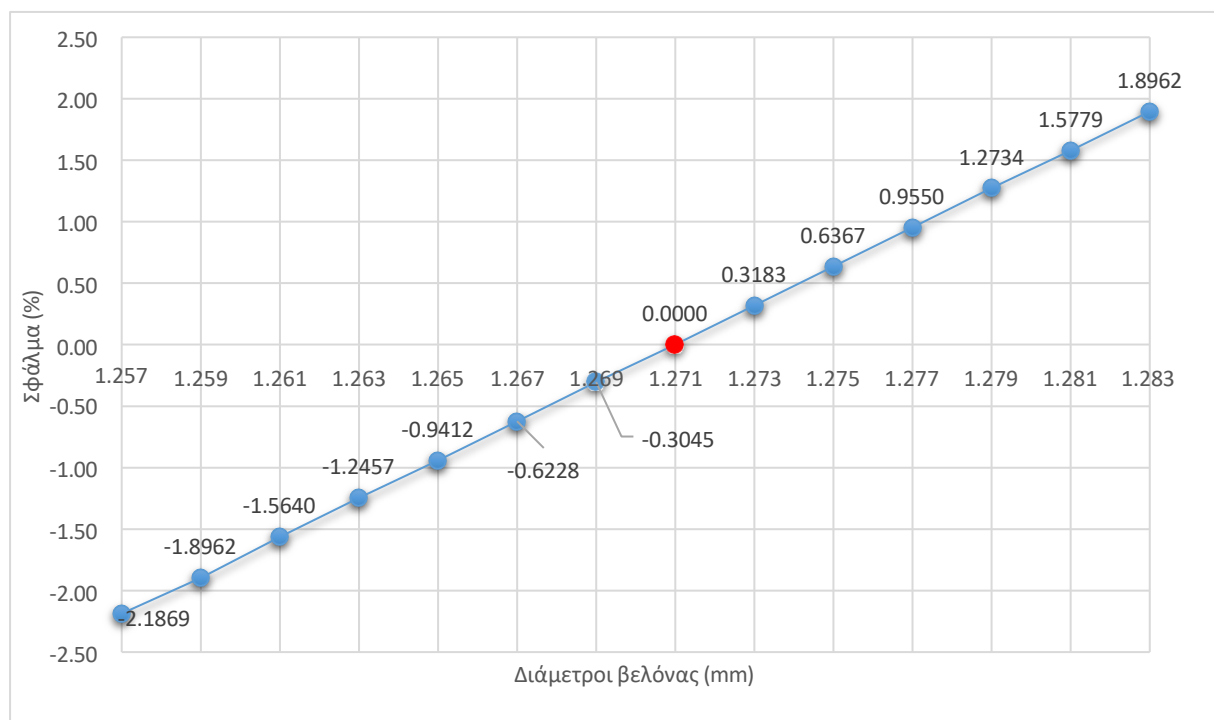
Συνοψίζοντας, ο υπολογισμός του d_e καθορίζει τον υπολογισμό του d_s και κατ’ επέκταση τον υπολογισμό της επιφανειακής τάσης.

Η βελόνα, για την οποία η διάμετρος δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται από παρτίδα σε παρτίδα, έρχεται από τον κατασκευαστή με κάποιες ανοχές. Το σύστημα με το οποίο μετράται η διάμετρος της βελόνας είναι το σύστημα Birmingham gauge [37]. Σύμφωνα με αυτό το σύστημα, για 18G η ονομαστική διάμετρος της βελόνας είναι 1.271mm με ανοχές από τον κατασκευαστή $\pm 0.013\text{mm}$.

Σε αυτό το σημείο κρίθηκε απαραίτητη μια ανάλυση ευαισθησίας για να γίνει αντιληπτό εάν μεγάλη απόκλιση από την ονομαστική διάμετρο της βελόνας καθορίζει σε μεγάλο βαθμό ή όχι το πειραματικό αποτέλεσμα. Στο **Διάγραμμα 5** εμφανίζονται τα σχετικά σφάλματα των μετρήσεων για τις διάφορες ανοχές στην διάμετρο της βελόνας. Το σφάλμα υπολογίζεται ως προς την τιμή της επιφανειακής τάσης απιονισμένου νερού, η μέτρηση της οποίας έγινε με την ονομαστική διάμετρο βελόνας (1.27 mm). Το σφάλμα υπολογίστηκε με τον εξής μαθηματικού τύπο:

$$Error = \frac{\sigma - 72.25}{72.25} \times 100 \quad (28)$$

όπου σ η μετρούμενη επιφανειακή τάση για κάθε διάμετρο βελόνας.



Διάγραμμα 5: διαμέτροι βελόνας με σχετικά σφάλματα

Για εύρος τιμών της διαμέτρου της βελόνας από 1.257mm μέχρι και 1.283mm μια πρώτη παρατήρηση που μπορεί κανείς να κάνει είναι το γεγονός ότι η συνάρτηση των 2 αυτών παραμέτρων είναι γραμμική. Συνεπώς, όσο μεγαλύτερη είναι η απόκλιση της διαμέτρου της βελόνας από την ονομαστική της τιμή, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η τιμή του σφάλματος.

Κεφάλαιο 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

5.1 Συμπεράσματα

Από την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής, εξάχθηκαν αρκετά συμπεράσματα τα οποία μπορεί κανείς να εκμεταλλευτεί για να βελτιωθεί το μετρικό όργανο. Ορισμένα από αυτά είναι τα εξής:

- Η μέθοδος pendant drop δίνει ακριβή αποτελέσματα σε σχέση με τις άλλες υπολογιστικές μεθόδους.
- Το μετρικό όργανο είναι πολύ ευαίσθητο σε εξωτερικούς παράγοντες (αέρας, ποιότητα εικόνας κ.λπ.).
- Ο ακριβής υπολογισμός των διαμέτρων της σταγόνας παίζει καθοριστικό ρόλο.
- Στις μετρήσεις που έγιναν δεν παίζει καθοριστικό ρόλο η θερμοκρασία.

5.2 Προτάσεις βελτίωσής για το μέλλον

Σε αυτήν την διπλωματική εργασία μελετήθηκε η μελέτη και η ανάπτυξη ενός οργάνου μέτρησης επιφανειακής τάσης.

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής, όπως είναι εύκολα κατανοητό, δεν γίνεται να καλυφθούν όλες οι τυχόν απορίες που δημιουργήθηκαν κατά το χρονικό αυτό διάστημα της εκπόνησης της διπλωματικής.

Παρόλη την ενασχόληση με το συγκεκριμένο θέμα, μερικά από τα ερωτήματα που έχουν μείνει αναπάντητα και θα μπορούσαν να αποτελέσουν μελλοντικό αντικείμενο περαιτέρω ενασχόλησης και μελέτης είναι τα εξής:

- Εξέλιξη του οργάνου για τη δυνατότητα μέτρησης διεπιφανειακής τάσης ανάμεσα σε δύο μη αναμίξιμα . Αυτό το είδος μέτρησης δεν μπορεί να επιτευχθεί με το εμπορικό όργανο Kruss.

- Δυνατότητα μέτρησης επιφανειακής τάσης με περαιτέρω μεθόδους (max bubble pressure κ.λπ.)
- Ανάλυση αβεβαιότητας για τις παραμέτρους S,H (για την εκτίμηση της σημαντικότητας)
- Αυτοματοποίηση πειραματικής διάταξης με την χρήση του syringe pump για καλύτερης ποιότητα σταγόνες
- Τοποθέτηση γυάλινων πλακών περιμετρικά για αποφυγή αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον
- Τοποθέτηση θερμομέτρου καθώς η επιφανειακή τάση εξαρτάται ως έναν βαθμό από την θερμοκρασία

5.3 Οικονομική ανάλυση της πειραματικής διάταξης

Το συνολικό κόστος της πειραματικής διάταξης διαμορφώνεται ως εξής:

1. Αποκλειστικό κόστος οργάνου:
 - Βάση: υλικό – PLA (25€/kg) – τιμή: $0.795 \times 25 = 19.8\text{€}$
 - Σύριγγες και βελόνες – τιμή: τα 100 τεμάχια 5€
2. Semi-flexible cost:
 - Κάμερα 1800 U-052m-08GTL- τιμή: 530€
 - Τρίποδο Nedis-Μίνι – τιμή: 20€
 - Προβολέας- τιμή: 20€
3. Flexible cost:
 - Υπολογιστής- τιμή: 600€

Βιβλιογραφία

- [1] “Intermolecular Forces in Action-Surface Tension Viscosity and Capillary Action.”
- [2] E. Gammon, *Γενική Χημεία*, 6η έκδοση. Τραυλός, 2011.
- [3] A. J. Stone, “The Theory of Intermolecular Forces”.
- [4] S. Facts, “Surface Tension.” [Online]. Available: <https://www.sciencefacts.net/surface-tension.html>
- [5] S. Khandekar, A. K. Jaiswal, and G. Sahu, “Spray cooling: From droplet dynamics to system level perspectives,” in *Advances in Heat Transfer*, vol. 54, Elsevier, 2022, pp. 135–177. doi: 10.1016/bs.aiht.2022.07.002.
- [6] H. Mukundarajan, T. C. Bardon, D. H. Kim, and M. Prakash, “Surface tension dominates insect flight on fluid interfaces,” *J. Exp. Biol.*, vol. 219, no. 5, pp. 752–766, Mar. 2016, doi: 10.1242/jeb.127829.
- [7] “Gerris lacustris.” Wikipedia. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Gerris_lacustris
- [8] “surface tension. Forces acting on molecules of a liquid and Floating objects. Vector diagram.” [Online]. Available: <https://www.shutterstock.com/image-vector/surface-tension-forces-acting-on-molecules-691806790>
- [9] S. Popinet, “Numerical Models of Surface Tension,” *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 50, no. 1, pp. 49–75, Jan. 2018, doi: 10.1146/annurev-fluid-122316-045034.
- [10] “Droplet Photos Pictures, Images and Stock Photos.” iStockphoto LP. [Online]. Available: <https://www.istockphoto.com/photos/droplet-photos>
- [11] M. C. Butler Ellis, C. R. Tuck, and P. C. H. Miller, “How surface tension of surfactant solutions influences the characteristics of sprays produced by hydraulic nozzles used for pesticide application,” *Colloids Surf. Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 180, no. 3, pp. 267–276, May 2001, doi: 10.1016/S0927-7757(00)00776-7.
- [12] “Discrete Phase Model (DPM): Introduction to Sprays.” MR CFD. [Online]. Available: <https://www.mr-cfd.com/dpm-spray-an-introduction/>
- [13] M. Tariq, M. G. Freire, B. Saramago, J. A. P. Coutinho, J. N. C. Lopes, and L. P. N. Rebelo, “Surface tension of ionic liquids and ionic liquid solutions,” *Chem Soc Rev*, vol. 41, no. 2, pp. 829–868, 2012, doi: 10.1039/C1CS15146K.
- [14] “Presentation of Ionic Liquid for Energy Research at the FTAL Meeting 2021.” Hochschule für Technik und Architektur Freiburg. [Online]. Available: <https://www.heia-fr.ch/de/anwendungsorientierte-forschung/institute/chemtech/news/ionic-liquid-for-energy-research/>
- [15] “Design of a touch sensation application including surface tension sample using a haptic device in engineering education _ Enhanced Reader.”
- [16] T. Karbowiak, F. Debeaufort, and A. Voilley, “Importance of Surface Tension Characterization for Food, Pharmaceutical and Packaging Products: A Review,” *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, vol. 46, no. 5, pp. 391–407, Jun. 2006, doi: 10.1080/10408390591000884.
- [17] “Hygiene and disinfection in the processed food industry.” PROQUIMIA. [Online]. Available: <https://www.proquimia.com/en/food-industry/hygiene-processed-foods/>
- [18] V. N. Kazakov, A. A. Udod, I. I. Zinkovych, V. B. Fainerman, and R. Miller, “Dynamic surface tension of saliva: General relationships and application in medical diagnostics,” *Colloids Surf. B Biointerfaces*, vol. 74, no. 2, pp. 457–461, Dec. 2009, doi: 10.1016/j.colsurfb.2009.06.010.

- [19] X. Zhang *et al.*, "The Determination of Surface Tension of Traditional Chinese Medicine Tablet," *J. Mod. Phys.*, vol. 03, no. 12, pp. 1878–1881, 2012, doi: 10.4236/jmp.2012.312236.
- [20] S. Lauren, "Why is surface tension important?" Linked In. [Online]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/why-surface-tension-important-susanna-lauren>
- [21] M. Gugliotti, M. S. Baptista, M. J. Politi, Todd P. Silverstein, and Carl D. Slater, "Surface Tension Gradients Induced by Temperature: The Thermal Marangoni Effect," *J. Chem. Educ.*, vol. 81, no. 6, p. 824, Jun. 2004, doi: 10.1021/ed081p824.
- [22] B. Christopher, "Tears of Wine and the Marangoni Effect." COMSOL. [Online]. Available: <https://www.comsol.com/blogs/tears-of-wine-and-the-marangoni-effect>
- [23] "On the calculation of surface tension from measurements of pendant drops," *Proc. R. Soc. Lond. Ser. Math. Phys. Sci.*, vol. 194, no. 1036, pp. 1–16, Jul. 1948, doi: 10.1098/rspa.1948.0063.
- [24] F. K. Hansen and G. Rodsrud, "Surface Tension by Pendant Drop".
- [25] A. Morita, D. Carastan, and N. Demarquette, "Influence of drop volume on surface tension evaluated using the pendant drop method," *Colloid Polym. Sci.*, vol. 280, no. 9, pp. 857–864, Sep. 2002, doi: 10.1007/s00396-002-0694-z.
- [26] A. M. Worthington, "IV. Note on a point in the theory of pendent drops," *Lond. Edinb. Dublin Philos. Mag. J. Sci.*, vol. 19, no. 116, pp. 46–48, Jan. 1885, doi: 10.1080/14786448508627638.
- [27] J. D. Berry, M. J. Neeson, R. R. Dagastine, D. Y. C. Chan, and R. F. Tabor, "Measurement of surface and interfacial tension using pendant drop tensiometry," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 454, pp. 226–237, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.jcis.2015.05.012.
- [28] "Sodium Analyzer." INDUSTRY PLAZA. [Online]. Available: <https://www.industry-plaza.com/sodium-analyzer-p125097980.html>
- [29] V. B. Fainerman, R. Miller, and P. Joos, "The measurement of dynamic surface tension by the maximum bubble pressure method," *Colloid Polym. Sci.*, vol. 272, no. 6, pp. 731–739, Jun. 1994, doi: 10.1007/BF00659287.
- [30] K. J. Mysels, "The maximum bubble pressure method of measuring surface tension, revisited," *Colloids Surf.*, vol. 43, no. 2, pp. 241–262, Jan. 1990, doi: 10.1016/0166-6622(90)80291-B.
- [31] "Maximum bubble pressure method." Wikipedia. [Online]. Available: <https://courses.washington.edu/mengr553/MaxBubble.pdf>
- [32] R. Luo, D. Zhang, Z. Zeng, and R. L. Lytton, "Effect of surface tension on the measurement of surface energy components of asphalt binders using the Wilhelmy Plate Method," *Constr. Build. Mater.*, vol. 98, pp. 900–909, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.125.
- [33] "What is Surface Tension?" KYOWA. [Online]. Available: https://www.face-kyowa.co.jp/english/en_science/en_what_Surface_tension.html
- [34] B.-B. Lee, E.-S. Chan, P. Ravindra, and T. A. Khan, "Surface tension of viscous biopolymer solutions measured using the du Nouy ring method and the drop weight methods," *Polym. Bull.*, vol. 69, no. 4, pp. 471–489, Aug. 2012, doi: 10.1007/s00289-012-0782-2.
- [35] Durgesh Kawale, "Influence of dynamic surface tension on foams: Application in gas well deliquification.," 2012, *Unpublished*. doi: 10.13140/RG.2.1.1539.2241.
- [36] T. W. Richards and E. K. Carver, "A critical study of the capillary rise method of determining surface tension, with data for water, benzene, toluene, chloroform, carbon

- tetrachloride, ether and dimethyl aniline.," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 43, no. 4, pp. 827–847, Apr. 1921, doi: 10.1021/ja01437a012.
- [37] D. Theunissen, "Advancing Atomic Force Microscopy for Microscale Imaging of Ink on Paper Fibers." Eindhoven University of Technology. [Online]. Available: <https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/312727047/1573020-PaperFibersOnAFM.pdf>
- [38] R. C. Brown, "CIII. On Jaeger's method as applied to the determination of the surface tension of mercury," *Lond. Edinb. Dublin Philos. Mag. J. Sci.*, vol. 6, no. 39, pp. 1044–1055, Nov. 1928, doi: 10.1080/14786441108564684.
- [39] R. G. Clausen, "Oxygen Consumption in Fresh Water Fishes," *Ecology*, vol. 17, no. 2, pp. 216–226, Apr. 1936, doi: 10.2307/1931461.
- [40] "STUDY OF TEMPERATURE VARIATION OF SURFACE TENSION OF A LIQUID." THE PEOPLE'S UNIVERSITY. [Online]. Available: <https://egyankosh.ac.in/bitstream/123456789/67458/1/Experiment-7.pdf>
- [41] S. M. I. Saad, Z. Policova, and A. W. Neumann, "Design and accuracy of pendant drop methods for surface tension measurement," *Colloids Surf. Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 384, no. 1–3, pp. 442–452, Jul. 2011, doi: 10.1016/j.colsurfa.2011.05.002.
- [42] N. J. Alvarez, L. M. Walker, and S. L. Anna, "A non-gradient based algorithm for the determination of surface tension from a pendant drop: Application to low Bond number drop shapes," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 333, no. 2, pp. 557–562, May 2009, doi: 10.1016/j.jcis.2009.01.074.
- [43] B.-B. Lee, E.-S. Chan, P. Ravindra, and T. A. Khan, "Surface tension of viscous biopolymer solutions measured using the du Nouy ring method and the drop weight methods," *Polym. Bull.*, vol. 69, no. 4, pp. 471–489, Aug. 2012, doi: 10.1007/s00289-012-0782-2.
- [44] V. Vinš, M. Fransen, J. Hykl, and J. Hrubý, "Surface Tension of Supercooled Water Determined by Using a Counterpressure Capillary Rise Method," *J. Phys. Chem. B*, vol. 119, no. 17, pp. 5567–5575, Apr. 2015, doi: 10.1021/acs.jpcb.5b00545.
- [45] C. Zhenglong, "Design and implementation of an experimental device by the pendant drop method for measuring surface tension of pulmonary fluid." Wuhan University of Technology. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Experimental-setup-for-pendant-drop-tensiometry-1-optical-table-with-rails-2-LED-cold_fig1_364710826
- [46] SpragClutch, "X-Max-3 Dry Box Side Holder." Maker World Beta. [Online]. Available: <https://makerworld.com/en/models/113271>
- [47] "SIMPLE AND MOBILE MEASUREMENT OF DYNAMIC SURFACE TENSION AND SURFACTANT CONTENT." KRUSS. [Online]. Available: <https://www.antoeli.com.mx/assets/bp50.pdf>
- [48] "On the calculation of surface tension from measurements of pendant drops," *Proc. R. Soc. Lond. Ser. Math. Phys. Sci.*, vol. 194, no. 1036, pp. 1–16, Jul. 1948, doi: 10.1098/rspa.1948.0063.
- [49] "International Tables of surface tension of water."
- [50] P. Wagner, R. Fürstner, W. Barthlott, and C. Neinhuis, "Quantitative assessment to the structural basis of water repellency in natural and technical surfaces," *J. Exp. Bot.*, vol. 54, no. 385, pp. 1295–1303, Apr. 2003, doi: 10.1093/jxb/erg127.
- [51] B. Kvamme, "Small Alcohols as Surfactants and Hydrate Promoters," *Fluids*, vol. 6, no. 10, p. 345, Sep. 2021, doi: 10.3390/fluids6100345.

- [52] L. Kirkup, *Experimental Methods for Science and Engineering Students: An Introduction to the Analysis and Presentation of Data*, 2nd ed. Cambridge University Press, 2019. doi: 10.1017/9781108290104.
- [53] "Birmingham gauge." [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Birmingham_gauge