



# **Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο**

**Σχολή Χημικών Μηχανικών**

*Τομέας Ανάλυσης, Σχεδιασμού & Ανάπτυξης Διεργασιών  
και Συστημάτων (II)*

**Κατευθυνόμενη κίνηση σταγόνων σε  
πορώδη, υδρόφοβη επιφάνεια και  
μελέτη της δυναμικής της κίνησης.**

**Directional droplet motion on a  
porous, hydrophobic surface and  
study of the motion's dynamics**

Διπλωματική Εργασία | **Απόστολος Ζαγανιάρης**

Επιβλέπων | **Ανδρέας Μπουντουβής**, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούνιος 2021

Ευχαριστώ

Τον καθηγητή και επιβλέποντα **Ανδρέα Μπουντουβή** για την υποστήριξη και την ανάθεση του θέματος.

Τον συνεπιβλέποντα **Νικόλαο Βούρδα** για την καθοδήγηση και για την παροχή του πειραματικού εξοπλισμού.

Τον **Ιωάννη Θωμόπουλο** για την ανάπτυξη της επιφάνειας που χρησιμοποιήθηκε και για την υποστήριξη στα αρχικά πειράματα

# Abstract

## Directional droplet motion on a porous, hydrophobic surface and study of the motion's dynamics

Apostolos Zaganiaris, Diploma Thesis

Controlled directional movement of droplets on surfaces is a field with important ongoing research, and a variety of potential applications. Lab-on-a-chip for chemical and biochemical processes in the micro-scale, use of droplets as bits of information and control of the adhesion of droplets in self cleaning anti-fogging and related functionalities are some of the applications suggested in the literature.

A wide variety of methods to achieve the directional movement of droplets on surfaces has been studied. Wetting gradients alone and surface topography asymmetries in combination with energy supply such as heat, vibration, light etc. Another approach is to apply a directly controllable force to the droplet, as is the case with the magnetic manipulation in droplets doped with magnetic materials. Gas flow has been also used along the surface as a means to directionally move the droplet.

In this work, a new method is presented for the directional movement of droplets on surfaces. It uses a porous surface of ratchet-like asymmetric geometry and pressurized air flow applied through the pores. An aerodynamic force is thus applied from the porous surface to the droplet, in combination with air lubrication between the droplet and the surface, which together with the surface asymmetry yields directional movement.

The method is studied in conditions of different air pressure, droplet volume and surface tilt. The surface geometry consists of 4 'steps' 0.55 cm in length and 0.15 cm in height each. Air pressure values from 1000 to 1700 mbar were applied. Droplet velocity reached on average 0.25 m/s with an average acceleration of 3 m/s<sup>2</sup>. The highest measured velocity reached 0.5 m/s. Droplets of volume between 20 and 70  $\mu$ l were moved directionally upwards on inclines between 13° and 44°. The increase of the droplet's acceleration with the increase of the air pressure is observed. Finally a simple model is developed considering the forces acting on the droplet, in order to follow the experimental results and towards understanding the governing mechanisms

# Περίληψη

Η κίνηση σταγόνων προς μια κατεύθυνση πάνω σε επιφάνειες, είναι μια ερευνητική δραστηριότητα με σημαντικές εξελίξεις τα τελευταία χρόνια και με αρκετές εν δυνάμει εφαρμογές. Μερικές από αυτές τις εφαρμογές περιλαμβάνουν τη διενέργεια φυσικών, χημικών και βιοχημικών διεργασιών σε ψηφίδες (lab-on-a-chip) στη μικροκλίμακα, τη χρήση των σταγόνων ως bits πληροφορίας, τον έλεγχο σταγόνων για εφαρμογές αυτό-καθαρισμού, ελέγχου της οπτικής διαφάνειας και άλλες σχετικές λειτουργικότητες επιφανειών.

Έχουν προταθεί αρκετές μέθοδοι για να επιτευχθεί η κατευθυνόμενη κίνηση των σταγόνων. Βασίζονται στη δημιουργία βαθμίδων επιφανειακής τάσης στα στερεά, ή στη ύπαρξη ασυμμετρίας στην επιφανειακή τοπογραφία σε συνδυασμό με την παροχή ενέργειας, θερμικής, μηχανικής κτλ. Μια άλλη προσέγγιση βασίζεται στην άμεση άσκηση κάποιας δύναμης όπως μαγνητική σε μαγνητικές σταγόνες. Ροή αέρα κατά την επιφάνεια έχει επίσης χρησιμοποιηθεί ως μέθοδος κατευθυνόμενης μετακίνησης σταγόνων.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μια καινοτόμα μέθοδος μετακίνησης σταγόνων πάνω σε επιφάνειες, η οποία βασίζεται στη χρήση πορωδών επιφανειών με ασύμμετρη επιφανειακή τοπογραφία και διοχέτευση αέρα μέσα από τους πόρους της επιφάνειας. Η δύναμη που αναπτύσσεται στη σταγόνα προς τη κατεύθυνση της κίνησης σε συνδυασμό με τον αέρα από την κάτω πλευρά της σταγόνας, με τον οποίο μειώνονται οι τριβές υγρού-στερεού οδηγεί σε ελεγχόμενη κατευθυνόμενη κίνηση της σταγόνας.

Παρουσιάζεται η μέθοδος σε διαφορετικές συνθήκες πίεσης/παροχής αέρα, όγκου σταγόνας και κλίσης της επιφάνειας. Η επιφανειακή ασυμμετρία αποτελείται από 4 ‘σκαλοπάτια’ με διαστάσεις 0.55 cm μήκος και 0.15 cm ύψος το καθένα. Πιέσεις από 1000 έως 1700 mbar εφαρμόστηκαν. Η ταχύτητα των σταγόνων έφτασε κατά μέσο όρο τα 0.25 m/s με μέση επιτάχυνση 3 m/s<sup>2</sup>. Η υψηλότερη ταχύτητα που μετρήθηκε έφτασε τα 0.5 m/s. Σταγόνες όγκου από 20 έως 70  $\mu$ l μετακινήθηκαν σε ανηφορικές κλίσεις από 13° έως 44°. Παρατηρείται η επίδραση της αύξησης της πίεσης στην αύξηση της επιτάχυνσης των σταγόνων. Τέλος αναπτύσσεται ένα μοντέλο των δυνάμεων που ασκούνται στη σταγόνα με σκοπό αφενός να προβλεφθούν τα πειραματικά αποτελέσματα και αφετέρου να ενισχυθεί η κατανόηση του μηχανισμού μετακίνησης της σταγόνας.



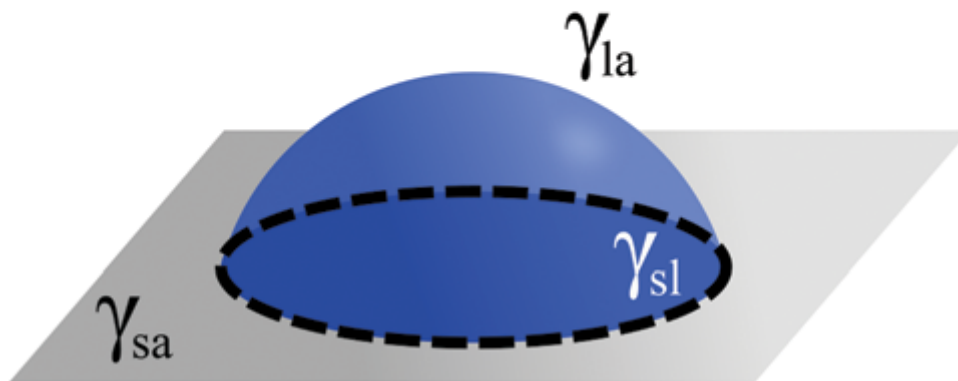
# Περιεχόμενα

1.Εισαγωγή.....	6
1.1 Σχετικά με τη σταγόνα σε στερεή επιφάνεια.....	6
1.2 Ιστορική ανασκόπηση.....	8
1.3 Τομείς Εφαρμογής.....	9
1.4 Μέθοδοι ελέγχου κίνησης σταγόνων.....	11
2. Η παρούσα προσέγγιση.....	14
2.1 Επιφάνεια.....	14
2.2 Διάταξη.....	14
3. Αποτελέσματα και συζήτηση.....	16
3.1 Ποιοτική Ανάλυση.....	16
3.1.1 Παρατήρηση και κατηγοριοποίηση της κίνησης.....	16
3.1.2 Συμπεράσματα ποιοτικής ανάλυσης.....	20
3.2 Ποσοτική Ανάλυση.....	21
3.2.1 Ανάλυση Βίντεο.....	21
3.2.2 Επεξεργασία Δεδομένων.....	22
3.2.3 Μέτρηση Επιτάχυνσης.....	24
3.2.4 Εξάρτηση επιτάχυνσης από την πίεση.....	26
4. Μοντέλο.....	28
4.1 Στοιχεία Διάταξης.....	28
4.1.1 Επιφανειακό πορώδες επιφάνειας.....	28
4.1.2 Συσχέτιση ροής αέρα και πίεσης αέρα.....	29
4.1.3 Υπολογισμός της ταχύτητας του αέρα.....	29
4.2 Δυνάμεις που ασκούνται στην σταγόνα.....	30
4.3 Αναμενόμενη σχέση μεταξύ τριβής (σταθεράς C) και πίεσης.....	32
4.4 Προσαρμογή του Μοντέλου.....	35
4.5 Αξιολόγηση των διαφορετικών μορφών δυνάμεων.....	37
5. Ενεργειακή απόδοση.....	38
6. Συμπεράσματα.....	39
7. Βιβλιογραφία.....	40
8. Παράρτημα.....	43

# 1.Εισαγωγή

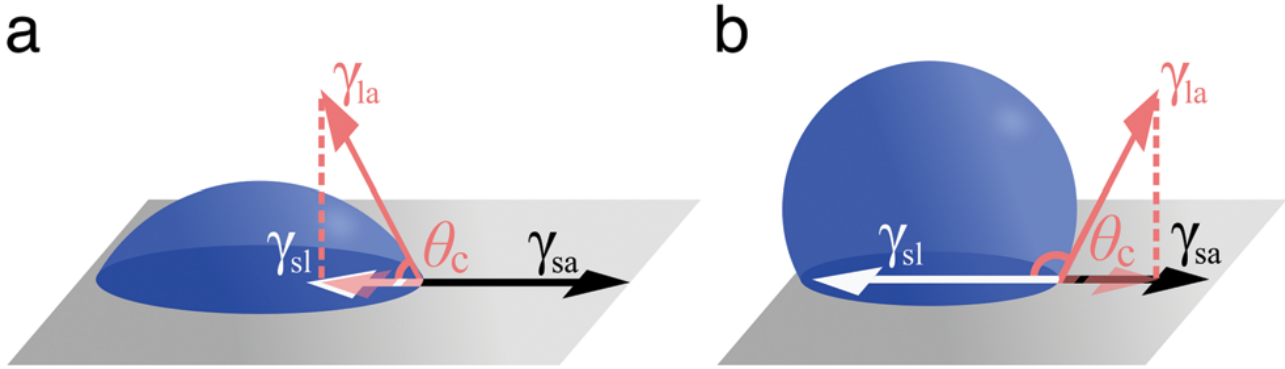
## 1.1 Σχετικά με τη σταγόνα σε στερεή επιφάνεια

Όταν ένα υγρό είναι στατικό πάνω σε μια επιφάνεια υπάρχουν τρεις πιθανές καταστάσεις. Η πλήρης διαβροχή όπου το υγρό απλώνεται εντελώς στην επιφάνεια και δημιουργεί ένα μακροσκοπικό φιλμ (υμένιο), το να μην υπάρχει καθόλου διαβροχή όπου ένα μικροσκοπικό φιλμ αερίου σχηματίζεται ανάμεσα στη σταγόνα και στην επιφάνεια και η σταγόνα παίρνει σχήμα σφαίρας και η κατάσταση μερικής διαβροχής όπου γύρω από τη σταγόνα δημιουργείται ένα μικροσκοπικό φιλμ πάχους λίγων μορίων[1]. Στην παρούσα εργασία μελετώνται καταστάσεις που ανήκουν στη μερική διαβροχή. Στην κατάσταση μερικής διαβροχής δημιουργείται σταγόνα με σχήμα μερικής σφαίρας όπως φαίνεται στην εικόνα 1.  $\gamma_{la}$  είναι η επιφανειακή τάση μεταξύ υγρού και περιβάλλοντος αερίου,  $\gamma_{sa}$  είναι η επιφανειακή τάση μεταξύ στερεού και περιβάλλοντος αερίου και  $\gamma_{sl}$  η επιφανειακή τάση μεταξύ υγρού και στερεού. Επιφανειακή τάση είναι η ενέργεια που απαιτείται για να δημιουργηθεί μια διεπιφάνεια μεταξύ δύο φάσεων ανά μονάδα επιφανείας αυτής της διεπιφάνειας. Η κάθε επιφανειακή τάση 'επιθυμεί' να μειώσει την έκταση της αντίστοιχης της διεπιφάνειας για να μειωθεί η απαιτούμενη της ενέργεια. Έτσι το σχήμα της σταγόνας προκύπτει από την ελαχιστοποίηση της συνολικής ενέργειας της σταγόνας, για τη συνολική της επιφάνεια.



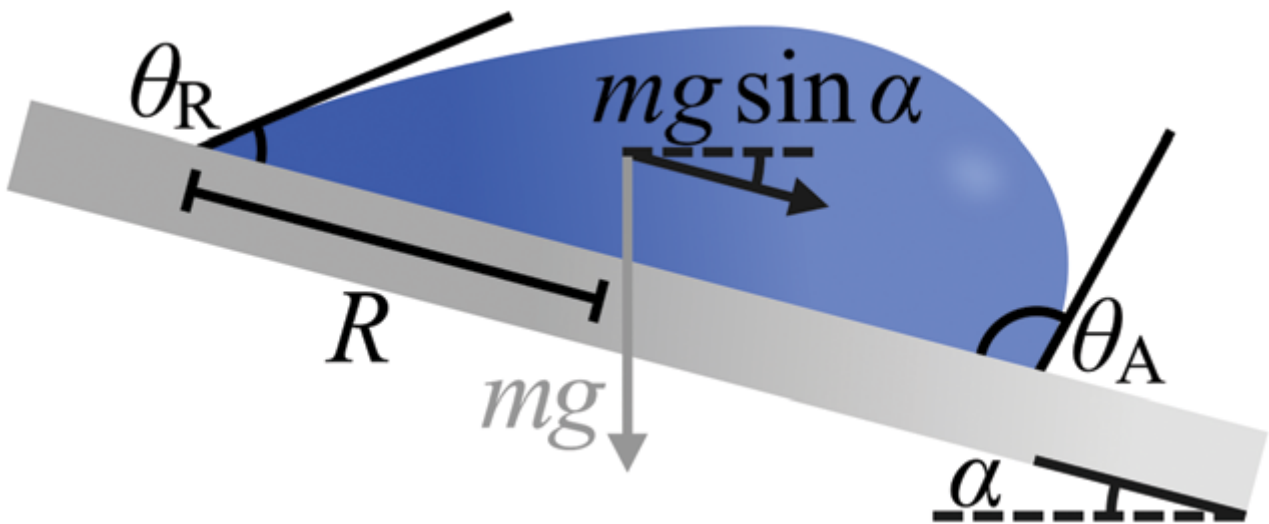
Εικόνα 1: Σχηματική αναπαράσταση σταγόνας σε στερεή επιφάνεια με μερική διαβροχή. Από αναφορά [2].

Ως γωνία επαφής ορίζεται η γωνία μεταξύ του στερεού και της εφαπτομένης της σταγόνας στο σημείο επαφής τους όπως φαίνεται στην Εικόνα 2. Η γωνία επαφής δείχνει πόσο ενεργειακά προτιμητέα είναι η επαφή σταγόνας-στερεού σε σχέση με τις άλλες δύο διεπιφάνειες [2]. Όταν η διαβροχή είναι ενεργειακά προτιμητέα μεταξύ υγρού και στερεού, η γωνία επαφής μικραίνει σε μικρότερη από  $90^\circ$  (εικόνα 2a) και η επιφάνεια ονομάζεται υδρόφιλη εφόσον η αλληλεπίδραση αφορά σε νερό. Αντίστροφα, όταν η διεπιφάνεια μεταξύ στερεού και υγρού απαιτεί μεγάλη ενέργεια για να δημιουργηθεί, τότε υπάρχει η τάση να μειωθεί το εμβαδόν αυτής της διεπιφάνειας, η γωνία μεγαλώνει σε άνω των  $90^\circ$  και η επιφάνεια ονομάζεται υδρόφοβη (εικόνα 2b).



Εικόνα 2: Σχηματική αναπαράσταση στατικών σταγόνων σε (a) υδρόφιλη επιφάνεια με μικρή γωνία επαφής (b) υδρόφοβη επιφάνεια με μεγάλη γωνία επαφής. Από αναφορά [2].

Αν η επαφή της σταγόνας στην στερεά επιφάνεια δε δημιουργούσε καμία αντίσταση στην κίνηση, η σταγόνα θα μπορούσε να μετακινηθεί ενώ η γωνία επαφής κατά την κίνηση θα ήταν ίση με τη στατική γωνία επαφής. Λόγω όμως της προσκόλλησης της σταγόνας στην επιφάνεια, υπάρχει ένα εύρος γωνιών επαφής που προκύπτουν από την παραμόρφωση της σταγόνας μέχρι να ξεπεραστεί η δύναμη προσκόλλησης και η σταγόνα να αποκολληθεί (derinned). Οι ακραίες τιμές αυτού του εύρους, οι τιμές δηλαδή που μετά από αυτές η σταγόνα κινείται, ονομάζονται προελαύνουσα ( $\theta_A$ ) και υποχωρούσα ( $\theta_R$ ) γωνία επαφής (advancing and receding contact angles). Οι δύο γωνίες φαίνονται στη σχηματική αναπαράσταση της Εικόνας 3. Προελαύνουσα είναι η μεγάλη γωνία στο μπροστινό μέρος της σταγόνας κατά τη φορά της τάσης προς κίνηση και υποχωρούσα η μικρή γωνία στο πίσω μέρος της σταγόνας. Η διαφορά αυτών των δύο γωνιών είναι μέτρο της προσκόλλησης της σταγόνας στην επιφάνεια. Έτσι η δύναμη που απαιτείται για να αποκολληθεί και να μετακινηθεί η σταγόνα είναι ανάλογη της διαφοράς των συνημίτονων των δύο γωνιών [2]

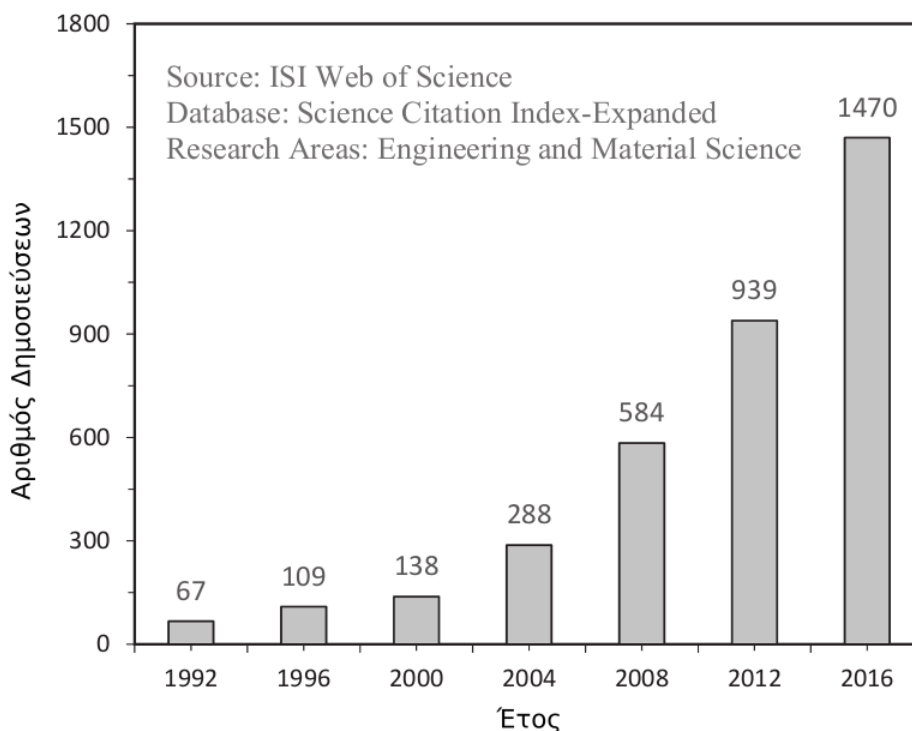


Εικόνα 3: Σχηματική αναπαράσταση της προελαύνουσας ( $\theta_A$ ) και υποχωρούσας ( $\theta_R$ ) γωνίας επαφής. Από αναφορά [2].

## 1.2 Ιστορική ανασκόπηση

Το 1965 ο Carter [3] έδειξε ότι κύτταρα πάνω σε μια επιφάνεια με επικάλυψη παλλαδίου μετακινούνται προς την κατεύθυνση με την υψηλότερη προσκόλληση, δηλαδή με την περισσότερη συγκέντρωση παλλαδίου. Επίσης μπόρεσε να ελέγξει με μεγαλύτερη ακρίβεια την κίνηση δημιουργώντας μια στενή λωρίδα υψηλής προσκόλλησης και τα κύτταρα περιορίζονταν σε αυτήν. Σε επόμενη εργασία του το 1967 [4], ο Carter υποστηρίζει ότι η κινητήριος δύναμη για αυτήν τη συμπεριφορά των κυττάρων είναι κυρίως φυσικοχημική και όχι ‘ενεργητική’ κίνηση του κυττάρου. Με αφορμή τη δουλειά του Carter καθώς και άλλες εργασίες σχετικά με το σχήμα, την προσκόλληση και την κινητικότητα των κυττάρων, ο Greenspan το 1978 [5] μελέτησε την κίνηση σταγόνας νερού σε επιφάνεια βαθμιδωτής προσκόλλησης, προκειμένου να κάνει παραλληλισμούς με την κίνηση των κυττάρων. Έτσι περιγράφει πρώτος [6] θεωρητικά την κίνηση σταγόνας σε επιφάνεια λόγω χημικής βαθμίδωσης που επηρεάζει την γωνία επαφής. Το μοντέλο του στηρίζεται στην “Lubrication Theory” που αφορά λεπτά στρώματα υγρών με υψηλό ιξώδες και χρησιμοποιεί εξισώσεις Navier-Stokes. Το 1988 ο Brochard [7] περιγράφει θεωρητικά την κίνηση σταγόνας σε βαθμίδα χημική ή θερμοκρασίας. Μελετάει τις δυνάμεις που ασκούνται στη σταγόνα για διάφορα σχήματα και εξάγει έκφραση για την ταχύτητά της. Τελικά πρώτοι [6] οι Chaudhury και Whitesides το 1992 [8] μετακινούν σταγόνα ανηφορικά σε επιφάνεια με κλίση χρησιμοποιώντας επιφάνεια με χημική βαθμίδωση. Στη συνέχεια μέχρι και σήμερα έχουν ακολουθήσει αρκετοί ερευνητές που μελετούν την κατευθυνόμενη κίνηση σταγόνων με διαφορετικές μεθόδους και σε διαφορετικές εφαρμογές, όπως αναλύεται παρακάτω.

Σχετικά με την μελέτη γενικότερα της διαβροχής επιφανειών, στην εργασία των Edalatpour και συνεργατών [6] παρουσιάζεται το διάγραμμα της Εικόνας 4, που δείχνει την αυξητική εξέλιξη του αριθμού των εργασιών με τη λέξη κλειδί “Surface Wettability” (Διαβροχή Επιφάνειας) από το 1992 έως και το 2016.



Εικόνα 4: Εξελιγή του αριθμού των επιστημονικών δημοσιεύσεων με τη λέξη κλειδί “surface wettability” από το 1992 έως και το 2016. Περιλαμβάνει μόνο τις δημοσιεύσεις στα πεδία “Engineering” και “Material Science”. Από αναφορά [6].

## 1.3 Τομείς Εφαρμογής

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιοι τομείς που βρίσκει εφαρμογή η μετακίνηση σταγόνων. Κάποιες από αυτές τις εφαρμογές αφορούν στη μεταβολή της διαβροχής και προσκόλλησης της σταγόνας στη στερεή επιφάνεια με σκοπό την απλή κατακράτηση ή την απομάκρυνση της σταγόνας από την συγκεκριμένη επιφάνεια, χωρίς να ελέγχεται η ακριβής της πορεία και άλλες χρειάζονται την κατευθυνόμενη κίνηση σταγόνων με έλεγχο της πορείας της σταγόνας.

### -Τεχνολογίες ενάντια στο θάμπωμα επιφανειών

Η εκμετάλλευση των ιδιοτήτων των σταγόνων και της αλληλεπίδρασής τους με το στερεό υπόστρωμα έχει δημιουργήσει τεχνικές για την αποφυγή του θαμπώματος τζαμιών εκτεθειμένα σε υψηλό ποσοστό υγρασίας [9]. Το θάμπωμα δημιουργείται από τη σκέδαση του φωτός που προκαλούν οι σταγόνες που σχηματίζονται πάνω στην επιφάνεια. Η μετατροπή της επιφάνειας σε υπερυδρόφοβη, οδηγεί τις σταγόνες στη δυσκολότερη κατακράτησή τους στην επιφάνεια, και απομάκρυνση από αυτήν υπό την επίδραση κάποιας κλίσης. Αντίστροφα η μετατροπή της επιφάνειας σε υπερυδρόφιλη, οδηγεί τις σταγόνες στο να απλωθούν συνεχώς, σε όλη την επιφάνεια, με αποτέλεσμα να μην παραμορφώνουν την εικόνα που μεταφέρεται από το φως.

### -Επιφάνειες ανταλλαγής θερμότητας

Ο σχηματισμός σταγόνων σε επιφάνειες ανταλλαγής θερμότητας μειώνει την απόδοση του εναλλάκτη θερμότητας, μπορεί να αυξήσει την ανάπτυξη μικροοργανισμών και προκαλεί προβλήματα διάβρωσης [6]. Κατά συνέπεια στόχος είναι οι σταγόνες που σχηματίζονται να απομακρύνονται από την επιφάνεια. Χρήση βαθμίδων διαβροχής κατά μήκος της επιθυμητής πορείας της σταγόνας ή δόνηση της επιφάνειας ή ο συνδυασμός τους που οδηγεί στην κατευθυνόμενη κίνηση σταγόνων, έχει χρησιμοποιηθεί στη βιβλιογραφία για την αύξηση της απομάκρυνσης των σταγόνων. Επιπλέον άλλες προσεγγίσεις για αύξηση της κινητικότητας των σταγόνων, χωρίς ωστόσο την κατευθυνόμενη κίνησή τους περιλαμβάνουν την επεξεργασία όλης της επιφάνειας σε υδροφοβική ή με χημικές μεθόδους ή με επεξεργασία είτε της τραχύτητας είτε της γεωμετρίας της επιφάνειας και τη δημιουργία υβριδικής επιφάνειας, με κάποιες περιοχές υδροφιλικές και άλλες υδροφοβικές σε διάφορα σχήματα και μεγέθη.

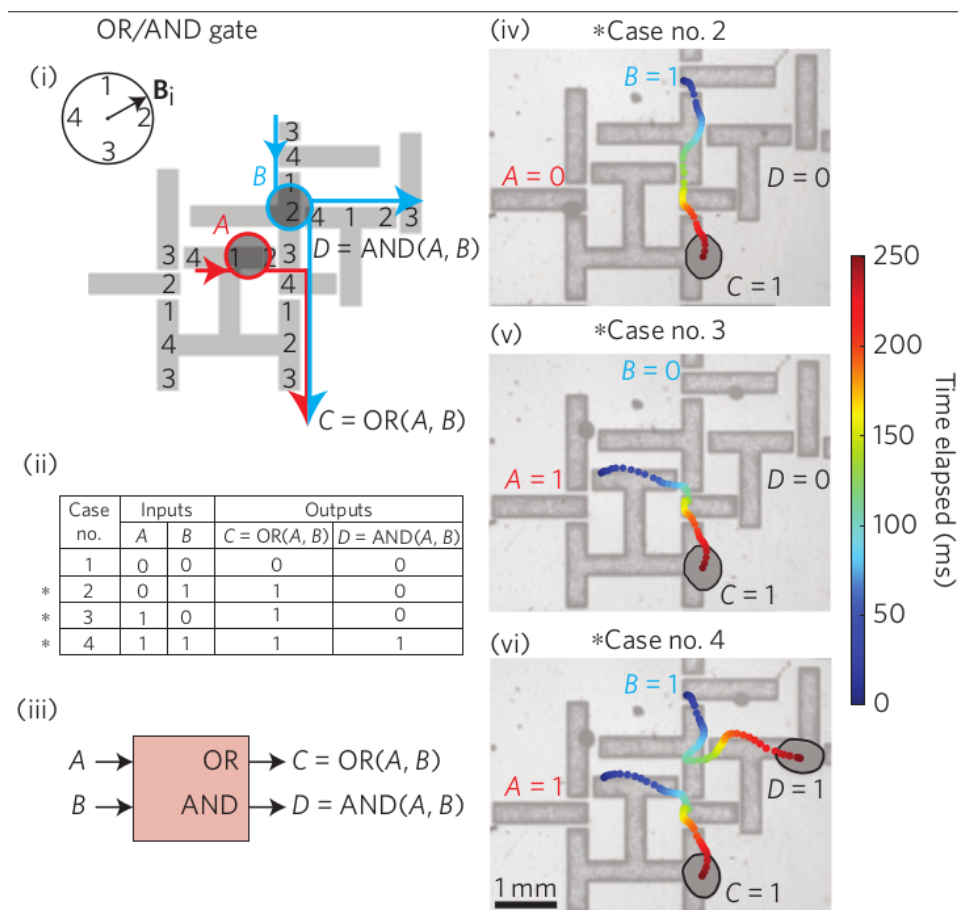
### - Lab on a chip

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει έντονη ερευνητική δραστηριότητα με στόχο τη σμίκρυνση και ενσωμάτωση σε μια ψηφίδα (chip) πολλών διεργασιών που ενδεχομένως αποτελούν μέρη μιας πλήρους χημικής ή βιολογικής ανάλυσης και που κανονικά γίνονται σε επίπεδο εργαστηρίου (Lab on a Chip) [10]. Διεργασίες όπως η μετακίνηση και ανάμιξη ρευστών, ο διαχωρισμός μιγμάτων, μπορούν να διενεργούνται σε όγκους  $\mu\text{m}^3$  έως  $\text{pL}$  λίτρου σε αντίθεση με τους συνήθεις όγκους που απαιτούνται σε μια συνηθισμένη εργαστηριακή ανάλυση. Τα πλεονεκτήματα της τεχνικής περιλαμβάνουν χρήση λιγότερου δείγματος και αντιδρώντων, χαμηλότερο κόστος, πιο γρήγορη ανάλυση, in-situ χρήση και δυνατότητα αυτοματισμού αναλύσεων.

Απαιτούμενο για την λειτουργία της τεχνολογίας αυτής είναι ένα σύστημα που να μεταφέρει, μικρούς όγκους ρευστών και να υποστηρίζει τέτοιου είδους φυσικών και χημικών διεργασίες.

## -Μεταφορά πληροφορίας/κατασκευή πυλών λογικής

Η μεταφορά σταγόνων ως πακέτα πληροφορίας είναι μια ιδέα που έχει μελετηθεί τα τελευταία χρόνια. Μια από τις πιο γνωστές και ολοκληρωμένες περιπτώσεις είναι η εργασία των Katsikis et al το 2015 [11]. Σε αυτήν την εργασία χρησιμοποιούνται σταγόνες μαγνητικού υγρού και για τη μετακίνησή τους χρησιμοποιείται κατάλληλη μαγνητική επιφάνεια και καθολικό εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο. Με την κατάλληλη γεωμετρία των μαγνητικών επιφανειών, και για συγκεκριμένο εύρος συχνότητας του πεδίου και μεγέθους σταγόνες, η τροχιά της σταγόνας γίνεται 100% προβλέψιμη. Σε συνδυασμό με την απώθηση μεταξύ των σταγόνων λόγω του μαγνητικού τους φορτίου, η τροχιά της κάθε σταγόνας αλλάζει με συγκεκριμένο τρόπο ανάλογα με το αν και που υπάρχει ταυτόχρονα και άλλη σταγόνα στην επιφάνεια. Έτσι με κατάλληλες γεωμετρίες μπορούν να δημιουργηθούν επιφάνειες που λειτουργούν σαν πύλες λογικής. Η πληροφορία που χρησιμοποιείται είναι η ύπαρξη ή απουσία σταγόνας σε συγκεκριμένα σημεία, κατ'αντιστοιχία με το 0 και 1 στα ηλεκτρικά κυκλώματα. Ένα απλό παράδειγμα για μία OR/AND πύλη φαίνεται στην Εικόνα 5.



Εικόνα 5: Από αναφορά [11]. Παρουσίαση της OR/AND λογικής πύλης που κατασκεύασαν (i) Παρουσιάζονται σχηματικά με γκρι η γεωμετρία των μαγνητικών επιφανειών, και τα σημεία A,B,C και D όπου αξιολογείται η παρουσία (1) ή απουσία (0) σταγόνας. Με τα βέλη φαίνονται οι πιθανές τροχιές των δύο σταγόνων. (ii) Οι λογικές πράξεις σε μορφή πίνακα. (iv), (v),(vi) πειραματικές τροχιές για τις περιπτώσεις 1,2 και 3 του πίνακα (ii), φαίνεται πως η ύπαρξη η μη της μιας σταγόνας αλλάζει την τροχιά της άλλης λόγω της αλληλοαπόωθής τους.

## -Μεταφορά στερεού σε αντιδραστήρες

Έχει δειχθεί η χρήση της τεχνολογίας για μεταφορά καυσίμου σε αντιδραστήρα-κλίβανο [12]. Η συγκεκριμένη εφαρμογή δεν αφορά σταγόνα, αλλά χρησιμοποιεί την ίδια προσέγγιση για κυταρρινικά σωματίδια, συμπιεσμένα σε κύβους 1 mm. Τα σωματίδια αυτομετακινούνταν πάνω σε επιφάνεια ratchet θερμοκρασίας 760-800 °C, λόγω του φαινομένου Leidenfrost. Πιθανή εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου, θα ήταν η δημιουργία της πρώτης ταινίας μεταφοράς κυταρρινικών σωματιδίων χωρίς κινούμενα μέρη, για τροφοδοσία βιομάζας σε αντιδραστήρες πυρόλυσης ή αεριοποίησης.

## -Περιστροφή στερεού για χρήση ως θερμική μηχανή

Ο έλεγχος της κίνησης σταγόνων, ή, στη συγκεκριμένη περίπτωση, κίνησης ολόκληρου σώματος νερού, έχει, ως proof of concept, χρησιμοποιηθεί για την περιστροφή μάζας με χρήση θερμικής ενέργειας [13]. Χρησιμοποιήθηκε μια επιφάνεια με επιφανειακή ασυμμετρία κατάλληλη ώστε να προκαλέσει κατευθυνόμενη κίνηση του υγρού πάνω σε αυτή με χρήση του φαινομένου Leidenfrost. Η επιφάνεια κρατιόταν σε σταθερή θερμοκρασία αρκετά υψηλή για να λειτουργήσει το φαινόμενο. Πάνω στην επιφάνεια του σώματος νερού που περιστρέφονταν αποτέθηκε μια γυάλινη πλάκα. Αυτή η πλάκα περιστρέφονταν καθώς η περιστροφική κίνηση του νερού της μεταφέρονταν μέσω των ιξώδων δυνάμεων από το νερό. Μάλιστα μέσω ειδικής επεξεργασίας με πλάσμα ώστε να μετατραπεί σε υπερυδρόφιλη, η μετάδοση της κίνησης αυξήθηκε. Επίσης μέσω ειδικής επικάλυψης στην κάτω επιφάνεια, η θερμοκρασία που εμφανίζονταν το Leidenfrost μπορούσε να χαμηλώσει και επομένως να δημιουργηθεί η περιστροφική κίνηση από μικρότερη διαφορά θερμοκρασίας. Με ανάκτηση του νερού που εξατμίζεται, συμπύκνωσή του και επιστροφή του στη διεργασία, δημιουργείται ένας κλειστός κύκλος ατμού που μετατρέπει θερμότητα σε περιστροφική κίνηση.

## 1.4 Μέθοδοι ελέγχου κίνησης σταγόνων

### 1.4.1 Βαθμίδωση Διαβροχής

Μια μεγάλη κατηγορία μεθόδων για μετακίνηση σταγόνων είναι η δημιουργία και ο έλεγχος βαθμίδωσης διαβροχής στην επιφάνεια πάνω στην οποία μετακινείται η σταγόνα. Όπως αναλύθηκε παραπάνω, η ενέργεια διεπιφάνειας μεταξύ σταγόνας-στερεού επηρεάζει τη μορφή της σταγόνας, και η αύξηση της διαβροχής αυξάνει την 'έλξη' της σταγόνας από την επιφάνεια. Αν λοιπόν η επιφάνεια έχει τέτοια μορφή έτσι ώστε η διαβροχή να μην είναι σταθερή, αλλά να αυξάνεται προς μία κατεύθυνση, τότε η σταγόνα μετακινείται προς την περιοχή με την υψηλότερη διαβροχή.

Η τεχνική αυτή είναι πολύ ευέλικτη και έχει εφαρμοστεί στην βιβλιογραφία με πολλές μεθόδους. Η δημιουργία της βαθμίδωσης διαβροχής μπορεί είτε να είναι σταθερή κατά την προετοιμασία της επιφάνειας ή του υλικού, είτε ελεγχόμενη μέσω κάποιας εξωτερικής επίδρασης. Ενδεικτικά για να δημιουργηθεί η βαθμίδωση διαβροχής έχουν χρησιμοποιηθεί, μεταξύ άλλων, χημική βαθμίδωση στη συγκέντρωση επικάλυψης που επηρεάζει τη διαβροχή [8], βαθμιδώσεις θερμοκρασίας [14], ελεγχόμενη ηλεκτρική τάση που ρυθμίζει την διαβροχή [15], χρήση φωτός σε υλικά που η διαβροχή τους επηρεάζεται από αυτό [16].

## 1.4.2 Μέθοδος με χρήση μαγνητισμού

Η χρήση κατάλληλου μαγνητικού πεδίου για τη μετακίνηση σταγόνων [17], απαιτεί η σταγόνα να είναι μαγνητική, και, καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις αυτό δεν συμβαίνει, τυπικά η μέθοδος περιλαμβάνει την εισαγωγή μαγνητικών σωματιδίων, είτε στο σώμα της σταγόνας είτε στην επιφάνειά της. Στην βιβλιογραφία υπάρχουν κυρίως 3 τρόποι.

-Εισαγωγή σωματιδίων στο κυρίως σώμα της σταγόνας. Η μετακίνηση τους με μαγνήτη μεταφέρεται στην σταγόνα όταν τα σωματίδια φτάσουν στην άκρη της σταγόνας και τη συμπαρασύρουν με την κίνησή τους. Λόγω των δυνάμεων συνοχής της σταγόνας τα σωματίδια δεν ξεφεύγουν από το εσωτερικό της σταγόνας, αλλά υπάρχει όριο στη δύναμη που μπορεί να αντέξει η σταγόνα χωρίς να σπάσει.

-Η μέθοδος “liquid marble”, όπου μαγνητικά σωματίδια απλώνονται στην επιφάνεια της σταγόνας και την καλύπτουν. Μέσω της χειραγώγησης των σωματιδίων αυτών μπορεί να επιτευχθεί σχεδόν πλήρης υδροφοβικότητα και έλεγχος της σταγόνας μέσω του μαγνητικών σωματιδίων που την καλύπτουν.

-Οι σταγόνες να είναι από ferrofluid. Είναι μαγνητικό και οι ιδιότητες ροής του αλλάζουν υπό το μαγνητικό πεδίο. Χωρίς μαγνητικό πεδίο συμπεριφέρεται σαν υγρή σταγόνα, αλλά υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου συμπεριφέρεται σχεδόν σαν στερεό.

## 1.4.3 Leidenfrost με ασυμμετρία στην επιφάνεια

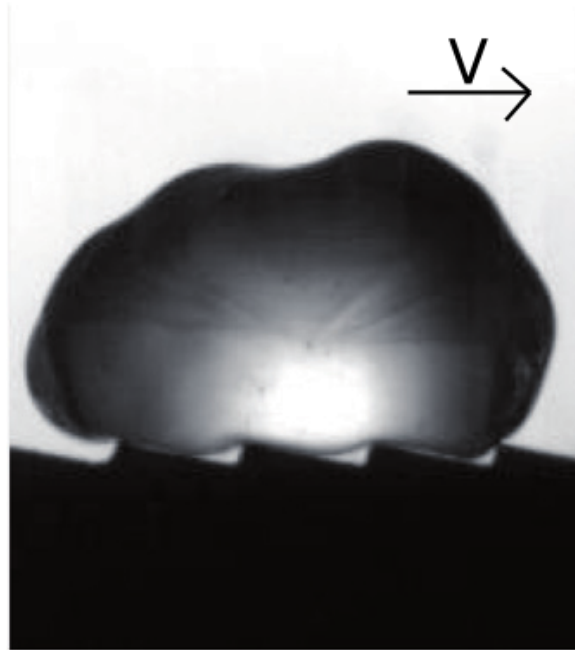
Το φαινόμενο Leidenfrost ανακαλύφθηκε το 1751 για το νερό. Κατά την τοποθέτηση σταγόνων νερού σε ζεστή επιφάνεια, περίπου 193 °C και περισσότερο, κατά την εξάτμιση του νερού δημιουργείται μια στρώση ατμού κάτω από τη σταγόνα, ικανή να την υποστηρίξει. Έτσι η σταγόνα αιωρείται και εμφανίζει ελάχιστες τριβές κατά την κίνησή της και άρα είναι πολύ ευκίνητη. Παράλληλα, το στρώμα ατμού λειτουργεί ως μόνωση, και η διάρκεια ζωής της σταγόνας σε αυτήν την κατάσταση είναι σημαντικά μεγαλύτερη από ότι σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Το φαινόμενο δημιουργείται και για άλλα υγρά, όχι μόνο για το νερό, αλλά και με άλλες φάσεις, όπως στερεό σε στερεό, και υγρό σε υγρό όταν υπάρχει αρκετή παραγωγή αερίου για να τα στηρίξει.

Χρήση Leidenfrost για μετακίνηση σταγόνων: Πρώτοι οι Linke και συνεργάτες το 2006 [18] παρουσίασαν τη χρήση του φαινομένου με επιφάνεια με γεωμετρική ασυμμετρία. Συγκεκριμένα με μορφή καστανίας (ratchet) όπως φαίνεται στην Εικόνα 6. Η επιφάνεια δεν είναι ομοιόμορφη αλλά έχει ασυμμετρίες, έτσι η ροή του αερίου επίσης γίνεται ασυμμετρική και αυτό οδηγεί στην κίνηση της σταγόνας [19]. Η επικρατούσα θεωρία για τον μηχανισμό που η ασυμμετρία μετακινεί τη σταγόνα, είναι η θεωρία της ιξώδους δύναμης (viscous force) προτεινόμενη από τους ίδιους τον Linke και τους συνεργάτες [18] του και υποστηριζόμενη από τους Dupreux και συνεργάτες [20], [21]. Σε κάθε τρίγωνοειδές που δημιουργείται μεταξύ της επιφάνειας της σταγόνας ή του στερεού και της επιφάνειας ratchet, σε κάθε ‘σκαλοπάτι’ δηλαδή, το αέριο έχει την τάση να μετακινείται προς το σημείο του χώρου του τριγώνου με τον μεγαλύτερο όγκο (στην Εικόνα 6, προς τα δεξιά). Αυτή η ροή του αερίου, μέσω τριβής λόγω ιξώδους με τη σταγόνα ή το στερεό, της ασκεί μια δύναμη κατά κατεύθυνση ίδια με την κίνησή του. Κατά αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η μετακίνηση σταγόνων ή στερεών.

Κατά την δυναμική ανάλυση της κίνησης, οι Linke και συνεργάτες [18] θεώρησαν δύο δυνάμεις που ασκούνται στην σταγόνα, μια δύναμη πρόωσης και μια δύναμη τριβής. Την δύναμη πρόωσης την θεώρησαν σταθερή και την τριβή εξαρτώμενη από την ταχύτητα της σταγόνας, ως  $F_{\text{drag}} = -\beta v_x(t)$  όπου  $\beta$  είναι παράγοντας προσαρμογής και  $v_x(t)$  η ταχύτητα της σταγόνας. Έτσι η σταγόνα έφτανε σε μια οριακή ταχύτητα που διατηρούσε για μεγάλη απόσταση. Αντίστοιχη ανάλυση έκαναν και οι Dodd και οι συνεργάτες [22], αλλά θεώρησαν την τριβή ως εξαρτώμενη από



την ταχύτητα της σταγόνας στο τετράγωνο ως  $F_{\text{drag}} = -c_i v$  όπου  $c_i$  ένας αριθμητικός συντελεστής που εξαρτάται από 'inertial resistance' της επιφάνειας, και προκύπτει από την προσαρμογή στα πειραματικά δεδομένα κίνησης, και  $v$  είναι η ταχύτητα της σταγόνας.



*Εικόνα 6: Από αναφορά [19], φαίνεται το σχήμα καστανίας (ratchet), η μορφή της σταγόνας πάνω του και με το βέλος φαίνεται η κατεύθυνση κίνησης της σταγόνας. Η επιφάνεια είναι κατασκευασμένη από ορείχαλκο και το κάθε 'σκαλοπάτι' έχει ύψος 0.3 mm και μήκος 1.5 mm.*

Επιπλέον, μόλις το 2021, η ομάδα του Quere έδειξε τη χρήση του φαινομένου Leidenfrost για μεταφορά σταγόνων σε συνδυασμό με βαθμίδωση θερμοκρασίας στην κατεύθυνση της κίνησης και όχι με ασυμμετρία στην επιφάνεια. [23] Η ανάλυση τους αποδίδει την κίνηση στην πιο γρήγορη κατανάλωση της σταγόνας στο πιο ζεστό μέρος, και άρα στην δημιουργία περισσότερου ατμού σε εκείνο το σημείο, πράγματα που δημιουργούν μια κλίση της σταγόνας και αυτή η κλίση είναι που δημιουργεί την κίνηση

Η χρήση του φαινομένου Leidenfrost ωστόσο, απαιτεί συνθήκες αλλαγής φάσης, συνεπώς μπορεί να είναι ακατάλληλη για κάποιο ευαίσθητο δείγμα, όπως πχ βιολογικά δείγματα. Ταυτόχρονα όμως, λόγω του μονωτικού στρώματος αερίου, δεν είναι κατάλληλη ούτε για εφαρμογές που απαιτούν ιδιαίτερα καλή μετάδοση θερμότητας.

#### 1.4.4 Μέθοδος με χρήση δόνησης

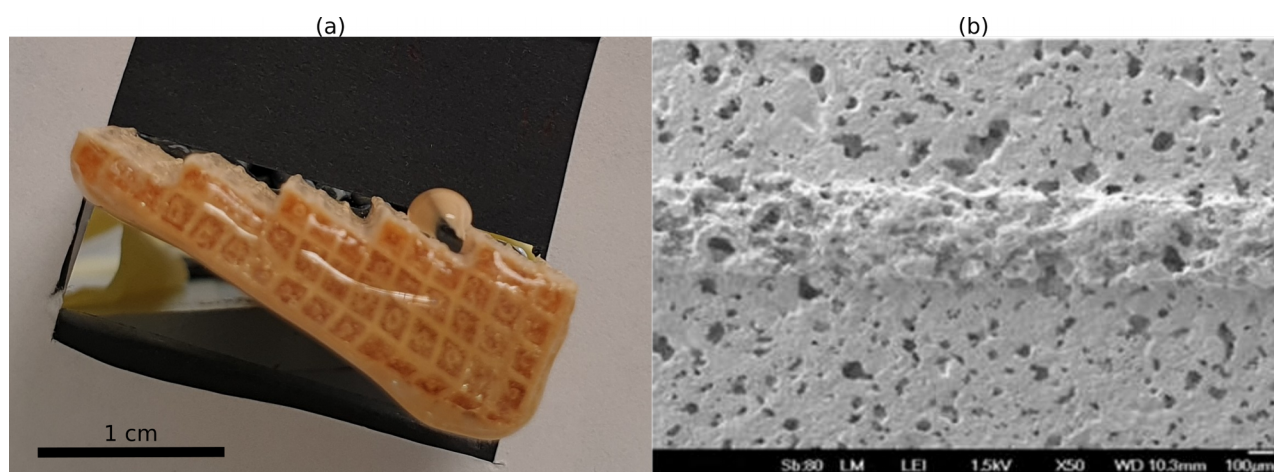
Και εδώ χρησιμοποιείται μια ανισοτροπία της επιφάνειας για να προωθήσει τη σταγόνα. Η τεχνική βασίζεται στο ότι η δόνηση προκαλεί αποκόλληση της σταγόνας, και λόγω της ανισοτροπίας της επιφάνειας, κατά την επαναπροσκόλληση η σταγόνα προσκολλάται στην επόμενη επανάληψη της επιφάνειας. Για παράδειγμα έχουν χρησιμοποιηθεί μοτίβα με μορφή μερικού τόξου κύκλου [24] ή 'δοντάκια' γερμένα προς τη μία κατεύθυνση [25]. Έχουν χρησιμοποιηθεί και οριζόντια και κάθετη δόνηση με επιτυχία. Επίσης η μετακίνηση της σταγόνας εξαρτάται από τη συχνότητα συντονισμού της σταγόνας, η οποία επηρεάζεται από τον όγκο και το ιξώδες της και άρα αλλάζοντας τη συχνότητα δόνησης της επιφάνειας, θεωρητικά μπορούν να ελεγχθούν ανεξάρτητα διαφορετικές σταγόνες διαφορετικών χαρακτηριστικών στην ίδια επιφάνεια [26]

## 2. Η παρούσα προσέγγιση

### 2.1 Επιφάνεια

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται για πρώτη φορά μια νέα τεχνική για να επιτευχθεί κατευθυνόμενη κίνηση σταγόνων. Η τεχνική βασίζεται στη χρήση πορώδους υλικού, με υδρόφοβη επιφάνεια και επιφανειακή ασύμμετρη τοπογραφία καστανίας (ratchet) (σκαλοπατιών). Με τη χρήση αέρα που διοχετεύεται μέσα από τους πόρους ενεργοποιείται η σταγόνα και λόγω της ασυμμετρίας κινείται προς μια κατεύθυνση. Ο αέρας που διοχετεύεται παράλληλα προς την επιφάνεια κατευθύνει τη σταγόνα και η αέρας που διοχετεύεται κάθετα προς την επιφάνεια μειώνει τις τριβές υγρού-στερεού [27],[28].

Για την κατασκευή της επιφάνειας χρησιμοποιήθηκε εμπορικά διαθέσιμος κυψελοειδής κορδιερίτης. Κόπηκε κατά μήκος του κεντρικού άξονα, αφήνοντας 4 κελιά πλάτος και 1 κελί ύψος για κάθε σκαλοπάτι. Για να τροποποιηθούν οι απορροφητικές και υπερυδρόφιλες ιδιότητες του κορδιερίτη σε υδρόφοβες, 0,5% wt διάλυμα Τεφλόν (poly(4,5-difluoro-2,2-bis(trifluoromethyl)-1,3-dioxole- co-tetrafluoroethylene σε Fluorinert FC-770) εμποτίστηκε και αφέθηκε να στεγνώσει. Η τελική γεωμετρία είναι γεωμετρία ‘σκαλοπατιών’, όπου ο πεπιεσμένος αέρας διοχετεύεται με σωληνάκια από την πλαϊνή μεριά των ‘σκαλοπατιών’. Στην Εικόνα 7(a) φαίνεται η επιφάνεια με σταγόνα στο πρώτο σκαλοπάτι σε ακινησία, πριν διοχετευθεί αέρας στο υλικό. Εμφανή είναι και τα προαναφερθέντα κελιά του υλικού. Το κάθε ‘σκαλοπάτι’ έχει μήκος περίπου 0,55 cm και ύψος περίπου 0,15 cm. Στην Εικόνα 7(b) παρουσιάζεται εικόνα ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (SEM) της επιφάνειας, όπου φαίνονται οι επιφανειακοί πόροι της επιφάνειας, μέσα από τους οποίους διοχετεύεται ο αέρας.



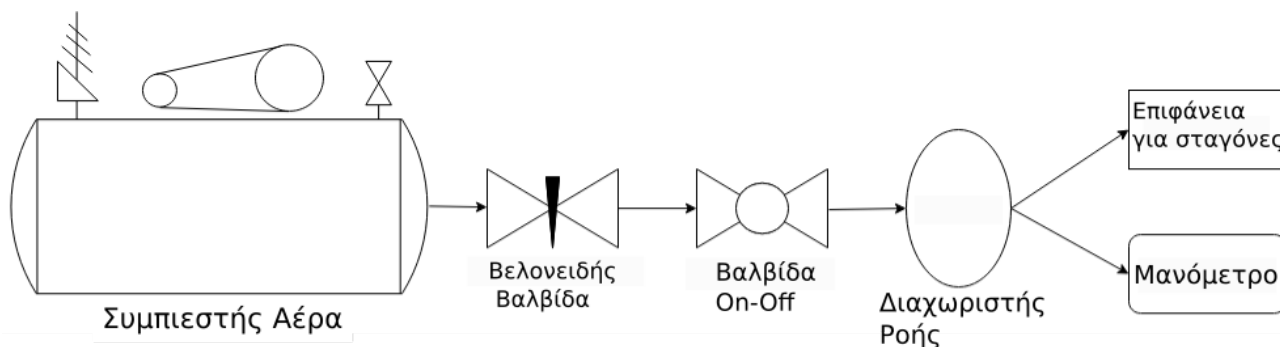
Εικόνα 7: Η δομή του υλικού. (a) Φωτογραφία του υλικού με σταγόνα πριν αρχίσει η ροή του αέρα. Φαίνεται η γεωμετρία καστανίας σε σχήμα ‘σκαλοπατιών’. (b) Μικροσκοπία SEM της επιφάνειας του υλικού, από αναφορά [29], όπου είναι η ίδια επιφάνεια με της παρούσας εργασίας.

### 2.2 Διάταξη

Για τη μελέτη του φαινομένου και την αξιολόγηση της καινούριας μεθόδου, έγιναν πολλές επαναλήψεις πρόωσης σταγόνων αλλάζοντας 3 πειραματικές παραμέτρους, την πίεση του πεπιεσμένου αέρα που ρέει μέσα από το υλικό, την κλίση της επιφάνειας, και τον όγκο της σταγόνας. Μελετήθηκαν 3 ομάδες πιέσεων, περίπου 1000 mbar (εύρος 990-1030), 1350 mbar (εύρος 1320-1380) και 1700 mbar (εύρος 1640-1710). Η πίεση για κάθε σταγόνα μετρούταν ξεχωριστά. Μελετήθηκαν 3 όγκοι, 20, 45 και 70  $\mu\text{l}$ , και 4 κλίσεις, 13, 24, 33 και 44  $^\circ$ .

Αρχικά η επιφάνεια τοποθετούνταν στην επιθυμητή κλίση, η οποία μετρήθηκε μέσω

φωτογραφίας. Για την φωτογραφία χρησιμοποιήθηκε το Samsung Galaxy Note 9. Για να εξασφαλισθεί ότι η κάμερα ήταν επίπεδη χρησιμοποιήθηκε εφαρμογή αναγνώρισης της κλίσης του κινητού/κάμερας. Αφού η επιφάνεια ασφαλιζονταν στην επιθυμητή κλίση, ρυθμίζονταν η πίεση του αέρα. Ο πεπιεσμένος αέρας για την κίνηση της σταγόνας τροφοδοτούνταν από συμπιεστή αέρα Togos BWDC-24. Η πίεση στο σύστημα ρυθμίζονταν μέσω μιας βελονοειδούς βαλβίδας ενσωματωμένης στον συμπιεστή. Οι μετρήσεις πίεσης διεξήχθησαν με μανόμετρο Kimo, MP 200HP, ακρίβειας  $\pm 2$  mbar. Όταν επιτυγχάνονταν η επιθυμητή πίεση, το σύστημα έκλεινε μέσω μιας άλλης βαλβίδας. Σταγόνα απιονισμένου νερού επιθυμητού όγκου τοποθετούνταν με χρήση πιπέτας στο πίσω σκαλοπάτι όπως φαίνεται στην Εικόνα 7(a). Έτσι ανοίγοντας απότομα τη δεύτερη βαλβίδα, ο αέρας έρεε στην κατάλληλη πίεση. Η πίεση που έγραφε το μανόμετρο κατά την κίνηση τη σταγόνας καταγράφονταν ως η πίεση της σταγόνας. Το διάγραμμα ροής της διάταξης παρουσιάζεται στην Εικόνα 8.



Εικόνα 8: Διάγραμμα Ροής της διάταξης.

Το πείραμα επαναλαμβανόταν όσες φορές χρειαζόταν με όλους τους διαφορετικούς όγκους που μελετήθηκαν, μέχρι να ληφθούν δεδομένα που μπορούσαν να αξιοποιηθούν (βλ. πιο κάτω στην ποιοτική ανάλυση). Έπειτα γινόταν ρύθμιση της πίεσης στην επόμενη τιμή και το πείραμα επαναλαμβανόταν για διάφορους όγκους σταγόνας. Όταν ολοκληρώνονταν οι επαναλήψεις με την μεταβολή της πίεσης ρυθμίζονταν εκ νέου η κλίση της επιφάνειας και επαναλαμβανόταν η διαδικασία. Όλες οι επαναλήψεις καταγράφονταν στα 240 καρέ ανά δευτερόλεπτο, με χρήση του ίδιου Samsung Galaxy Note 9 που αναφέρθηκε παραπάνω. Στόχος είναι η εξαγωγή ποσοτικών δεδομένων θέσης -χρόνου της σταγόνας για τις διάφορες συνθήκες λειτουργίας της διάταξης.

## 3. Αποτελέσματα και συζήτηση

### 3.1 Ποιοτική Ανάλυση

#### 3.1.1 Παρατήρηση και κατηγοριοποίηση της κίνησης

Με βάση την παραπάνω διαδικασία ελήφθησαν σειρά βίντεο, τα οποία πρώτα αξιολογήθηκαν ποιοτικά, πριν την επεξεργασία τους για την εξαγωγή ποσοτικών δεδομένων θέσης-χρόνου. Τα βίντεο αρχικά αξιολογήθηκαν οπτικά, σε κανονική ταχύτητα αλλά και σε slow motion. Χαρακτηρίστηκε η συμπεριφορά της κάθε επανάληψης/σταγόνας κατηγοριοποιώντας τη στις 8 κατηγορίες που ακολουθούν. Σε κάθε βίντεο, ένας βαθμός δόθηκε σε κάθε κατηγορία κίνησης αν ήταν ξεκάθαρο ότι η συμπεριφορά συνέβαινε, μισός βαθμός αν υπήρχε αμφιβολία, και κανένας αν η συμπεριφορά δε συνέβαινε. Οι 8 κατηγορίες ήταν οι ακόλουθες:

1. **Καλή:** Όλη ή τουλάχιστον ένα διακριτό μέρος της σταγόνας κινείται κατά μήκος της επιφάνειας παραμένοντας σε επαφή με την επιφάνεια. Χαρακτηριστικό παράδειγμα φαίνεται στην παράγραφο 3.2.1 Εικόνα 9. Τα αποτελέσματα από αυτήν την κατηγορία χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια για την εξαγωγή ποσοτικών δεδομένων θέσης-χρόνου
2. **Χωρισμός:** Η σταγόνα χωρίζεται στα δύο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα φαίνεται στο Παράρτημα, στην Εικόνα 15.
3. **Σπάσιμο:** Η σταγόνα σπάει σε πάρα πολλές μικρότερες σταγόνες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα φαίνεται στο Παράρτημα, στην Εικόνα 16.
4. **Ψεκασμός:** Υπάρχουν πολλές μικρές σταγόνες που φεύγουν από την κυρίως σταγόνα, σαν να υπάρχει ψεκασμός. Χαρακτηριστικό παράδειγμα φαίνεται στο Παράρτημα, στην Εικόνα 17.
5. **Πτήση:** Η σταγόνα ή τουλάχιστον ένα διακριτό μέρος της πετάει, χωρίς να βρίσκεται σε επαφή με την επιφάνεια, σαν να εκτοξεύεται. Χαρακτηριστικό παράδειγμα φαίνεται στο Παράρτημα, στην Εικόνα 18.
6. **Εκτροχιασμός:** Η σταγόνα αντί να κινηθεί ευθεία, κινείται διαγώνια και πέφτει από τα πλάγια της επιφάνειας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα φαίνεται στο Παράρτημα, στην Εικόνα 19. Αυτής της κατηγορίας τα βίντεο δεν χρησιμοποιήθηκαν για την ποσοτική ανάλυση διότι προκαλούν προβλήματα στην εξαγωγή δεδομένων θέσης-χρόνου
7. **Πίσω:** Η σταγόνα κινείται προς τα πίσω αντί για μπροστά. Χαρακτηριστικό παράδειγμα φαίνεται στο Παράρτημα, στην Εικόνα 20.
8. **Κόλλημα:** Η σταγόνα κολλάει και σταματάει να μετακινείται. Χαρακτηριστικό παράδειγμα φαίνεται στο Παράρτημα, στην Εικόνα 21.

Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται αθροιστικά οι βαθμολογίες για όλες τις κατηγορίες σε κάθε συνδυασμό παραμέτρων. Η κλίση αναφέρεται στην κλίση του άξονα X, όπως φαίνεται στην Εικόνα 10, στην παράγραφο 3.2.1.

Πίνακας 1: Παρουσιάζεται η συμπεριφορά της σταγόνας για κάθε συνδυασμό παραμέτρων (πίεση, όγκο σταγόνας, και γωνία κλίσης). Ένας βαθμός δίνεται κάθε φορά που παρατηρείται η συγκεκριμένη συμπεριφορά, και μισός βαθμός κάθε φορά που υπάρχει αμφιβολία για το αν συνέβη. Σε παρένθεση φαίνεται ο αριθμός των βίντεο, που αντιστοιχεί στον αριθμό των επαναλήψεων για κάθε συνδυασμό παραμέτρων.

<b>Κλίση Επιφάνειας 13°</b>						
Πίεση	~1000 mbar		~1350 mbar		~1700 mbar	
Όγκος Σταγόνας	Βαθμοί ανά κατηγορία	(αριθμός βίντεο)	Βαθμοί ανά κατηγορία	(αριθμός βίντεο)	Βαθμοί ανά κατηγορία	(αριθμός βίντεο)
20 ul	4 Καλή 3 Ψεκασμός 1,5 Πτήση 0,5 Σπάσιμο	(5)	3 Πτήση 1,5 Καλή 1 Χωρισμός 0,5 Σπάσιμο	(3)	2,5 Πτήση 1 Ψεκασμός 0,5 Καλή	(3)
45 ul	5 Καλή 5 Χωρισμός 2 Σπάσιμο 1 Ψεκασμός 0,5 Πτήση	(8)	3 Καλή 1 Σπάσιμο 1 Ψεκασμός 0,5 Πτήση	(3)	2 Καλή 2 Σπάσιμο 1 Ψεκασμός	(3)
70 ul	4 Καλή 0,5 Χωρισμός	(4)	3 Καλή 1 Χωρισμός	(3)	2 Καλή 2 Σπάσιμο 1 Χωρισμός	(3)
<b>Κλίση Επιφάνειας 24°</b>						
Πίεση	~1000 mbar		~1350 mbar		~1700 mbar	
Όγκος Σταγόνας	Βαθμοί ανά κατηγορία	(αριθμός βίντεο)	Βαθμοί ανά κατηγορία	(αριθμός βίντεο)	Βαθμοί ανά κατηγορία	(αριθμός βίντεο)
20 ul	3 Πτήση 0,5 Σπάσιμο	(3)	3 Πτήση 1 Χωρισμός 1 Σπάσιμο	(3)	3 Πτήση 3 Σπάσιμο	(3)
45 ul	4 Καλή	(4)	3 Καλή 1 Σπάσιμο 1 Χωρισμός	(3)	2,5 Πτήση 1,5 Σπάσιμο 0,5 Χωρισμός	(3)
70 ul	3 Καλή	(3)	3 Καλή 1 Χωρισμός	(3)	1 Πτήση 1 Χωρισμός 0,5 Σπάσιμο 0,5 Καλή	(3)
<b>Κλίση Επιφάνειας 33°</b>						
Πίεση	~1000 mbar		~1350 mbar		~1700 mbar	
Όγκος Σταγόνας	Βαθμοί ανά κατηγορία	(αριθμός βίντεο)	Βαθμοί ανά κατηγορία	(αριθμός βίντεο)	Βαθμοί ανά κατηγορία	(αριθμός βίντεο)

20 ul	4,5 Καλή 4 Κόλλημα 3 Ψεκασμός 2,5 Σπάσιμο 2,5 Χωρισμός 1 Εκτροχιάζεται 1 Πίσω 0,5 Πτήση	(9)	6 Πτήση 3,5 Σπάσιμο 1 Καλή 1 Σπάσιμο	(7)	6 Πτήση 2 Σπάσιμο 1 Εκτροχιάζεται 1 Ψεκασμός 1 Πίσω	(6)
45 ul	8 Κόλλημα 6 Ψεκασμός 2 Χωρισμός 1 Καλή 1 Εκτροχιάζεται 1 Πτήση	(9)	6 Σπάσιμο 5 Πτήση 2,5 Καλή 2 Χωρισμός 2 Εκτροχιάζεται 1,5 Ψεκασμός	(9)	6 Σπάσιμο 2,5 Καλή 1,5 Πτήση 1 Ψεκασμός 1 Χωρισμός	(8)
70 ul	8,5 Κόλλημα 8 Ψεκασμός 6 Χωρισμός 4 Καλή 2 Πίσω	(13)	4,5 Καλή 4,5 Χωρισμός 4 Σπάσιμο 2 Ψεκασμός 2 Εκτροχιάζεται 2 Πτήση	(9)	9 Σπάσιμο 4 Ψεκασμός 3 Χωρισμός 1 Πτήση 1 Καλή	(9)
<b>Κλίση Επιφάνειας 44°</b>						
Πίεση	~1000 mbar		~1350 mbar		~1700 mbar	
Όγκος Σταγόνας	Βαθμοί ανά κατηγορία	(αριθμός βίντεο)	Βαθμοί ανά κατηγορία	(αριθμός βίντεο)	Βαθμοί ανά κατηγορία	(αριθμός βίντεο)
20 ul	2,5 Κόλλημα 2 Ψεκασμός 2 Καλή 1,5 Πτήση	(4)	4 Πτήση 3 Κόλλημα 3 Ψεκασμός 3 Σπάσιμο 2 Πίσω 2 Εκτροχιάζεται 1 Χωρισμός 0,5 Καλή	(6)	8,5 Πτήση 4,5 Σπάσιμο 3 Πίσω 2 Χωρισμός 1 Ψεκασμός 1 Εκτροχιάζεται 0,5 Καλή	(10)
45 ul	5,5 Κόλλημα 3 Ψεκασμός 2 Πίσω 1,5 Καλή 1 Πτήση 0,5 Σπάσιμο	(8)	4 Σπάσιμο 4 Καλή 3 Ψεκασμός 2 Πτήση 2 Χωρισμός 2 Εκτροχιάζεται	(7)	4,5 Σπάσιμο 3 Ψεκασμός 2,5 Καλή 2 Χωρισμός 1,5 Πτήση 1 Κόλλημα	(6)
70 ul	5 Κόλλημα 5 Ψεκασμός 2 Πίσω	(6)	5 Χωρισμός 4,5 Καλή 3,5 Πτήση 3 Ψεκασμός 2 Σπάσιμο 2 Πίσω 2 Εκτροχιάζεται	(9)	5 Ψεκασμός 3 Πτήση 3 Σπάσιμο 2 Χωρισμός 2 Καλή 1 Εκτροχιάζεται 1 Πίσω	(6)

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι κύριες κατηγορίες που συνέβησαν σε κάθε συνδυασμό παραμέτρων. Δίπλα στις κατηγορίες φαίνεται το ποσοστό των βαθμών της συμπεριφοράς προς τον αριθμό των βίντεο που αναλύθηκαν.

Πίνακας 2: Σε κάθε συνδυασμό παραμέτρων φαίνονται οι πιο συχνές συμπεριφορές των σταγόνων με το ποσοστό εμφάνισής τους.

<b>Κλίση Επιφάνειας 13°</b>			
	~1000 mbar	~1350 mbar	~1700 mbar
20 ul	Καλή 80% Ψεκασμός 60%	Πτήση 67% Καλή 50%	Πτήση 83%
45 ul	Καλή 63% Χωρισμός 63%	Καλή 100%	Καλή 66% Σπάσιμο 66%
70 ul	Καλή 100%	Καλή 100%	Καλή 66% Σπάσιμο 66%
<b>Κλίση Επιφάνειας 24°</b>			
	~1000 mbar	~1350 mbar	~1700 mbar
20 ul	Πτήση 100%	Πτήση 100%	Πτήση 100% Σπάσιμο 100%
45 ul	Καλή 100%	Καλή 100%	Πτήση 83% Σπάσιμο 50%
70 ul	Καλή 100%	Καλή 100%	- (μίξη)
<b>Κλίση Επιφάνειας 33°</b>			
	~1000 mbar	~1350 mbar	~1700 mbar
20 ul	Καλή 50% Κόλλημα 44%	Πτήση 86% Σπάσιμο 50%	Πτήση 100%
45 ul	Κόλλημα 89%	Σπάσιμο 67% Πτήση 56%	Σπάσιμο 75%
70 ul	Κόλλημα 65% Ψεκασμός 62% Χωρισμός 46%	Καλή 50% Χωρισμός 50% Σπάσιμο 44%	Σπάσιμο 100%
<b>Κλίση Επιφάνειας 44°</b>			
	~1000 mbar	~1350 mbar	~1700 mbar
20 ul	Κόλλημα 63% Ψεκασμός 50% Καλή 50%	Πτήση 67% Κόλλημα 50% Ψεκασμός 50% Σπάσιμο 50%	Πτήση 85%
45 ul	Κόλλημα 69%	Καλή 57% Σπάσιμο 57%	Σπάσιμο 75%
70 ul	Κόλλημα 83%	Χωρισμός 56% Καλή 50%	Ψεκασμός 83% Σπάσιμο 50% Πτήση 50%

Στον Πίνακα 3 εμφανίζονται τα ποσοστά της “Καλής” συμπεριφοράς. Υπογραμμισμένες και με bold σημειώνονται οι περιπτώσεις με πάνω από 50% καλής συμπεριφοράς.

Πίνακας 3: Εμφανίζονται τα ποσοστά της “Καλής” συμπεριφοράς ανά συνδυασμό παραμέτρων. Υπογραμμισμένες και σε Bold παρουσιάζονται οι περιπτώσεις με πάνω από 50% καλής συμπεριφοράς.

<b>Κλίση Επιφάνειας 13°</b>			
	~1000 mbar	~1350 mbar	~1700 mbar
20 ul	<b><u>80</u></b>	<b><u>50</u></b>	17
45 ul	<b><u>63</u></b>	<b><u>100</u></b>	<b><u>66</u></b>
70 ul	<b><u>100</u></b>	<b><u>100</u></b>	<b><u>66</u></b>
<b>Κλίση Επιφάνειας 24°</b>			
	~1000 mbar	~1350 mbar	~1700 mbar
20 ul	0	0	0
45 ul	<b><u>100</u></b>	<b><u>100</u></b>	0
70 ul	<b><u>100</u></b>	<b><u>100</u></b>	17
<b>Κλίση Επιφάνειας 33°</b>			
	~1000 mbar	~1350 mbar	~1700 mbar
20 ul	<b><u>50</u></b>	14	0
45 ul	11	28	31
70 ul	31	<b><u>50</u></b>	11
<b>Κλίση Επιφάνειας 44°</b>			
	~1000 mbar	~1350 mbar	~1700 mbar
20 ul	<b><u>50</u></b>	8	5
45 ul	19	<b><u>57</u></b>	42
70 ul	0	<b><u>50</u></b>	33

### 3.1.2 Συμπεράσματα ποιοτικής ανάλυσης

Από την ποιοτική αυτή ανάλυση προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Στις συνθήκες που οι δυνάμεις που εναντιώνονται στην κίνηση είναι μεγάλες, δηλαδή μεγάλη κλίση και μεγάλος όγκος και η δύναμη που συνεισφέρει στην κίνηση είναι επίσης μεγάλη δηλαδή υψηλή πίεση, παρατηρούνται συχνά συμπεριφορές σπασίματος και διάσπασης της συνοχής της σταγόνας, όπως Σπάσιμο, Χωρισμός και Ψεκασμός. Αρκετά αναμενόμενο, αφού οι αντίθετες μεγάλες δυνάμεις κάνουν πολύ δύσκολο να διατηρήσουν οι σταγόνες την συνοχή τους, ειδικά οι μεγάλες σταγόνες.
- Στις συνθήκες που οι δυνάμεις που εναντιώνονται στην κίνηση είναι μεγάλες, δηλαδή μεγάλη κλίση και μεγάλος όγκος και η δύναμη που συνεισφέρει στην κίνηση είναι μικρή δηλαδή χαμηλή πίεση, παρατηρείται συχνά η σταγόνα να κολλάει και να μην κινείται. Αναμενόμενη συμπεριφορά, καθώς δεν υπάρχει αρκετή δύναμη για να μετακινήσει την σταγόνα.
- Στις συνθήκες που οι δυνάμεις που εναντιώνονται στην κίνηση είναι μικρές, δηλαδή μικρή κλίση και μικρός όγκος και η δύναμη που συνεισφέρει στην κίνηση είναι μεγάλη, δηλαδή υψηλή πίεση, παρατηρείται συχνά η σταγόνα να πετάει. Η συγκεκριμένη συμπεριφορά παρατηρείται κυρίως σε όγκο των 20 ul, προφανώς γιατί μεγαλύτεροι όγκοι σταγόνων δεν μπορούν να διατηρήσουν τη συνοχή τους σε συνθήκες ‘πτήσης’.
- Στις ενδιάμεσες καταστάσεις, όπου η δύναμη από την πίεση αρκεί για να προωθήσει τη σταγόνα, και η αντίσταση δεν είναι αρκετά ισχυρή για να σπάσει την σταγόνα, παρατηρείται συχνά Καλή συμπεριφορά.



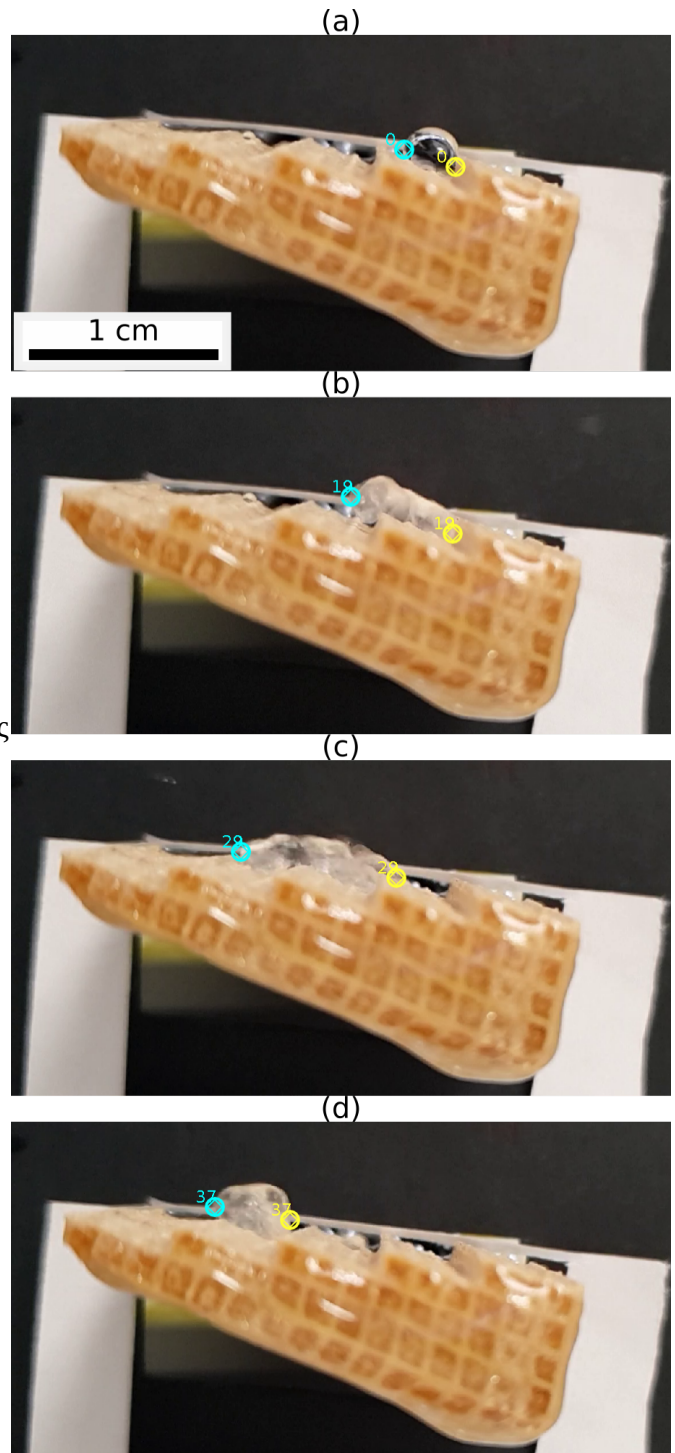
## 3.2 Ποσοτική Ανάλυση

### 3.2.1 Ανάλυση Βίντεο

Στα βίντεο που η σταγόνα είχε αρκετά καλή συμπεριφορά για όλη ή τουλάχιστον για το μεγαλύτερο μέρος της κίνησης, ακολούθησε ποσοτική ανάλυση. Για την ανάλυση των βίντεο χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό “Tracker, Video Analysis and Modeling Tool”

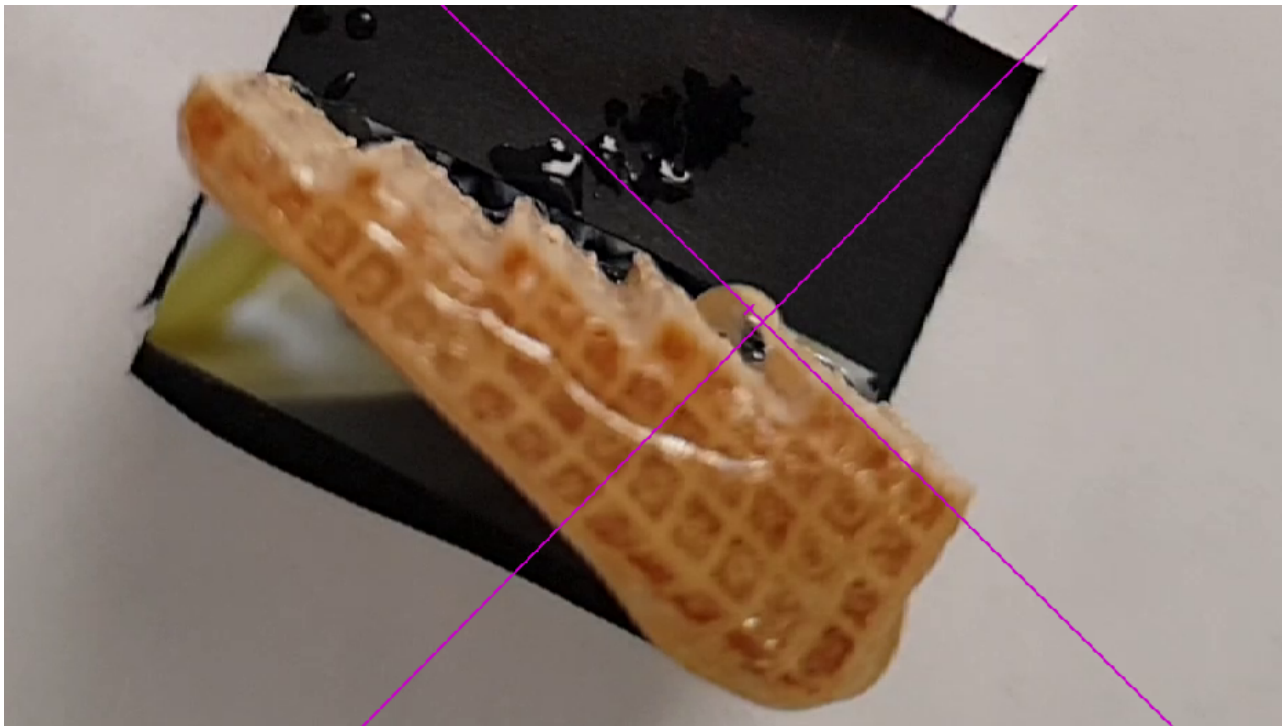
(<https://physlets.org/tracker/>). Τα βίντεο τραβήχτηκαν στα 240 καρέ το δευτερόλεπτο (fps). Σε κάθε καρέ, χειροκίνητα, επιλέχθηκε το πιο πίσω και το πιο μπροστά σημείο της σταγόνας. Το κέντρο μάζας των δύο αυτών σημείων θεωρήθηκε το κέντρο μάζας της σταγόνας. Στην Εικόνα 9 φαίνεται η διαδικασία για μερικά ενδεικτικά καρέ.

Η συγκεκριμένη διαδικασία προσδιορισμού της θέσης, επαναλήφθηκε 4 φορές σε ένα βίντεο που δεν χρησιμοποιήθηκε στην εργασία. Η μέση τυπική απόκλιση των θέσεων που προσδιορίστηκαν ήταν  $1 \cdot 10^{-4}$  m.



Εικόνα 9: Ενδεικτικά καρέ που φαίνεται η κίνηση της σταγόνας και η ανάλυση του βίντεο. (a) Το καρέ 0 του βίντεο, πριν ξεκινήσει να ρέει ο αέρας. Έπειτα ο αέρας ξεκινάει και η σταγόνα αρχίζει να κινείται. (b) Το 180 καρέ του βίντεο. (c) Το 280 καρέ. (d) Το 370 καρέ. Σε κάθε καρέ το πιο πίσω σημείο της σταγόνας σημειώνεται με κίτρινο και το πιο μπροστά με γαλάζιο. Το κέντρο μάζας των δύο αυτών σημείων θεωρείται το κέντρο μάζας της σταγόνας.

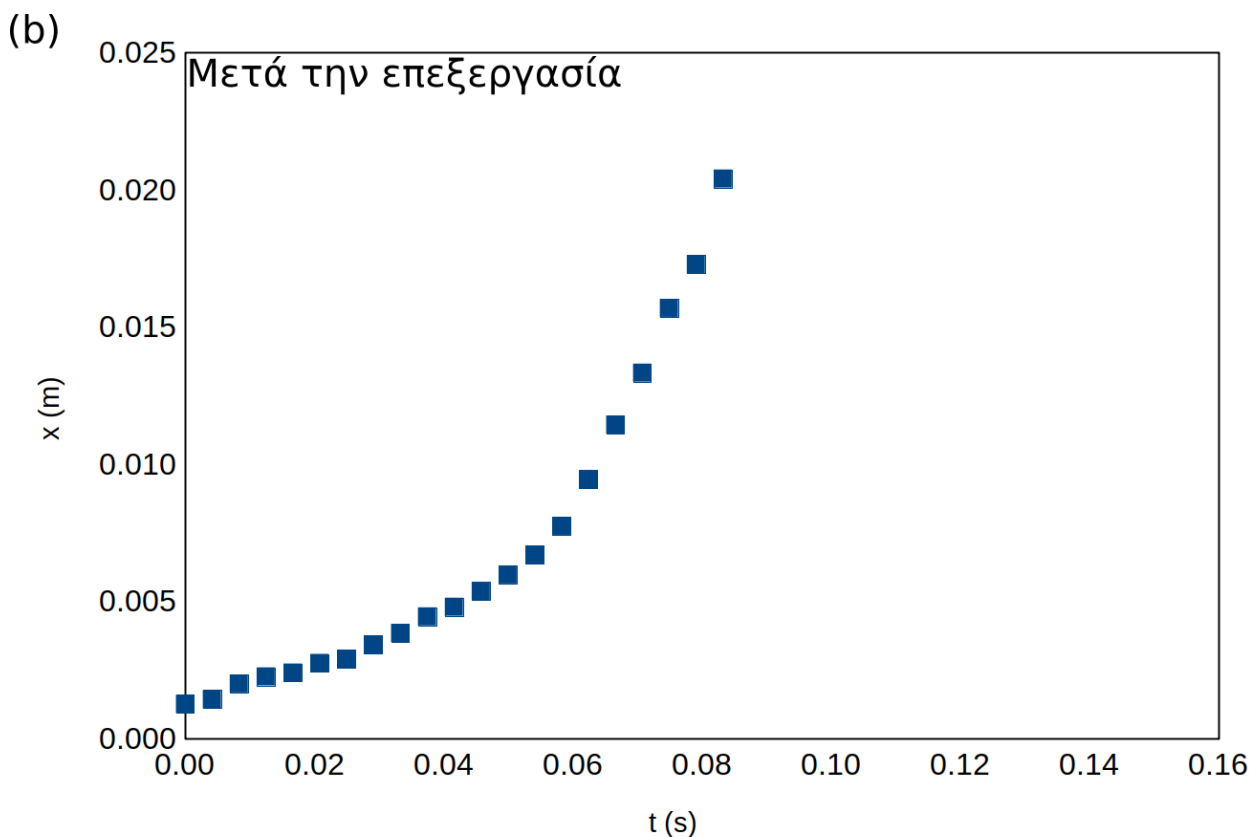
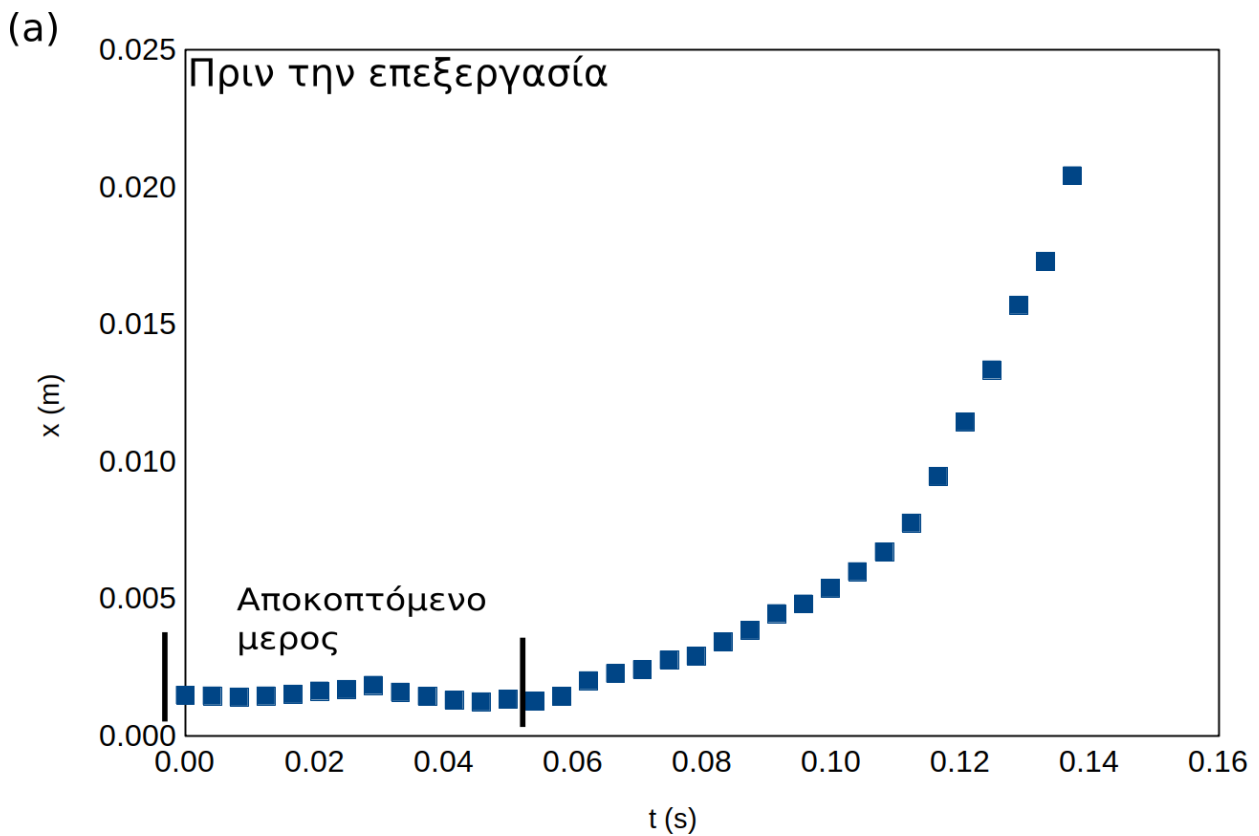
Στο σύστημα αξόνων που χρησιμοποιήθηκε ο άξονας X ήταν παράλληλος στην επιφάνεια των 'σκαλοπατιών' της καστανίας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 10. Έτσι προέκυψαν από το πρόγραμμα τα δεδομένα θέσης-χρόνου για κάθε ένα από τα βίντεο.



Εικόνα 10: Καρέ από την ανάλυση του βίντεο που δείχνει το σύστημα αξόνων που χρησιμοποιήθηκε που φαίνεται με μοβ χρώμα. Ο άξονας χ είναι παράλληλος στην οριζόντια επιφάνεια των 'σκαλοπατιών'.

### 3.2.2 Επεξεργασία Δεδομένων

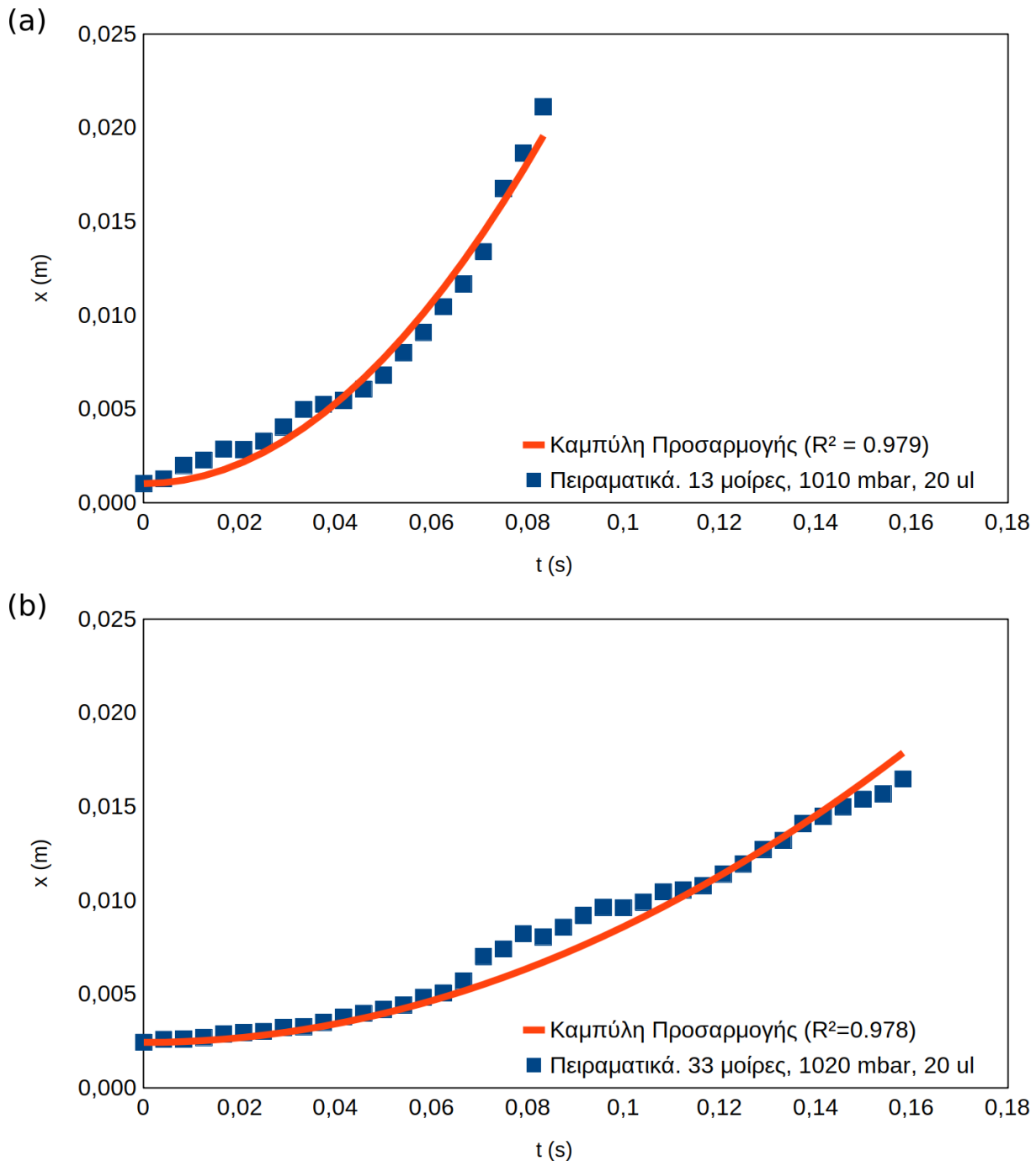
Τα αρχικά δεδομένα επεξεργάστηκαν αποκόπτοντας κάποιο μέρος αυτών ώστε η στιγμή  $t=0$  να είναι η στιγμή που η σταγόνα αποκολλήθηκε (derinned) και ξεκίνησε την πορεία της. Έτσι κατά τη μετέπειτα κινητική ανάλυση της σταγόνας, τα αποτελέσματα δεν επηρεάστηκαν από τον χρόνο μέχρι να υπερνικηθούν οι δυνάμεις για να ξεκινήσει η κίνηση. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της επεξεργασίας αυτής φαίνεται στο Διάγραμμα 1. Η θέση της σταγόνας τη στιγμή της αποκόλλησης ήταν πάντα πρακτικά η ίδια ή πολύ κοντά με την αρχική θέση. Επίσης, το χρονικό σημείο που θεωρήθηκε ότι αποκολλήθηκε η σταγόνα, ήταν σε τοπικό ελάχιστο. Δηλαδή σε εκείνο το χρονικό σημείο το κέντρο μάζας έκανε λίγο πίσω πριν αρχίσει να μετακινείται προς τα εμπρός. Έτσι παρά την αποκοπή συνεχίζει να μπορεί να θεωρηθεί ότι η αρχική ταχύτητα είναι 0.



Διάγραμμα 1: Χαρακτηριστικό παράδειγμα της επεξεργασίας πειραματικών δεδομένων θέσης-χρόνου πριν την περαιτέρω ανάλυσή τους. Αποκόπτεται το αρχικό κομμάτι όπου η σταγόνα παραμένει προσκολλημένη στην επιφάνεια και ουσιαστικά δεν μετακινείται. (a) Φαίνονται τα αρχικά δεδομένα και το μέρος των δεδομένων που αποκόπηκαν. (b) Τα τελικά δεδομένα μετά την επεξεργασία.

### 3.2.3 Μέτρηση Επιτάχυνσης

Στα πειραματικά δεδομένα προσαρμόστηκε με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων μια καμπύλη της μορφής  $x(t) = \frac{1}{2}at^2 + x_0$  όπου  $a$  είναι η επιτάχυνση και  $x_0$  είναι η αρχική θέση. Η αρχική ταχύτητα έχει θεωρηθεί 0, οπότε δεν υπάρχει στην έκφραση της καμπύλης. Δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα της διαδικασίας παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 2.



Διάγραμμα 2: Πειραματικά δεδομένα θέσης-χρόνου και της καμπύλης προσαρμογής τους. Είναι δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα καθώς το  $R^2$  της προσαρμογής τους είναι περίπου ίσο με το διάμεσο των  $R^2$  όλων των επαναλήψεων.

Αφού η αρχική θέση είναι γνωστή, από την προσαρμογή της καμπύλης προκύπτει η επιτάχυνση, η οποία είναι η μετρούμενη επιτάχυνση. Έτσι, για κάθε επανάληψη με τις παραμέτρους της, είναι γνωστή η επιτάχυνση.

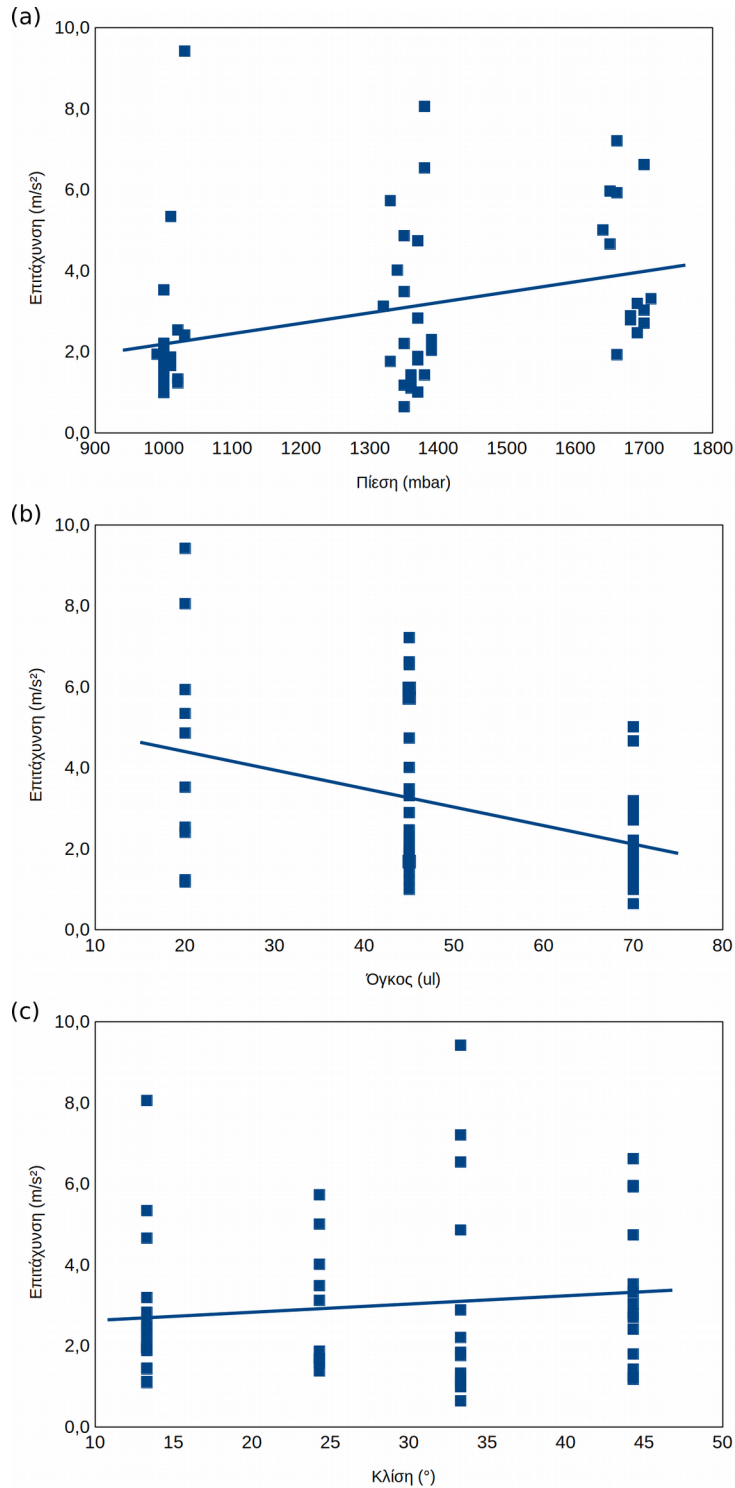
Οι παράμετροι όλων των επαναλήψεων που συμπεριλήφθηκαν στην ποσοτική ανάλυση, καθώς και η πειραματική επιτάχυνση παρουσιάζονται στον πίνακα 4.

*Πίνακας 4: Σύνοψη πειραμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στην ποσοτική ανάλυση και στην ανάπτυξη του μοντέλου. Σε κάθε πείραμα δίνονται η κλίση, ο όγκος, η πίεση και η 'μετρούμενη επιτάχυνση'.*

Αύξοντας αριθμός	Κλίση (°)	Πίεση (mbar)	Όγκος (ul)	Μετρούμενη Επιτάχυνση (m/s <sup>2</sup> )	Αύξοντας αριθμός	Κλίση (°)	Πίεση (mbar)	Όγκος (ul)	Μετρούμενη Επιτάχυνση (m/s <sup>2</sup> )
1	13	1020	20	2.5	29	33	1020	20	1.2
2	13	1010	20	5.3	30	33	1030	20	9.4
3	13	1000	45	1.4	31	33	1000	45	1.8
4	13	990	45	1.9	32	33	1000	70	1.0
5	13	1000	70	1.1	33	33	1020	70	1.3
6	13	1000	70	1.9	34	33	1000	70	2.2
7	13	1000	70	1.1	35	33	1350	20	4.9
8	13	1380	20	8.1	36	33	1380	45	6.5
9	13	1350	45	2.2	37	33	1330	45	1.8
10	13	1390	45	2.0	38	33	1370	45	1.0
11	13	1390	45	2.3	39	33	1360	70	1.1
12	13	1370	70	1.9	40	33	1350	70	0.6
13	13	1370	70	2.8	41	33	1660	45	7.2
14	13	1360	70	1.4	42	33	1680	45	2.9
15	13	1690	45	2.5	43	44	1030	20	2.4
16	13	1660	45	1.9	44	44	1000	20	3.5
17	13	1690	70	3.2	45	44	1350	20	1.2
18	13	1650	70	4.7	46	44	1370	45	4.7
19	24	1010	45	1.7	47	44	1360	45	1.2
20	24	1000	45	1.7	48	44	1370	70	1.8
21	24	1000	70	1.6	49	44	1380	70	1.4
22	24	1010	70	1.9	50	44	1660	20	5.9
23	24	1000	70	1.4	51	44	1650	45	6.0
24	24	1330	45	5.7	52	44	1700	45	6.6
25	24	1340	45	4.0	53	44	1710	45	3.3
26	24	1350	45	3.5	54	44	1700	70	2.7
27	24	1320	70	3.1	55	44	1700	70	3.0
28	24	1640	70	5.0	56	44	1680	70	2.8

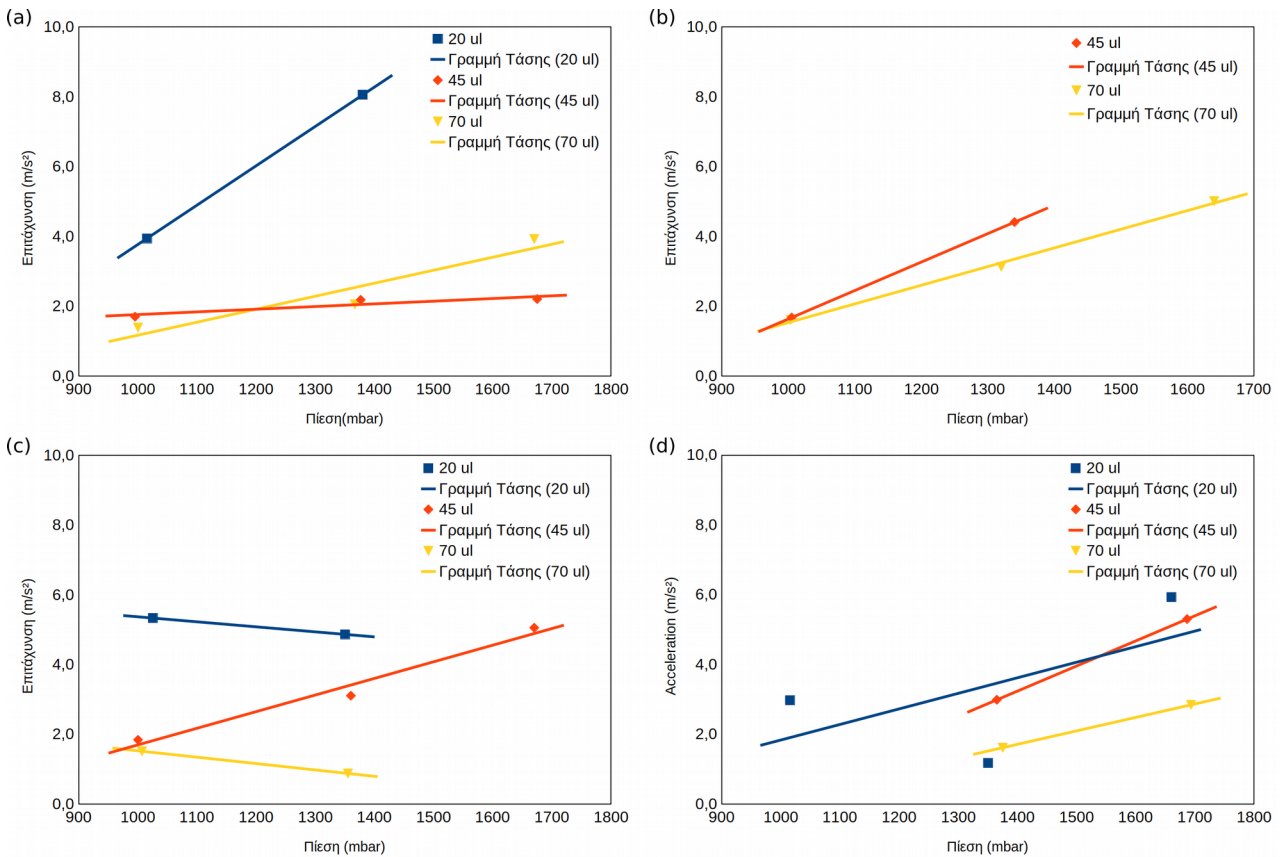
### 3.2.4 Εξάρτηση επιτάχυνσης από την πίεση

Η επιτάχυνση όπως μετρήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, όλων των επαναλήψεων σε σχέση με την κάθε μια παράμετρο τους (πίεση, κλίση, όγκος) φαίνεται στα Διάγραμμα 3. Με μπλε τετράγωνα φαίνεται η κάθε μία επανάληψη, και η μπλε γραμμή είναι η γραμμή τάσης. Παρατηρήθηκε ότι, όπως αναμένονταν, η τάση είναι η αύξηση της επιτάχυνσης με την αύξηση την πίεσης. Επίσης φαίνεται και τάση πτώσης της επιτάχυνσης με την αύξηση του όγκου.



Διάγραμμα 3: Πειραματική επιτάχυνση ως προς (a) Πίεση (b) Όγκο (c) Κλίση. Κάθε μπλε τετράγωνο αντιστοιχεί σε μία επανάληψη και η μπλε γραμμή είναι η γραμμή τάσης.

Για να απομονωθεί η επιρροή της πίεσης στην επιτάχυνση από την επιρροή της κλίσης και του όγκου, όλες οι επαναλήψεις χωρίστηκαν με βάση την κλίση και τον όγκο, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 4. Έτσι προέκυψαν 4 διαγράμματα, ένα για κάθε κλίση που το καθένα περιλαμβάνει τα πειραματικά δεδομένα χωρισμένα ανά όγκο. Έτσι σε κάθε κατηγορία όλες οι παράμετροι είναι σταθερές εκτός από την πίεση. Επιβεβαιώνεται λοιπόν ότι πράγματι η επιτάχυνση αυξάνεται με την αύξηση της πίεσης, αφού 9 από τις 11 γραμμές τάσης είναι αυξητικές.



Διάγραμμα 4: Πειραματική επιτάχυνση ως προς πίεση, κατηγοριοποιημένη ανά όγκο και κλίση. (a) 13 ° (b) 24 ° (c) 33 ° (d) 44 °. Στις περιπτώσεις που στον ίδιο συνδυασμό παραμέτρων υπήρχαν παραπάνω από μία επαναλήψεις, χρησιμοποιήθηκε ο μέσος όρος τους.

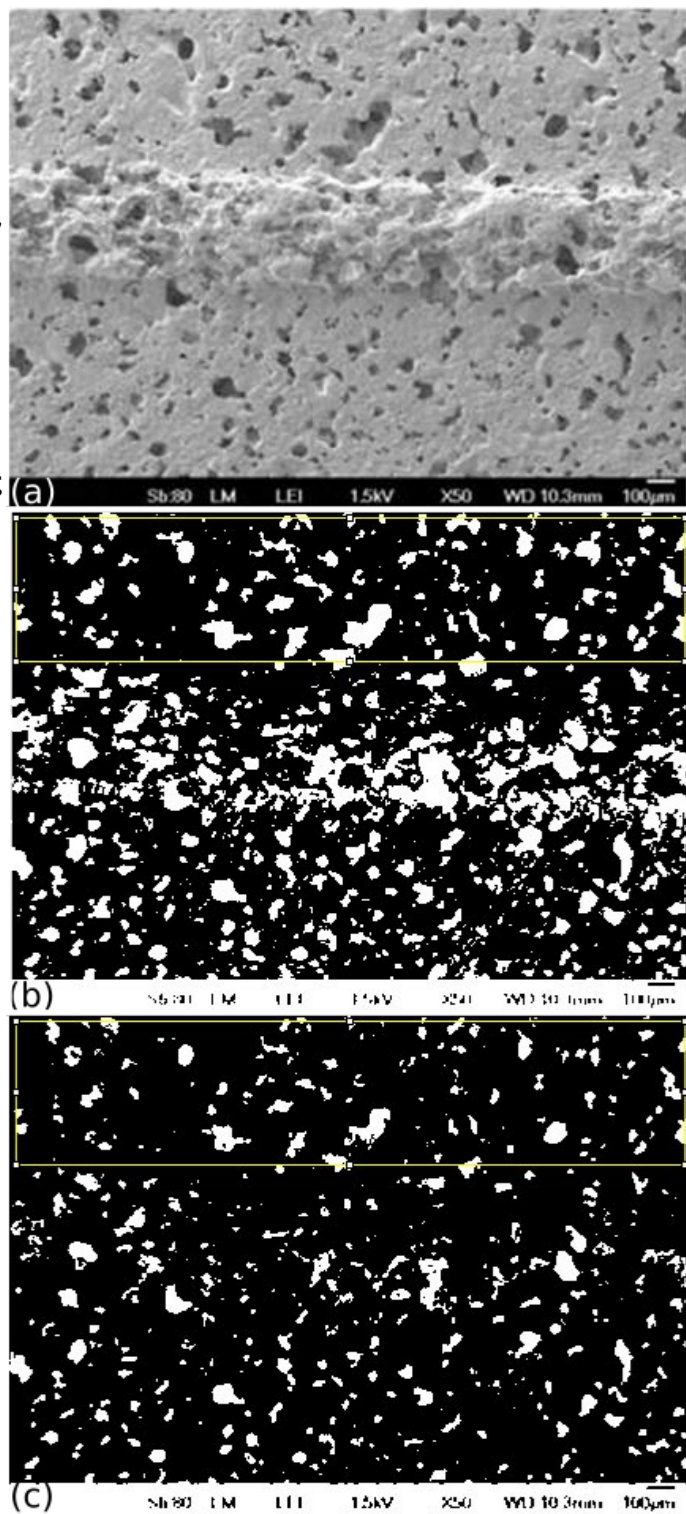


## 4. Μοντέλο

### 4.1 Στοιχεία Διάταξης

#### 4.1.1 Επιφανειακό πορώδες επιφάνειας

Για την εκτίμηση του επιφανειακού πορώδους της επιφάνειας χρησιμοποιήθηκε ανάλυση εικόνας σε εικόνα ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης. Η εικόνα αρχικά δημοσιεύθηκε στην αναφορά [29], και αφορά την ίδια επιφάνεια με της παρούσας εργασίας. Η ανάλυση εικόνας έγινε στο ImageJ με τη χρήση χειροκίνητου thresholding. Χειροκίνητο γιατί το όριο φωτεινότητας που μια περιοχή θα θεωρούνταν πόρος ή όχι, τέθηκε από τον χειριστή, και το πρόγραμμα εμφάνιζε το ποσοστό του πορώδους. Η διαδικασία επαναλήφθηκε μία φορά ως άνω όριο του τι θα μπορούσε να είναι πόρος, μία φορά ως το κάτω όριο του πορώδους, και δύο φορές ως η ρεαλιστική εκτίμηση. Επίσης μελετήθηκαν και δύο εικόνες SEM από το πλαϊνό μέρος της επιφάνειας. Το εύρος του πορώδους ήταν από 9 έως 20%, με το 13% να εκτιμάται από τον συγγραφέα ως η πιο πιθανή τιμή και να χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς της ταχύτητας του αέρα παρακάτω. Η αρχική εικόνα της μικροσκοπίας φαίνεται στην Εικόνα 11 (a). Στις εικόνες (b) και (c) φαίνεται η εικόνα μετά την ανάλυση. Με άσπρο είναι χρωματισμένες οι επιφάνειες που θεωρούνται πόροι και με μαύρο η υπόλοιπη επιφάνεια. Το κίτρινο πλαίσιο στο πάνω μέρος των εικόνων είναι η περιοχή της δειγματοληψίας. Η εικόνα (b) είναι η εικόνα από την ανάλυση που υπερεκτιμάει τους πόρους, και η εικόνα (c) από την ανάλυση που τις υποεκτιμάει.

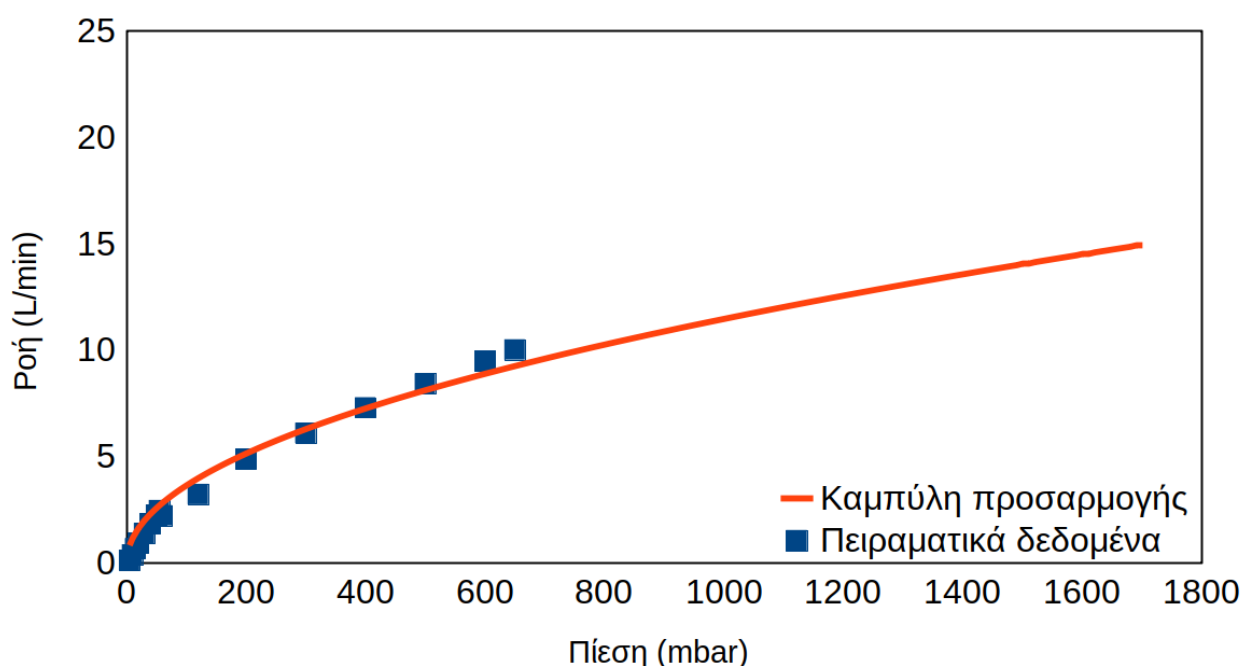


Εικόνα 11: Ανάλυση μικροσκοπίας SEM. Στην εικόνα (a) παρουσιάζεται η αρχική εικόνα μικροσκοπίας, από αναφορά [29], και στις (b) και (c) η ανάλυσή τους. Το κίτρινο παραλληλόγραμμο στο πάνω μέρος είναι η περιοχή της δειγματοληψίας. Με άσπρο είναι χρωματισμένες οι περιοχές που θεωρούνται πόροι και με μαύρο η υπόλοιπη επιφάνεια. Η εικόνα (b) είναι η υψηλή εκτίμηση του πορώδους και η (c) είναι η χαμηλή.



## 4.1.2 Συσχέτιση ροής αέρα και πίεσης αέρα

Η συσχέτιση της ροής του αέρα μέσα από την επιφάνεια με τη μετρούμενη πίεση του αέρα, έγινε πειραματικά και με προεκβολή των πειραματικών δεδομένων. Για τη μέτρηση της ογκομετρικής ροής του αέρα σε πιέσεις από 5 έως 55 mbar χρησιμοποιήθηκε ο μετρητής ροής αέρα Aalborg PMR1-011398, και για εύρος από 60 έως 650 mbar, Organomation Associates N-Evap 111. Μετρήθηκε η ροή του αέρα και η πίεση στον αγωγό που οδηγεί τον αέρα προς την επιφάνεια. Για να βρεθεί η σχέση πίεσης-ροής, προσαρμόστηκε καμπύλη της μορφής  $Q = \Delta \cdot \sqrt{P}$  όπου Q είναι η ογκομετρική ροή του αέρα, Δ είναι μια σταθερά προσαρμογής και P η πίεση του αέρα. Από την προσαρμογή με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων προέκυψε η καμπύλη όπου  $\Delta = 0.362$ , με την πίεση σε mbar και τη ροή σε λίτρα ανά λεπτό και  $R^2 = 0.997$ . Τα δεδομένα και η καμπύλη προσαρμογής παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 5. Έτσι γνωρίζοντας την πίεση του αέρα, που είναι πειραματικό δεδομένο, υπολογίζεται και η ογκομετρική ροή του αέρα.



Διάγραμμα 5: Δεδομένα και καμπύλη προσαρμογής για τη συσχέτιση της ογκομετρικής ροής και της πίεσης του αέρα στη διάταξη.

## 4.1.3 Υπολογισμός της ταχύτητας του αέρα

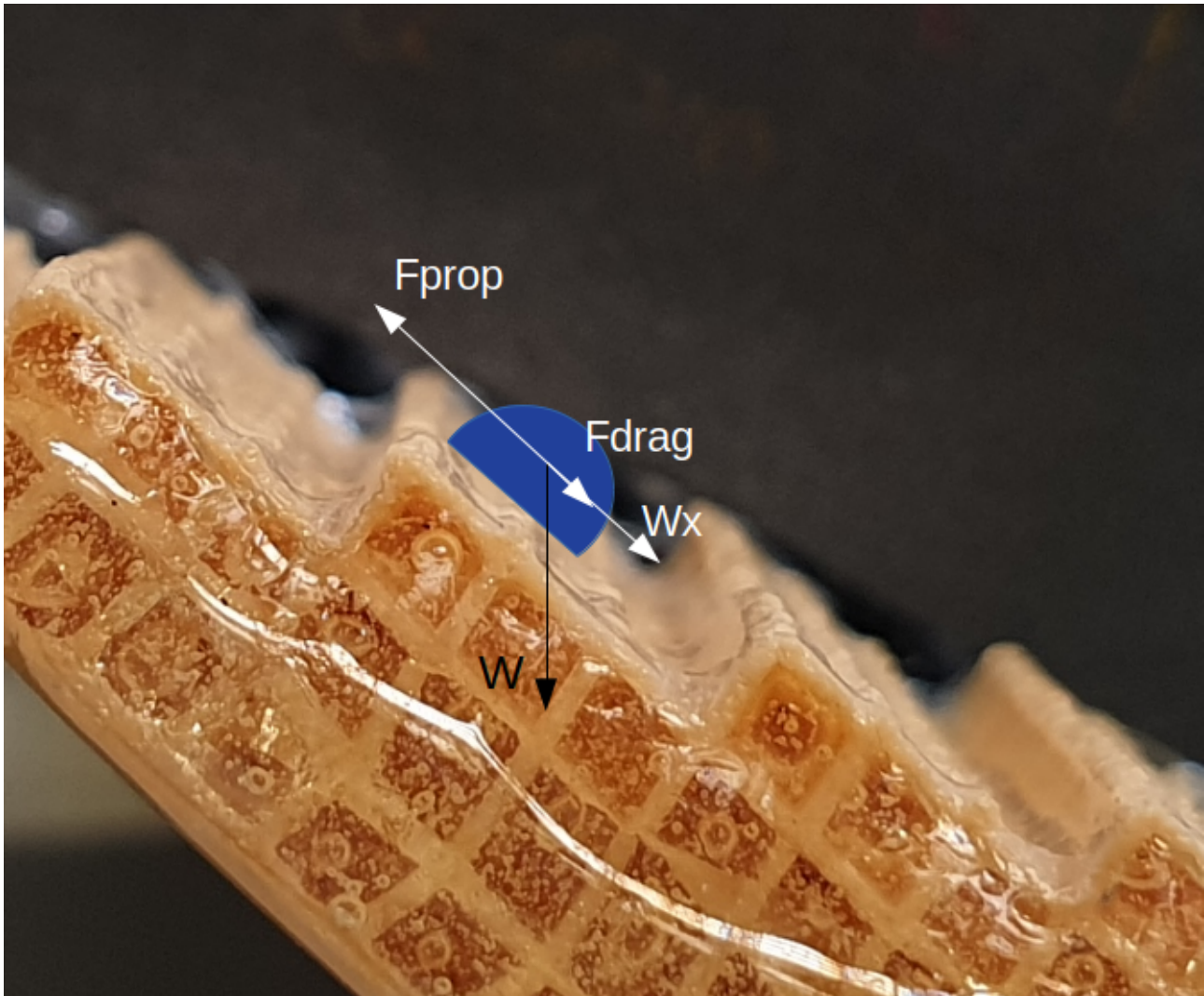
Για την εύρεση της ταχύτητας του αέρα, καταστρώνεται και επιλύεται το ισοζύγιο μάζας του αέρα. Η μάζα του αέρα στην είσοδο του υλικού είναι ίση με τη μάζα στην έξοδο, αφού δεν υπάρχει κανενός είδους συσσώρευση. Η ροή μάζας στην είσοδο ισούται με την ογκομετρική ροή, που είναι υπολογισμένη στην ενότητα 4.1.2, πολλαπλασιασμένη με την πυκνότητα του αέρα, που για γνωστή πίεση και θερμοκρασία που θεωρείται θερμοκρασία δωματίου, είναι γνωστή. Υπολογίζεται λοιπόν η ροή μάζας του αέρα στην είσοδο, και άρα και στην έξοδο. Η ροή της μάζας στην έξοδο υπολογίζεται ως την ογκομετρική ροή επί την πυκνότητα του αέρα. Αφού ο αέρας εκτονώνεται στο περιβάλλον, η πίεσή του θεωρείται ατμοσφαιρική και η θερμοκρασία δωματίου, και άρα είναι γνωστή η πυκνότητα του και υπολογίζεται η ογκομετρική ροή του στην έξοδο.

Από την παράγραφο 4.1.1, είναι γνωστό το επιφανειακό πορώδες της επιφάνειας. Επίσης μετρήθηκε το συνολικό εμβαδόν της επιφάνειας, και άρα είναι γνωστό το συνολικό εμβαδόν των

πόρων. Όλη η μάζα του αέρα εκτονώνεται μέσα από τους πόρους, συνεπώς όντας γνωστό το συνολικό εμβαδόν τους, σε συνδυασμό με την ογκομετρική ροή στην έξοδο, υπολογίζεται η ταχύτητα του αέρα στην έξοδο, η οποία χρησιμοποιείται παρακάτω, στον υπολογισμό της δύναμης που ασκεί ο αέρας στη σταγόνα.

## 4.2 Δυνάμεις που ασκούνται στην σταγόνα

Στο μοντέλο που αναπτύσσεται στην εργασία αυτή λαμβάνουμε υπόψη 3 δυνάμεις που δρουν στη σταγόνα. Το βάρος ( $W$ ), η προωθητική δύναμη ( $F_{prop}$ ), και η τριβή ( $F_{drag}$ ), όπως παρουσιάζονται γραφικά στην Εικόνα 12. Το βάρος είναι γνωστό, για την προωθητική δύναμη μελετώνται 3 διαφορετικές προσεγγίσεις και για την τριβή μελετώνται 2 διαφορετικές προσεγγίσεις.



Εικόνα 12: Σχηματική αναπαράσταση της σταγόνας και των δυνάμεων που της ασκούνται.

### - Βάρος ( $W_x$ ) :

Η συνιστώσα  $X$  του βάρους που ασκείται στη σταγόνα είναι καλά ορισμένη και υπολογίζεται βάσει της κλίσης και του όγκου της σταγόνας:

$$W_x = m g \sin(\theta) = V \rho_{water} g \sin(\theta)$$

όπου  $m$  είναι η μάζα της σταγόνας,  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $V$  ο όγκος της σταγόνας,  $\theta$  η κλίση και  $\rho_{water}$  η πυκνότητα του νερού.

## - Τριβή ( $F_{drag}$ ):

Μελετώνται δύο μορφές:

1. Η σταθερή τριβή για σταγόνες, που αναμένεται να είναι ίση με [28], [30]:

$$F_{drag} = C_1 2w\gamma(\cos(\theta_R) - \cos(\theta_A))$$

Όπου  $C_1$  είναι σταθερά προσαρμογής (fitting factor) που εξαρτάται από την πίεση και προσαρμόζεται για κάθε επανάληψη του πειράματος,  $\gamma$  είναι η επιφανειακή τάση του υγρού,  $2w$  είναι το πλάτος της σταγόνας στην κατεύθυνση κάθετη στην κίνηση,  $\theta_R$ ,  $\theta_A$  είναι η υποχωρούσα και προελαύνουσα γωνία επαφής (receding and advancing contact angles) αντίστοιχα.

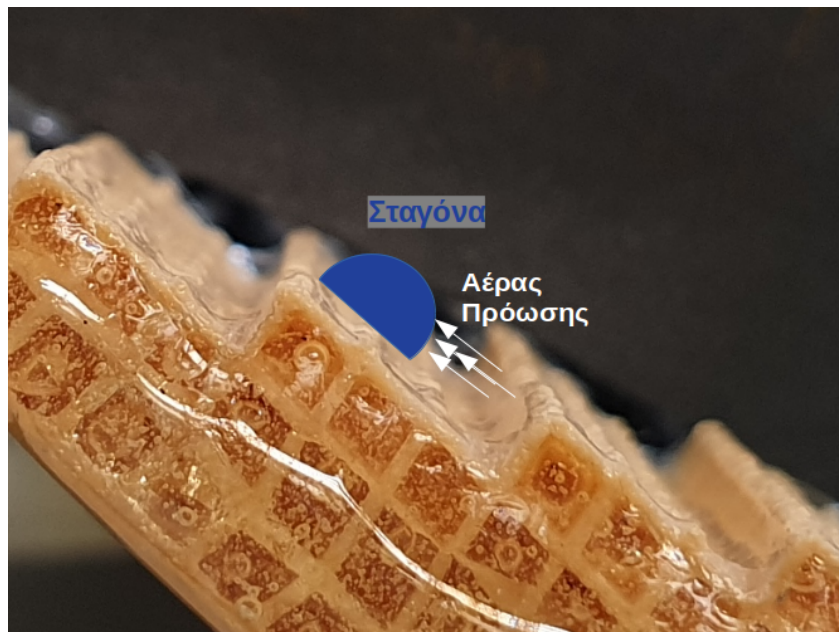
2. Η τριβή που εξαρτάται από την ταχύτητα της σταγόνας [18]:

$$F_{drag} = C_2 2w v_{droplet}$$

όπου  $C_2$  είναι σταθερά προσαρμογής που εξαρτάται από την πίεση και προσαρμόζεται για κάθε επανάληψη του πειράματος,  $2w$  είναι το πλάτος της σταγόνας στην κατεύθυνση κάθετη στην κίνηση, και  $v_{droplet}$  είναι η ταχύτητα της σταγόνας.

## - Προωθητική Δύναμη ( $F_{prop}$ ):

Η προωθητική δύναμη πρέπει να είναι αεροδυναμικής φύσης, αφού η ροή του αέρα από το κάθετο κομμάτι της επιφάνειας είναι η μόνη δύναμη που θα μπορούσε να προωθήσει τη σταγόνα κατά τη φορά της κίνησής της. Αυτή η επίδραση παρουσιάζεται σχηματικά στην Εικόνα 13.



Εικόνα 13: Σχηματική αναπαράσταση του τρόπου που δημιουργείται η δύναμη πρόωσης από τον αέρα που προέρχεται από το κάθετο μέρος της επιφάνειας.

Τρεις μορφές μελετώνται για την προωθητική δύναμη:

1. Η μορφή που προτάθηκε από την ομάδα του Amirfazli και καταλήγει ότι η δύναμη εξαρτάται από την  $v_{air}^3$  [31]  $F_{prop} \sim B_1 v_{air}^3$

Πιο αναλυτικά, η δύναμη που προτείνεται είναι:

$$F_{prop} = B_1 \rho_{air} \left( \frac{dU}{dZ} \right)^2 \frac{AH^2}{8}$$

Όπου  $B_1$  είναι σταθερά προσαρμογής και θεωρείται σταθερή για όλες τις επαναλήψεις,  $\rho_{air}$  είναι η πυκνότητα του αέρα,  $A$  είναι το εμβαδόν της προβολής της επιφάνειας κάθετη στην κατεύθυνση του αέρα,  $H$  είναι το ύψος της σταγόνας και  $\frac{dU}{dZ}$  είναι το στρωτό οριακό στρώμα που

προσεγγίζεται ως  $\frac{dU}{dZ} = 0.332 \sqrt{\frac{v_{air}^3}{\nu x}}$  όπου  $v_{air}$  είναι η ταχύτητα του αέρα,  $x$  είναι η απόσταση κατά τη ροή του αέρα από την αρχή του boundary layer, και  $\nu$  είναι το κινηματικό ιξώδες του αέρα.

2. Η αεροδυναμική δύναμη που εξαρτάται από την  $v_{air}^2$ :  $F_{prop} = B_2 \frac{1}{2} C_d A \rho_{air} v_{air}^2$

Όπου  $B_2$  είναι σταθερά προσαρμογής και θεωρείται σταθερή για όλες τις επαναλήψεις,  $A$  είναι το εμβαδόν της προβολής της επιφάνειας κάθετη στην κατεύθυνση του αέρα,  $\rho_{air}$  είναι η πυκνότητα του αέρα,  $C_d$  είναι μια παράμετρος που συνήθως προκύπτει πειραματικά και περιλαμβάνει την επιρροή κυρίως του σχήματος του αντικειμένου, και  $v_{air}$  είναι η σχετική ταχύτητα του αέρα και του αντικειμένου.

3. Μια αεροδυναμική δύναμη σαν την παραπάνω, αλλά που εξαρτάται από την  $v_{air}^1$

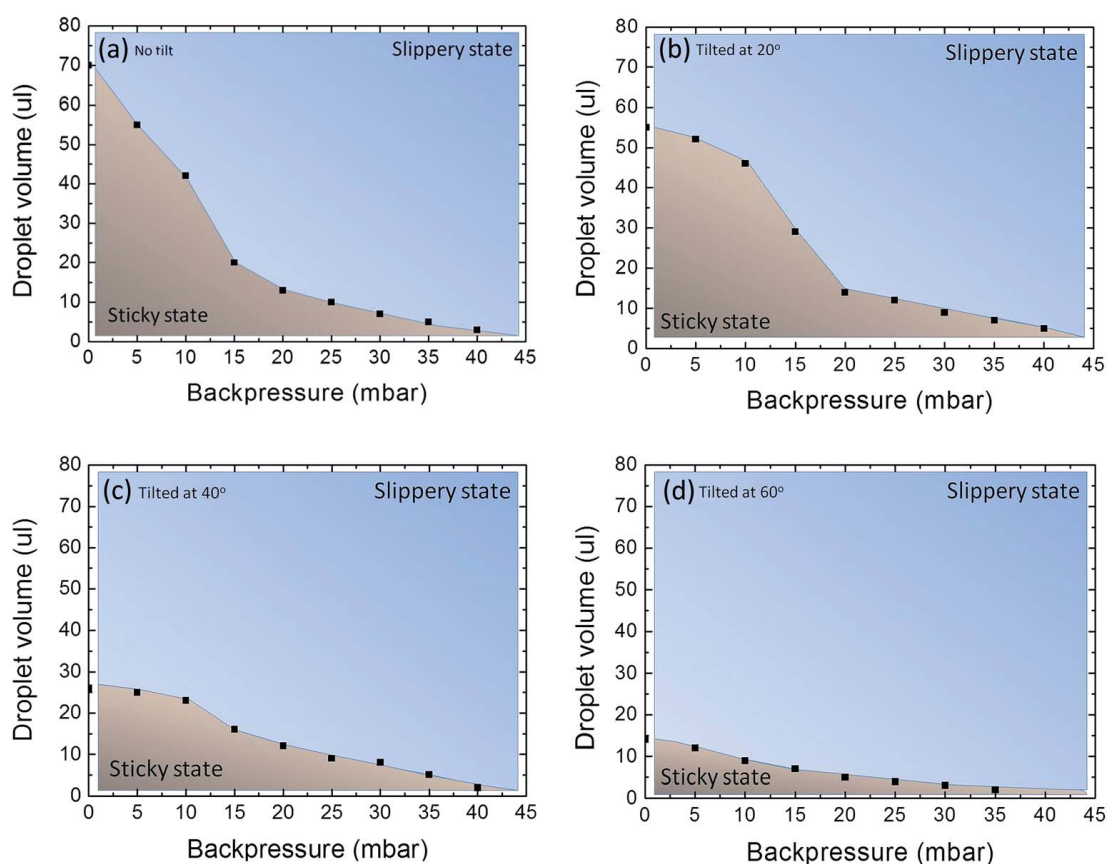
$$F_{prop} = B_3 \frac{1}{2} C_d A \rho_{air} v_{air}$$

Όπου  $B_3$  είναι σταθερά προσαρμογής και θεωρείται σταθερή για όλες τις επαναλήψεις.

### 4.3 Αναμενόμενη σχέση μεταξύ τριβής (σταθεράς C) και πίεσης

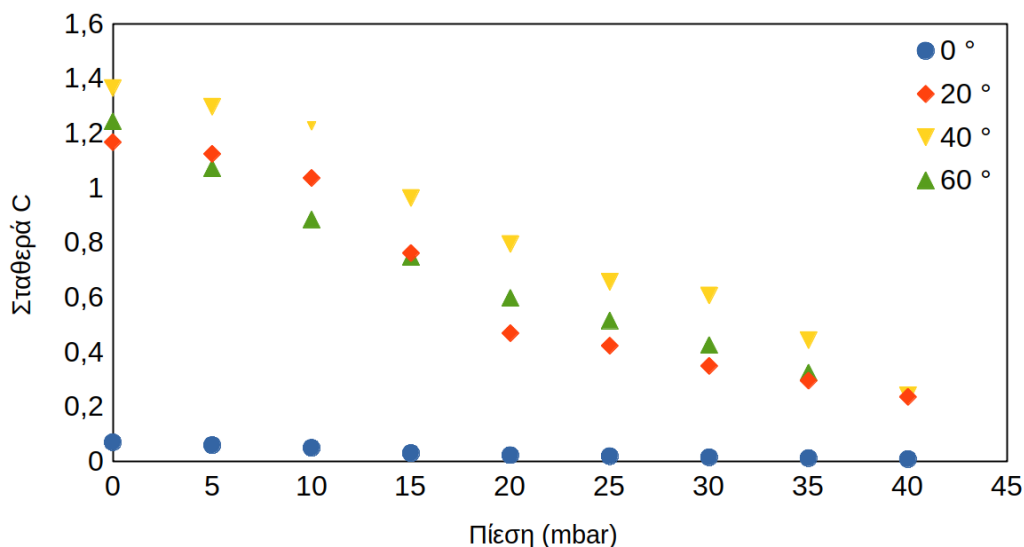
Σε προηγούμενη εργασία της ομάδας του Βούρδα, μελετήθηκε η σχέση μεταξύ της τριβής ( $F_{drag}$ ) και της πίεσης του αέρα που έρεε μέσα από την επιφάνεια [28]. Η επιφάνεια που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματά τους ήταν από το ίδιο υλικό και κατασκευασμένη με τον ίδιο τρόπο όπως η επιφάνεια που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία αλλά ήταν επίπεδη, χωρίς το σχήμα καστανίας (τα 'σκαλοπάτια') που έχει η παρούσα επιφάνεια.

Σε εκείνη την εργασία, μετρήθηκε η κίνηση σε διαφορετικές κλίσεις, 0, 20, 40 και 60°. Τοποθετούνταν σταγόνες διαφορετικών όγκων στην επιφάνεια και μελετούνταν η ελάχιστη πίεση αέρα που απαιτούνταν για να κυλήσει η σταγόνα. Η βαρύτητα και η τριβή ήταν οι μόνες δυνάμεις που ασκούσαν στη σταγόνα. Παρουσιάστηκαν λοιπόν τα δεδομένα πίεσης-όγκου σταγόνας, για κάθε κλίση, όπως φαίνεται στην Εικόνα 14.



Εικόνα 14: Δεδομένα όπως παρουσιάζονται στην αναφορά [28]. Για κάθε κλίση παρουσιάζεται ο ελάχιστος όγκος σταγόνας που κυλούσε για την κάθε πίεση. (a)  $0^\circ$  κλίση (b)  $20^\circ$  κλίση (c)  $40^\circ$  κλίση (d)  $60^\circ$  κλίση.

Με περαιτέρω ανάλυση σε αυτά τα δεδομένα, βρέθηκε η αναμενόμενη σχέση μεταξύ τριβής (συγκεκριμένα του παράγοντα προσαρμογής  $C$ ) και πίεσης. Στην οριακή πίεση που η σταγόνα κυλούσε, θεωρήθηκε ότι οριακά οι δυνάμεις που ασκούνταν στη σταγόνα ισούταν, δηλαδή  $F_{\text{drag}} = W_x$ . Αντικαθιστώντας τις δυνάμεις με τους τύπους τους προκύπτει ότι για τον κάθε όγκο, κλίση, και την οριακή τους πίεση, ισχύει  $C_1 2w\gamma(\cos(\theta_r) - \cos(\theta_a)) = V\rho_{\text{water}}g\sin(\theta)$  όπου  $\theta_r$  και  $\theta_a$  είναι γνωστά για το νερό στην συγκεκριμένη επιφάνεια, περίπου  $110^\circ$  και  $135^\circ$  αντίστοιχα [28]  $\rho_{\text{water}}$ ,  $\gamma$ ,  $g$  είναι γενικές γνωστές ποσότητες,  $V$  και  $\theta$  είναι γνωστά από τα δεδομένα του πειράματος και το  $2w$  προκύπτει από τον όγκο θεωρώντας την σταγόνα ημισφαίριο. Συνεπώς λύνοντας για κάθε πίεση, προκύπτει το αντίστοιχο  $C_1$  για την αντίστοιχη πίεση όπως παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 6.



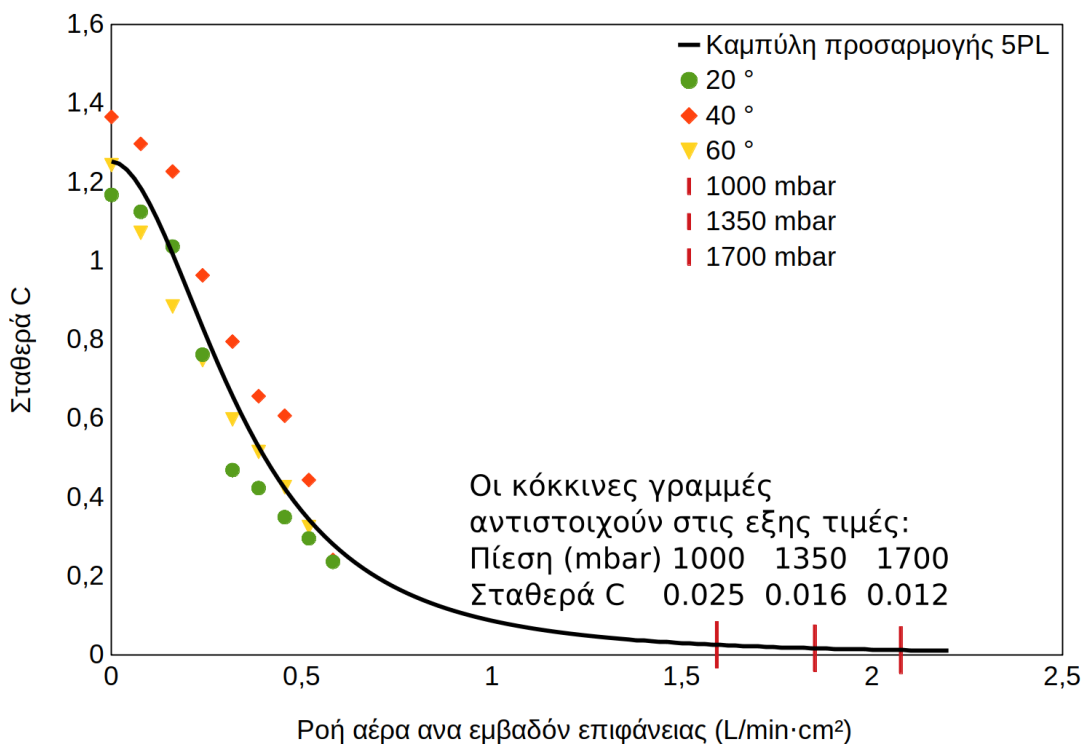
Διάγραμμα 6: Σταθερά  $C$  της τριβής προς την πίεση του αέρα που ρέει μέσα από την επιφάνεια. Προκύπτει από ανάλυση δεδομένων από αναφορά [28]. Με μπλε κύκλους παρουσιάζονται τα δεδομένα από τα πειράματα με  $0^\circ$  κλίση, με κόκκινα τετράγωνα από  $20^\circ$ , με κίτρινα ανάποδα τρίγωνα από  $40^\circ$  και με πράσινα τρίγωνα  $60^\circ$ .



Παρατηρείται ότι η σταθερά της τριβής μειώνεται με την αύξηση της πίεσης όπως εξάλλου αναμένεται λόγω αύξησης της ροής του αέρα με την αύξηση της πίεσης. Η βιβλιογραφία δείχνει ότι η μείωση της τριβής αυξάνεται με την αύξηση της ροής του αέρα [27]. Τα δεδομένα για την οριζόντια επιφάνεια ( $0^\circ$ ) απορρίπτονται, καθώς είναι εμφανώς διαφορετικά από τα δεδομένα με τις άλλες κλίσεις. Τα δεδομένα εξάλλου των  $0^\circ$  κλίση, είναι εγγενώς λιγότερο κατάλληλα για την παρούσα ανάλυση, λόγω της πολύ ασθενούς βαρυτικής δύναμης που δημιουργεί την κίνηση, καθώς και των πολύ μεγαλύτερων σφαλμάτων που υπάρχουν στην μέτρηση της κλίσης και στο ημίτονο της γωνίας που υπάρχει στον τύπο.

Η καμπύλη προσαρμογής των δεδομένων είναι σιγμοειδής μορφής όπως επιβεβαιώνεται και από την βιβλιογραφία [32]. Εδώ χρησιμοποιείται μη συμμετρική σιγμοειδής καμπύλη (5PL). Η μορφή αυτής της καμπύλης έχει καλή προσαρμογή με τα δεδομένα ( $R^2= 0.978$ ) και συμπίπτει με την αναμενόμενη από τη βιβλιογραφία αφού το δεύτερο σημείο καμπής της καμπύλης αντιστοιχεί περίπου στο 20% της τριβής [27],[32].

Για να εφαρμοσθούν τα αποτελέσματα της μελέτης της εργασίας [28] στην παρούσα εργασία, αντιστοιχήθηκε η πίεση που χρησιμοποιήθηκε εκεί με τη ροή του αέρα ανά εμβαδόν επιφάνειας. Επίσης αντιστοιχήθηκε η πίεση στην παρούσα μελέτη με τη ροή του αέρα ανά εμβαδόν επιφάνειας και άρα και με την εργασία [28]. Το αποτέλεσμα της παραπάνω ανάλυσης παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 7. Παρουσιάζεται η σιγμοειδής καμπύλη προσαρμογής, τα δεδομένα από την εργασία [28], και τα σημεία που αντιστοιχούν οι ομάδες πίεσης που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία. Από αυτήν την ανάλυση βρίσκεται η σταθερά C της τριβής που αναμένεται στις πιέσεις που μελετώνται στην παρούσα μελέτη. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα, η σταθερά C της τριβής μειώνεται τόσο λίγο στις πιέσεις που χρησιμοποιούνται, που αναμένεται πρακτικά σταθερή μεταξύ των τριών ομάδων πίεσης που μελετήθηκαν.



Διάγραμμα 7: Σταθερά C ως προς Ροή Αέρα. Δεδομένα από αναφορά [28], με επιπλέον ανάλυση. Οι κύκλοι, οι ρόμβοι και τα τρίγωνα δείχνουν τα δεδομένα. Η μαύρη καμπύλη είναι η καμπύλη προσαρμογής προεκβολής των δεδομένων. Οι κόκκινες γραμμές αντιστοιχούν στην ροή του αέρα που δημιουργείται στις πιέσεις που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία και οι τιμές C που αναγράφονται είναι οι τιμές της προεκβολής για αυτές τις πιέσεις.

## 4.4 Προσαρμογή του Μοντέλου

Το μοντέλο που μελετάται σε αυτήν την εργασία θεωρεί τη σταγόνα ως σημειακή μάζα, και άρα δε λαμβάνει υπόψη την παραμόρφωση του σχήματος της σταγόνας. Επιπλέον δε λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδραση του αέρα από τις κάθετες περιοχές της επιφάνειας, που δημιουργεί την δύναμη πρόωσης, με τον αέρα από τις οριζόντιες περιοχές της επιφάνειας, που μειώνει τις δυνάμεις τριβής στερεού-υγρού.

Για τις δυνάμεις του μοντέλου ισχύει ο πρώτος νόμος του Νεύτωνα, δηλαδή

$$F_{\text{prop}} - F_{\text{drag}} - W_x = m a$$

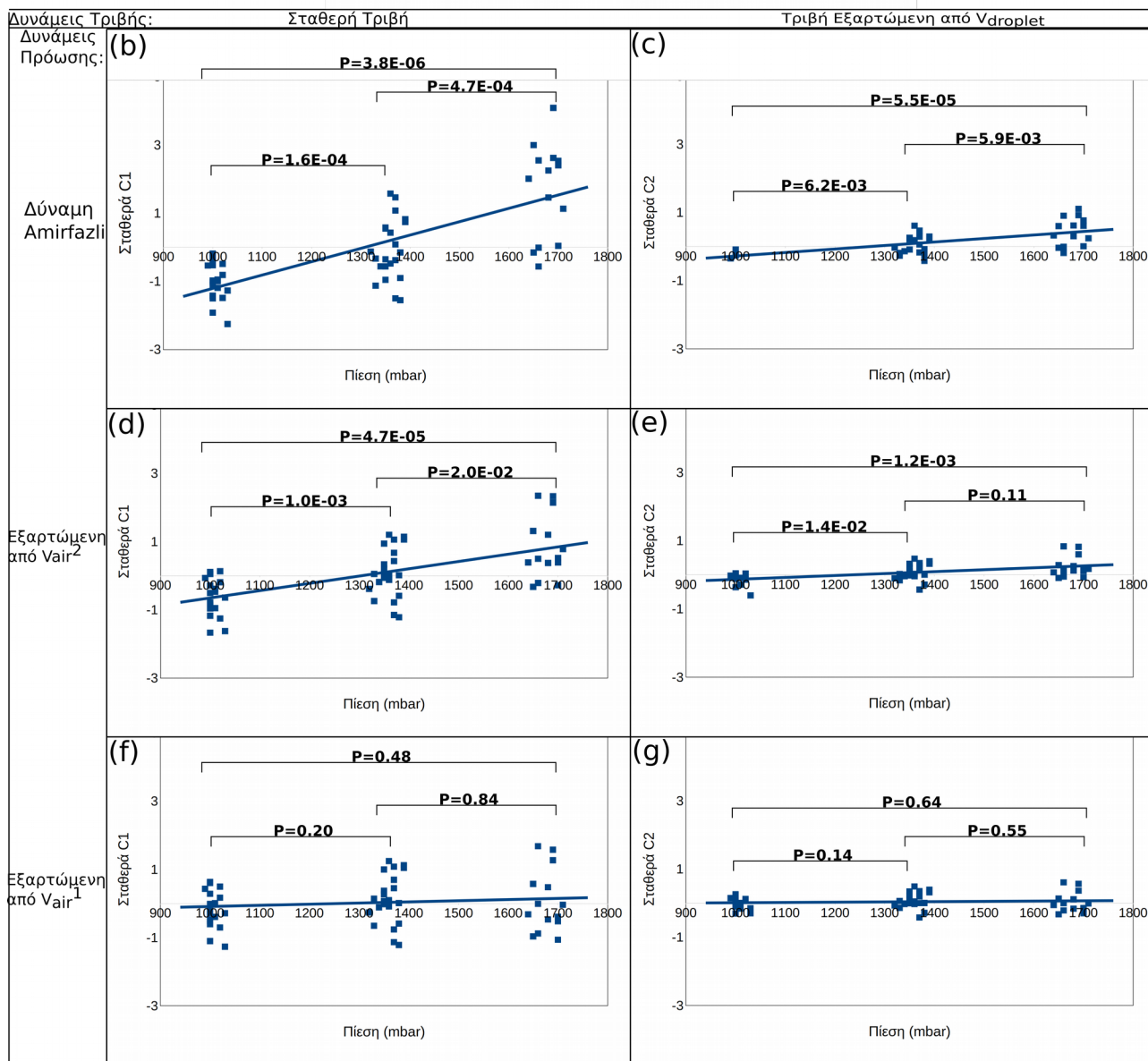
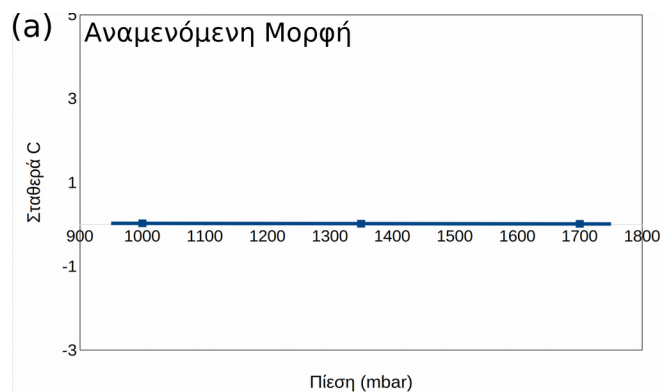
όπου  $m$  είναι η μάζα και  $a$  είναι η επιτάχυνση της σταγόνας. Από την παραπάνω σχέση εξάγεται η σχέση θέσης-χρόνου της σταγόνας. Αφού μελετώνται 3 μορφές για τη δύναμη πρόωσης και 2 για την τριβή, προκύπτουν 6 συνδυασμοί οι οποίοι μελετώνται.

Με βάση τις τιμές των  $B_1$ ,  $B_2$  ή  $B_3$ , τα  $C_1$  ή  $C_2$  προσαρμόστηκαν για να επιτευχθεί η βέλτιστη προσαρμογή του μοντέλου στα πειραματικά δεδομένα της κάθε επανάληψης. Για τη βέλτιστη προσαρμογή χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων.

Το κάθε ένα εκ των  $B_1$ ,  $B_2$  ή  $B_3$  αφορά την μορφή της δύναμης πρόωσης που αντιστοιχεί και είναι σταθερό για όλες τις επαναλήψεις, άσχετα με τις παραμέτρους πίεσης, όγκου και κλίσης. Οι τιμές τους καθορίστηκαν ώστε ο μέσος όρος των  $C_1$  που προκύπτουν όλων των σταγόνων να είναι 0.018, όπως προκύπτει από την παραπάνω ανάλυση με βάση τα δεδομένα της εργασίας [28]

Με τα  $B_1$ ,  $B_2$  και  $B_3$  γνωστά, για κάθε επανάληψη προκύπτει ένα  $C$  ( $C_1$  ή  $C_2$  ανάλογα με την μορφή της τριβής που μελετάται). Στο Διάγραμμα 8 παρουσιάζονται τα  $C_1$  ή  $C_2$  της κάθε επανάληψης ως προς την πίεση της επανάληψης.

Για να διαπιστωθεί αν η διαφορά των  $C$  μεταξύ των τριών διαφορετικών ομάδων πιέσεων είναι σημαντική, διενεργήθηκαν t-test. Το αποτέλεσμα τους δείχνει πόσο πιθανό είναι η διαφορά που παρατηρείται μεταξύ των διαφορετικών ομάδων να είναι πραγματική και όχι τυχαία. Αυτό το δείχνει η τιμή  $p$  που είναι το αποτέλεσμα του t-test. Τιμή  $p$  μικρότερη από 0.05 σημαίνει ότι η πιθανότητα αυτή είναι άνω του 95% και τότε η διαφορά θεωρείται σημαντική. Επιλέχθηκε η τιμή 0.05 ως η πιο συνήθης που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της σημαντικότητας. Στο Διάγραμμα 8 φαίνεται η τιμή  $p$  του κάθε ζεύγους ομάδων πιέσεων. Από την ανάλυση της ενότητας 4.3 αναμένεται ότι η τιμές των  $C$  αλλάζουν τόσο ελάχιστα στις πιέσεις που μελετώνται όπου η διαφορά τους αναμένεται να είναι μη σημαντική. Και σε κάθε περίπτωση δεν αναμένεται να αυξάνονται με αύξηση της πίεσης. Στο Διάγραμμα 8(a) φαίνεται η αναμενόμενη μορφή των  $C$ .



Διάγραμμα 8: Τα αποτελέσματα του μοντέλου. Στο διάγραμμα (a) παρουσιάζεται η αναμενόμενη συμπεριφορά της σταθεράς C ως προς την πίεση, και όπως φαίνεται είναι πρακτικά σταθερή. Στα διαγράμματα (b) έως (g) παρουσιάζονται οι συμπεριφορές των σταθερών C για όλους τους συνδυασμούς δυνάμεων πρόωσης και δυνάμεων τριβής που μελετούνται. Οι τιμές P είναι από 2-tailed Unequal Variances t-test για το κάθε ζευγάρι ομάδων πίεσης. Φαίνεται ότι η δύναμη πρόωσης που παρουσιάζει συμπεριφορά που ταιριάζει στην αναμενόμενη είναι αυτή που εξαρτάται από την  $Vair^1$ .



## 4.5 Αξιολόγηση των διαφορετικών μορφών δυνάμεων

Μελετήθηκαν 3 διαφορετικές μορφές για τη δύναμη πρόωσης. Η μορφή που προτάθηκε από την ομάδα του Amirfazli που εξαρτάται από την  $V_{air}^3$ , η αεροδυναμική δύναμη που εξαρτάται από την  $V_{air}^2$  και η δύναμη εξαρτώμενη από την  $V_{air}^1$ .

Στην εφαρμογή της δύναμης που προτάθηκε από την ομάδα του Amirfazli φαίνεται ότι το μοντέλο υπερεκτιμάει την επιρροή της πίεσης. Αυτό φαίνεται από το ότι σε υψηλές πιέσεις τα προσαρμοσμένα  $C$  αυξάνονται για να αντισταθμίσουν την, λόγω ισχυρής επιρροής της ταχύτητας του αέρα, αυξημένη δύναμη πρόωσης. Η πίεση συνδέεται άμεσα με την ταχύτητα του αέρα, οπότε το γεγονός ότι η δύναμη εξαρτάται από την τρίτη δύναμη της ταχύτητας του αέρα, την κάνει ευαίσθητη στην αλλαγή της πίεσης. Αυτή η αύξηση της σταθεράς  $C$  της τριβής με την αύξηση της πίεσης δεν αναμένεται, και άρα μπορεί να αποδοθεί στην υπερεκτίμηση της επίδρασης της ταχύτητας του αέρα από αυτήν τη μορφή. Τα t-test επιβεβαιώνουν ότι η αύξηση των συντελεστών τριβής όσο αυξάνεται η πίεση είναι πραγματική, αφού οι τιμές  $p$  για την δύναμη του Amirfazli είναι της τάξης του  $10^{-6}$  με  $10^{-4}$  όταν συνδυάζεται με τη σταθερή τριβή, και  $10^{-5}$  με  $10^{-3}$  όταν συνδυάζεται με την τριβή που εξαρτάται από την ταχύτητα της σταγόνας, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 8 (b) και (c) αντίστοιχα.

Για την αεροδυναμική δύναμη πρόωσης που εξαρτάται από την  $V_{air}^2$ , εμφανίζεται το ίδιο φαινόμενο, όπου η προσαρμοσμένη τριβή αυξάνεται με την πίεση. Σε αυτήν την περίπτωση η αύξηση της τριβής είναι πιο ήπια από την προηγούμενη περίπτωση, όπως άλλωστε αναμένεται, αφού αυτή η δύναμη εξαρτάται από την ταχύτητα του αέρα στο τετράγωνο, και άρα είναι λιγότερο ευαίσθητη στην πίεση σε σχέση με την δύναμη Amirfazli. Οι τιμές  $p$  των t-test είναι από  $10^{-5}$  μέχρι  $10^{-2}$  για την σταθερή τριβή και  $10^{-3}$  ως  $10^{-1}$  για την τριβή που εξαρτάται από την ταχύτητα του αέρα, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 8 (d) και (e) αντίστοιχα. Και σε αυτήν την περίπτωση οι διαφορές είναι σημαντικές και αυτή η αύξηση δεν αναμένεται οπότε αποδίδεται σε υπερεκτίμηση της συνεισφοράς της πίεσης και άρα της ταχύτητας του αέρα στην δύναμη που εξαρτάται από την  $V_{air}^2$ .

Η μορφή της δύναμης πρόωσης που δίνει το αναμενόμενο αποτέλεσμα στην προσαρμοσμένη σταθερά  $C$  της τριβής, είναι αυτή που εξαρτάται από την ταχύτητα του αέρα στην πρώτη. Οι διαφορές μεταξύ των διαφορετικών ομάδων πιέσεων δεν είναι σημαντικές, με την τιμή  $p$  να είναι μεταξύ  $10^{-1}$  και  $10^0$  και για τις δύο μορφές τριβής, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 8 (f) και (g). Αυτό το αποτέλεσμα είναι συνεπές με το αναμενόμενο, και άρα αυτή η μορφή της δύναμης πρόωσης προτείνεται ως η πλέον κατάλληλη από τις τρεις που μελετήθηκαν για να περιγράψει το φαινόμενο.

Σχετικά με τις δύο δυνάμεις τριβής που μελετήθηκαν, η δύναμη που εξαρτάται από την ταχύτητα της σταγόνας φαίνεται να αντισταθμίζει μερικώς τις αστοχίες των δυνάμεων πρόωσης που προτάθηκε από την ομάδα του Amirfazli και αυτής που εξαρτάται από την  $V_{air}^2$ , ενώ στην δύναμη πρόωσης που ταιριάζει με τα δεδομένα, δίνει παρόμοια αποτελέσματα με την σταθερή τριβή. Κατά συνέπεια, οι διαφορές μεταξύ των δύο τύπων για την τριβή είναι αρκετά μικρές και όχι επαρκείς για να προκύψει κάποιο συμπέρασμα για την καταλληλότερη μορφή.

## 5. Ενεργειακή απόδοση

Τέλος, μια εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης έγινε ως εξής. Ως ενεργειακή απόδοση ορίστηκε η μηχανική ενέργεια της σταγόνας στο τέλος της κίνησης προς το έργο που αποδόθηκε στην επιφάνεια που βρισκόταν η σταγόνα από τον αέρα μέσω της εκτόνωσής του κατά την κίνηση της σταγόνας.

Η μηχανική ενέργεια είναι το άθροισμα της κινητικής ενέργειας και της δυναμικής ενέργειας της βαρύτητας. Γνωρίζοντας για την κάθε σταγόνα την επιτάχυνση της ( $\alpha$ ) από την ενότητα 3.2.3, γνωρίζοντας τη μάζα της σταγόνας ( $m$ ) και τον χρόνο που διήρκεσε η κίνηση ( $t$ ), η κινητική ενέργεια ισούται με  $E_{kin} = \frac{1}{2} m (\alpha t)^2$ . Η δυναμική ενέργεια της βαρύτητας, γνωρίζοντας τη μάζα της σταγόνας ( $m$ ), την επιτάχυνση της βαρύτητας ( $g$ ) και τη διαφορά του ύψους της αρχικής και της τελικής θέσης της σταγόνας ( $h$ ) που προέκυψε από την ανάλυση του βίντεο της κίνησης της κάθε σταγόνας, όπως αναλύεται στην ενότητα 3.2.1 ισούται με  $E_{grav} = mgh$ . Ως ένα μέσο παράδειγμα, η περίπτωση με κλίση  $33^\circ$ , πίεση 1330 mbar και όγκο 45  $\mu$ l, παρουσιάζει επιτάχυνση  $1.77 \text{ m/s}^2$ , η κίνηση διήρκεσε 0.11 s και άρα  $E_{kin} = 8.8 \cdot 10^{-7} \text{ J}$ . Η μετρούμενη διαφορά ύψους ήταν  $4.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ , άρα  $E_{grav} = 1.98 \cdot 10^{-6} \text{ J}$ .

Το έργο της εκτόνωσης του αέρα, θεωρώντας την εκτόνωση ισοθερμοκρασιακή, υπολογίζεται ως:

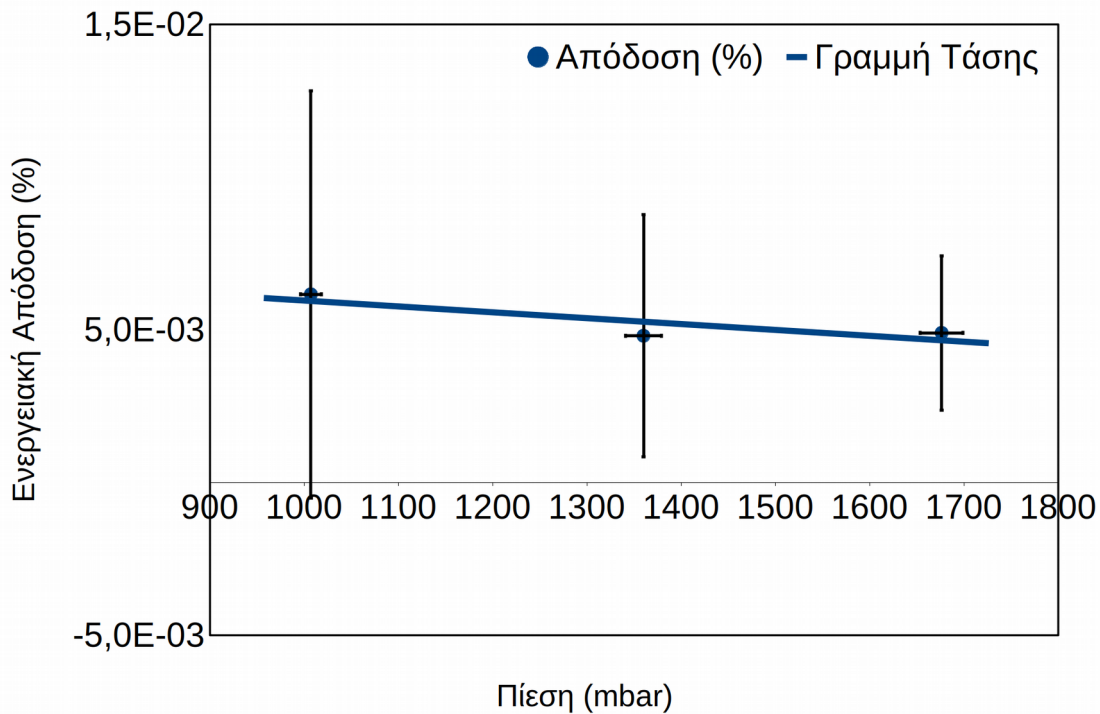
$$W_{air} = P_b V_b \ln\left(\frac{P_a}{P_b}\right) + (P_b - P_a) V_b$$

όπου  $P_a$  είναι η ατμοσφαιρική πίεση αφού ο αέρας εκτονώνεται στην ατμόσφαιρα,  $P_b$  είναι η πίεση του αέρα πριν την εκτόνωση και  $V_b$  είναι ο συνολικός όγκος πριν την εκτόνωση, του αέρα που εκτονώθηκε κατά τη διάρκεια της κίνησης της σταγόνας. Υπολογίζεται ως η ογκομετρική ροή του αέρα επί τον χρόνο κίνησης της σταγόνας. Στο παραπάνω παράδειγμα, η πίεση  $P_b = 1330 \text{ mbar}$ , άρα από την παράγραφο 4.1.2, η ογκομετρική ροή του αέρα είναι  $2.2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ , και με διάρκεια κίνησης 0.11 s, ο όγκος  $V_b = 2.47 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$ . Άρα το έργο που αποδόθηκε από τον αέρα  $|W_{air}| = 1.57 \text{ J}$

Για να μην επηρεαστεί η ενεργειακή απόδοση από το μέγεθος της επιφάνειας, και να υπολογιστεί μόνο η ενέργεια που αφορά την σταγόνα, ο παρονομαστής του λόγου της ενεργειακής απόδοσης είναι η ενέργεια που αποδίδεται από την εκτόνωση του αέρα σε όλη την επιφάνεια, επί τον λόγο του εμβαδού της επιφάνειας που καταλαμβάνει η σταγόνα προς το εμβαδόν ολόκληρης της επιφάνειας. Η επιφάνεια που καταλαμβάνει η σταγόνα θεωρείται ως η επιφάνεια επαφής της σταγόνας με το στερεό συν η προβολή της σταγόνας στην κατεύθυνση κάθετη στην κίνηση του αέρα. Η σταγόνα θεωρείται ημισφαιρικού σχήματος για τον υπολογισμό του εμβαδού αυτού. Έτσι για την κάθε σταγόνα που μελετήθηκε προέκυψε μια ενεργειακή απόδοση. Για το παραπάνω παράδειγμα, η επιφάνεια επαφής της σταγόνας προκύπτει  $2.43 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$  και το εμβαδόν της προβολής της  $1.21 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$ . Το εμβαδόν όλης της επιφάνειας μετρήθηκε  $7.19 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ , και έτσι το ποσοστό της ενέργειας που αποδόθηκε από τον αέρα, που αφορά την σταγόνα, είναι το 5%.

Έτσι, τελικά για το συγκεκριμένο παράδειγμα,  $Εν. Απόδοση = \frac{E_{kin} + E_{grav}}{0.05 |W_{air}|} = 3.6 \cdot 10^{-5} = 3.6 \cdot 10^{-3} \%$

Ομαδοποιώντας τις σταγόνες στην αντίστοιχη ομάδα πίεσης, προκύπτει το Διάγραμμα 9 με την ενεργειακή απόδοση ως προς την πίεση. Η ενεργειακή απόδοση δεν μπορούμε να πούμε ότι μεταβάλλεται με την αύξηση της πίεσης καθώς το  $p$  των  $t$ -test μεταξύ των διαφορετικών πιέσεων είναι από 0.43 έως 0.93 και άρα οι διαφορές μη σημαντικές.



Διάγραμμα 9: Ενεργειακή Απόδοση ως προς Πίεση. Ο μέσος όρος των ενεργειακών αποδόσεων της κάθε ομάδας πίεσης φαίνεται με μπλε κύκλους. Το συνολικό σφάλμα που παρουσιάζεται είναι ίσο με 2 φορές την τυπική απόκλιση. Όπως φαίνεται και επιβεβαιώνεται και με t-test (δεν παρουσιάζεται) η ενεργειακή απόδοση δεν παρουσιάζει σημαντικές αλλαγές.

## 6. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μια καινοτόμα μέθοδος για την κατευθυνόμενη και ελεγχόμενη πρόωση σταγόνων. Η καινούρια μέθοδος χρησιμοποιεί πεπιεσμένο αέρα που περνάει μέσα από πορώδες υλικό με επιφάνεια κατάλληλης, ασύμμετρης γεωμετρίας ώστε να προωθεί τις σταγόνες προς συγκεκριμένη κατεύθυνση.

-Επιτεύχθηκε η κατευθυνόμενη κίνηση, σε σταγόνες έως 70  $\mu\text{l}$  σε κλίση έως  $44^\circ$ . Επιπλέον επιτεύχθηκαν πολύ υψηλές ταχύτητες, 0.25 m/s κατά μέσο όρο, μετρούμενη στο τέλος της επιφάνειας/κίνησης. Η μέγιστη ταχύτητα που μετρήθηκε ήταν 0.5 m/s. Στη βιβλιογραφία, σε οριζόντιες επιφάνειες, μέθοδοι που χαρακτηρίζονται “High Speed” έχουν ταχύτητα 0.02 m/s [25]. Η μεγαλύτερη ταχύτητα που έχει επιτευχθεί απ’όσο γνωρίζουμε, είναι 0.35 m/s [22]. Η μεγαλύτερη ταχύτητα που αναφέρεται στην πιο πρόσφατη ανασκόπηση της βιβλιογραφίας είναι 0.1 m/s [2].

- Ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας και για μικρά μεγέθη σταγόνας, φαίνεται ποιοτικά να είναι δυνατόν να επηρεαστεί η μορφή της κίνησης μέχρι και σε πτήση.

-Μελετήθηκε η συσχέτιση της πίεσης του πεπιεσμένου αέρα και της επιτάχυνσης της σταγόνας. Τα πειραματικά δεδομένα δείχνουν ότι με την αύξηση της πίεσης, αυξάνεται και η παρατηρούμενη επιτάχυνση των σταγόνων.

-Μελετήθηκαν τρεις μορφές για τη δύναμη που ασκεί ο πεπιεσμένος αέρας στην σταγόνα. Η μορφή που ταιριάζει στα δεδομένα είναι η δύναμη να εξαρτάται γραμμικά από την ταχύτητα του αέρα.

-Μελετήθηκαν δύο μορφές δυνάμεων τριβής, αλλά δεν προέκυψε επαρκής διαφορά μεταξύ τους για να θεωρηθεί κάποια πιο ταιριαστή με τα δεδομένα.

## 7. Βιβλιογραφία

- [1] Bonn, D., Eggers, J., Indekeu, J., Meunier, J., & Rolley, E. (2009). Wetting and spreading. *Reviews of Modern Physics*, 81(2), 739–805. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.81.739>
- [2] Malinowski, R., Parkin, I. P., & Volpe, G. (2020). Advances towards programmable droplet transport on solid surfaces and its applications. In *Chemical Society Reviews*. <https://doi.org/10.1039/d0cs00268b>
- [3] Carter, S. B. (1965). Principles of cell motility: The direction of cell movement and cancer invasion. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/2081183a0>
- [4] Carter, S. B. (1967). Haptotaxis and the mechanism of cell motility. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/213256a0>
- [5] Greenspan, H. P. (1978). On the motion of a small viscous droplet that wets a surface (relevant to cell movement). *J. Fluid Mech.*
- [6] Edalatpour, M., Liu, L., Jacobi, A. M., Eid, K. F., & Sommers, A. D. (2018). Managing water on heat transfer surfaces: A critical review of techniques to modify surface wettability for applications with condensation or evaporation. In *Applied Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.178>
- [7] Brochard, F. (1989). Motions of Droplets on Solid Surfaces Induced by Chemical or Thermal Gradients. *Langmuir*. <https://doi.org/10.1021/la00086a025>
- [8] Chaudhury, M. K., & Whitesides, G. M. (1992). How to make water run uphill. *Science*. <https://doi.org/10.1126/science.256.5063.1539>
- [9] Tzianou M, Thomopoulos G, Vourdas N, Ellinas K, Gogolides E. Tailoring Wetting Properties at Extremes States to Obtain Antifogging Functionality. *Advanced Functional Materials*. 2020:2006687
- [10] Stone, H. A., Stroock, A. D., & Ajdari, A. (2004). Engineering flows in small devices: Microfluidics toward a lab-on-a-chip. *Annual Review of Fluid Mechanics*. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.36.050802.122124>
- [11] Katsikis, G., Cybulski, J. S., & Prakash, M. (2015). Synchronous universal droplet logic and control. *Nature Physics*. <https://doi.org/10.1038/nphys3341>
- [12] Krumm, C., Maduskar, S., Paulsen, A. D., Anderson, A. D., Barberio, N. L., Damen, J. N., Beach, C. A., Kumar, S., & Dauenhauer, P. J. (2016). Micro-ratcheted surfaces for a heat engine biomass conveyor. *Energy and Environmental Science*, 9(5). <https://doi.org/10.1039/c6ee00519e>
- [13] Agrawal, P., Wells, G. G., Ledesma-Aguilar, R., McHale, G., Buchoux, A., Stokes, A., & Sefiane, K. (2019). Leidenfrost heat engine: Sustained rotation of levitating rotors on turbine-inspired substrates. *Applied Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.034>
- [14] Brzoska, J. B., Brochard-Wyart, F., & Rondelez, F. (1993). Motions of Droplets on Hydrophobic Model Surfaces Induced by Thermal Gradients. *Langmuir*. <https://doi.org/10.1021/la00032a052>
- [15] Pollack, M. G., Fair, R. B., & Shenderov, A. D. (2000). Electrowetting-based actuation of liquid droplets for microfluidic applications. *Applied Physics Letters*. <https://doi.org/10.1063/1.1308534>

- [16] Baigl, D. (2012). Photo-actuation of liquids for light-driven microfluidics: State of the art and perspectives. In *Lab on a Chip*. <https://doi.org/10.1039/c2lc40596b>
- [17] Huang, G., Li, M., Yang, Q., Li, Y., Liu, H., Yang, H., & Xu, F. (2017). Magnetically actuated droplet manipulation and its potential biomedical applications. In *ACS Applied Materials and Interfaces*. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b09017>
- [18] Linke, H., Alemán, B. J., Melling, L. D., Taormina, M. J., Francis, M. J., Dow-Hygelund, C. C., Narayanan, V., Taylor, R. P., & Stout, A. (2006). Self-propelled leidenfrost droplets. *Physical Review Letters*, 96(15). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.154502>
- [19] Lagubeau, G., Le Merrer, M., Clanet, C., & Quéré, D. (2011). Leidenfrost on a ratchet. *Nature Physics*, 7(5). <https://doi.org/10.1038/nphys1925>
- [20] Dupeux, G., Le Merrer, M., Lagubeau, G., Clanet, C., Hardt, S., & Quéré, D. (2011). Viscous mechanism for Leidenfrost propulsion on a ratchet. *EPL (Europhysics Letters)*, 96(5). <https://doi.org/10.1209/0295-5075/96/58001>
- [21] Marín, Á. G., Arnaldo del Cerro, D., Römer, G. R. B. E., Pathiraj, B., Huis in 't Veld, A., & Lohse, D. (2012). Capillary droplets on Leidenfrost micro-ratchets. *Physics of Fluids*, 24(12). <https://doi.org/10.1063/1.4768813>
- [22] Dodd, L. E., Agrawal, P., Parnell, M. T., Gheraldi, N. R., Xu, B. B., Wells, G. G., Stuart-Cole, S., Newton, M. I., McHale, G., & Wood, D. (2019). Low-Friction Self-Centering Droplet Propulsion and Transport Using a Leidenfrost Herringbone-Ratchet Structure. *Physical Review Applied*. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.11.034063>
- [23] Bouillant, A., Lafoux, B., Clanet, C., & Quéré, D. (2021). Thermophobic Leidenfrost. *Soft Matter*. <https://doi.org/10.1039/D1SM00548K>
- [24] Dong, Y., Holmes, H. R., & Böhringer, K. F. (2017). Converting Vertical Vibration of Anisotropic Ratchet Conveyors into Horizontal Droplet Motion. *Langmuir*. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.7b02504>
- [25] Wu, D., Zhang, Z., Zhang, Y., Jiao, Y., Jiang, S., Wu, H., Li, C., Zhang, C., Li, J., Hu, Y., Li, G., Chu, J., & Jiang, L. (2020). High-Performance Unidirectional Manipulation of Microdroplets by Horizontal Vibration on Femtosecond Laser-Induced Slant Microwall Arrays. *Advanced Materials*. <https://doi.org/10.1002/adma.202005039>
- [26] Duncombe, T. A., Erdem, E. Y., Shastry, A., Baskaran, R., & Böhringer, K. F. (2012). Controlling liquid drops with texture ratchets. *Advanced Materials*. <https://doi.org/10.1002/adma.201104446>
- [27] Elbing, B. R., Mäkiharju, S., Wiggins, A., Perlin, M., Dowling, D. R., & Ceccio, S. L. (2013). On the scaling of air layer drag reduction. *Journal of Fluid Mechanics*, 717. <https://doi.org/10.1017/jfm.2012.588>
- [28] Vourdas, N., Ranos, C., & Stathopoulos, V. N. (2015). Reversible and dynamic transitions between sticky and slippery states on porous surfaces with ultra-low backpressure. *RSC Advances*, 5(42). <https://doi.org/10.1039/c5ra00663e>
- [29] Vourdas, N., Dalamagkidis, K., & Stathopoulos, V. N. (2015). Active porous valves for plug actuation and plug flow manipulation in open channel fluidics. *RSC Advances*. <https://doi.org/10.1039/c5ra21263d>

[30] Sarkiris, P., Ellinas, K., Gkiolas, D., Mathioulakis, D., & Gogolides, E. (2019). Motion of Drops with Different Viscosities on Micro-Nanotextured Surfaces of Varying Topography and Wetting Properties. *Advanced Functional Materials*, 29(35).

<https://doi.org/10.1002/adfm.201902905>

[31] Roisman, I. V., Criscione, A., Tropea, C., Mandal, D. K., & Amirfazli, A. (2015). Dislodging a sessile drop by a high-Reynolds-number shear flow at subfreezing temperatures. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 92(2).

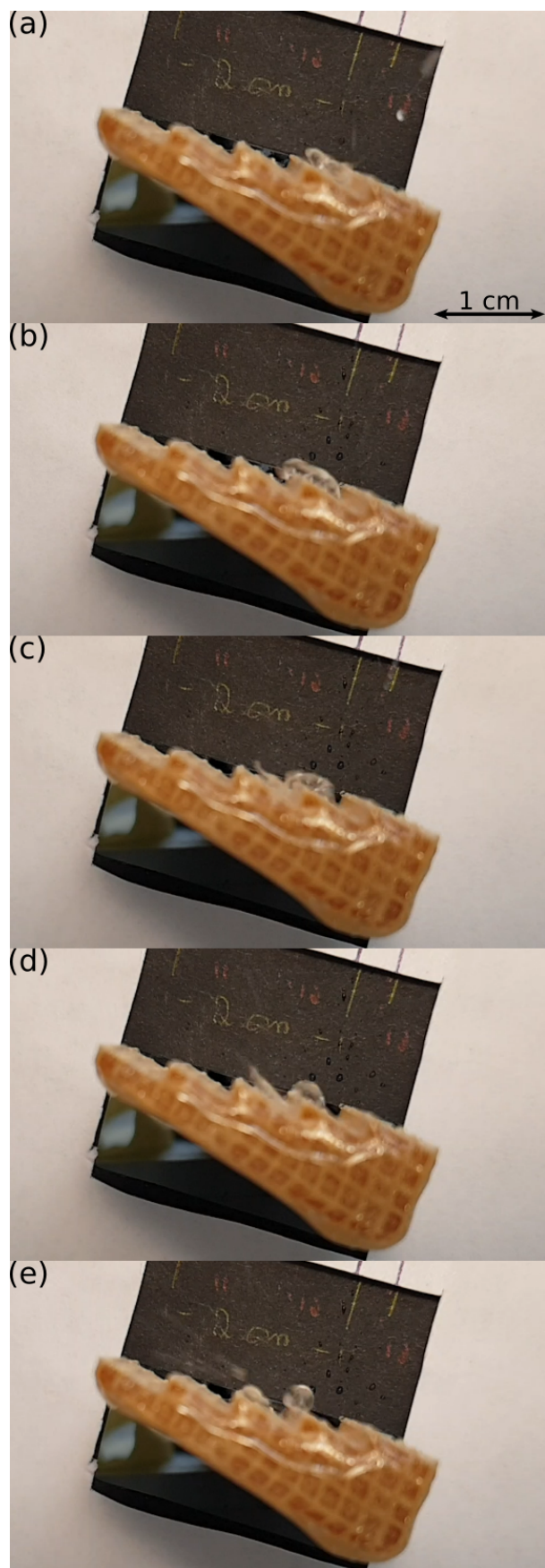
<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.92.023007>

[32] Park, S. H., & Lee, I. (2018). Optimization of drag reduction effect of air lubrication for a tanker model. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 10(4).

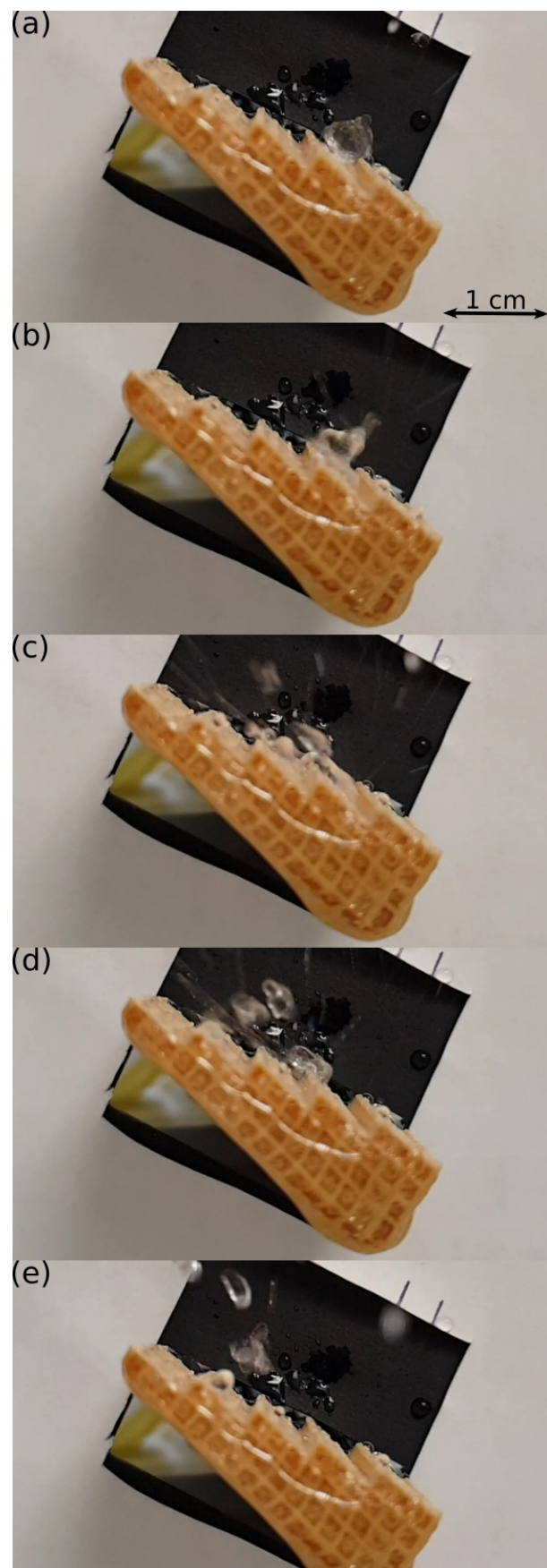
<https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2017.09.003>



## 8. Παράρτημα

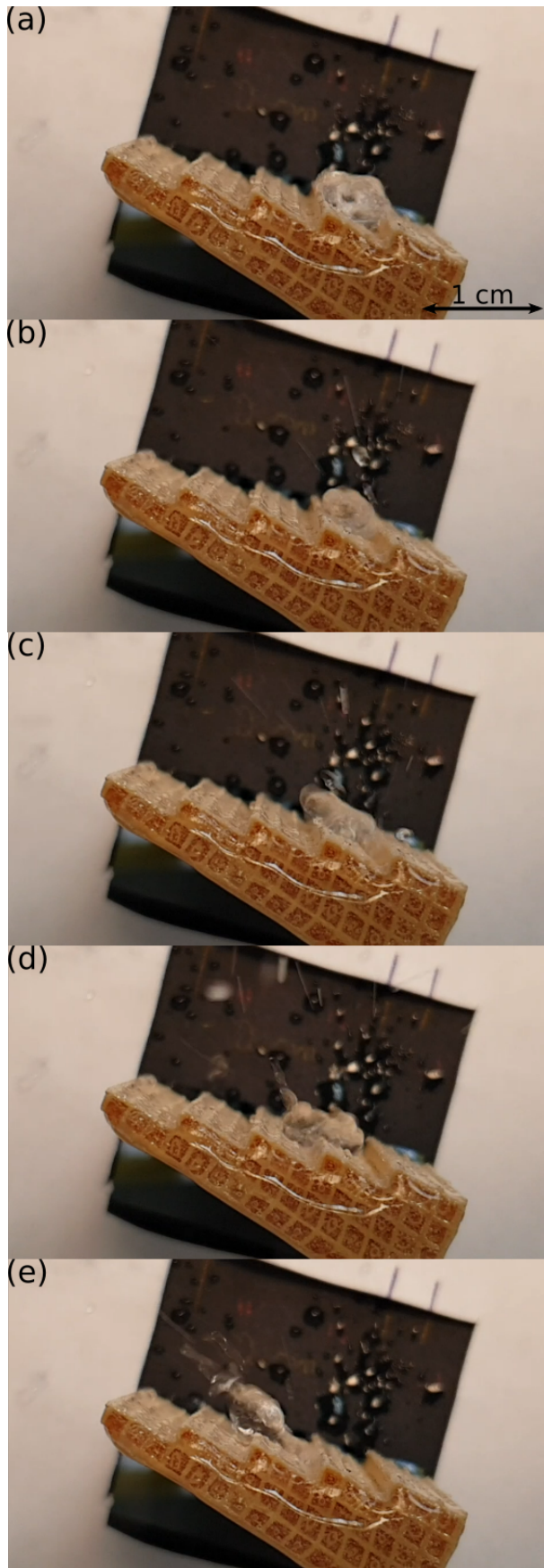


Εικόνα 15: Χαρακτηριστικό παράδειγμα της συμπεριφοράς "Χωρισμός" της παραγράφου 3.1.1. Παράμετροι:  $33^{\circ}$ , 1020 mbar, 20 ul (a) Καρέ 32, (b) Καρέ 41, (c) Καρέ 43, (d) Καρέ 44, (e) Καρέ 46. Καρέ 0 θεωρείται το καρέ που ξεκινάει η ροή του αέρα.

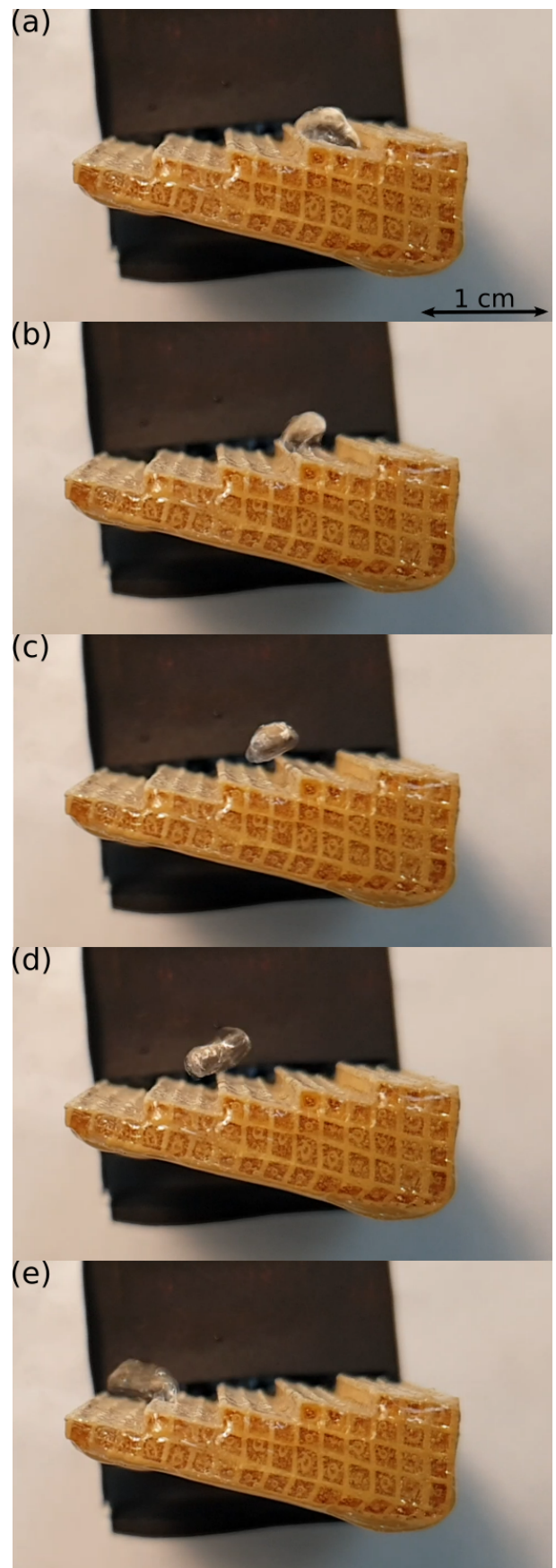


Εικόνα 16: Χαρακτηριστικό παράδειγμα της συμπεριφοράς "Σπάσιμο" της παραγράφου 3.1.1. Παράμετροι:  $44^{\circ}$ , 1370 mbar, 45 ul (a) Καρέ 14, (b) Καρέ 32, (c) Καρέ 45, (d) Καρέ 49, (e) Καρέ 54. Καρέ 0 θεωρείται το καρέ που ξεκινάει η ροή του αέρα.



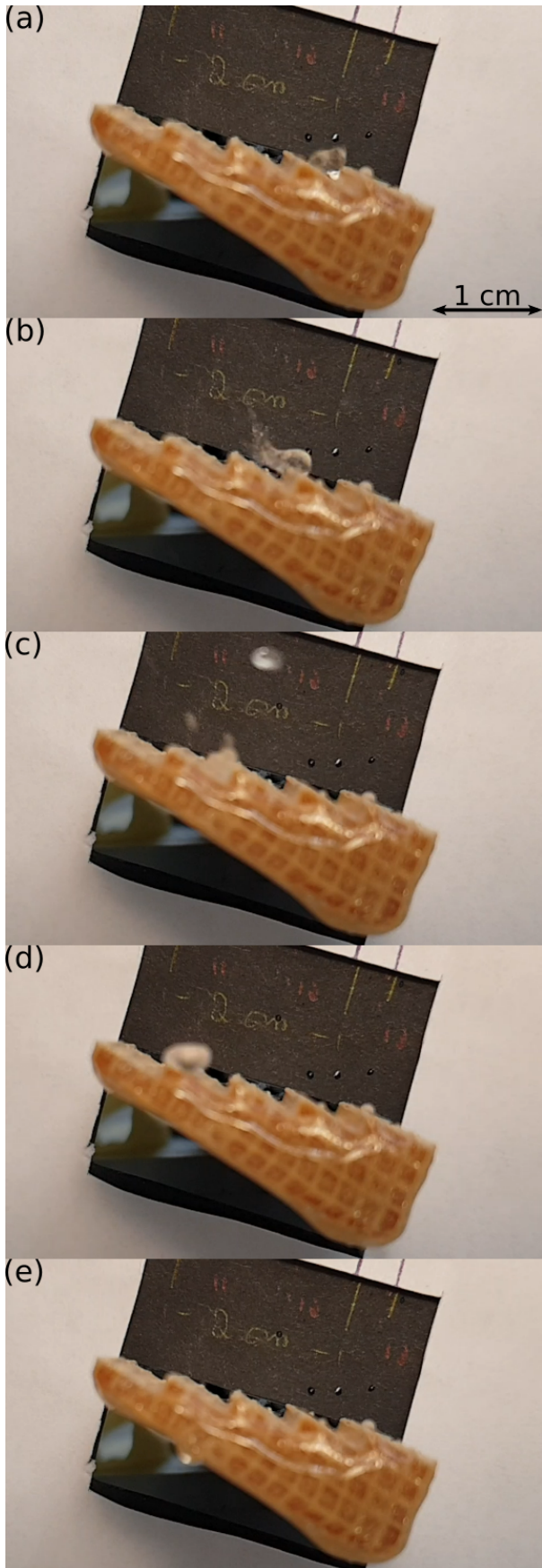


Εικόνα 17: Χαρακτηριστικό παράδειγμα της συμπεριφοράς "Ψεκασμός" της παραγράφου 3.1.1. Παράμετροι: 33°, 1000 mbar, 70 ul (a) Καρέ 38, (b) Καρέ 137, (c) Καρέ 171, (d) Καρέ 191, (e) Καρέ 203. Καρέ 0 θεωρείται το καρέ που ξεκινάει η ροή του αέρα.

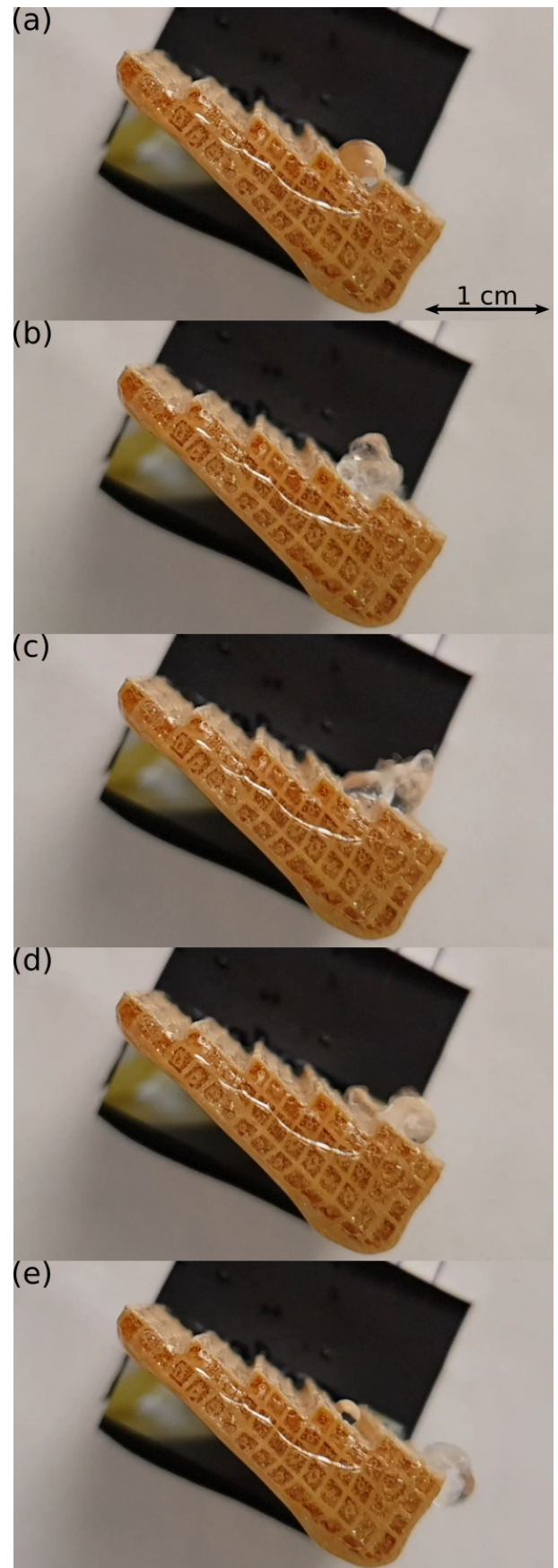


Εικόνα 18: Χαρακτηριστικό παράδειγμα της συμπεριφοράς "Πτήση" της παραγράφου 3.1.1. Παράμετροι: 13°, 1350 mbar, 20 ul (a) Καρέ 13, (b) Καρέ 17, (c) Καρέ 21, (d) Καρέ 26, (e) Καρέ 30. Καρέ 0 θεωρείται το καρέ που ξεκινάει η ροή του αέρα.

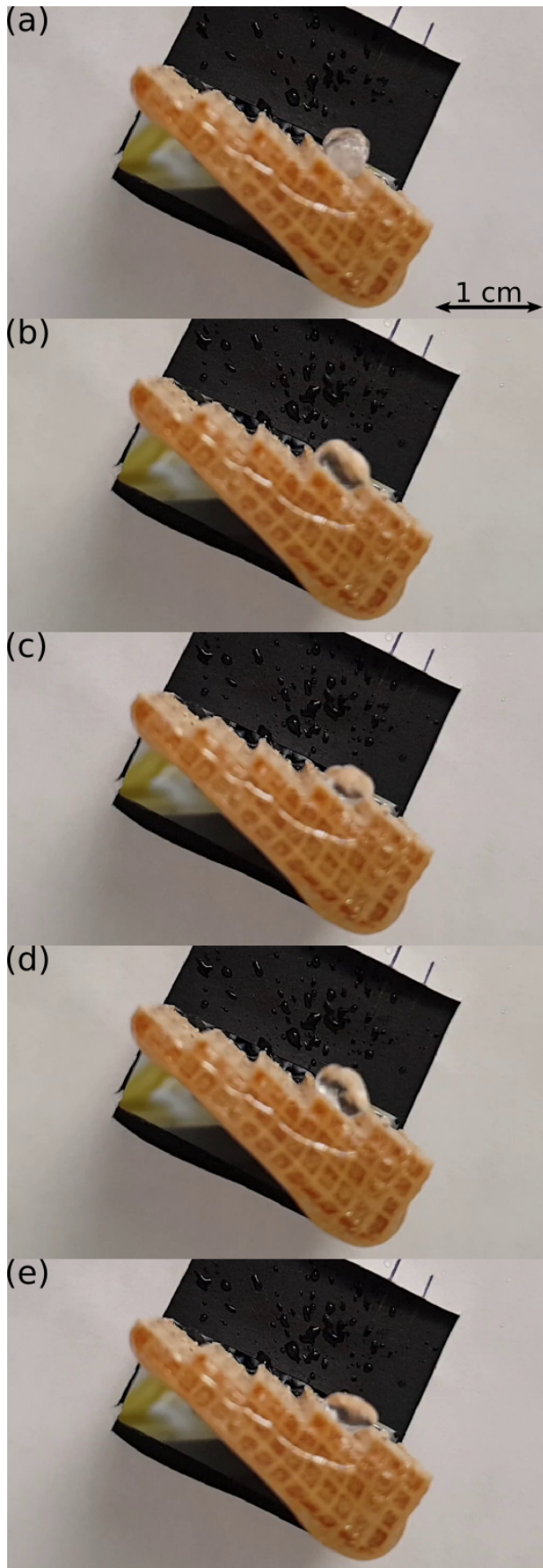




Εικόνα 19: Χαρακτηριστικό παράδειγμα της συμπεριφοράς "Εκτροχιασμός" της παραγράφου 3.1.1. Παράμετροι:  $33^{\circ}$ , 1030 mbar, 20 ul (a) Καρέ 61, (b) Καρέ 112, (c) Καρέ 131, (d) Καρέ 144, (e) Καρέ 166. Καρέ 0 θεωρείται το καρέ που ξεκινάει η ροή του αέρα.



Εικόνα 20: Χαρακτηριστικό παράδειγμα της συμπεριφοράς "Πίσω" της παραγράφου 3.1.1. Παράμετροι:  $44^{\circ}$ , 1030 mbar, 45 ul (a) Καρέ 1, (b) Καρέ 16, (c) Καρέ 32, (d) Καρέ 37, (e) Καρέ 53. Καρέ 0 θεωρείται το καρέ που ξεκινάει η ροή του αέρα.



Εικόνα 21: Χαρακτηριστικό παράδειγμα της συμπεριφοράς "Κόλλημα" της παραγράφου 3.1.1. Παράμετροι:  $44^{\circ}$ , 1030 mbar, 70  $\mu$ l  
(a) Καρέ 10, (b) Καρέ 600, (c) Καρέ 635, (d) Καρέ 1642, (e) Καρέ 1653. Καρέ 0 θεωρείται το καρέ που ξεκινάει η ροή του αέρα.