



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΙΙΙ: ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Διπλωματική εργασία

Προσομοίωση υπερυδρόφοβων επιφανειών με  
μεθόδους υπολογιστικής ρευστοδυναμικής

*Ιωάννης Καραμπλιάς*

*Επιβλέπων: Κ.Α Χαρτιδής, Καθηγητής Ε.Μ.Π*



ΑΘΗΝΑ, 2020





---

## Περιεχόμενα

---

Πρόλογος.....	3
Περίληψη.....	4
Abstract.....	5
1. ΥΠΕΡΥΔΡΟΦΟΒΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ.....	6
1.1. Εισαγωγικές έννοιες.....	6
1.2. Υπερυδρόφοβες επιφάνειες στη φύση.....	6
1.3. Τεχνικές κατασκευής υπερυδρόφοβων επιφανειών.....	7
1.3.1. Προσέγγιση από επάνω προς τα κάτω.....	8
1.3.2. Προσέγγιση από κάτω προς τα επάνω.....	8
1.4. Γεωμετρία υπερυδρόφοβων επιφανειών.....	9
1.5. Εφαρμογές.....	10
1.5.1. Αντιμετώπιση του πάγου.....	10
1.5.2. Αντιδιαβρωτικά επιχρίσματα.....	10
1.5.3. Υφάσματα ανθεκτικά στο νερό.....	11
1.5.4. Βιοιατρικές εφαρμογές.....	11
2. ΜΕΛΕΤΗ ΥΠΕΡΥΔΡΟΦΟΒΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ.....	14
2.1. Πειραματικές μέθοδοι.....	14
2.2. Υπολογιστικές μέθοδοι.....	14
2.3. Υπολογιστικές μέθοδοι σε προβλήματα διφασικής ροής.....	15
2.3.1. Η μέθοδος Volume of Fluid (VOF).....	15
3. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΟ ANSYS FLUENT.....	19
3.1. Περιγραφή κατασκευής του μοντέλου προσομοίωσης.....	19
3.1.1. Κατασκευή γεωμετρίας.....	19
3.1.2. Γένεση πλέγματος.....	19
3.1.3. Δημιουργία μοντέλου στο Fluent.....	20
3.1.4. Μετα-επεξεργασία αποτελεσμάτων.....	23
4. ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	24
4.1. Έλεγχος επάρκειας πλέγματος.....	24
4.2. Αποτελέσματα και σύγκριση με τη βιβλιογραφία.....	26
4.2.1. Σύγκριση με το μοντέλο των Bhardwaj και Attinger.....	26
4.2.2. Σύγκριση με το μοντέλο του Yun.....	28
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	31
5.1. Αδιάστατοι αριθμοί.....	31
5.2. Προσομοίωση επιφάνειας με πυλώνες παραλληλόγραμμου προφίλ.....	34
5.2.1. $We \gg 1$ και $Bo \ll 1$ .....	34

5.2.2.	<b>We</b> < 1 και <b>Bo</b> > 1.....	35
5.2.3.	<b>We</b> < 1 και <b>Bo</b> < 1.....	35
5.2.4.	<b>We</b> > 1 και <b>Bo</b> > 1.....	36
5.3.	Σύγκριση επίπεδης (λείας) με τραχεία επιφάνεια.....	37
5.3.1.	<b>We</b> > 1 και <b>Bo</b> < 1.....	37
5.3.2.	<b>We</b> < 1 και <b>Bo</b> > 1.....	38
5.3.3.	<b>We</b> < 1 και <b>Bo</b> < 1.....	39
5.3.4.	<b>We</b> > 1 και <b>Bo</b> > 1.....	39
5.4.	Προσομοίωση επιφάνειας με πλώνες τριγωνικού προφίλ.....	40
5.5.	Επίδραση της γωνίας επαφής.....	43
5.5.1.	Επιφάνεια με πλώνες παραλληλόγραμμου προφίλ.....	43
5.5.2.	Επιφάνεια με πλώνες τριγωνικού προφίλ.....	46
6.	Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία.....	47
6.1.	Συμπεράσματα.....	47
6.2.	Προτεινόμενη μελλοντική εργασία.....	48
7.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	49

## Πρόλογος

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στη σχολή Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και συγκεκριμένα στο Εργαστήριο Προηγμένων και Σύνθετων Υλικών, Νανουλικών, Νανοδιεργασιών και Νανοτεχνολογίας. Η εργασία πραγματοποιήθηκε υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Κ.Α Χαριτίδη, τον οποίο θα ήθελα να ευχαριστήσω για την διαρκεί καθοδήγηση που μου προσέφερε. Επί πρόσθετα, θέλω να ευχαριστήσω τον μεταδιδακτορικό ερευνητή Δ.Α Δραγατογιάννη για τις χρήσιμες συμβουλές που μου παρείχε. Συνεχίζοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον μεταδιδακτορικό ερευνητή Γ. Ψυχογιό, για τη συνεχή και πολύτιμη βοήθειά του σε κομβικά σημεία της εργασίας. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη διαρκεί υποστήριξή τους όλο αυτό το διάστημα.

Ιωάννης Καραμπιλιάς

## Περίληψη

Προτείνεται ένα δισδιάστατο υπολογιστικό μοντέλο για την προσομοίωση της πρόσκρουσης σταγόνων σε μια στερεή επιφάνεια με σκοπό τη μελέτη της υπερυδροφοβικότητάς της. Το υπολογιστικό μοντέλο βασίζεται στη μέθοδο Volume Of Fluid, η οποία είναι ικανή να περιγράψει τη δυναμική συμπεριφορά δύο μη-αναμιξιμων ρευστών με ικανοποιητική ακρίβεια, και υλοποιήθηκε στο λογισμικό ANSYS Fluent.

Το φαινόμενο της πρόσκρουσης και αναπήδησης μιας σταγόνας από μια στερεή επιφάνεια παρουσιάζει πλούσια φυσική λόγω του ότι εμπεριέχει την αλληλεπίδραση τριών φάσεων (υγρή φάση της σταγόνας, αέρια φάση του περιβάλλοντος ρευστού και στερεή φάση της επιφάνειας πρόσκρουσης). Για την εξαγωγή, κατά το δυνατό, γενικών συμπερασμάτων απαιτείται η χρήση αδιάστατων αριθμών μέσω των οποίων πρέπει να εκφραστούν οι (συνήθως αντίρροποι) παράγοντες που ελέγχουν το φαινόμενο.

Έγινε προσπάθεια το πρόβλημα να προσεγγιστεί με βάση δύο ομάδες αδιάστατων αριθμών. Η πρώτη ομάδα αφορά αδιάστατους αριθμούς που σχετίζονται με τη δυναμική της αλληλεπίδρασης των δύο ρευστών φάσεων, ενώ η δεύτερη καθαρά με γεωμετρικές παραμέτρους της επιφάνειας.

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν ακολουθώντας την παραπάνω προσέγγιση διαπιστώθηκε ότι η υπερυδροφοβικότητα μιας επιφάνειας δεν είναι εγγενής της ιδιότητα. Αυτό σημαίνει ότι μια επιφάνεια δεδομένης γεωμετρίας και στατικής γωνίας επαφής δεν μπορεί να χαρακτηριστεί *a priori* ως υπερυδροφόβη ή μη. Αυτό γιατί, ανάλογα τις επικρατούσες συνθήκες μεταξύ των δύο ρευστών φάσεων, η ίδια επιφάνεια μπορεί να εμφανίσει ή όχι υπερυδροφόβη συμπεριφορά. Από πρακτική σκοπιά αυτό σημαίνει ότι για να κατασκευασθεί μια επιφάνεια με υπερυδροφόβη συμπεριφορά απαιτείται να προσδιοριστεί το περιβάλλον (όπως αυτό καθορίζεται από τις θερμοφυσικές ιδιότητες των δύο ρευστών φάσεων, το συντελεστή διεπιφανειακής τάσης και την ταχύτητα πρόσκρουσης των σταγόνων) στο οποίο θα πρέπει να εκφράσει υπερυδροφόβη συμπεριφορά.

Όπως διαπιστώθηκε, υπάρχουν συνθήκες οι οποίες ευνοούν την έκφραση της υπερυδροφοβικότητας μιας επιφάνειας, οπότε σε αυτές τις περιπτώσεις η ακριβής μορφολογία της έχει δευτερεύοντα ρόλο, αλλά και αντίστροφα, η ακριβής μορφολογία της επιφάνειας μπορεί να καταβάλει την τάση μη-εκδήλωσης υπερυδροφόβων χαρακτηριστικών.

**Λέξεις κλειδιά:** Υπερυδροφόβες επιφάνειες, μέθοδος VOF, δυναμική πρόσκρουσης, μορφολογία επιφάνειας, γωνία επαφής.

## *Abstract*

A two-dimensional computational model is proposed for the simulation of droplets impact on a solid surface with purpose the study of its superhydrophobicity. The computational model was based on the Volume Of Fluid method which is capable of describing the dynamic behavior of two non-miscible fluids with sufficient accuracy, and was implemented in ANSYS Fluent software.

The phenomenon of droplet impacting and bouncing from a solid surface is rich in physics because of the interaction of three phases (liquid phase of droplet, gaseous phase of ambient fluid and solid phase of the impact surface). To export, as far as possible, general conclusions is required the use of dimensional numbers through which must be expressed the (usually opposites) factors that controlling the problem.

An attempt was made to approach the problem on the basis of two groups of dimensional numbers. The first group concerns dimensional numbers that was related with dynamics of the interaction of the two fluid phases, while the second group was clearly related with geometrical parameters of surface.

From results obtained by following the above approach, was found that superhydrophobicity of a surface it's not an inherent property. That means surface of a given geometry and static contact angle cannot be characterized a priori as superhydrophobic or non. That's because depending on prevailing conditions between two fluid phases, the same surface may or may not exhibit superhydrophobic behavior. From a practical point of view, that means for manufacture a superhydrophobic surface, the environment is required to be determined (as specified from thermophysical properties of two-phase fluids, interfacial tension coefficient and impact velocity of droplets).

It was found that there are conditions which favor the superhydrophobicity of a surface, so in these cases the exact morphology of surface has secondary role, but also vice versa, morphology of surface could overcome non-manifestation tendency of superhydrophobic characteristics.

**Keywords:** Superhydrophobic surfaces, VOF method, collision dynamics, surface morphology, contact angle.



# 1. ΥΠΕΡΥΔΡΟΦΟΒΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ

## 1.1. Εισαγωγικές έννοιες

---

Τα τελευταία χρόνια, οι υπερυδροφώβες επιφάνειες (*superhydrophobic surfaces*) έχουν προσελκύσει σημαντικό ενδιαφέρον λόγω των διαφόρων τεχνικών τους εφαρμογών, όπως για παράδειγμα η χρήση τους ως επικάλυψη σε [1]: υφάσματα για την απομάκρυνση βακτηρίων, ηλεκτρολογικούς εξοπλισμούς (με σκοπό την απομάκρυνση της υγρασίας), επιφάνειες που απαιτείται να εμφανίζουν αντιπαγωτικές ιδιότητες. Πρόκειται για επιφάνειες που παρουσιάζουν στατική γωνία επαφής μεγαλύτερη των  $150^\circ$  και υστέρηση γωνίας επαφής μικρότερη των  $10^\circ$  [2]. Οι επιφάνειες αυτές χαρακτηρίζονται από χαμηλή ενέργεια υποστρώματος και απωθούν ισχυρά το νερό. Μια πολύ σημαντική ιδιότητα αυτών των επιφανειών είναι ο αυτοκαθαρισμός [1]. Συγκεκριμένα, όταν μία σταγόνα προσκρούσει σε μία τέτοια επιφάνεια δε θα παραμείνει επάνω της όπως θα ήταν αναμενόμενο. Αντιθέτως, θα κυλίσει κατά μήκος της συμπαρασύροντας όλους τους ρύπους που τυχόν υπάρχουν επάνω στην επιφάνεια, διατηρώντας την έτσι καθαρή.

Γενικά, ανάλογα με την τιμή της στατικής γωνίας επαφής, διακρίνονται τρία είδη επιφανειών: για  $\theta < 90^\circ$  η επιφάνεια χαρακτηρίζεται ως υδρόφιλη, για  $\theta > 90^\circ$  η επιφάνεια χαρακτηρίζεται ως υδρόφοβη, και τέλος, για  $\theta > 150^\circ$  η επιφάνεια χαρακτηρίζεται ως υπερυδροφώβη [1]. Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία μελετήθηκε η εμφάνιση υπερυδροφοβικότητας σε μία επιφάνεια μέσω της πρόσκρουσης σταγόνας στην επιφάνεια αυτή. Θεωρήθηκε ότι η αναπήδηση της σταγόνας από τη στερεή επιφάνεια δηλώνει υπερυδροφώβη συμπεριφορά της επιφάνειας, ενώ η μη αναπήδηση της σταγόνας δηλώνει μη υπερυδροφώβη συμπεριφορά.

Όταν μία σταγόνα βρίσκεται επάνω σε μία στερεή επιφάνεια η οποία έχει μία ελαφριά κλίση, η σταγόνα παραμένει προσκολλημένη στην επιφάνεια, αλλά παρουσιάζει διαφορά στις γωνίες επαφής στις δύο πλευρές της σταγόνας. Η διαφορά αυτή ονομάζεται υστέρηση γωνίας επαφής και εκφράζει την ευκολία κίνησης της σταγόνας επάνω στην επιφάνεια, και επομένως την ευκολία απομάκρυνσής της από αυτή [1]. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, όταν η υστέρηση γωνίας επαφής είναι μικρότερη των  $10^\circ$ , η επιφάνεια χαρακτηρίζεται ως υπερυδροφώβη.

## 1.2. Υπερυδροφώβες επιφάνειες στη φύση

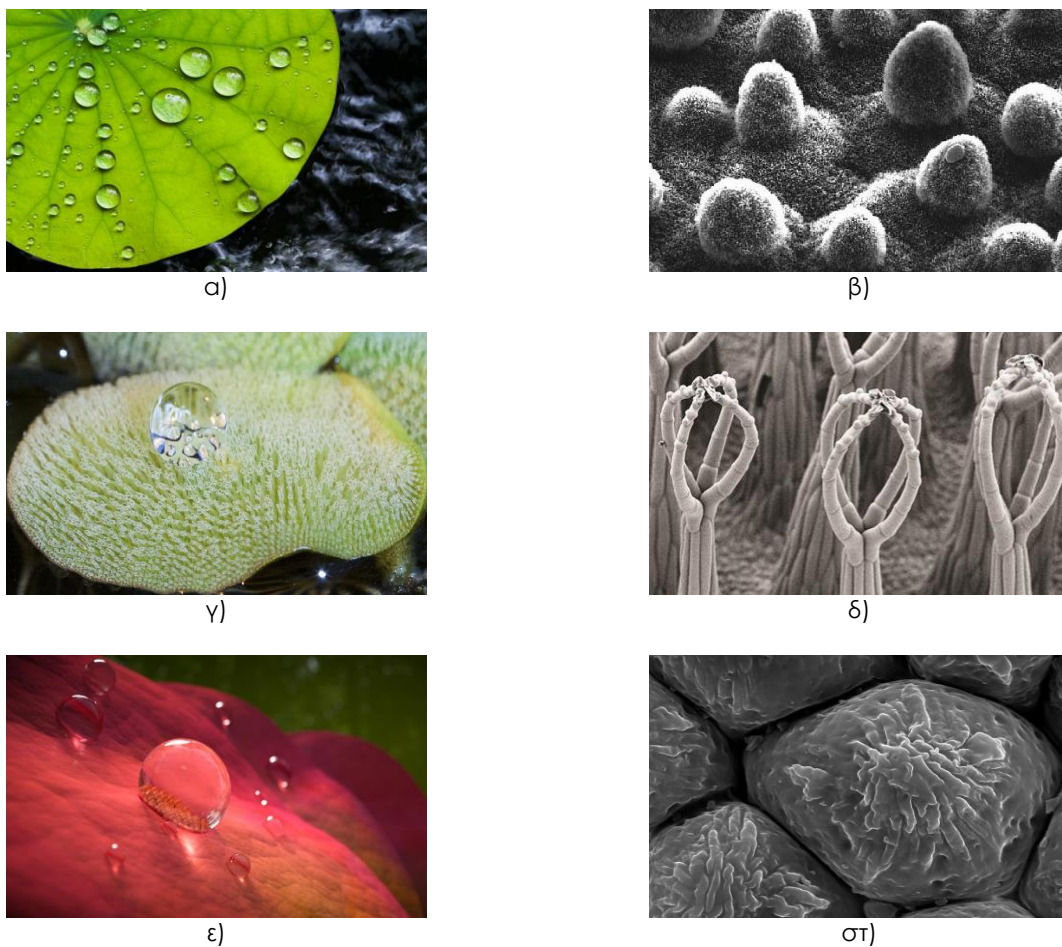
---

Στη φύση έχουν βρεθεί πολλά υλικά τα οποία χαρακτηρίζονται από υπερυδροφοβικότητα (Σχήμα 1.1). Για παράδειγμα, τα φύλλα περισσότερων από 200 ειδών φυτών, όπως είναι ο λωτός, ο ευκάλυπτος και η τουλίπα, είναι υπερυδροφώβα [3]. Οι επιφάνειες αυτές παρουσιάζουν τα εξής κοινά χαρακτηριστικά [3]:

- Καλύπτονται από ένα φιλμ φυσικού υδρόφοβου κηρού.
- Έχουν επιφανειακά εξογκώματα μεγέθους της τάξης των  $10 \mu\text{m}$ .
- Στην επιφάνεια των εξογκωμάτων υπάρχει μία δεύτερη επιφανειακή μορφολογία, με μέγεθος μικρότερο του  $1 \mu\text{m}$ .

Το πιο γνωστό παράδειγμα φυσικής υπερυδρόφοβης επιφάνειας αποτελεί το φύλλο του λωτού (Σχήμα 1.1-α, β), το οποίο χαρακτηρίζεται από στατική γωνία επαφής μεγαλύτερη των 150°, εξαιρετικά χαμηλή προσκόλληση του νερού και ιδιότητες αυτοκαθαρισμού [3]. Οι ιδιότητες του αυτοκαθαρισμού προέρχονται από την κατάσταση Cassie-Baxter και είναι αποτέλεσμα μίας διπλής μικροεπιφανειακής και νάνοεπιφανειακής δομής. Στη μικροκλίμακα, στο φύλλο παρατηρούνται κυρτές κυτταρικές θηλές (*convex cell papilla*), ενώ στη νανοκλίμακα κρύσταλλοι κηρού (λιπιδίων) [3].

Οι Pedersen et al. [4] αναφέρουν ότι το *melilotus siculus*, το οποίο είναι ένα όσπριο με υπερυδρόφοβα φύλλα, είναι επίσης σε θέση να συγκρατεί φουσαλίδες αέρα όταν βρίσκεται μέσα στο νερό και να επιτυγχάνει φωτοσύνθεση ακόμα και μετά από τρεις μέρες πλήρους βύθισης.



**Σχήμα 1.1**

Παραδείγματα υπερυδρόφοβων επιφανειών σε φυτά: α, β) φύλλο λωτού στη φύση και στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο αντίστοιχα, γ, δ) φύλλο *solaninia molesta* στη φύση και στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο αντίστοιχα, ε, στ) πέταλο κόκκινου τριαντάφυλλου στη φύση και στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.

### **1.3. Τεχνικές κατασκευής υπερυδρόφοβων επιφανειών**

Έχουν παρουσιαστεί διάφορες τεχνικές με σκοπό την κατασκευή υπερυδρόφοβων επιφανειών. Μερικές από αυτές είναι η εγχάραξη με laser ή πλάσμα [5], η επίστρωση με ψεκασμό [6], η ανοδική

οξειδωση [1], η γαλβανική εναπόθεση [1] και η λιθογραφία [7], [8]. Οι προσεγγίσεις που έχουν επικρατήσει για την κατασκευή μίας υπερυδρόφοβης επιφάνειας είναι οι ακόλουθες [1]:

- Προσέγγιση από επάνω προς τα κάτω
- Προσέγγιση από κάτω προς τα επάνω
- Συνδυασμός των δύο παραπάνω προσεγγίσεων

### 1.3.1. Προσέγγιση από επάνω προς τα κάτω

Στην προσέγγιση αυτή, η κατασκευή της επιθυμητής επιφάνειας πραγματοποιείται με σκάλισμα, μηχανική κατεργασία ή χύτευση υλικών, με τη βοήθεια εργαλείων και laser [1]. Οι τρεις βασικότερες μέθοδοι που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία είναι η λιθογραφία, η χάραξη και η μέθοδος εκμαγείου.

Η λιθογραφία [7], [8] είναι μία κοινή μέθοδος που χρησιμοποιείται για την κατασκευή υπερυδρόφοβων επιφανειών με μικρο- και νάνο-σωματίδια, και ελέγχει σε μεγάλο βαθμό την επιφανειακή μορφολογία και δομή. Επιπρόσθετα, επιτρέπει την εγχάραξη διαφορετικών δομών όπως κυκλικούς και τετραγωνικούς πυλώνες (*pillars*), με διαφορετικές διαμέτρους, ύψη και μεταξύ τους αποστάσεις. Γενικά, με τον όρο λιθογραφία αναφερόμαστε στη φωτολιθογραφία στην οποία ένα φωτοενεργό πολυμερές ακτινοβολείται από φως (συνήθως από υπεριώδεις ακτίνες), καθοδηγούμενο διαμέσου δομημένων επιφανειών. Αντί υπεριώδους ακτινοβολίας μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ακτίνες X, δέσμη ηλεκτρονίων ή δέσμη laser. Η λιθογραφία είναι μία πολύ χρήσιμη τεχνική για την παραγωγή υπερυδρόφοβων επιφανειών των οποίων το σχήμα και η δομή είναι σαφώς προκαθορισμένα.

Μία ακόμα μέθοδος παραγωγής υπερυδρόφοβων επιφανειών είναι η χάραξη [5]. Όταν μία επιφάνεια εκτίθεται σε ένα μέσο χάραξης, χημικές αντιδράσεις διαβρώνουν και αφαιρούν επιλεκτικά υλικά. Ορισμένα είδη χάραξης είναι η χάραξη με πλάσμα, με laser και η χημική χάραξη. Αν ένα πολυμερικό υπόστρωμα υποβληθεί σε μία επεξεργασία με πλάσμα ή laser, συρρικνώνεται δημιουργώντας ταχύτατα τραχείες επιφάνειες. Η διαδικασία της χάραξης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή τραχέων μικροδομημένων επιφανειών.

Στη μέθοδο με εκμαγείο [9], προετοιμάζεται αρχικά ένα πρότυπο επιφάνειας που αποτελείται από κενά συγκεκριμένης γεωμετρίας. Στη συνέχεια τα κενά αυτά γεμίζονται με ένα υλικό επικάλυψης και το δοκίμιο υφίσταται πίεση έτσι ώστε να σχηματιστεί η αντίστροφη δομή του σχεδίου. Η επακόλουθη ανύψωση του προτύπου δημιουργεί την απαιτούμενη τραχεία επιφάνεια. Η μέθοδος αυτή είναι πολύ χρήσιμη για την παραγωγή πολυμερικών υπερυδρόφοβων επιφανειών.

### 1.3.2. Προσέγγιση από κάτω προς τα επάνω

Από την εξίσωση Wenzel–Baxter προκύπτει ότι μία υπερυδρόφοβη επιφάνεια μπορεί να επιτευχθεί όταν το κλάσμα του αέρα είναι χαμηλό και η στατική γωνία επαφής είναι υψηλή. Η προσέγγιση από επάνω προς τα κάτω μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν το κλάσμα αέρα είναι της τάξης της μεταξύ του  $10^{-9}$  και του  $10^{-6}$ . Έτσι, η προσέγγιση αυτή απαιτεί υδρόφοβα υλικά μεγαλύτερης γωνίας επαφής για την παραγωγή μίας υπερυδρόφοβης επιφάνειας [1]. Εάν μία επιφάνεια μπορεί να παραχθεί με πολύ χαμηλό κλάσμα αέρα στη νανοκλίμακα, τότε μπορούν να παραχθούν υπερυδρόφοβες επιφάνειες ακόμα και από υδρόφιλα υλικά. Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι κατάλληλη η προσέγγιση από κάτω προς τα επάνω. Η προσέγγιση αυτή αναφέρεται σε μία διαδικασία προσθήκης υλικού κατά

την οποία σχηματίζεται μία πολύπλοκη επιφάνεια με μικρότερα δομικά στοιχεία από μικρο- και νάνο-υλικά. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν η χημική εναπόθεση ατμών (CVD), η εναπόθεση στρώματων και η μέθοδος sol-gel.

Στην περίπτωση μεθόδων κατασκευής υπερυδρόφοβων επιφανειών με υγρή φάση [6], απαιτείται η χρήση διαλυτών πράγμα που ενδέχεται να προκαλέσει δυσμενείς επιπτώσεις. Η επιστροφή χρησιμοποιώντας τεχνικές υγρής φάσης οδηγεί σε μηχανική υποβάθμιση και μη ομοιόμορφες επικαλύψεις. Η δράση των διαλυτών έχει ως συνέπεια την αφαίρεση της επικάλυψης από τα άκρα και τα πλευρικά τοιχώματα της επιφάνειας. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με τη χημική εναπόθεση ατμών, κατά την οποία ένα πρόδρομο αέριο αντιδρών (*precursor*) διαβιβάζεται επάνω από επιφάνεια και η επιστροφή πραγματοποιείται απευθείας μέσω διαδικασίας πολυμερισμού. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την παραγωγή τραχέων επιφανειών ή για τη δημιουργία ενός λεπτού υδρόφοβου στρώματος επάνω σε μία τραχεία επιφάνεια.

Η εναπόθεση σε στρώματα [10] είναι μία διαδικασία εμβάπτισης του υποστρώματος σε κάποιο διάλυμα. Στη συνέχεια προετοιμάζεται μία πολυστρωματική ταινία με εναλλασσόμενη βύθιση μίας φορτισμένης επιφάνειας (υπόστρωμα) σε ένα υδατικό διάλυμα χημικών με αντίθετο φορτίο (υλικό επιστροφής). Μετά από κάθε εμβάπτιση, η επικαλυμμένη μεμβράνη ξηλώνεται με νερό και ξηραίνεται. Η τραχεία επιφάνεια προκύπτει μέσω πολλαπλών αδύναμων αλληλεπιδράσεων όπως αλληλεπιδράσεις μεταφοράς φορτίου, ηλεκτροστατικές αλληλεπιδράσεις, δεσμούς αλογόνου, δεσμούς υδρογόνου και κατιοντικών-διπολικών αλληλεπιδράσεων. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται σε μία ποικιλία υποστρωμάτων (επίπεδα, κυλινδρικά, πορώδη, κολλοειδή), επιφανειακών τοπογραφιών και δομικών στοιχείων (πολυμερή, πεπτίδια, νανοσωλήνες άνθρακα, βαφές, οξειδία μετάλλων).

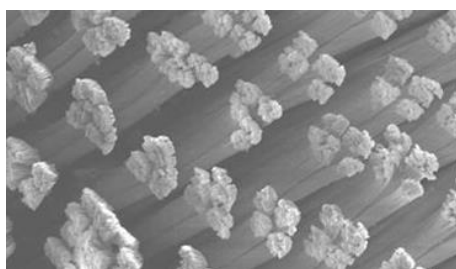
Η μέθοδος sol-gel [11] βασίζεται στις αντιδράσεις ενός διαλύματος στο οποίο σχηματίζεται ένα μακρομοριακό δίκτυο διαμέσου της αντίδρασης υδρόλυσης ομάδων αλκοξειδίου του μετάλλου, ακολουθούμενη από αντίδραση συμπύκνωσης των σιλανολών. Συνήθως προστίθενται υδροφοβικά πρόσθετα για να κάνουν την επικάλυψη ακόμα πιο υπερυδρόφοβη. Ένα κολλοειδές παρασκευάζεται από αντίδραση υδρόλυσης παρουσία διαλύτη και σχηματίζεται πηκτή λόγω του εμποτισμού του κολλοειδούς στο διαλύτη. Το κολλοειδές εφαρμόζεται στο υπόστρωμα και οι ιδιότητες της προκύπτουσας επιφάνειας εξαρτώνται από την επεξεργασία των κολλοειδών και των δραστικών του ομάδων. Η τραχύτητα της επιφάνειας ελέγχεται αλλάζοντας τις συνθήκες του συστήματος και τα αντιδρώντα. Η μέθοδος sol-gel έχει ορισμένα πλεονεκτήματα όπως η δυνατότητα επεξεργασίας σε χαμηλές θερμοκρασίες και η ύπαρξη ομοιογένειας στα τελικά προϊόντα.

Παρόλο που υπάρχουν αρκετές μέθοδοι για την κατασκευή μιας υπερυδρόφοβης επιφάνειας, μόνο λίγες από αυτές είναι εμπορικά διαθέσιμες για πρακτικές εφαρμογές, λόγω της χημικής και μηχανικής τους αστάθειας.

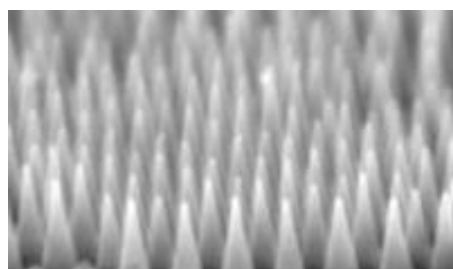
#### **1.4. Γεωμετρία υπερυδρόφοβων επιφανειών**

---

Στο προηγούμενο υποκεφάλαιο αναφέρθηκαν διάφορες τεχνικές για την κατασκευή μίας υπερυδρόφοβης επιφάνειας. Οι επιφάνειες αυτές, όπως παρατηρήθηκε και στη βιβλιογραφία [1], χαρακτηρίζονται συνήθως από τραχύτητα και αποτελούνται από πυλώνες παραλληλογράμμου ή τριγωνικού προφίλ (Σχήμα 1.2). Για το λόγο αυτό, οι τραχείες επιφάνειες που εξετάστηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία διαθέτουν παρόμοια προφίλ (παραλληλόγραμμο ή τριγωνικό).



α)



β)

### Σχήμα 1.2

Εικόνες από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο τραχείων επιφανειών: α) παραλληλογράμμου προφίλ, β) τριγωνικού προφίλ.

## 1.5. Εφαρμογές

---

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι υπερυδρόφοβες επιφάνειες βρίσκονται στο επίκεντρο λόγω του ευρέος φάσματος των εφαρμογών τους. Μερικές από αυτές τις εφαρμογές παρουσιάζονται παρακάτω.

### 1.5.1. Αντιμετώπιση του πάγου

Η προσκόλληση και ο σχηματισμός πάγου επάνω σε επιφάνειες είναι ένα φαινόμενο που προκαλεί προβλήματα και επηρεάζει τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες των αντίστοιχων επιφανειών. Για παράδειγμα, ο σχηματισμός πάγου σε ένα αεροσκάφος τροποποιεί το σχήμα του με αποτέλεσμα να επηρεάζει την αεροδυναμική του, και τελικά και την αξιοπιστία του [1]. Για τον λόγο αυτό, σχεδιάζονται υπερυδρόφοβες επιφάνειες έτσι ώστε να εμποδίζουν το πάγωμα του νερού, και εάν υπάρχει πάγος να εξασθενεί η προσρόφηση μεταξύ επιφάνειας και πάγου ώστε να απομακρύνεται εύκολα. Το μειονέκτημα που προκύπτει σε τέτοιες περιπτώσεις είναι το ότι με τη πάροδο του χρόνου η μικροδομή της επιφάνειας βλάπτεται και χάνει τις αντιπαγωτικές της ιδιότητες. Ως εκ τούτου, απαιτείται συνεχής έλεγχος της δομής και των χαρακτηριστικών της.

Οι Boironich et al. [12] κατασκεύασαν επιφάνειες με τέτοιες ιδιότητες επάνω σε ανοξείδωτο χάλυβα με νανοσωματίδια πυριτίου μέσω χημικής εγχάραξης. Οι Cao et al. [13] δημιούργησαν υπερυδρόφοβες επιφάνειες με ακρυλικό πολυμερές και σύνθετα νανοσωματίδια πυριτίου σε γυάλινο υπόστρωμα μέσω διαδικασίας πολυμερισμού. Οι επιφάνειες αυτές παρουσίασαν εξαιρετικά αντιπαγωτικές ιδιότητες και βρίσκουν εφαρμογή σε πλοία, ανεμογεννήτριες, ψυγεία και κλιματιστικά.

### 1.5.2. Αντιδιαβρωτικά επιχρίσματα

Τα περισσότερα ανθεκτικά στη διάβρωση υλικά περιέχουν χρώμιο λόγω των αντιδιαβρωτικών ιδιοτήτων του [1]. Ωστόσο, το γεγονός ότι είναι πολύ τοξικό καθιστά επιτακτική ανάγκη το να βρεθούν εναλλακτικές λύσεις. Από την άλλη, κράματα μετάλλων όπως αλουμινίου, μαγνησίου και τιτανίου χρησιμοποιούνται στην αεροδιαστημική, στη μηχανική και στην αυτοκινητοβιομηχανία

λόγω του χαμηλού τους βάρους. Ωστόσο, έχουν κακή αντοχή στη διάβρωση και η χρήση τους βαίνει μειούμενη. Οι Ou et al. [14] προετοίμασαν μία υπερυδροφοβή επιφάνεια με επικάλυψη υπερφθορο-οκτυλοτριεθοξυσιλάνιο (PFOTES) επάνω σε κράματα μαγνησίου και τιτανίου. Η επιφάνεια που προέκυψε ήταν σταθερή και αντιδιαβρωτική. Οι Ishizaki et al. [15] κατασκεύασαν μία υπερυδροφοβή επιφάνεια επάνω σε κράματα μαγνησίου. Το μαγνήσιο και τα κράματά του έχουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες όπως υψηλή αντοχή και δυνατότητα χύτευσης, ωστόσο έχουν μικρή αντοχή στη διάβρωση.

### 1.5.3. Υφάσματα ανθεκτικά στο νερό

Οι υπερυδροφοβές επιφάνειες εφαρμόζονται με επιτυχία σε άκαμπτα υποστρώματα. Αντίθετα, σε εφαρμογές όπως τα υφάσματα, το υπόστρωμα (ύφασμα) δεν είναι άκαμπτο και η υπερυδροφοβικότητα χάνεται. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητο να παρασκευασθούν μαλακές και εύκαμπτες υπερυδροφοβές επιφάνειες. Οι Wang et al. [16] δημιούργησαν τέτοιου είδους επιφάνειες τροποποιώντας υποστρώματα βαμβακιού με *n*-dodecanethiol και μικρο/νάνο δομές από χρυσό. Οι επιφάνειες που προέκυψαν παρουσίασαν γωνία επαφής μεγαλύτερη από 150° και μπόρεσαν να διατηρήσουν την υπερυδροφοβικότητά τους ακόμα και μετά από πολλές αναδιπλώσεις τους. Επίσης οι Wang et al. [17] δημιούργησαν υφάσματα τροποποιημένα με προϊόντα υδρόλυσης. Οι επιφάνειες αυτές εμφάνισαν υψηλή ανθεκτικότητα σε οξέα, υπεριώδης ακτίνες και στην τριβή.

### 1.5.4. Βιοιατρικές εφαρμογές

Η προσκόλληση των αιμοπεταλίων σε εμφυτεύματα ενός ανθρώπινου οργανισμού μπορεί να προκαλέσει πήξη του αίματος και να οδηγήσει σε θρόμβωση [18]. Συνέπεια αυτού είναι η λειτουργική αστοχία του τεχνητού εμφυτεύματος και άλλων ιατρικών συσκευών που έρχονται σε επαφή με το ανθρώπινο αίμα. Η υπερυδροφοβικότητα συμβάλλει στην αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος καθώς απωθεί όλα σχεδόν τα αιμοπετάλια από τα εμφυτεύματα. Οι Sun et al. [18] δημιούργησαν ένα υπερυδροφοβό υλικό από φθοριωμένο αλκύλιο με πλευρική ομάδα την πολύ-ανθρακική ουρεθάνη, κατάλληλη για βιοϊατρικές εφαρμογές, μέσω της μεθόδου της επικάλυψης. Η τελική επιφάνεια παρουσίασε γωνία επαφής μεγαλύτερη των 163° και εμφάνισε εξαιρετική ικανότητα στην απόθεση των αιμοπεταλίων.

Τέλος, ορισμένες εφαρμογές των υπερυδροφοβών επιφανειών είναι οι ακόλουθες [19]:

- Ως προστατευτική επίστρωση σε ήδη χρωματισμένες επιφάνειες πλοίων με σκοπό την αποφυγή της διάβρωσης του χρώματος (Σχήμα 1.3-α)
- Ως επίστρωση σε κεραίες και καλώδια για την αντιμετώπιση του πάγου (Σχήμα 1.3-β)
- Σε υαλοκαθαριστήρες αυτοκινήτων για απομάκρυνση της βροχής (Σχήμα 1.3-γ)
- Ως επίστρωση σε ηλεκτρονικό εξοπλισμό για την αποφυγή αστοχίας λόγω υγρασίας (Σχήμα 1.3-δ)
- Ως επικάλυψη σε παπούτσια (ή ρούχα) για απομάκρυνση βακτηρίων και εύκολη απολύμανση (Σχήμα 1.3-ε)



α)



β)



γ)



δ)



ε)

### Σχήμα 1.3

Εφαρμογές υπερυδρόφοβων επιφανειών σε: α) αντιδιαβρωτική επίστρωση σε χρωματισμένες επιφάνειες πλοίων, β) καλώδια μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος, γ) υαλοκαθαριστήρες αυτοκινήτων, δ) ηλεκτρονικό εξοπλισμό, ε) μπότες





## 2. ΜΕΛΕΤΗ ΥΠΕΡΥΔΡΟΦΟΒΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ

### 2.1. Πειραματικές μέθοδοι

---

Οι περισσότερες από τις πειραματικές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί χρησιμοποιούν φωτογραφική μηχανή υψηλής ταχύτητας για την καταγραφή της δυναμικής πρόσκρουσης σταγονιδίων σε υπερυδρόφοβες επιφάνειες. Για παράδειγμα, οι Richard και Quere [20] κατέγραψαν αρκετούς κύκλους αναπήδησης ενός σταγονιδίου νερού διαμέτρου 0.8 mm σε μια υπερυδρόφοβη επιφάνεια, με στατική γωνία επαφής ίση με  $170^\circ$ . Οι Clanet et al. [21] μελέτησαν την αναπήδηση ενός σταγονιδίου νερού διαμέτρου 2.5 mm, με ταχύτητα πρόσκρουσης στην υπερυδρόφοβη επιφάνεια ίση με 0.83 m/s και στατική γωνία επαφής ίση με  $170^\circ$ . Μέσω αυτού έδειξαν ότι η μέγιστη διάμετρος διάβροχης της επιφάνειας είναι ανάλογη του αριθμού  $d_0 We^{1/4}$ , όπου  $d_0$  είναι η αρχική διάμετρος της σταγόνας και  $We$  ο αδιάστατος αριθμός Weber.

Συνεχίζοντας, οι εργασίες των Bartolo et al. [22], Jung και Bhushan [23] και Tsai et al. [24] αναφέρουν ότι σταγονίδια νερού διαμέτρου 2 mm αναπηδούν σε υπερυδρόφοβες επιφάνειες με στατική γωνία επαφής  $152^\circ$ – $158^\circ$ . Τέλος, οι Chen et al. [25] συνέκριναν την πρόσκρουση μιας σταγόνας μεταξύ μιας τεχνητής υπερυδρόφοβης επιφάνειας και ενός φύλλο λωτού. Η ταχύτητα πρόσκρουσης κυμαινόταν από 0.08 έως 3 m/s και η στατική γωνία επαφής ήταν μεγαλύτερη από  $160^\circ$ , και στις δύο περιπτώσεις. Οι συγγραφείς κατέληξαν στο ότι ο ελάχιστος αριθμός Weber για τον οποίο η σταγόνα μπορεί να αναπηδήσει είναι 0.1, ενώ για αρκετά μεγαλύτερους αριθμούς Weber ( $We \geq 41$ ), η σταγόνα διασπείρεται επάνω στην επιφάνεια (*splash*).

### 2.2. Υπολογιστικές μέθοδοι

---

Μέθοδοι της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολλές εργασίες για την μελέτη της υπερυδροφοβικότητας επιφανειών. Συμπεράσματα σχετικά με την συμπεριφορά της προς εξέταση επιφάνειας μπορούν να εξαχθούν μέσω της προσομοίωσης της σύγκρουσης μιας σταγόνας ρευστού με την υπό μελέτη επιφάνεια.

Οι Sun et al. [26] κατασκεύασαν ένα τρισδιάστατο υπολογιστικό μοντέλο βασισμένο στη μέθοδο CLSVOF (Coupled Level Set Volume Of Fluid), για την προσομοίωση της πρόσκρουσης ενός σταγονιδίου επάνω σε μία υπερυδρόφοβη επιφάνεια. Παρατήρησαν ότι η διασπορά της σταγόνας μπορεί να ξεκινήσει από δύο περιοχές της: είτε στα άκρα της, γεγονός που οφείλεται στην επιφανειακή τάση, είτε στο εσωτερικό της, γεγονός που οφείλεται σε εσωτερικές δυνάμεις. Επίσης, παρατήρησαν ότι η δημιουργία αυξημένης πίεσης στην κορυφή και στη βάση της σταγόνας έχει ως αποτέλεσμα την τάλαντσή της μέσω ενός κύκλου συνεχούς έκτασης–σύμπτυξής της.

Οι Azimi et al. [27] μελέτησαν την πρόσκρουση μιας σταγόνας νερού επάνω σε μία υπερυδρόφοβη επιφάνεια με πολώνες (*pillars*). Συγκεκριμένα, ανέπτυξαν ένα τρισδιάστατο υπολογιστικό μοντέλο βασισμένο στη μέθοδο VOF (Volume Of Fluid), ικανό να καταγράψει την κίνηση της γραμμής επαφής (*contact line*) του υγρού με τη στερεή επιφάνεια. Παρατήρησαν ότι όσο πιο μεγάλες ήταν

οι αποστάσεις μεταξύ των πυλώνων, τόσο μεγαλύτερη ήταν η διαβροχή της στερεής επιφάνειας. Παράλληλα, για πολύ μικρές αποστάσεις των πυλώνων, προέκυψε μηδενική διαβροχή, γεγονός το οποίο αποδόθηκε στο ότι η επιφανειακή ενέργεια αυξάνεται με τη μείωση της απόστασης των πυλώνων.

Τέλος, οι Liu et al. [28] δημιούργησαν ένα υπολογιστικό μοντέλο προσομοίωσης για να μελετήσουν το χρόνο επαφής ενός σταγονιδίου νερού κατά την πρόσκρουσή του σε μια υπερυδροφοβή επιφάνεια. Πιο συγκεκριμένα, προσομοίωσαν μία στερεή επιφάνεια με μορφολογία βασισμένη στις ιδιότητες της επιφάνειας ενός φύλλου κάνναβης. Η στατική γωνία επαφής που προέκυψε ήταν  $152^\circ$  ενώ ο χρόνος επαφής 10.1 ms. Ένα βασικό συμπέρασμα στο οποίο κατέληξαν είναι το ότι η επιφανειακή δομή παίζει σημαντικό ρόλο στη υπερυδροφοβικότητα μίας επιφάνειας.

## 2.3. Υπολογιστικές μέθοδοι σε προβλήματα διφασικής ροής

---

Για τη προσομοίωση της ροής μεταξύ δύο μη-αναμιξιμων ρευστών μπορεί κανείς να διακρίνει τρεις κατηγορίες υπολογιστικών μεθόδων [29]: α) μεθόδους τύπου Euler, β) μεθόδους τύπου Lagrange και γ) τη μέθοδο lattice-Boltzmann. Στις δύο πρώτες κατηγορίες οι εξισώσεις διατήρησης της μάζας και της γραμμικής ορμής επιλύονται μέσω διακριτοποίησης τους με χρήση κάποιας τεχνικής διακριτοποίησης, όπως η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών, των πεπερασμένων όγκων ελέγχου ή των πεπερασμένων στοιχείων. Από την άλλη, η μέθοδος lattice-Boltzmann ακολουθεί τελείως διαφορετική φιλοσοφία και επιλύει έμμεσα τις εξισώσεις διατήρησης ουσιαστικά επιλύοντας την διακριτή εξίσωση Boltzmann στη μεσοκλίμακα.

Στην παρούσα εργασία έχει χρησιμοποιηθεί η πιο διαδεδομένη μέθοδος τύπου Euler, γνωστή στη βιβλιογραφία ως VOF (Volume of Fluid). Η επιλογή αυτή έχει να κάνει με το γεγονός ότι η VOF παρουσιάζει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα έναντι αντίστοιχων υπολογιστικών μεθόδων, όπως [29]:

- Επιτυγχάνει διατήρηση της μάζας των δύο ρευστών, κάτι στο οποίο άλλες μέθοδοι (π.χ. Level-set) εμφανίζουν προβλήματα
- Ανταπεξέρχεται με επιτυχία σε απότομες τοπολογικές μεταβολές της διεπιφάνειας, κάτι στο οποίο οι μέθοδοι τύπου Lagrange δεν είναι συνήθως επιτυχείς
- Δεν απαιτεί την εισαγωγή φαινομενολογικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ ρευστού-στερεού για την μοντελοποίηση της γωνίας επαφής, όπως για παράδειγμα συμβαίνει με τη μέθοδο lattice-Boltzmann

### 2.3.1. Η μέθοδος Volume of Fluid (VOF)

Παρότι η μέθοδος μπορεί να εφαρμοσθεί σε περιπτώσεις ροής περισσότερων από δυο μη-αναμιξιμων ρευστών, θα περιορίσουμε την ανάλυση μας για την περίπτωση όπου μελετάται η ροή δύο μη-αναμιξιμων ρευστών. Τυπικά, το ένα ρευστό αναφέρεται ως πρωτεύον ενώ το άλλο ως δευτερεύον. Στα επόμενα ο χρησιμοποιούμε τους δείκτες  $p$  και  $s$  για να υποδηλώσουμε ότι αναφερόμαστε στο πρωτεύον ή το δευτερεύον ρευστό, αντίστοιχα.

Θεωρούμε έναν όγκο ελέγχου του υπολογιστικού πεδίου και εισάγουμε το κλάσμα όγκου που καταλαμβάνει το ρευστό  $p$  και  $s$ , αντίστοιχα, ως:

$$a_p = \frac{V_p}{V_{cv}} \quad (2.1)$$

$$a_s = \frac{V_s}{V_{cv}} \quad (2.2)$$

όπου  $V_{cv}$  ο όγκος του υπό θεώρηση όγκου ελέγχου,  $V_p$  ο όγκος που καταλαμβάνει το ρευστό  $p$  και  $V_s$  ο όγκος που καταλαμβάνει το ρευστό  $s$ . Φανερά:

$$a_p + a_s = 1 \Leftrightarrow a_s = 1 - a_p \quad (2.3)$$

η οποία υποδηλώνει ότι δοθέντως του  $a_p$ , υπολογίζεται άμεσα το  $a_s$ , βάση του οποίου η μοναδική μεταβλητή η οποία θα μας απασχολήσει εν συνεχεία είναι το κλάσμα όγκου του πρωτεύοντος ρευστού,  $a_p$ . Είναι άμεσα φανερό ότι αν:

- $a_p = 1$ , ο όγκος ελέγχου καταλαμβάνεται πλήρως από το ρευστό  $p$
- $a_p = 0$ , ο όγκος ελέγχου καταλαμβάνεται πλήρως από το ρευστό  $s$
- $0 < a_p < 1$ , ο όγκος ελέγχου περιέχει και τα δύο ρευστά και κατά συνέπεια εντός αυτού υπάρχει η μεταξύ τους διεπιφάνεια

Η εξίσωση συνεχείας για το ρευστό  $p$  μπορεί να γραφεί ως [29], [30]:

$$\frac{\partial a_p}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla a_s = 0 \quad (2.4)$$

όπου  $\mathbf{u}$ , το πεδίο ταχύτητας, το οποίο ικανοποιεί την εξίσωση Navier-Stokes:

$$\frac{\partial(\rho\mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\mathbf{u}\mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla\mathbf{u} + \nabla\mathbf{u}^T)] + \rho\mathbf{g} + \mathbf{F}_s \quad (2.5)$$

όπου  $\rho$  η πυκνότητα,  $\mu$  το δυναμικό ιξώδες,  $p$  η πίεση,  $\mathbf{g}$  η επιτάχυνση της βαρύτητας και  $\mathbf{F}_s$  η ασκούμενη δύναμη στην διεπιφάνεια των δυο ρευστών.

Η εξίσωση (2.5) ακολουθεί την αναφερόμενη ως προσέγγιση ενός ρευστού (*single-fluid formulation*) [29] με βάση την οποία το υπολογιστικό πεδίο θεωρείται ότι καταλαμβάνεται από ένα ρευστό πυκνότητας  $\rho$  και δυναμικού ιξώδους  $\mu$ , τα οποία υπολογίζονται από τις εξισώσεις [30]:

$$\rho = a_p\rho_p + (1 - a_p)\rho_s \quad (2.6)$$

$$\mu = a_p\mu_p + (1 - a_p)\mu_s \quad (2.7)$$

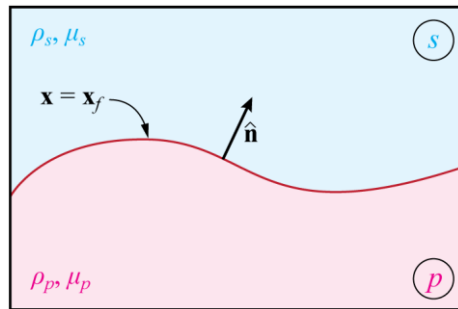
όπου  $\rho_p$  (αντίστοιχα  $\rho_s$ ) είναι η πυκνότητα του πρωτεύοντος (αντίστοιχα δευτερεύοντος) ρευστού και  $\mu_p$  (αντίστοιχα  $\mu_s$ ) είναι το δυναμικό ιξώδες του πρωτεύοντος (αντίστοιχα δευτερεύοντος) ρευστού.

Αν  $\mathbf{x} = \mathbf{x}_f$  είναι εξίσωση που περιγράφει την διεπιφάνεια μεταξύ των δύο ρευστών, τότε η διεπιφανειακή δύναμη  $\mathbf{F}_s$ , μπορεί να εκφραστεί ως [29], [30]:

$$\mathbf{F}_s = \sigma\kappa\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_f)\hat{\mathbf{n}} \quad (2.8)$$

όπου  $\sigma$  ο συντελεστής διεπιφανειακής τάσης,  $\kappa$  η καμπυλότητα της διεπιφάνειας,  $\delta$  η συνάρτηση Dirac και  $\hat{\mathbf{n}}$  το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα της διεπιφάνειας (Σχήμα 2.1). Η παρουσία της συνάρτησης  $\delta$  στο δεξιό μέλος της τελευταίας εξίσωσης διασφαλίζει ότι η  $\mathbf{F}_s$  είναι μηδενική σε οποιοδήποτε

σημείο του υπολογιστικού πεδίου με εξαίρεση, πιθανόν, την διεπιφάνεια, όπου έχουμε  $\mathbf{F}_s \neq \mathbf{0}$  (υπό την προϋπόθεση ότι η διεπιφάνεια δεν είναι επίπεδη, δηλαδή υπό την προϋπόθεση ότι  $\kappa \neq 0$ ).



**Σχήμα 2.1**

Μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα επάνω στην διεπιφάνεια μεταξύ δύο μη-αναμιξιμων ρευστών.

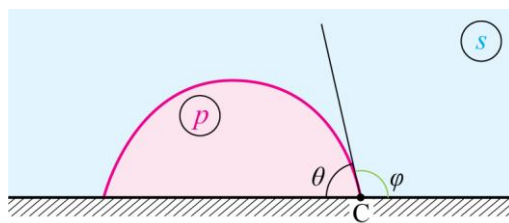
Στη μέθοδο VOF, το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα της διεπιφάνειας υπολογίζεται μέσω της κλίσης του κλάσματος όγκου  $a_p$ , μέσω της εξίσωσης [30]:

$$\hat{\mathbf{n}} = \frac{\nabla a_p}{\|\nabla a_p\|} \quad (2.9)$$

Με τη βοήθεια της τελευταίας εξίσωσης, η καμπυλότητα της διεπιφάνειας μπορεί να εκφραστεί ως [30]:

$$\kappa = \nabla \cdot \hat{\mathbf{n}} \quad (2.10)$$

Για την επίλυση των ανωτέρω διαφορικών εξισώσεων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ANSYS Fluent, το οποίο χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων ελέγχου με σκοπό την διακριτοποίησή τους [30].



**Σχήμα 2.2**

Ορισμός της στατικής γωνίας επαφής στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας.

Στο σημείο αυτό, για λόγους σαφήνειας, θα πρέπει να γίνουμε πιο συγκεκριμένοι σχετικά με το πως ορίζουμε τη στατική γωνία επαφής στην παρούσα εργασία. Αναφερόμενοι στο Σχήμα 2.2, θεωρούμε το σημείο C, στο οποίο συναντώνται οι δύο ρευστές φάσεις με την στερεή επιφάνεια. Αν φέρουμε την εφαπτόμενη ευθεία στην επιφάνεια η οποία διέρχεται από το C, τότε αυτή σχηματίζει δύο γωνίες  $\theta$ ,  $\varphi$  με την στερεή επιφάνεια. Επειδή οι γωνίες αυτές είναι παραπληρωματικές κάθε μια εξ' αυτών μπορεί να θεωρηθεί ως γωνία επαφής. Ωστόσο, για να είμαστε σε συμφωνία με την σύμβαση

που ακολουθεί το Fluent [30], στα επόμενα ως γωνία επαφής θα νοείται η γωνία  $\theta$ , δηλαδή η γωνία που βρίσκεται εντός του ρευστού  $p$ . Τέλος, ο επιθετικός προσδιορισμός «στατική» χρησιμοποιείται για να δηλώσει ρητά ότι αναφερόμαστε στη γωνία επαφής όπως αυτή μετράται σε κατάσταση πλήρους ακινησίας των δύο ρευστών.

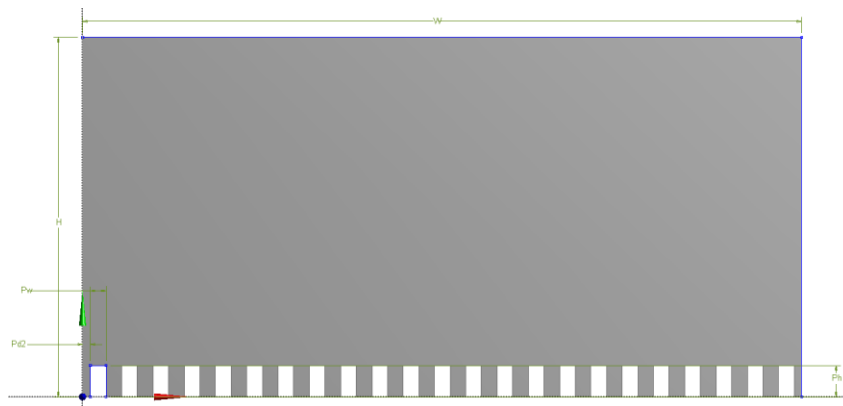
## 3. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΟ ANSYS FLUENT

### 3.1. Περιγραφή κατασκευής του μοντέλου προσομοίωσης

Στο σημείο αυτό παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη δημιουργία του μοντέλου προσομοίωσης. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν στο λογισμικό ANSYS Fluent, ενώ η κατασκευή της γεωμετρίας, η γένεση του πλέγματος και η μετα-επεξεργασία των αποτελεσμάτων μέσω του ολοκληρωμένου περιβάλλοντος ANSYS Workbench.

#### 3.1.1. Κατασκευή γεωμετρίας

Για τη δημιουργία της γεωμετρίας του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε το ενσωματωμένο πρόγραμμα CAD, Design Modeler, του λογισμικού της ANSYS. Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται η γεωμετρία μια επιφάνειας με πυλώνες παραλληλόγραμμου προφίλ, όπως απεικονίζεται στο γραφικό περιβάλλον του Design Modeler.



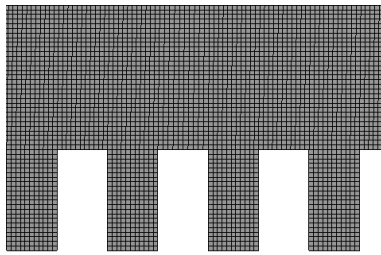
**Σχήμα 3.1**

Γεωμετρία υπολογιστικού πεδίου, όπως απεικονίζεται στο λογισμικό ANSYS Design Modeler.

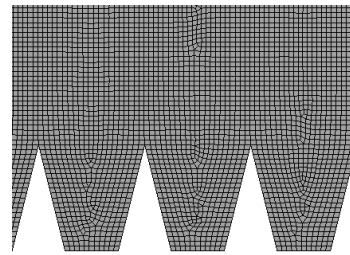
#### 3.1.2. Γένεση πλέγματος

Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής της γεωμετρίας του προβλήματος, ακολουθεί η γένεση του πλέγματος διακριτοποίησης μέσω του ενσωματωμένου γενετή πλέγματος (*mesher*) του λογισμικού.

Για τις προσομοιώσεις που αφορούν είτε επίπεδες επιφάνειες είτε επιφάνειες με πυλώνες παραλληλόγραμμου προφίλ μπορεί κάποιος να εκμεταλλευθεί τη δυνατότητα να γενέσει πλέγματα τετραγωνικών κελιών (Σχήμα 3.2-α). Αυτή η επιλογή εμφανίζει το πλεονέκτημα ότι ο χρόνος που απαιτείται για τη γένεση του πλέγματος είναι της τάξης των μερικών δευτερολέπτων. Από την άλλη μεριά, για τις προσομοιώσεις επιφανειών με πυλώνες τριγωνικού προφίλ η γεωμετρία δεν μπορεί να διακριτοποιηθεί μέσω τετραγωνικών κελιών και κάποιος πρέπει αναπόφευκτα να χρησιμοποιήσει τετράπλευρα κελιά (*quadrilaterals*) (Σχήμα 3.2-β). Η γένεση ενός τέτοιου πλέγματος μπορεί να διαρκέσει από μερικά έως αρκετά λεπτά, ανάλογα με την πυκνότητα του πλέγματος που έχει επιλεγεί.



α)



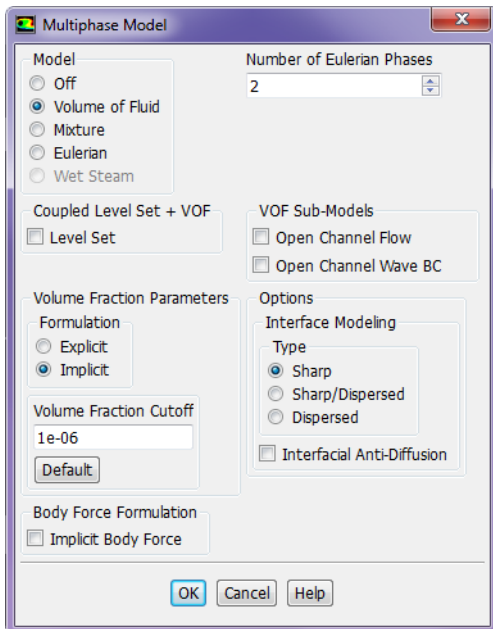
β)

**Σχήμα 3.2**

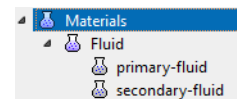
Εστιασμένα δείγματα πλεγμάτων στην περιοχή της στερεής επιφάνειας αποτελούμενης από πυλώνες: α) Παράλληλογραμμο προφίλ (διακριτοποίηση με χρήση τετραγωνικών κελιών), β) Τριγωνικού προφίλ (διακριτοποίηση με χρήση τετράπλευρων κελιών).

### 3.1.3. Δημιουργία μοντέλου στο Fluent

Στο στάδιο αυτό γίνεται η υλοποίηση της φυσικής του προς μελέτη προβλήματος στο λογισμικό ANSYS Fluent. Η δυνατότητα της προσομοίωσης της ροής δύο μη-αναμίξιμων ρευστών επιτυγχάνεται μέσω της ενεργοποίησης της επιλογής Models ► Multiphase (Volume of Fluid), όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στο Σχήμα 3.3-α.



α)



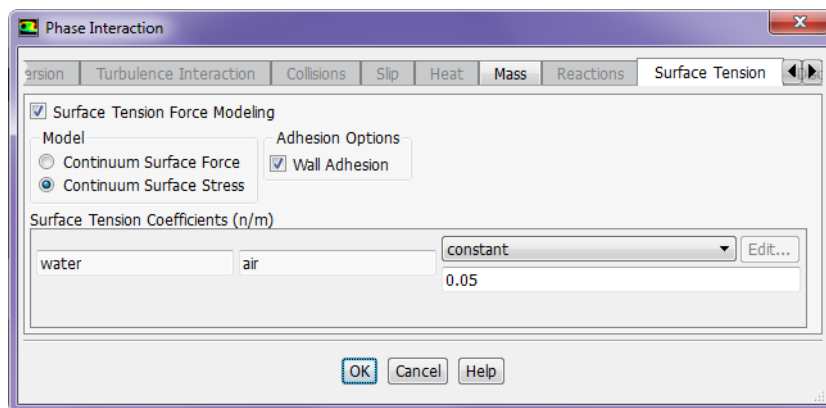
β)

**Σχήμα 3.3**

α) Ο διάλογος του ANSYS Fluent μέσω του οποίου ενεργοποιείται η μέθοδος VOF. β) Ορισμός φυσικοχημικών ιδιοτήτων των δύο ρευστών φάσεων μέσω της δημιουργίας δύο υλικών.

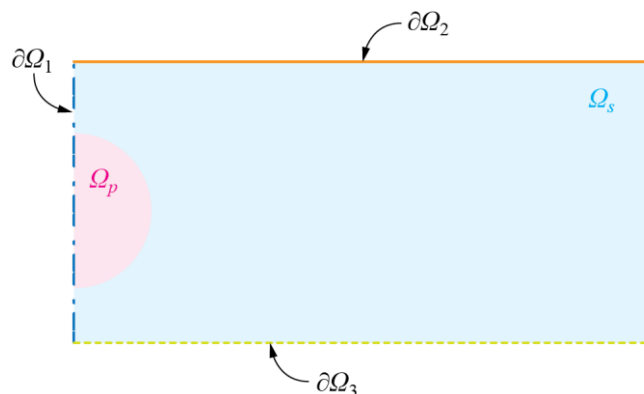
Σε επόμενο στάδιο πρέπει να καθοριστούν η πυκνότητα και το δυναμικό ιξώδες του κάθε ρευστού, μέσω της δημιουργίας δύο υλικών όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3–β.

Για την μοντελοποίηση διεπιφανειακών αλληλεπιδράσεων μεταξύ των δύο ρευστών πρέπει να ενεργοποιηθεί η σχετική επιλογή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4. Στο σημείο αυτό εισάγεται η τιμή του συντελεστή διεπιφανειακής τάσης μεταξύ των δύο ρευστών. Το Fluent παρέχει δυο διαφορετικά μοντέλα για τον υπολογισμό των διεπιφανειακών τάσεων. Σε όλες τις περιπτώσεις που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία οι υπολογισμοί έγιναν μέσω του μοντέλου Continuum Surface Stress, όπως συνιστάται στο εγχειρίδιο χρήσης του λογισμικού [30]. Επιπλέον, σε αυτόν τον διάλογο πρέπει να ενεργοποιηθεί η επιλογή Wall Adhesion, η οποία επιτρέπει τον καθορισμό της στατικής γωνίας επαφής στα στερεά σύνορα του υπολογιστικού πεδίου. Η τιμή της στατικής γωνίας επαφής εισάγεται αργότερα, όταν ορίζονται οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος, όπως εξηγείται παρακάτω.



**Σχήμα 3.4**

Διάλογος του λογισμικού Fluent για τον καθορισμό της μεθόδου υπολογισμού των διεπιφανειακών τάσεων, του συντελεστή διεπιφανειακής τάσης και την ενεργοποίηση της μοντελοποίησης της γωνίας επαφής.



**Σχήμα 3.5**

Σύνορα και περιοχές του υπολογιστικού πεδίου.



Στο σημείο αυτό απαιτείται η εισαγωγή των συνοριακών συνθηκών του προβλήματος. Με σκοπό να εξηγήσουμε τις συνοριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις, αναφερόμαστε στο Σχήμα 3.5, στο οποίο φαίνεται μια τυπική γεωμετρία για τα προβλήματα που εξετάστηκαν. Αν  $\Omega$  είναι το υπολογιστικό πεδίο, το σύνορό του,  $\partial\Omega$ , μπορεί να γραφεί ως ένωση τριών μη-αλληλεπικαλυπτόμενων συνόρων  $\partial\Omega_1$ ,  $\partial\Omega_2$  και  $\partial\Omega_3$ , έτσι ώστε  $\partial\Omega = \partial\Omega_1 \cup \partial\Omega_2 \cup \partial\Omega_3$ . Στο σύνορο:

- $\partial\Omega_1$  εφαρμόζεται συμμετρική συνοριακή συνθήκη. Κατά τον τρόπο αυτό εκμεταλλευόμαστε τη συμμετρία του προβλήματος και χρησιμοποιούμε μόνο το ήμισυ της γεωμετρίας, κάτι το οποίο φυσικά ελαττώνει το υπολογιστικό κόστος στο μισό (τόσο σε επίπεδο απαιτούμενης υπολογιστικής ισχύος, όσο και σε επίπεδο ταχύτητας των υπολογισμών)
- $\partial\Omega_2$  εφαρμόζεται επίσης συμμετρική συνοριακή συνθήκη, αυτή τη φορά όμως με σκοπό να μιμηθούμε ότι το εξωτερικό ρευστό καταλαμβάνει «άπειρο» χώρο και βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας
- $\partial\Omega_3$  εφαρμόζεται η συνοριακή συνθήκη μη-διείσδυσης στην κατακόρυφη διεύθυνση και ολίσθησης στην οριζόντια διεύθυνση. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτή η συνοριακή συνθήκη είναι ανεξάρτητη από το αν η επιφάνεια είναι επίπεδη (λεία) ή όχι.

Σε ό,τι αφορά τις αρχικές συνθήκες του προβλήματος, αυτές μαθηματικά περιγράφονται από τις εξής εξισώσεις:

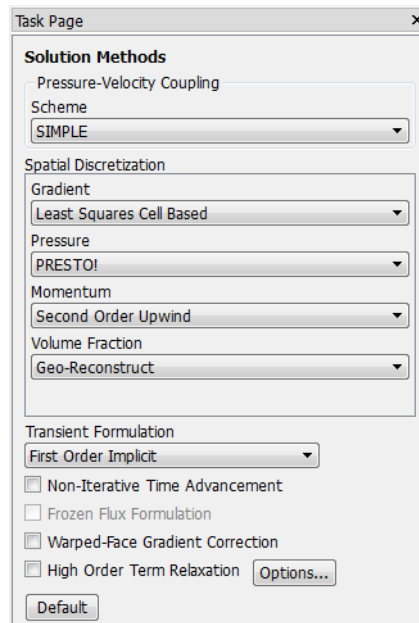
$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, t = 0) = \begin{cases} 0 & , \mathbf{x} \in \Omega_s \\ -u_0 & , \mathbf{x} \in \Omega_p \end{cases} \quad (3.1)$$

$$\rho(\mathbf{x}, t = 0) = \begin{cases} \rho_s & , \mathbf{x} \in \Omega_s \\ \rho_p & , \mathbf{x} \in \Omega_p \end{cases} \quad (3.2)$$

$$\mu(\mathbf{x}, t = 0) = \begin{cases} \mu_s & , \mathbf{x} \in \Omega_s \\ \mu_p & , \mathbf{x} \in \Omega_p \end{cases} \quad (3.3)$$

οι οποίες λεκτικά μπορούν να διατυπωθούν ως εξής: το υπολογιστικό πεδίο  $\Omega$  χωρίζεται σε δύο περιοχές  $\Omega_p$  και  $\Omega_s$ , έτσι ώστε  $\Omega_p \cup \Omega_s = \Omega$  και  $\Omega_p \cap \Omega_s = \emptyset$ . Στην περιοχή  $\Omega_s$ , η οποία αναπαριστά την περιοχή εκτός της σταγόνας, η ταχύτητα είναι μηδενική. Εντός της περιοχής  $\Omega_p$ , η οποία αναπαριστά το εσωτερικό της σταγόνας, η ταχύτητα είναι ίση με την επιθυμητή ταχύτητα πρόσκρουσης της σταγόνας επάνω στην στερεή επιφάνεια,  $u_0 (> 0)$  (το αρνητικό πρόσημο χρειάζεται μιας και η θετική φορά του κατακόρυφου άξονα στο Fluent είναι από κάτω προς τα επάνω, ενώ η σταγόνα θα πρέπει να κινείται από επάνω προς τα κάτω). Επιπλέον, στην περιοχή  $\Omega_s$  η πυκνότητα και το δυναμικό ιξώδες αντιστοιχούν σε αυτά του εξωτερικού ρευστού, ενώ στην περιοχή  $\Omega_p$  σε αυτά του ρευστού που αποτελεί τη σταγόνα.

Για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε ο προεπιλεγμένος επιλύτης πίεσης (*pressure-based solver*) του Fluent, μιας και σε προκαταρκτικές προσομοιώσεις δεν προέκυψαν προβλήματα σύγκλισης. Οι ακριβείς παράμετροι του επιλύτη φαίνονται στο Σχήμα 3.6.



**Σχήμα 3.6**

Παράμετροι του επιλύτη που χρησιμοποιήθηκαν για της προσομοιώσεις της εργασίας.

Η επίλυση στο χρόνο έγινε με χρήση αυτόματου χρονικού βήματος, όπου ως κριτήριο για την αποδοχή αύξησης του τέθηκε ο αριθμός Courant να είναι μικρότερος της μονάδας.

Ένας τυπικός χρόνος επίλυσης του προβλήματος σε επίπεδη ή αξονοσυμμετρική γεωμετρίας μπορεί να διαρκέσει μερικές (2-5) ώρες, σε έναν τυπικό υπολογιστή γραφείου, ανάλογα με την πυκνότητα του χρησιμοποιούμενου πλέγματος. Σε γεωμετρίες καθαρά τριών διαστάσεων οι υπολογιστικοί χρόνοι και τα ποσά μνήμης που απαιτούνται καθιστούν τις προσομοιώσεις ιδιαίτερα χρονοβόρες ή αδύνατες (λόγω ανεπάρκειας μνήμης) σε έναν τυπικό υπολογιστή. Για το λόγο αυτό προσομοιώσεις στις τρεις διαστάσεις δεν πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της εργασίας. Σε κάθε περίπτωση όμως, το μοντέλο που αναπτύχθηκε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την διενέργεια τρισδιάστατων προσομοιώσεων, χωρίς να απαιτείται ιδιαίτερη τροποποίησή ή επανέλεγχος της ορθότητάς του.

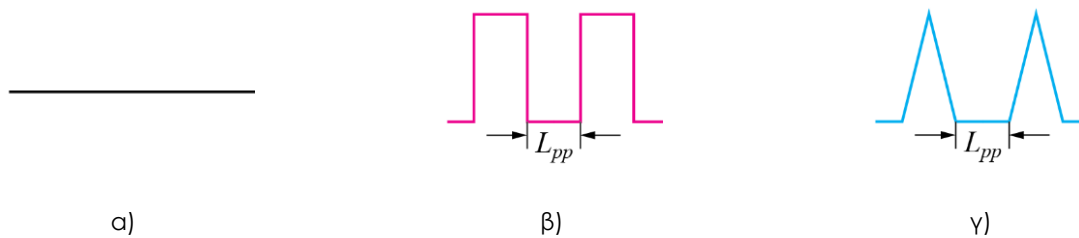
### 3.1.4. Μετα-επεξεργασία αποτελεσμάτων

Η μετα-επεξεργασία των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων έγινε στο ενσωματωμένο λογισμικό CFD-Post, μέσω του οποίου δημιουργήθηκαν όλες οι εικόνες που παρουσιάζονται παρακάτω.

## 4. ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

### 4.1. Έλεγχος επάρκειας πλέγματος

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας μπορούμε να διακρίνουμε δύο κατηγορίες γεωμετριών που μας απασχόλησαν (Σχήμα 4.1). Η ουσιαστική τους διαφορά έγκειται στο ότι στην πρώτη κατηγορία η στερεή επιφάνεια είναι επίπεδη, ενώ στη δεύτερη τραχεία. Η διαφοροποίηση αυτή έχει επίπτωση στο ποιο είναι το χαρακτηριστικό μήκος βάση του οποίου θα πρέπει να εκλεγεί η ανάλυση του υπολογιστικού πλέγματος. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση της λείας επιφάνειας είναι προφανές ότι το μέγεθος κελιού του υπολογιστικού πλέγματος πρέπει να εκλεγεί έτσι ώστε η σταγόνα να αναπαριστάται με ικανοποιητική ανάλυση. Αυτό σημαίνει ότι το χαρακτηριστικό μήκος της γεωμετρίας είναι η αρχική ακτίνα της σταγόνας,  $R_0$ . Από την άλλη, στην περίπτωση όπου μελετώνται τραχείες επιφάνειες με पुलώνες το χαρακτηριστικό μήκος είναι η ελάχιστη χωρική διάσταση της γεωμετρίας των पुलώνων. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι επειδή το ελάχιστο χαρακτηριστικό μήκος της γεωμετρίας των पुलώνων είναι εν γένει κατά πολύ μικρότερο της αρχικής ακτίνας της σταγόνας, αν διασφαλιστεί ακρίβεια στην αναπαράσταση της γεωμετρίας των पुलώνων διασφαλίζεται και ακρίβεια στην αναπαράσταση της γεωμετρίας της σταγόνας.



**Σχήμα 4.1**

Προφίλ επιφανειών που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία. α) Επίπεδη (λεία) επιφάνεια, β) Τραχεία επιφάνεια με παραλληλόγραμμους पुलώνες, γ) Τραχεία επιφάνεια με τριγωνικούς पुलώνες.

Με βάση τα ανωτέρω, αν συμβολίσουμε με  $L_c$  το χαρακτηριστικό μήκος της γεωμετρίας, τότε:

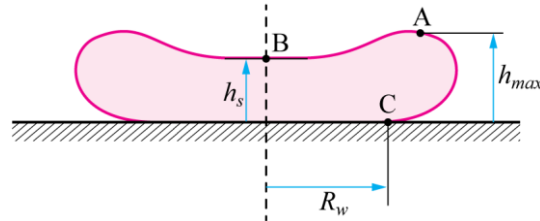
$$L_c = \begin{cases} R_0 & , \text{ λεία επιφάνεια} \\ L_{pp} & , \text{ τραχεία επιφάνεια} \end{cases} \quad (4.1)$$

με την προϋπόθεση ότι στις γεωμετρίες με पुलώνες η απόσταση पुलώνα-πυλώνα,  $L_{pp}$ , αποτελεί τη ελάχιστη χωρική διάσταση της εν λόγω γεωμετρίας.

Για την αξιολόγηση της επίδρασης της πυκνότητας του υπολογιστικού πλέγματος, ορίζουμε την αδιάστατη ακτίνα διαβροχής,  $R_w^*$ , ως:

$$R_w^* = \frac{R_w}{2R_0} \quad (4.2)$$

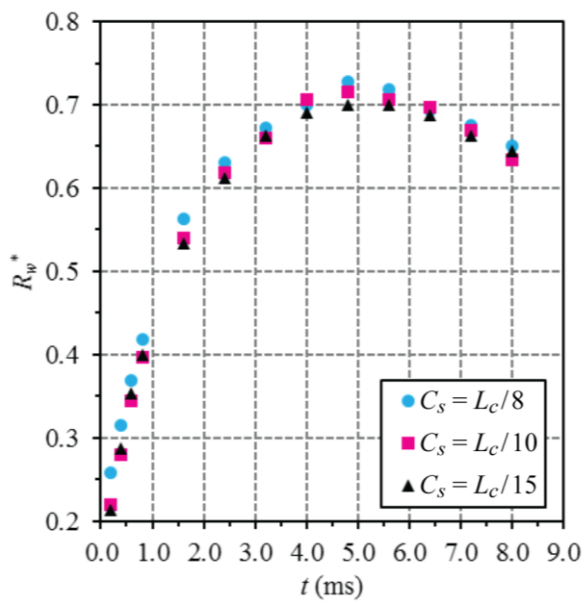
όπου, όπως και στα προηγούμενα,  $R_0$  είναι η αρχική (πριν τη σύγκρουση με την επιφάνεια) ακτίνα της σταγόνας και  $R_w$  είναι η απόσταση μεταξύ του κατακόρυφου άξονα συμμετρίας και του τριπλού σημείου C, όταν η σταγόνα είναι σε επαφή με τη στερεή επιφάνεια (Σχήμα 4.2).



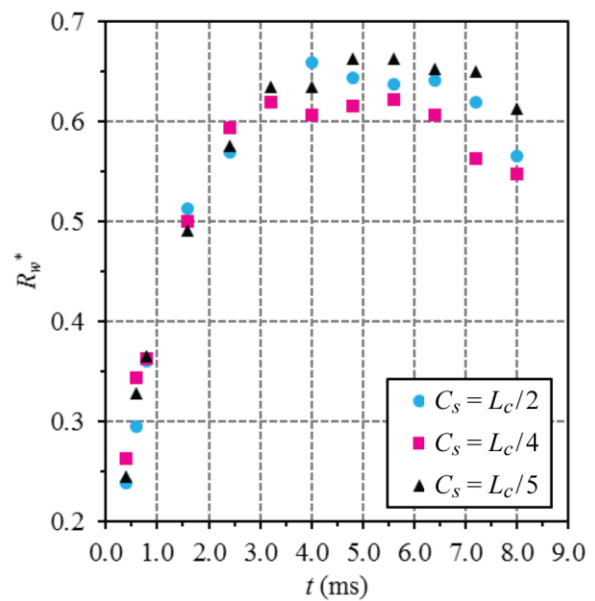
**Σχήμα 4.2**

Σταγόνα σε επαφή με στερεή επιφάνεια.

Εν γένει, η  $R_w^*$  είναι συνάρτηση του χρόνου μιας και η ακτίνα διαβροχής,  $R_w$ , είναι χρονικά μεταβαλλόμενη. Φυσικά καθώς  $t \rightarrow \infty$  και το σύστημα φτάνει σε μόνιμη κατάσταση η  $R_w$  (και συνεπακόλουθα η  $R_w^*$ ) τείνουν σε μια σταθερή οριακή τιμή, ανεξάρτητη του χρόνου.



α)



β)

**Σχήμα 4.3**

Αδιάστατη ακτίνα διαβροχής συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές πυκνότητες του υπολογιστικού πλέγματος. α) Σύγκρουση με επίπεδη (λεία) επιφάνεια, β) Σύγκρουση με τραχεία επιφάνεια αποτελούμενη από πυλώνες παραλληλόγραμμου προφίλ.

Στο Σχήμα 4.3-α φαίνονται τα αποτελέσματα τριών διαφορετικών προσομοιώσεων για τη σύγκρουση μιας σταγόνας με μια επίπεδη επιφάνεια για τρεις πυκνότητες πλέγματος, όπως αυτό εκφράζεται μέσω του μέγιστου μεγέθους κελιού  $C_s$ . Είναι εμφανές ότι τα αποτελέσματα συγκλίνουν

ικανοποιητικά και επομένως κάποιος μπορεί να συνάγει ότι σε πλέγματα με μέγεθος κελιού μικρότερο από περίπου  $L_c/10$  τα λαμβανόμενα αποτελέσματα είναι ανεξάρτητα από το πλέγμα. Με βάση αυτό, όλα τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία και αφορούν τη σύγκρουση σταγόνας με λεία επιφάνεια έχουν ληφθεί σε πλέγματα με μέγιστο μέγεθος κελιού  $L_c/10$ .

Στο Σχήμα 4.3-β φαίνονται τα αποτελέσματα τριών διαφορετικών προσομοιώσεων για τη σύγκρουση μιας σταγόνας με μια τραχεία επιφάνεια, αποτελούμενη από πυλώνες παραλληλόγραμμου προφίλ, για τρεις πυκνότητες πλέγματος. Σε αυτή την περίπτωση είναι εμφανές ότι το υπολογιστικό πλέγμα πρέπει να είναι πυκνότερο σε σχέση με την περίπτωση της επίπεδης επιφάνειας. Με βάση αυτό, όλα τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία και αφορούν τη σύγκρουση σταγόνας σε επιφάνεια με πυλώνες έχουν ληφθεί σε πλέγματα με μέγιστο μέγεθος κελιού  $C_s = L_c/5$ .

## 4.2. Αποτελέσματα και σύγκριση με τη βιβλιογραφία

---

Για να μπορέσουμε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα μας με αντίστοιχα της βιβλιογραφίας, θα πρέπει να ορίσουμε δύο επιπλέον αδιάστατες μεταβλητές. Συγκεκριμένα, θεωρούμε το σημείο Α στο Σχήμα 4.2 Σχήμα 4.2 το οποίο είναι το σημείο της επιφάνειας της σταγόνας που απέχει τη μέγιστη κατακόρυφη απόσταση από τη στερεή επιφάνεια και ορίζουμε το αδιάστατο μέγιστο ύψος:

$$h_{max}^* = \frac{h_{max}}{2R_0} \quad (4.3)$$

Όμοια με τα  $R_w$  και  $R_w^*$ , τόσο το  $h_{max}$  όσο και το  $h_{max}^*$  είναι συναρτήσεις του χρόνου και αποκτούν σταθερή τιμή μόνο όταν το σύστημα φτάσει στη μόνιμη κατάσταση.

Θεωρούμε πλέον το σημείο Β στο Σχήμα 4.2, το οποίο είναι το σημείο της επιφάνειας της σταγόνας το οποίο βρίσκεται επάνω στο κατακόρυφο άξονα συμμετρίας της. Έστω  $h_s$  η απόσταση του σημείου Β από την στερεή επιφάνεια. Ακολουθώντας τον [31], ορίζουμε το αδιάστατο ελάχιστο ύψος κατά μήκος του άξονα συμμετρίας:

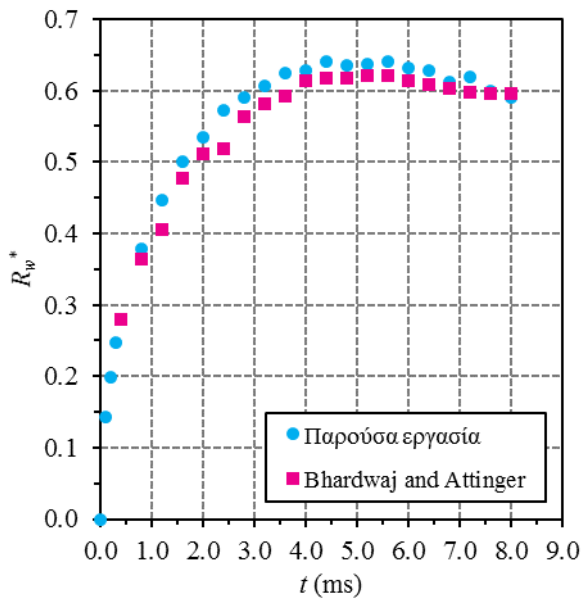
$$h_{min}^* = \frac{h_s}{2R_0} \quad (4.4)$$

Θα πρέπει να παρατηρήσουμε ότι οι ανωτέρω ορισμοί είναι γενικοί και ισχύουν ανεξάρτητα με το αν η υπό θεώρηση γεωμετρία είναι διοδιάστατη ή αξονοσυμμετρική.

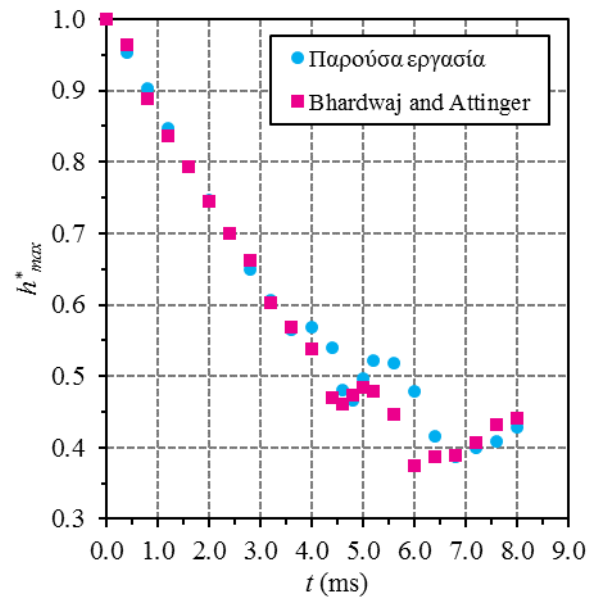
### 4.2.1. Σύγκριση με το μοντέλο των Bhardwaj και Attinger

Στο σημείο αυτό, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων του υπολογιστικού μας μοντέλου με αυτό των Bhardwaj και Attinger [32]. Το υπολογιστικό πεδίο έχει ύψος 4.5 mm και μήκος 8 mm, ενώ η γεωμετρία είναι αξονοσυμμετρική. Η σταγόνα έχει αρχική ακτίνα ίση με 1.6 mm, ενώ η ταχύτητα πρόσκρουσης της στη στερεή επιφάνεια είναι ίση με 0.4 m/s. Η στατική γωνία επαφής έχει ληφθεί ίση με  $177^\circ$  και η στερεή επιφάνεια είναι επίπεδη.

Στο Σχήμα 4.4-α, παρουσιάζεται η αδιάστατη ακτίνα διαβροχής ( $R_w^*$ ) της σταγόνας συναρτήσει του χρόνου για τα δύο υπολογιστικά μοντέλα.



α)



β)

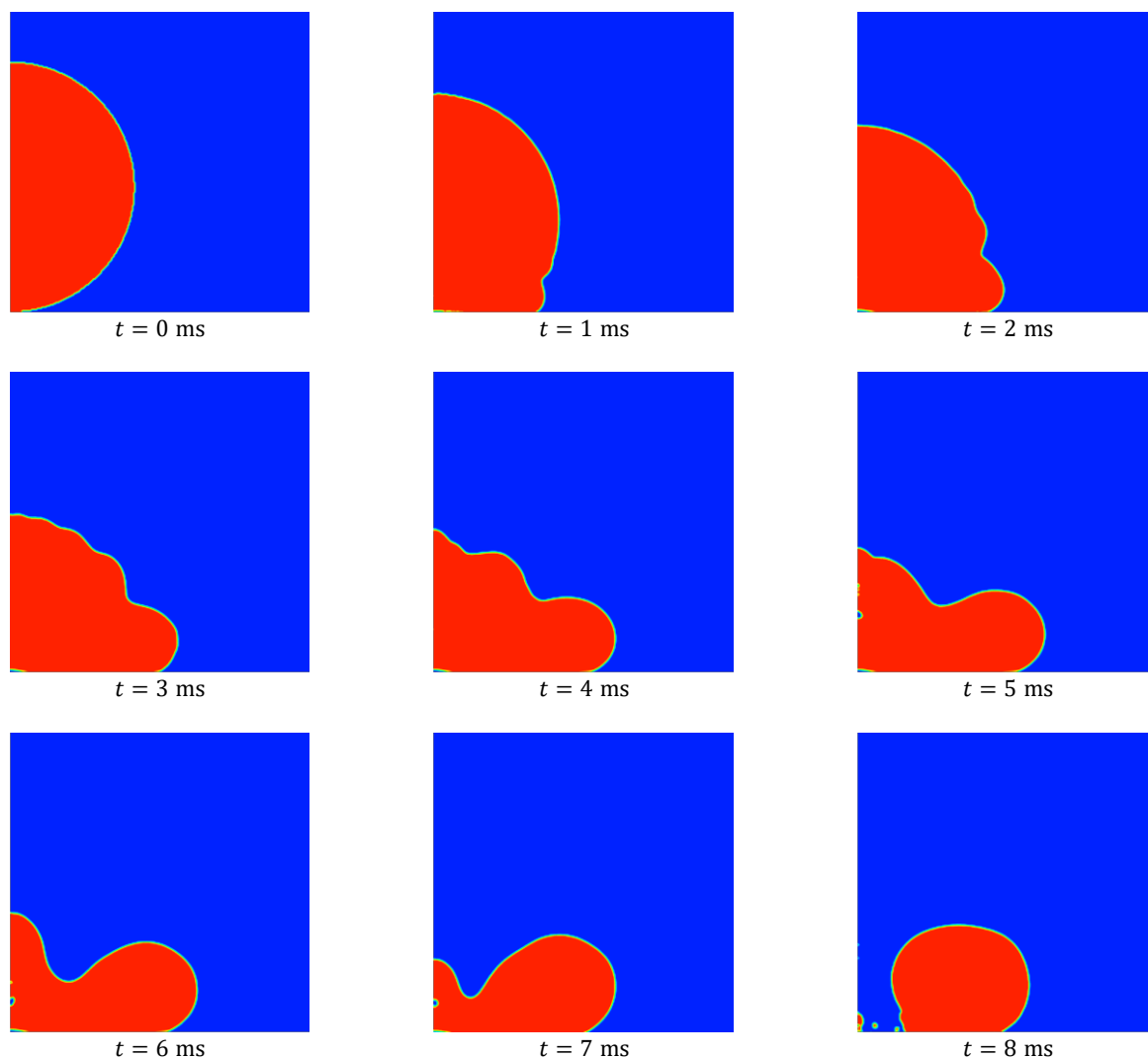
#### Σχήμα 4.4

Διαγράμματα σύγκρισης του μοντέλου των Bhardwaj και Attinger και της παρούσας εργασίας για: α) την αδιάστατη ακτίνα διαβροχής, και β) το αδιάστατο μέγιστο ύψος.

Κατά τα πρώτα έως 1.6 ms, η σταγόνα αρχίζει να εξαπλώνεται επάνω στην στερεή επιφάνεια με μεγάλο ρυθμό, οδηγώντας σε ισχυρή παραμόρφωση της επιφάνειάς της, γεγονός που οφείλεται στην υψηλή κινητική ενέργεια που έχει η σταγόνα στο διάστημα αυτό. Από εκεί και πέρα, συνεχίζει να εξαπλώνεται έως τα 5.6 ms, όπου η αδιάστατη ακτίνα διαβροχής λαμβάνει τη μέγιστή της τιμή, η οποία για το υπολογιστικό μοντέλο της παρούσας εργασίας είναι ίση με 0.64 ενώ για αυτό των [32] ίση με 0.62. Στο σημείο της μέγιστης διαβροχής, η επιφανειακή ενέργεια μεγιστοποιείται σε αντίθεση με την κινητική, η οποία λαμβάνει την ελάχιστη της τιμή. Από το σημείο αυτό και μετά, η σταγόνα αρχίζει να επανέρχεται (*recoil*). Η ανάσχεση αυτή οφείλεται στη μετατροπή της επιφανειακής ενέργειας σε κινητική ενέργεια, και αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ροή στο εσωτερικό της σταγόνας να είναι πλέον ακτινική με φορά προς τα μέσα. Η προσομοίωση του φαινομένου ολοκληρώνεται στα 8 ms, όπου  $R_w^* = 0.59$  και για τα δύο μοντέλα.

Στο Σχήμα 4.4-β παρουσιάζεται το αδιάστατο μέγιστο ύψος ( $h_{max}^*$ ) της σταγόνας συναρτήσει του χρόνου για τα δύο μοντέλα. Και σε αυτή την περίπτωση υπάρχει πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των δύο μοντέλων. Όπως προκύπτει από το διάγραμμα, το  $h_{max}^*$  μειώνεται γραμμικά στο χρονικό διάστημα από 0 έως 3.2 ms και με σχετικά μεγάλο ρυθμό, που όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οφείλεται στην υψηλή κινητική ενέργεια της σταγόνας. Από τη χρονική στιγμή των 4.0 ms και έως τα περίπου 7 ms εμφανίζονται ορισμένες αυξομειώσεις στις τιμές του  $h_{max}^*$ . Στο διάστημα αυτό η σταγόνα φαίνεται να εκτελεί ταλάντωση, η οποία είναι πιθανόν να οφείλεται στον «ανταγωνισμό» μεταξύ της επιφανειακής ενέργειας και της κινητικής ενέργειας της σταγόνας [32].

Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μας για τη γεωμετρία της σταγόνας σε διάφορες χρονικές στιγμές.



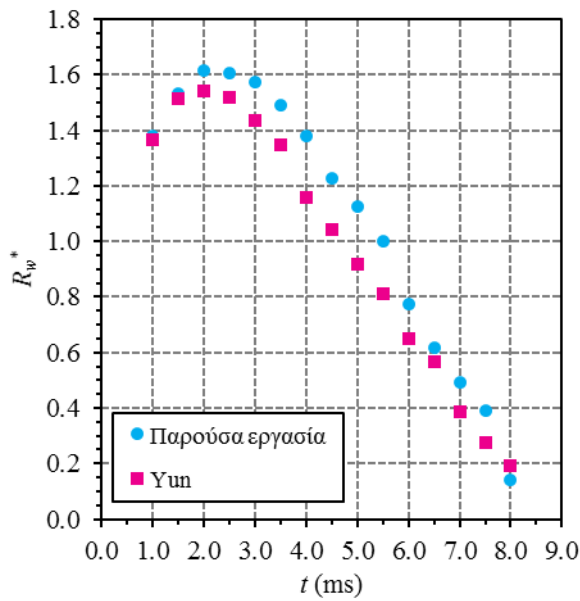
**Σχήμα 4.5**

Γεωμετρία της σταγόνας κατά την πρόσκρουσή της στη στερεή επιφάνεια.

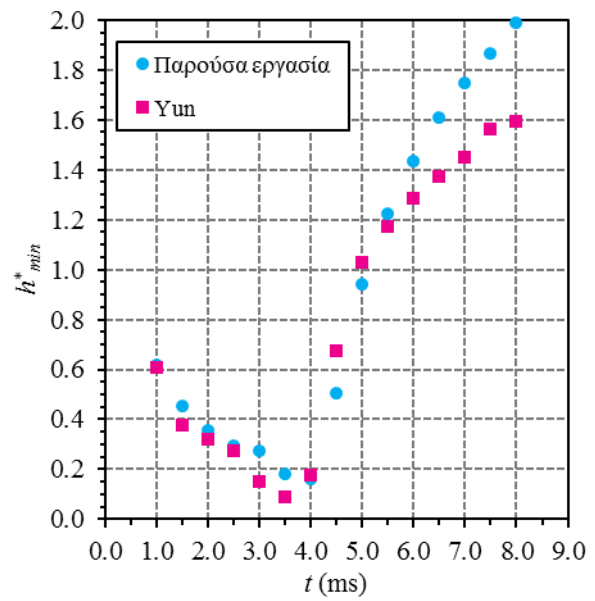
#### 4.2.2. Σύγκριση με το μοντέλο του Yun

Στην υποενότητα αυτή γίνεται σύγκριση του υπολογιστικού μας μοντέλου με αυτό του Yun [31]. Το υπολογιστικό πεδίο έχει ύψος 6 mm, μήκος 8 mm και η γεωμετρία είναι και πάλι αξονοσυμμετρική. Η σταγόνα έχει αρχική ακτίνα 0.985 mm, η ταχύτητα πρόσκρουσης της είναι 0.7882 m/s, ενώ η στατική γωνία επαφής είναι ίση με  $160^\circ$ .

Στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου της παρούσας εργασίας με αυτό του Yun [31] ως προς την αδιάστατη ακτίνα διαβροχής  $R_w^*$  και το αδιάστατο ύψος  $h_{min}^*$ .



α)



β)

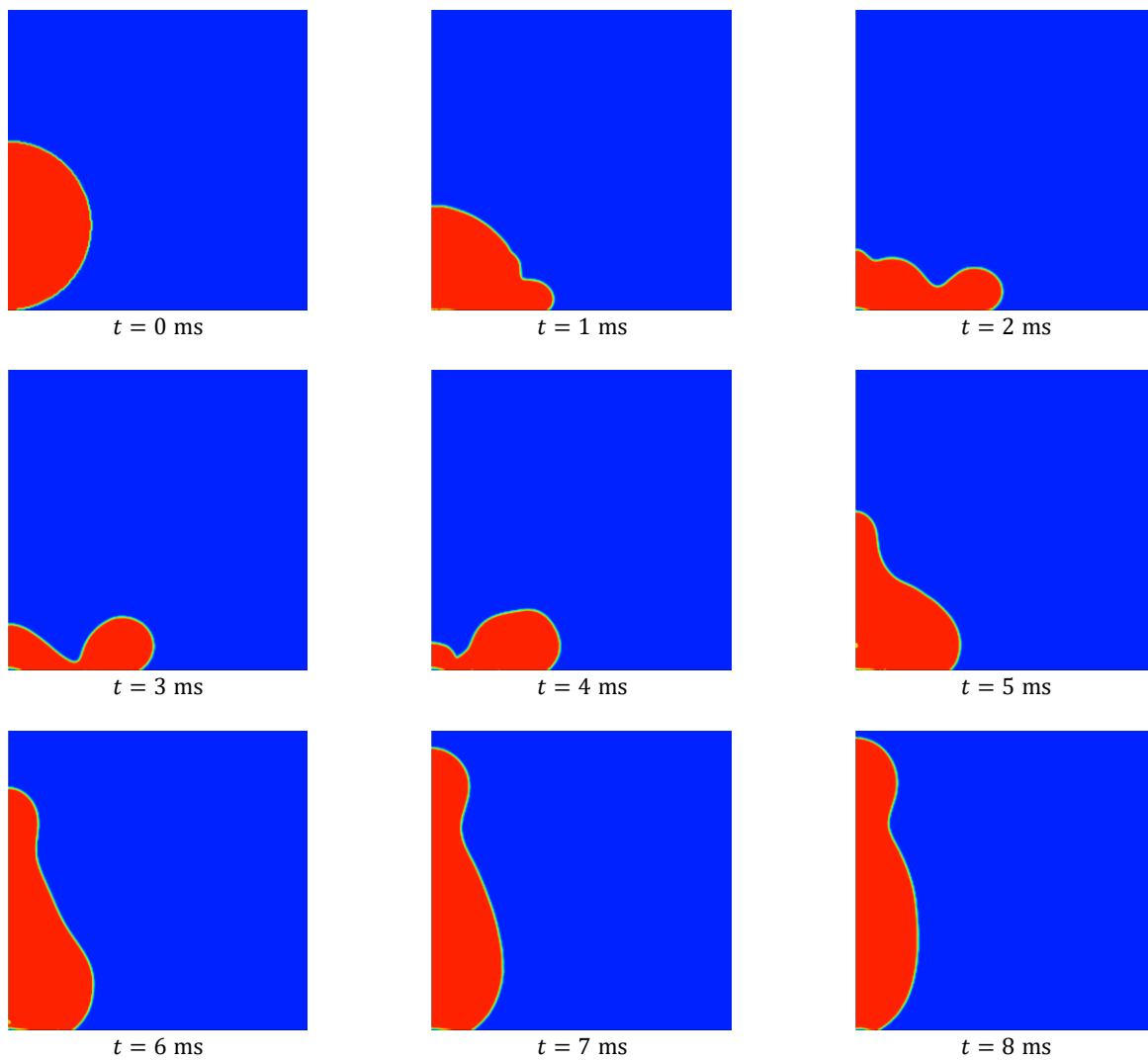
#### Σχήμα 4.6

Διαγράμματα σύγκρισης του μοντέλου του Yun και της παρούσας εργασίας για: α) την αδιάστατη ακτίνα διαβροχής, β) το αδιάστατο ελάχιστο ύψος κατά τον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας της σταγόνας.

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε οι υπολογισμοί της αδιάστατης ακτίνας διαβροχής,  $R_w^*$ , είναι σε καλή συμφωνία μόνο στο αρχικό και τελικό στάδιο της προσομοίωσης. Αντίθετα, σε ενδιάμεσους χρόνους, εμφανίζονται διαφορές της τάξης του 20%, οι οποίες θεωρούνται μεγάλες. Ωστόσο, η συμπεριφορά των δύο καμπυλών είναι σε συμφωνία. Σε ό,τι αφορά το αδιάστατο ύψος,  $h_{min}^*$ , η συμφωνία είναι αρκετά καλή μέχρι περίπου το μέσο του χρόνου προσομοίωσης. Από εκεί και πέρα, παρότι οι καμπύλες ακολουθούν παρεμφερή συμπεριφορά, οι αποκλίσεις είναι σημαντικές. Η ακριβής εξήγηση των διαφορών δεν είναι εύκολο να στοιχειοθετηθεί. Μπορεί κάποιος να πιθανολογήσει ότι αυτές οι διαφορές οφείλονται σε διαφορές στην υλοποίηση της μεθόδου VOF μεταξύ της παρούσας εργασίας και αυτής του Yun [31]. Με δεδομένο όμως ότι ο Yun στην εργασία του δεν παρουσιάζει λεπτομέρειες σχετικά με την υλοποίηση που έχει ακολουθήσει, δεν είναι δυνατό αυτή η υπόθεση να αιτιολογηθεί περαιτέρω. Σε κάθε περίπτωση, το συγκεκριμένο σημείο χρήζει περαιτέρω μελέτης.

Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μας για τη γεωμετρία της σταγόνας σε διάφορες χρονικές στιγμές.





**Σχήμα 4.7**

Γεωμετρία της σταγόνας κατά την πρόσκρουσή της στη στερεή επιφάνεια.

## 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 5.1. Αδιάστατοι αριθμοί

---

Κατόπιν της αξιολόγησης του υπολογιστικού μας μοντέλου περνάμε στον κύριο στόχο της παρούσας εργασίας, ο οποίος είναι η μελέτη επιφανειών που παρουσιάζουν υπερυδροφόβη συμπεριφορά.

Όπως είναι γνωστό, η δυναμική της πρόσκρουσης σταγόνων σε στερεές επιφάνειες αποτελεί πολύπλοκο φαινόμενο με πλούσια φυσική [33]. Το πρόβλημα γίνεται ακόμα πιο περίπλοκο όταν η υπό εξέταση επιφάνεια δεν είναι λεία στην κλίμακα μήκους που εξετάζεται το πρόβλημα. Κατά συνέπεια, το να μπορέσει κάποιος να εντοπίσει τις παραμέτρους που ελέγχουν το πρόβλημα και να τις εκφράσει μέσω αδιάστατων αριθμών (όπως είναι το ιδανικό για κάθε πρόβλημα ρευστοδυναμικής) απαιτεί όχι μόνο βαθιά γνώση της φυσικής του προβλήματος, αλλά και ιδιαίτερη διαίσθηση. Η προσέγγιση που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία είναι η αξιοποίηση της ευρείας γνώσης που υπάρχει στη βιβλιογραφία [29], [33] σχετικά με το ποιοι αδιάστατοι αριθμοί ελέγχουν το πρόβλημα σύγκρουσης σταγόνων με επίπεδες επιφάνειες και εν συνεχεία να γίνει προσθήκη επιπλέον αδιάστατων αριθμών που σχετίζονται αποκλειστικά με τη γεωμετρία της επιφάνειας όταν αυτή είναι μη-λεία στην εξεταζόμενη κλίμακα μήκους.

Η δυναμική της πρόσκρουσης σταγόνων σε λείες επιφάνειες, γενικά, ελέγχεται από τρεις αδιάστατους αριθμούς [19]: α) τον αδιάστατο αριθμό Reynolds ( $Re$ ), β) τον αδιάστατο αριθμό Weber ( $We$ ) και γ) τον αδιάστατο αριθμό Bond ( $Bo$ ).

Ο αδιάστατος αριθμός Reynolds εκφράζει την σχετική επίδραση των δυνάμεων αδράνειας σε σχέση με τις ιξώδεις δυνάμεις και για τις περιπτώσεις που μας απασχολούν ορίζεται ως [34]:

$$Re = \frac{\rho_p u_0 R_0}{\mu_p} \quad (5.1)$$

όπου  $\rho_p$  είναι η πυκνότητα της σταγόνας,  $\mu_p$  το δυναμικό της ιξώδεις,  $R_0$  η αρχική της (πριν την σύγκρουση) ακτίνα και  $u_0$  η αρχική της (πριν τη σύγκρουση) ταχύτητα. Στη γενική περίπτωση «μεγάλες» τιμές του  $Re$  οδηγούν σε τυρβώδη ροή. Ωστόσο, για περιπτώσεις σύγκρουσης σταγόνων με στερεές επιφάνειες, δεν είναι γνωστό πάνω από ποια κρίσιμη τιμή του  $Re$  συμβαίνει αυτό. Για να διασφαλίσουμε κατά το δυνατό ότι οι περιπτώσεις που μελετήσαμε είναι εντός της περιοχής της στρωτής ροής οι παράμετροι του προβλήματος επιλέχθηκαν έτσι ώστε ο  $Re$  να μην υπερβαίνει την τιμή του 200.

Ο αδιάστατος αριθμός Weber εκφράσει τη σχετική επίδραση των δυνάμεων αδράνειας σε σχέση με τις δυνάμεις διεπιφανειακής τάσης και για τις περιπτώσεις που μας απασχολούν ορίζεται ως [34]:

$$We = \frac{\rho_p u_0^2 R_0}{\sigma} \quad (5.2)$$

όπου  $\sigma$  ο συντελεστής διεπιφανειακής τάσης. Όταν  $We \ll 1$ , αναμένεται οι δυνάμεις διεπιφανειακής τάσης να υπερτερούν των δυνάμεων αδράνειας. Επομένως αναμένεται η σταγόνα να έχει τάση να διατηρήσει, κατά το δυνατόν, «σφαιρικό» σχήμα. Αυτό σημαίνει ότι μετά από την φάση εξάπλωσής της επάνω στην επιφάνεια θα ακολουθήσει μια φάση αναδιπλώσής της (*recoil*). Στη φάση αυτή, και ανάλογα κατά πόσο οι υπόλοιπες συνθήκες ευνοούν κάτι τέτοιο, η σταγόνα μπορεί να χάσει επαφή

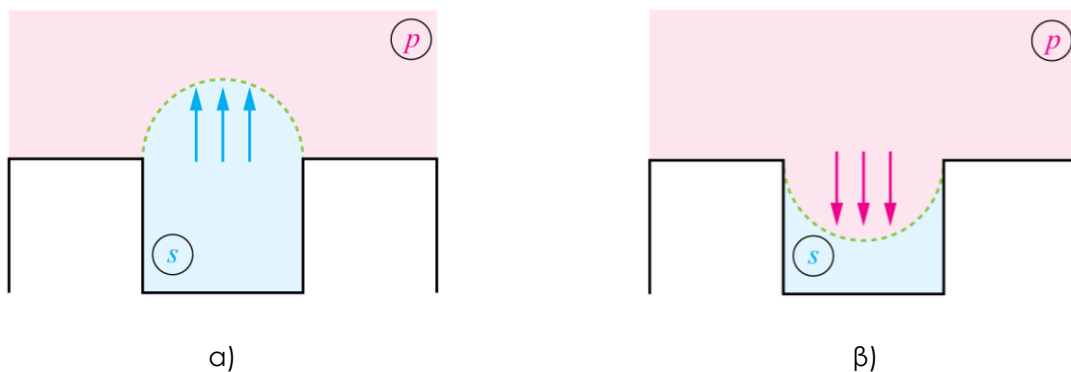
με την επιφάνεια (*detach*). Αντίθετα, όταν  $We \gg 1$ , αναμένεται ότι οι δυνάμεις αδράνειας θα οδηγήσουν σε περαιτέρω εξάπλωση της σταγόνας επάνω στην επιφάνεια, μειώνοντας την πιθανότητα η σταγόνα να οδηγηθεί σε αποκόλληση.

Τέλος, ο αδιάστατος αριθμός Bond εκφράσει τη σχετική επίδραση των δυνάμεων βαρύτητας σε σχέση με τις δυνάμεις διεπιφανειακής τάσης και για τις περιπτώσεις που μας απασχολούν ορίζεται ως [34]:

$$Bo = \frac{\rho_p g R_0^2}{\sigma} \quad (5.3)$$

όπου  $g$  το μέτρο της κάθετης στη στερεή επιφάνεια συνιστώσας της επιτάχυνσης της βαρύτητας. Όταν  $Bo \ll 1$ , αναμένεται οι δυνάμεις διεπιφανειακής τάσης να υπερτερούν των δυνάμεων βαρύτητας. Σε αυτή την περίπτωση και πάλι αναμένεται η σταγόνα να έχει τάση αναδιπλώσης. Αντίθετα, όταν  $Bo \gg 1$  οι δυνάμεις βαρύτητας υπερτερούν και η τάση αναμένεται να είναι η σταγόνα να μην αναδιπλωθεί.

Όπως είναι σαφές από τα παραπάνω, οι τρεις αδιάστατοι αριθμοί που ελέγχουν το πρόβλημα έχουν, στη γενική περίπτωση, αντίρροπες επιδράσεις αποτέλεσμα του οποίου είναι ότι κάποιος δεν μπορεί να προβλέψει εκ των προτέρων ποια θα είναι η συμπεριφορά της σταγόνας μετά την πρόσκρουσή της.



### Σχήμα 5.1

Δημιουργία δυνάμεων πίεσης λόγω καμπύλωσης της διεπιφάνειας μεταξύ της σταγόνας και του περιβάλλοντος ρευστού. α) Περίπτωση όπου οι δυνάμεις πίεσης τείνουν να απωθήσουν τη σταγόνα από τη στερεή επιφάνεια, και β) Περίπτωση όπου οι δυνάμεις πίεσης τείνουν να προσκολλήσουν τη σταγόνα στη στερεή επιφάνεια.

Όπως αναφέρθηκε και προηγούμενα, το όλο πρόβλημα περιπλέκεται περαιτέρω όταν η επιφάνεια δεν είναι επίπεδη. Για παράδειγμα, θεωρούμε την περίπτωση μιας επιφάνειας με πυλώνες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1. Αν οι τοπικές συνθήκες είναι τέτοιες ώστε η διεπιφάνεια να καμπυλώνεται προς τα επάνω, οι δυνάμεις πίεσης που αναπτύσσονται εντός της κοιλότητας που σχηματίζουν οι πυλώνες έχουν φορά προς τα επάνω (Σχήμα 5.1-α), δηλαδή τάση να αποκολλήσουν τη σταγόνα. Από την άλλη, αν οι τοπικές συνθήκες είναι τέτοιες ώστε η διεπιφάνεια να καμπυλώνεται προς τα κάτω οι δυνάμεις πίεσης έχουν φορά προς τα κάτω, δηλαδή τάση να συγκρατήσουν τη σταγόνα προσκολλημένη (Σχήμα 5.1-β). Παρότι το υπολογιστικό μας μοντέλο λαμβάνει υπόψη του αυτά τα φαινόμενα δεν επιχειρήθηκε η ποσοτικοποίηση τους.

Με βάση όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, τελικά, εξετάσαμε την επίδραση δύο αδιάστατων αριθμών ( $We$  και  $Bo$ ) και διακρίναμε τέσσερις χαρακτηριστικές περιοχές, όπως δίνονται στον Πίνακα 5-1. Μια τέτοια προσέγγιση του προβλήματος είναι συνδυασμός δυο τεχνικών της γνωστικής περιοχής της ρευστοδυναμικής, οι οποίες είναι γνωστές από κοινού ως *order-of-magnitude scaling* [34], [35]. Σε μια τέτοια προσέγγιση, ότι ένας αδιάστατος αριθμός είναι κατά πολύ μεγαλύτερος της μονάδας σημαίνει ότι η τιμή του είναι τουλάχιστον 10. Από την άλλη, κατά πολύ μικρότερος της μονάδας σημαίνει ότι η τιμή του είναι το πολύ 0.1.

**Πίνακας 5-1**

Περιοχές που εξετάστηκαν και προέκυψαν από το συνδυασμό των αδιάστατων αριθμών Weber και Bond.

	$We$	$Bo$
Περιοχή 1	$We \gg 1$	$Bo \ll 1$
Περιοχή 2	$We \ll 1$	$Bo \gg 1$
Περιοχή 3	$We \ll 1$	$Bo \ll 1$
Περιοχή 4	$We \gg 1$	$Bo \gg 1$

Από τους ορισμούς των αδιάστατων αριθμών  $We$  και  $Bo$  που δόθηκαν παραπάνω [εξίσωση (5.2) και (5.3), αντίστοιχα] προκύπτει ότι υπάρχουν συνολικά τρεις ανεξάρτητες μεταβλητές που μπορούν να καθορίσουν τις τιμές τους: α) η αρχική ακτίνα της σταγόνας  $R_0$ , β) η αρχική ταχύτητα της σταγόνας  $u_0$  και γ) ο συντελεστής διεπιφανειακής τάσης  $\sigma$ . Επομένως, θα πρέπει να επιλεγθεί κατάλληλη τριάδα αριθμών ( $R_0, u_0, \sigma$ ) έτσι ώστε οι  $We$  και  $Bo$  να βρίσκονται εντός των περιοχών του Πίνακα 5-1 και ταυτόχρονα ο  $Re$  να είναι της τάξης του 200, για τους λόγους που εξηγήθηκαν παραπάνω. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος κατασκευάστηκε κατάλληλο λογισμικό. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν δίνονται στον Πίνακα 5-2. Προφανώς η επιλογή τριάδων ( $R_0, u_0, \sigma$ ) έτσι ώστε οι  $We$ ,  $Bo$  και  $Re$  να είναι εντός μιας συγκεκριμένης περιοχής δεν είναι μοναδική, αλλά αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα μιας και η φυσική του προβλήματος δεν επηρεάζεται από τις ακριβείς τιμές των ( $R_0, u_0, \sigma$ ), αλλά από τις τιμές των αδιάστατων αριθμών που ελέγχουν το πρόβλημα [35].

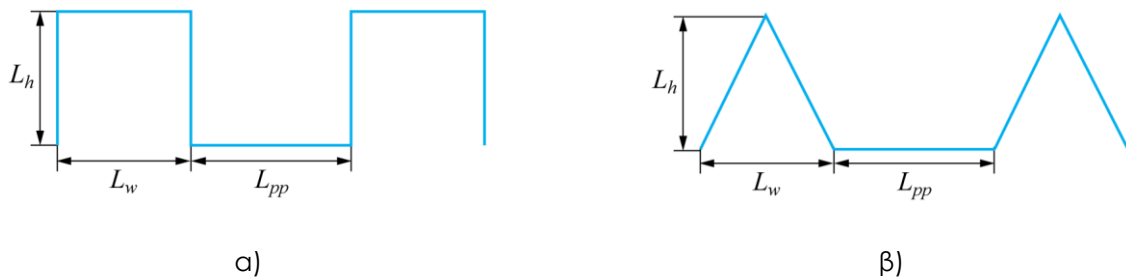
**Πίνακας 5-2**

Παράμετροι του προβλήματος και τιμές των αδιάστατων αριθμών που προέκυψαν για κάθε περιοχή.

	$R_0$ (m)	$u_0$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	$\sigma$ ( $N \cdot m^{-1}$ )	$We$	$Bo$
Περιοχή 1	$1.0 \times 10^{-5}$	$5.0 \times 10^{-1}$	$1.0 \times 10^{-4}$	$25 \times 10^0$	$1.0 \times 10^{-2}$
Περιοχή 2	$1.0 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-2}$	$1.0 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-1}$	$1.0 \times 10^1$
Περιοχή 3	$2.5 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-1}$	$1.0 \times 10^{-1}$	$2.0 \times 10^{-2}$	$6.0 \times 10^{-4}$
Περιοχή 4	$5.0 \times 10^{-4}$	$5.0 \times 10^{-2}$	$1.0 \times 10^{-4}$	$13 \times 10^0$	$25 \times 10^0$

Σε ό,τι αφορά τη γεωμετρία της επιφάνειας, εξετάσαμε γεωμετρίες με πολώνες παραλληλόγραμμου και τριγωνικού προφίλ. Μια τέτοια γεωμετρία (δεδομένης της περιοδικότητάς την στην οριζόντια διεύθυνση) μπορεί να χαρακτηριστεί πλήρως από τρεις γεωμετρικές παραμέτρους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2. Στις περιπτώσεις που μελετήσαμε, επιλέξαμε  $L_{pp} = L_w$  και  $L_h = 2L_w$  με το  $L_w$

να καθορίζεται ανάλογα την ενίοτε αρχική ακτίνα της σταγόνας έτσι ώστε πάντα να ισχύει  $L_w \approx R_0/5$ .



**Σχήμα 5.2**

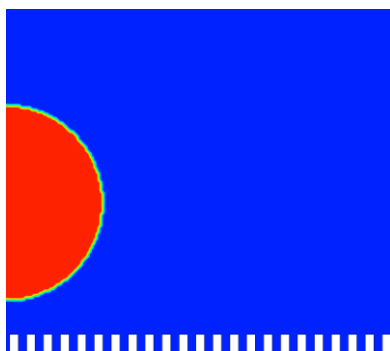
Προφίλ γεωμετρίας με πυλώνες: α) παραλληλόγραμμου προφίλ, β) τριγωνικού προφίλ.

## 5.2. Προσομοίωση επιφάνειας με πυλώνες παραλληλόγραμμου προφίλ

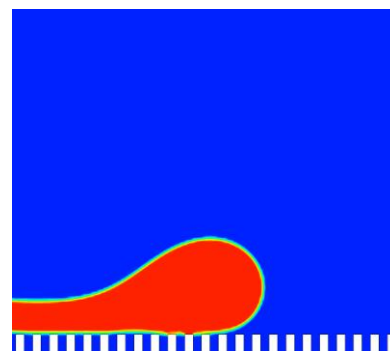
Σε όλες τις περιπτώσεις αυτής της ενότητας η στερεή επιφάνεια αποτελείται από πυλώνες παραλληλόγραμμου προφίλ, ενώ η στατική γωνία επαφής θεωρήθηκε ίση με  $135^\circ$ . Με δεδομένη τη γεωμετρία, εξετάζεται η συμπεριφορά της επιφάνειας σε κάθε μια από τις περιοχές του Πίνακα 5-1.

### 5.2.1. $We \gg 1$ και $Bo \ll 1$

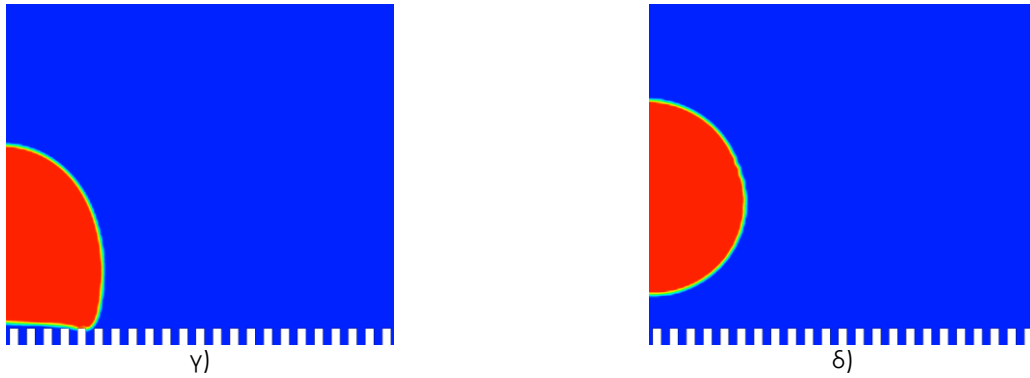
Η σταγόνα αρχικά εξαπλώνεται επάνω στη δομημένη με πυλώνες επιφάνεια μέχρι τη χρονική στιγμή  $t = 0.72 \text{ ms}$  (Σχήμα 5.3-β). Κατόπιν ξεκινάει η φάση αναδιπλώσής της. Τη χρονική στιγμή  $t = 1.47 \text{ ms}$  (Σχήμα 5.3-γ) η σταγόνα βρίσκεται σε οριακή επαφή με την επιφάνεια, ενώ λίγο αργότερα αποκολλάται από την επιφάνεια. Στην τελευταία εικόνα (Σχήμα 5.3-δ) η σταγόνα έχει αποκολληθεί πλήρως από την επιφάνεια, συνεπώς, η επιφάνεια εμφανίζει χαρακτηριστικά υπερυδροφοβηκότητας.



α)



β)

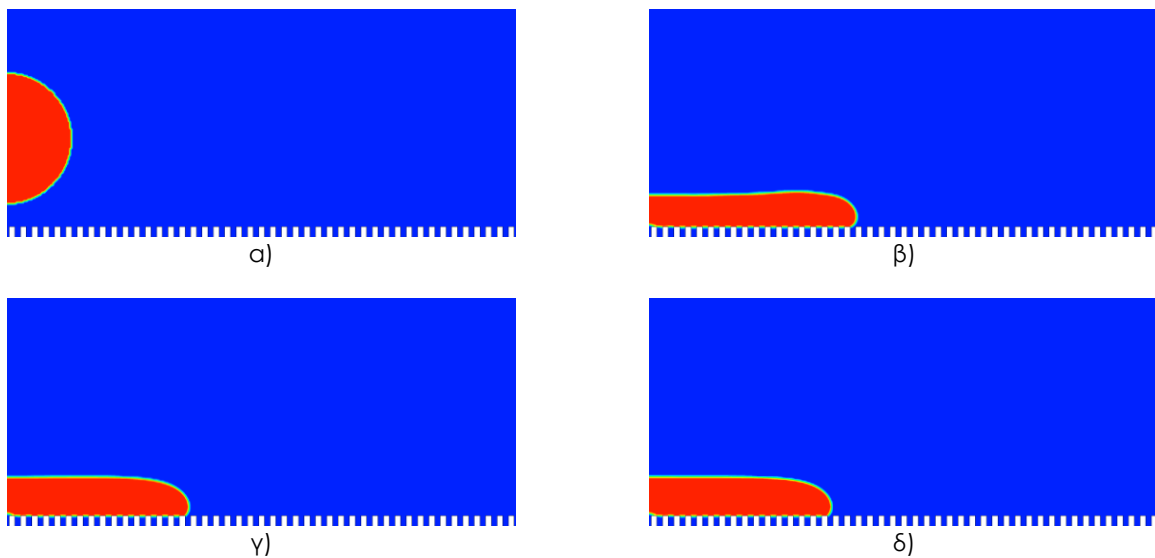


**Σχήμα 5.3**

Χρονική εξέλιξη της γεωμετρίας της σταγόνας για την Περίπτωση 1. α)  $t = 0$  ms, β)  $t = 0.72$  ms, γ)  $t = 1.47$  ms, δ)  $t = 2.25$  ms.

### 5.2.2. $We \ll 1$ και $Bo \gg 1$

Σε αυτή την περίπτωση η σταγόνα εξαπλώνεται μέχρι τη χρονική στιγμή  $t = 245$  ms (Σχήμα 5.4-β) και μετά από μικρή ανάσχεση (Σχήμα 5.4-γ), τελικά ακινητοποιείται (Σχήμα 5.4-δ). Η τελική μορφή της σταγόνας μοιάζει με επίπεδο δίσκο. Επομένως, υπό αυτές τις συνθήκες, η επιφάνεια δεν παρουσιάζει χαρακτηρισικά υπερυδροφοβικότητας.



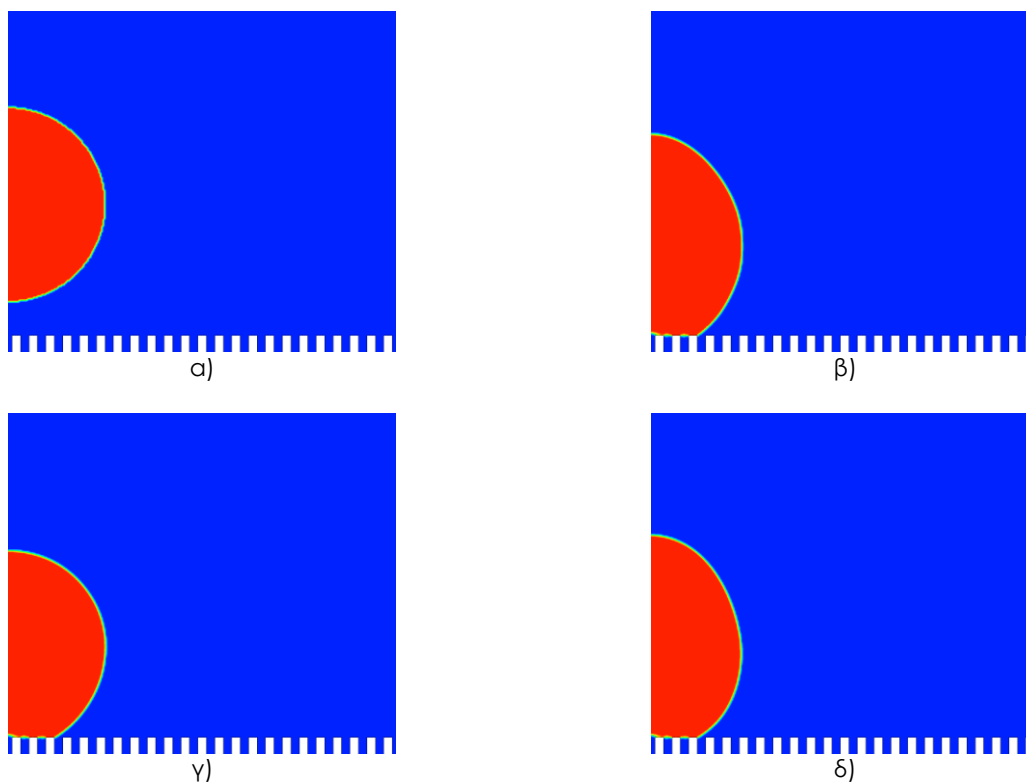
**Σχήμα 5.4**

Χρονική εξέλιξη της γεωμετρίας της σταγόνας για την Περίπτωση 2. α)  $t = 0$  ms, β)  $t = 245$  ms, γ)  $t = 490$  ms, δ)  $t = 736$  ms.

### 5.2.3. $We \ll 1$ και $Bo \ll 1$

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα αυτής της περίπτωσης (Σχήμα 5.5) η σταγόνα δεν εξαπλώνεται ιδιαίτερα επάνω στην επιφάνεια. Αντίθετα, παραμένει καρφωμένη (*pinned*) σε αυτή και όσο προχωράει η προσομοίωση το ύψος της σταγόνας αυξομειώνεται. Από το γεγονός αυτό εξάγεται το

συμπέρασμα ότι η σταγόνα εκτελεί ταλάντωση επάνω στην επιφάνεια. Επομένως, ούτε στη συγκεκριμένη περίπτωση παρατηρήθηκε υπερυδροφοβή συμπεριφορά της επιφάνειας.

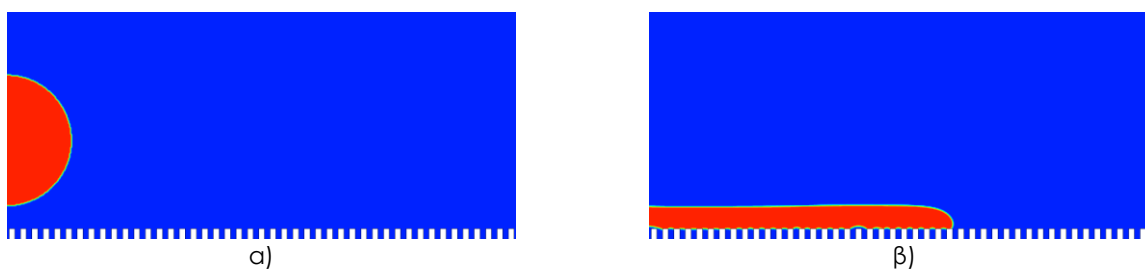


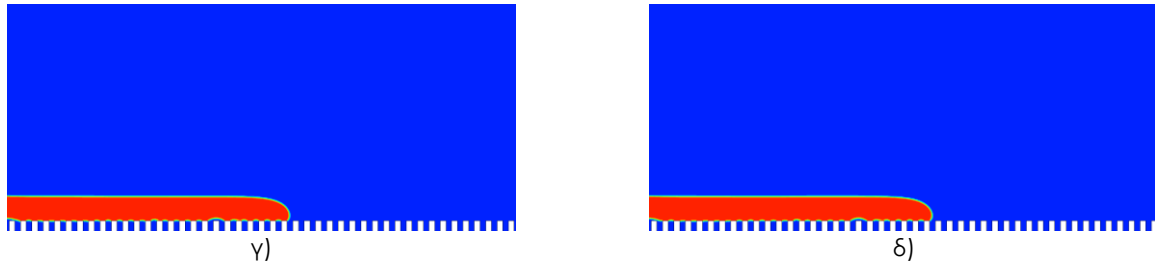
**Σχήμα 5.5**

Χρονική εξέλιξη της γεωμετρίας της σταγόνας για την Περίπτωση 3. α)  $t = 0$  ms, β)  $t = 7.4$  ms, γ)  $t = 15.5$  ms, δ)  $t = 20.5$  ms.

#### 5.2.4. $We \gg 1$ και $Bo \gg 1$

Η συγκεκριμένη περίπτωση χαρακτηρίζεται από μεγάλη εξάπλωση της σταγόνας επάνω στη στερεή επιφάνεια, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.6. Η σταγόνα κάνει μία πολύ μικρή ανάσχεση τη χρονική στιγμή  $t = 427$  ms (Σχήμα 5.6-γ) και παραμένει στη θέση αυτή μέχρι το τέλος της προσομοίωσης (Σχήμα 5.6-δ). Επομένως, ούτε και σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζετε υπερυδροφοβή συμπεριφορά της επιφάνειας.





**Σχήμα 5.6**

Χρονική εξέλιξη της γεωμετρίας της σταγόνας για την Περίπτωση 4. α)  $t = 0$  ms, β)  $t = 214$  ms, γ)  $t = 427$  ms, δ)  $t = 637$  ms.

### 5.3. Σύγκριση επίπεδης (λείας) με τραχεία επιφάνεια

Θα αντιπαραβάλουμε μια σειρά από προσομοιώσεις όπου η μοναδική διαφορά έγκειται στη μορφολογία της επιφάνειας: στη μια περίπτωση η επιφάνεια είναι επίπεδη ενώ στην άλλη αποτελείται από πυλώνες παραλληλόγραμμου προφίλ. Όλες οι παράμετροι των προσομοιώσεων είναι οι ίδιες με αυτές που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Και πάλι θα εξετάσουμε τέσσερις περιπτώσεις, ακριβώς όπως αυτές έχουν παρουσιασθεί στον Πίνακα 5-1.

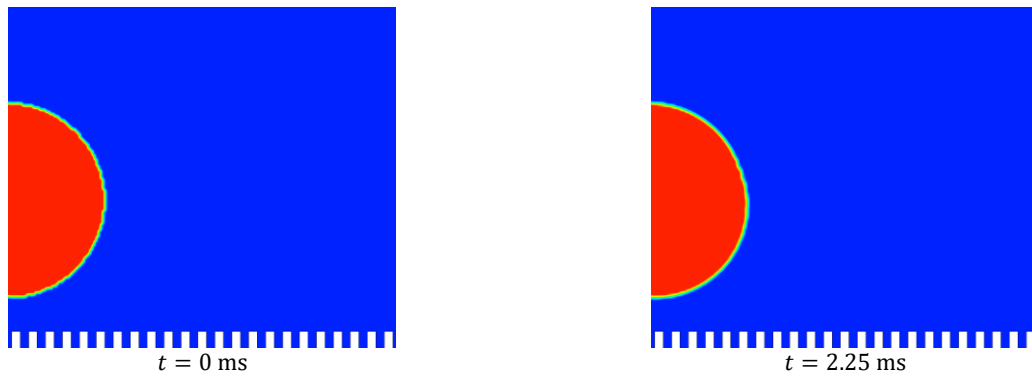
#### 5.3.1. $We \gg 1$ και $Bo \ll 1$

Όπως φαίνεται ξεκάθαρα από το Σχήμα 5.7-α, η σταγόνα μετά την πρόσκρουσή της στην επίπεδη επιφάνεια παραμένει προσκολλημένη. Αντίθετα, στην περίπτωση όπου η επιφάνεια είναι δομημένη με πυλώνες παραλληλόγραμμου προφίλ, η σταγόνα αναπηδά (Σχήμα 5.7-β). Βλέπουμε επομένως ξεκάθαρα ότι, υπό τις ίδιες συνθήκες, όταν στην επιφάνεια αναπτυχθούν πυλώνες εμφανίζεται υπερδρόφοβη συμπεριφορά.



α)

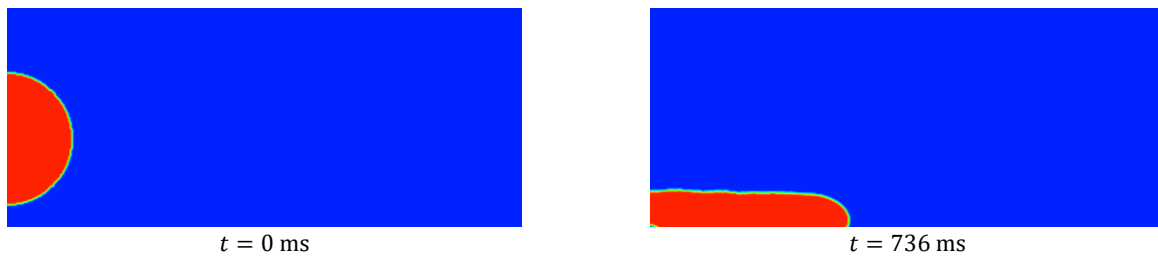




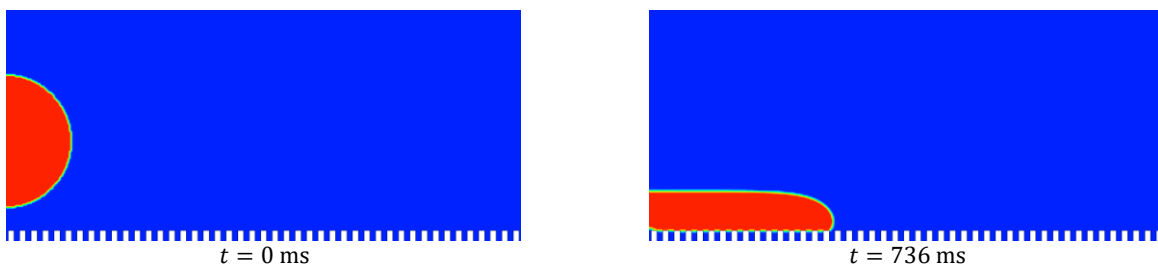
β)

**Σχήμα 5.7**

Χρονική εξέλιξη της γεωμετρίας της σταγόνας για την Περίπτωση 1. α) Επίπεδη επιφάνεια, β) Επιφάνεια με πυλώνες παραλληλόγραμμου προφίλ.



α)



β)

**Σχήμα 5.8**

Χρονική εξέλιξη της γεωμετρίας της σταγόνας για την Περίπτωση 2. α) Επίπεδη επιφάνεια, β) Επιφάνεια με πυλώνες παραλληλόγραμμου προφίλ.

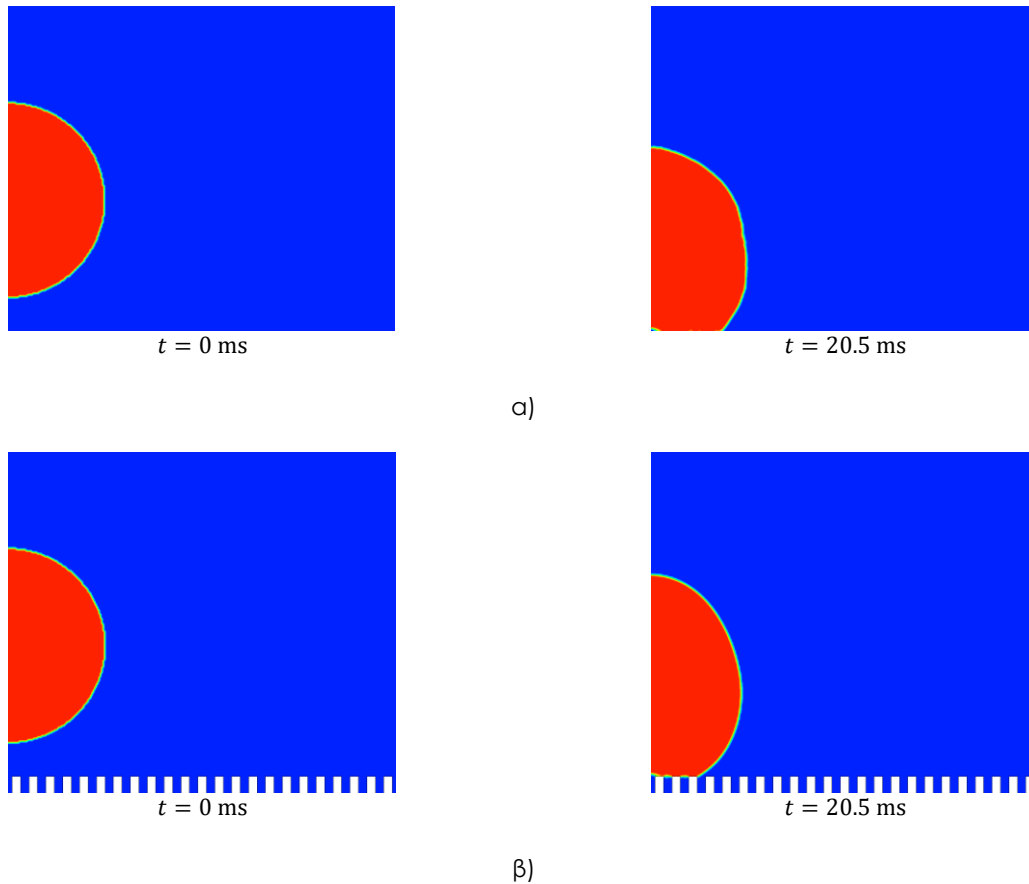
**5.3.2.  $We \ll 1$  και  $Bo \gg 1$**

Σε αυτή την περίπτωση, η επιφάνεια με πυλώνες αποτυγχάνει να εμφανίσει υπερυδρόφοβη συμπεριφορά και συμπεριφέρεται κατά τον ίδιο τρόπο με την επίπεδη επιφάνεια (Σχήμα 5.8). Μπορούμε να συμπεράνουμε ότι σε αυτή την περίπτωση τιμές των  $We$  και  $Bo$  είναι τέτοιες που οι δυνά-

μεις ρευστού-ρευστού δεν μπορούν να αντιπαρέλθουν την αλληλεπίδραση ρευστού-στερεής επιφάνειας και ρευστού-βαρύτητας, οι οποίες τελικά υπερτερούν και δεν επιτρέπουν την αποκόλληση της σταγόνας.

### 5.3.3. $We \ll 1$ και $Bo \ll 1$

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για αυτή την περίπτωση φαίνονται στο Σχήμα 5.9. Τα συμπεράσματα της προηγούμενης παραγράφου ισχύουν και σε αυτή την περίπτωση.

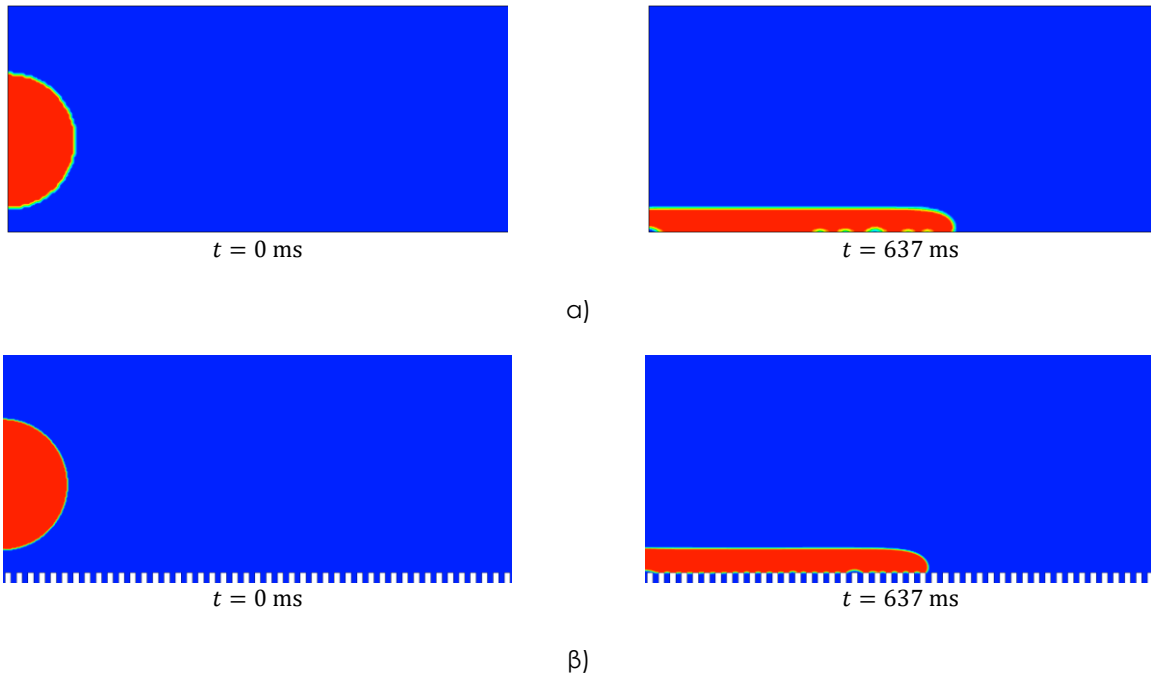


**Σχήμα 5.9**

Χρονική εξέλιξη της γεωμετρίας της σταγόνας για την Περίπτωση 3. α) Επίπεδη επιφάνεια, β) Επιφάνεια με πυλώνες παραλληλόγραμμου προφίλ.

### 5.3.4. $We \gg 1$ και $Bo \gg 1$

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για αυτή την περίπτωση φαίνονται στο Σχήμα 5.10. Τα συμπεράσματα της προηγούμενης παραγράφου ισχύουν και σε αυτή την περίπτωση.

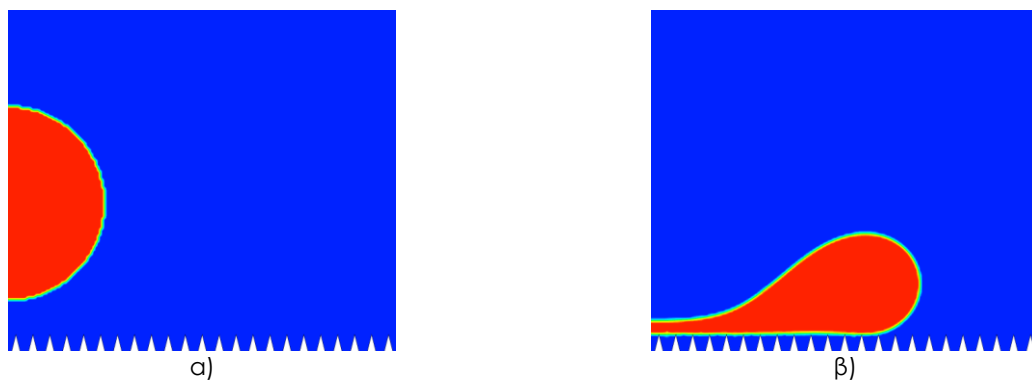


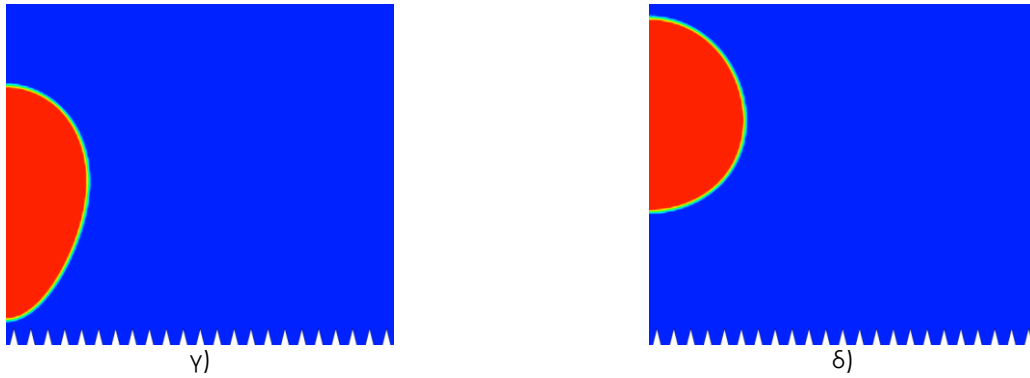
**Σχήμα 5.10**

Χρονική εξέλιξη της γεωμετρίας της σταγόνας για την Περίπτωση 4. α) Επίπεδη επιφάνεια, β) Επιφάνεια με πυλώνες παραλληλόγραμμου προφίλ.

## 5.4. Προσομοίωση επιφάνειας με πυλώνες τριγωνικού προφίλ

Με βάση τα αποτελέσματα της προηγούμενης παραγράφου, βρέθηκε ότι η επιφάνεια με πυλώνες παραλληλόγραμμου προφίλ παρουσιάζει υδρόφοβη συμπεριφορά στην Περιοχή 1 ( $We \gg 1$  και  $Bo \ll 1$ ). Επικεντρώνουμε τη μελέτη μας σε αυτή την περιοχή και θεωρούμε πλέον επιφάνεια δομημένη με πυλώνες τριγωνικού προφίλ. Στο Σχήμα 5.11 παρουσιάζεται η γεωμετρία της σταγόνας σε διάφορες χρονικές στιγμές. Όπως είναι εμφανές και στην περίπτωση όπου η επιφάνεια αποτελείται από πυλώνες τριγωνικού προφίλ εμφανίζεται υπερυδρόφοβη συμπεριφορά.



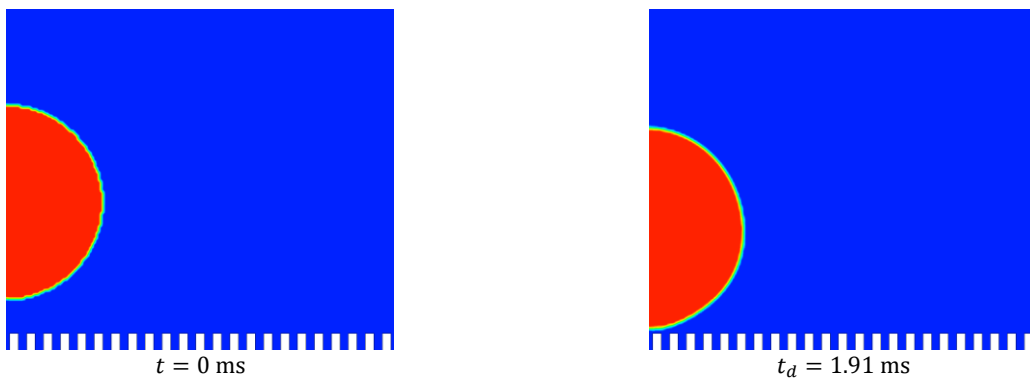


**Σχήμα 5.11**

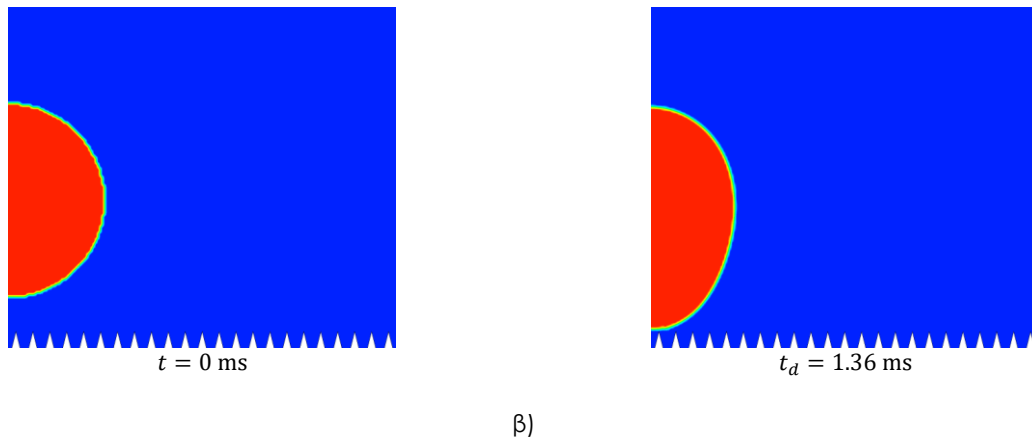
Χρονική εξέλιξη της γεωμετρίας της σταγόνας για την Περίπτωση 1 και επιφάνεια δομημένη με पुलώνες τριγωνικού προφίλ. α)  $t = 0$  ms, β)  $t = 0.72$  ms, γ)  $t = 1.47$  ms, δ)  $t = 1.84$  ms.

Έχει ενδιαφέρον να αντιπαραβάλουμε τη συμπεριφορά της επιφάνειας με पुलώνες παραλληλόγραμμου προφίλ, με αυτή με पुलώνες τριγωνικού προφίλ, πάντα αναφερόμενοι στην Περίπτωση 1. Στο Σχήμα 5.12 φαίνεται αυτή η σύγκριση. Στο σχήμα αυτό με  $t_d$  συμβολίζεται η χρονική στιγμή κατά την οποία η σταγόνα αποκολλάται από τη στερεή επιφάνεια. Όπως προκύπτει, η βασική διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι στην επιφάνεια με पुलώνες τριγωνικού προφίλ η σταγόνα αναπηδά κατά  $0.55$  ms νωρίτερα από ότι στη δομημένη επιφάνεια με पुलώνες παραλληλόγραμμου προφίλ. Είναι επομένως ξεκάθαρο ότι, υπό τις συνθήκες της Περίπτωσης 1, η επιφάνεια με τριγωνικούς पुलώνες εμφανίζει μεγαλύτερη υπερυδροφοβικότητα σε σχέση με αυτή με παραλληλόγραμμους.

Επί πρόσθετα, στην επιφάνεια με τους παραλληλόγραμμους पुलώνες η σταγόνα έχει σφαιρικό σχήμα κατά την αναπήδησή της. Αντίθετα, στην οδοντωτή επιφάνεια η σταγόνα φαίνεται ότι έχει επιμηκυνθεί πριν την αποκόλλησή της. Αυτό αποτελεί μια ένδειξη για την αλλαγή της δυναμικής του φαινομένου αποκόλλησης λόγω αλλαγής της μορφολογίας της επιφάνειας.



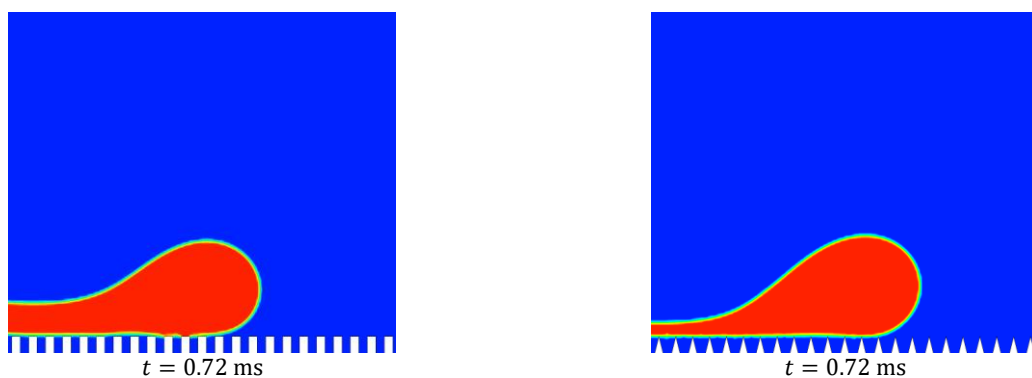
α)



**Σχήμα 5.12**

Σύγκριση της αναπήδησης σταγόνας από επιφάνεια με πυλώνες: α) Παραλληλόγραμμου προφίλ, β) Τριγωνικού προφίλ.

Στο Σχήμα 5.13 παρουσιάζεται η μορφή της σταγόνας κατά την φάση εξάπλωσής της σε επιφάνεια με πυλώνες παραλληλόγραμμου και τριγωνικού προφίλ, κατά τη χρονική στιγμή  $t = 0.72$  ms (και πάλι για την Περίπτωση 1). Με μία πρώτη ματιά φαίνεται ότι δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο περιπτώσεων. Ωστόσο, αν παρατηρήσει κανείς εκτενέστερα τις δύο εικόνες θα διαπιστώσει ότι στην περίπτωση της επιφάνειας με παραλληλόγραμμους πυλώνες η σταγόνα είναι σε εμφανή επαφή με την επιφάνεια, ενώ στην επιφάνεια με τριγωνικούς πυλώνες μοιάζει να αιωρείται. Από το γεγονός αυτό προκύπτει ότι είναι πιθανό στην περίπτωση της επιφάνειας με τριγωνικούς πυλώνες η σταγόνα να ολισθαίνει επάνω σε ένα στρώμα του περιβάλλοντος ρευστού το οποίο έχει εγκλωβιστεί μεταξύ της σταγόνας και της στερεής επιφάνειας.

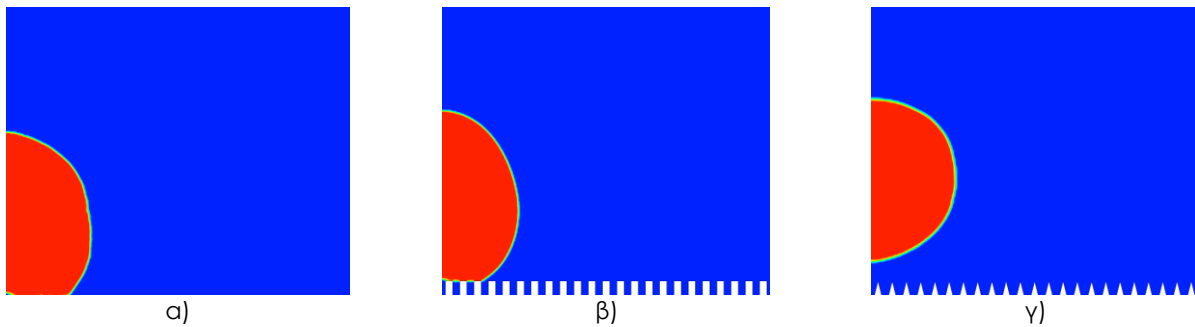


**Σχήμα 5.13**

Αντιπαραβολή της γεωμετρίας της σταγόνας κατά την φάση εξάπλωσής της επάνω σε επιφάνεια με πυλώνες: α) παραλληλόγραμμου προφίλ, β) τριγωνικού προφίλ.

Για να ενισχύσουμε το γεγονός ότι η μορφολογία της επιφάνειας επηρεάζει την υπερυδροφοβικότητά της, πραγματοποιήθηκε μία ακόμα προσομοίωση. Από τις προσομοιώσεις που έγιναν για την Περιοχή 3 ( $We \ll 1$  και  $Bo \ll 1$ ), προέκυψε ότι η σταγόνα δεν αναπηδά από τη δομημένη με πυλώνες παραλληλόγραμμου προφίλ επιφάνεια. Για να μελετήσουμε περαιτέρω την περίπτωση της

Περιοχής 3, πραγματοποιήσαμε προσομοίωση χρησιμοποιώντας πλέον επιφάνεια με τριγωνικούς πυλώνες. Στο Σχήμα 5.14 παρουσιάζεται σύγκριση των αποτελεσμάτων για την Περιοχή 3 με μοναδική διαφορά τη γεωμετρία της επιφάνειας. Τα αποτελέσματα αυτά ενισχύουν περαιτέρω το συμπέρασμα ότι η μορφολογία της επιφάνειας μπορεί να υπερνικήσει φυσικοχημικούς (π.χ. πυκνότητα, ιξώδες) και δυναμικούς (π.χ. ταχύτητα πρόσκρουσης, βαρύτητα) παράγοντες όπως αυτοί εκφράζονται μέσω των αδιάστατων αριθμών  $We$  και  $Bo$ , μιας και στις περιπτώσεις α) και β) δεν συμβαίνει αποκόλληση της σταγόνας ενώ στη γ) λαμβάνει χώρα.



**Σχήμα 5.14**

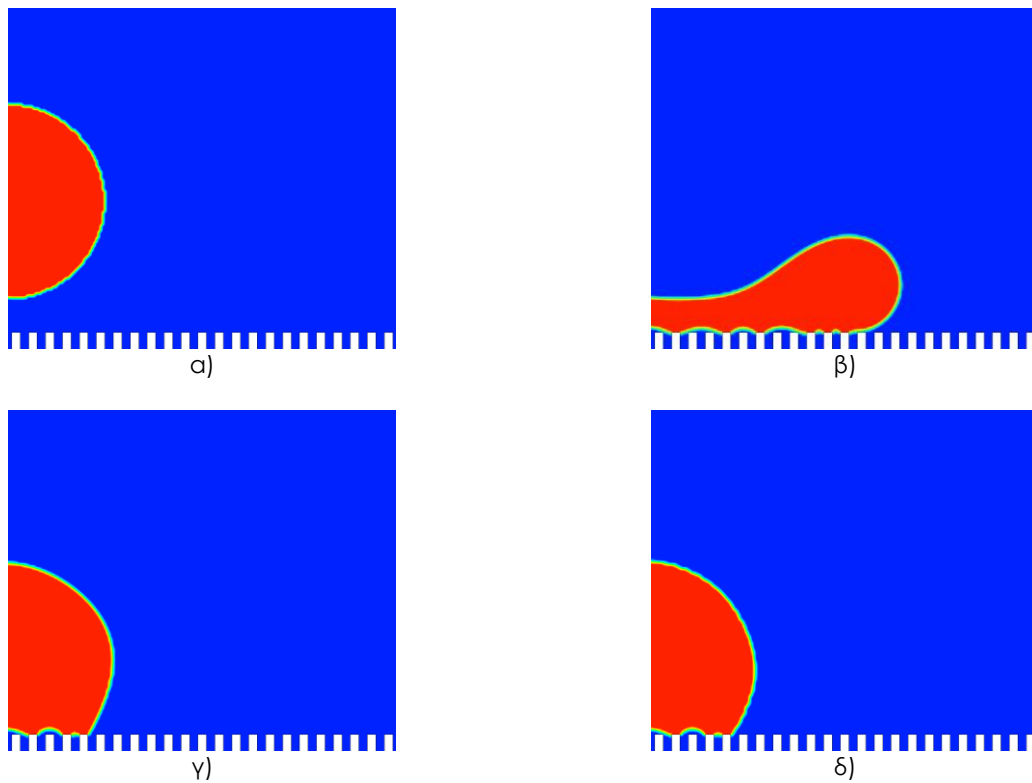
Επίδραση της γεωμετρίας της επιφάνειας στην Περιοχή 3: α) επίπεδη επιφάνεια, β) επιφάνεια με πυλώνες παραλληλόγραμμου προφίλ, γ) επιφάνεια με πυλώνες τριγωνικού προφίλ.

## 5.5. Επίδραση της γωνίας επαφής

Στο τελευταίο κομμάτι της παρούσας διπλωματικής εργασίας, εξετάζεται η επίδραση της στατικής γωνίας επαφής στην υπερυδροφοβικότητα μιας επιφάνειας. Οι επιφάνειες που προσομοιώθηκαν είναι δομημένες με πυλώνες είτε παραλληλόγραμμου είτε τριγωνικού προφίλ. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση της επιφάνειας με πυλώνες παραλληλόγραμμου προφίλ εξετάστηκε η Περιοχή 1 ( $We \gg 1$ ,  $Bo \ll 1$ ), ενώ για την περίπτωση με πυλώνες τριγωνικού προφίλ η Περιοχή 3 ( $We \ll 1$ ,  $Bo \ll 1$ ). Η στατική γωνία επαφής στις προσομοιώσεις που ακολουθούν θεωρήθηκε ίση με  $90^\circ$ , τιμή η οποία χαρακτηρίζει μια επιφάνεια ουδέτερη ως προς την εκλεκτική διαβροχή της.

### 5.5.1. Επιφάνεια με πυλώνες παραλληλόγραμμου προφίλ

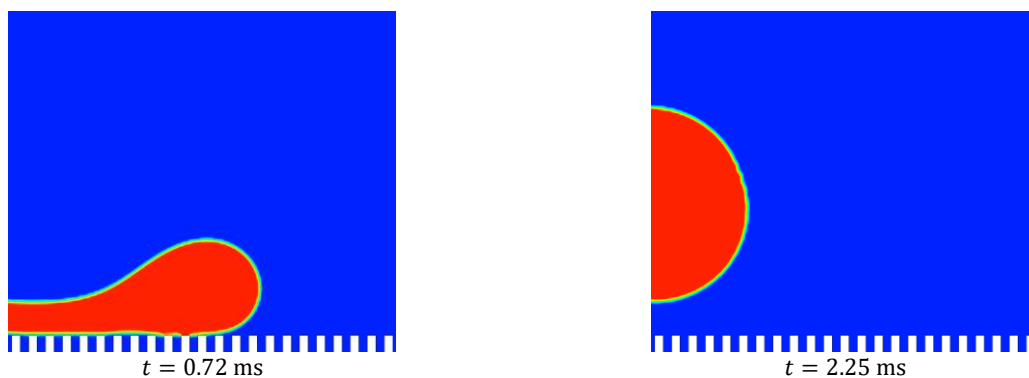
Τα αποτελέσματα για αυτή την περίπτωση παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.15. Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα, η σταγόνα δεν αναπηδά από τη στερεή επιφάνεια.



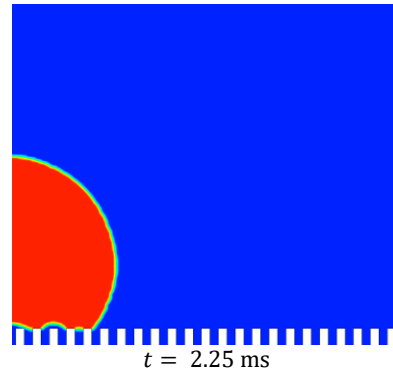
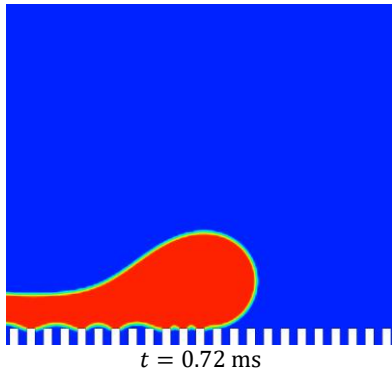
**Σχήμα 5.15**

Χρονική εξέλιξη της γεωμετρίας της σταγόνας για την Περιοχή 1 και επιφάνεια δομημένη με πυλώνες παραλληλόγραμμου προφίλ. Στατική γωνία επαφής  $90^\circ$ . α)  $t = 0$  ms, β)  $t = 0.72$  ms, γ)  $t = 11.8$  ms, δ)  $t = 38.7$  ms.

Τέλος, γίνεται σύγκριση μεταξύ των δύο προσομοιώσεων της Περιοχής 1 ( $We \gg 1$ ,  $Bo \ll 1$ ) για στατική γωνία επαφής ίση με  $135^\circ$  (Σχήμα 5.16-α) και  $90^\circ$  (Σχήμα 5.16-β). Όπως προκύπτει, σε αρχικά στάδια, η συμπεριφορά είναι παρεμφερής. Τελικά όμως, στην περίπτωση όπου η στατική γωνία επαφής είναι  $90^\circ$ , η σταγόνα δεν αποκολλάται. Αντίθετα, όταν η στατική γωνία επαφής είναι  $135^\circ$  η σταγόνα αποκολλάται.



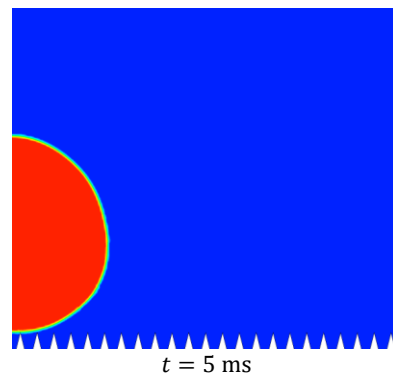
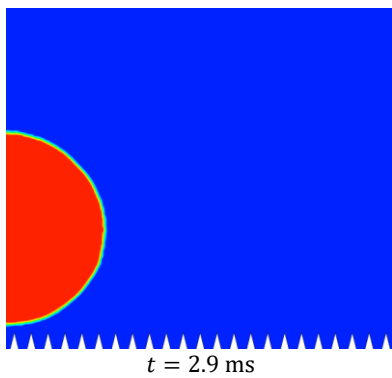
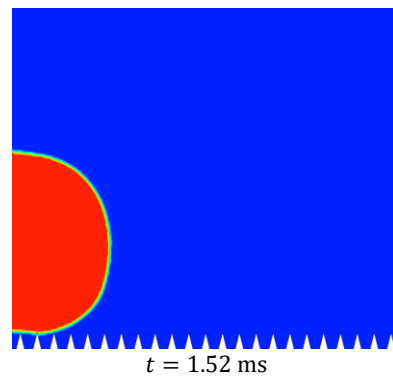
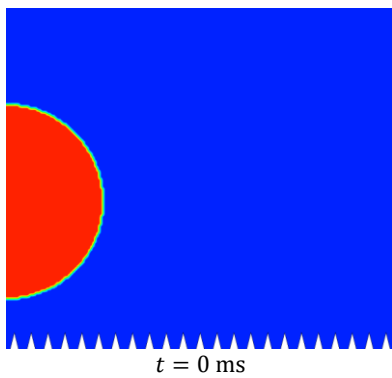
α)



β)

**Σχήμα 5.16**

Χρονική εξέλιξη της γεωμετρίας της σταγόνας για την Περιοχή 1 και διαφορετική στατική γωνία επαφής: α)  $135^\circ$ , β)  $90^\circ$ .



**Σχήμα 5.17**

Χρονική εξέλιξη της γεωμετρίας της σταγόνας για την Περιοχή 3 και διαφορετική στατική γωνία επαφής  $90^\circ$  σε επιφάνεια αποτελούμενη από πυλώνες τριγωνικού προφίλ



### 5.5.2. Επιφάνεια με πλώνες τριγωνικού προφίλ

Στο Σχήμα 5.17 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την πρόσκρουση της σταγόνας σε επιφάνεια με πλώνες τριγωνικού προφίλ, για την Περιοχή 3 και στατική γωνία επαφής ίση με  $90^\circ$ . Υπό αυτές τις συνθήκες η σταγόνα είτε οριακά χάνει επαφή είτε οριακά προσκολλάται στην επιφάνεια. Επομένως το να εκφέρει κάποιος συμπέρασμα είναι ιδιαίτερα παρακινδυνευμένο. Ωστόσο, μπορεί να λεχθεί ότι, υπό τις συνθήκες της Περιοχής 3, η μείωση της στατικής γωνίας επαφής έχει αρνητική επίπτωση στην υπερυδροφοβικότητα της επιφάνειας (δηλαδή οδηγεί σε περισσότερο υδρόφιλη επιφάνεια).

## 6. Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία

### 6.1. Συμπεράσματα

---

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αναπτύχθηκε ένα διδιάστατο υπολογιστικό μοντέλο στο λογισμικό ANSYS Fluent με στόχο της προσομοίωση της δυναμικής της πρόσκρουσης σταγόνων υγρού επάνω σε μια στερεή επιφάνεια, με χρήση της μεθόδου Volume Of Fluid (§ 3.1). Το μοντέλο είναι ικανό να προσομοιώσει διδιάστατες ή αξονοσυμμετρικές γεωμετρίες, ενώ μπορεί εύκολα να τροποποιηθεί για την περίπτωση καθαρά τρισδιάστατων γεωμετριών. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιήθηκε ως εργαλείο για να μελετηθεί η υπερωδροφοβικότητα διαφόρων επιφανειών.

Το υπολογιστικό μοντέλο που αναπτύχθηκε συγκρίθηκε με δύο παρεμφερή υπολογιστικά μοντέλα που έχουν παρουσιασθεί στη βιβλιογραφία (§§ 4.2.1, 4.2.2). Σε σχέση με τα αποτελέσματα του [32] η συμφωνία βρέθηκε ιδιαίτερα ικανοποιητική. Δεν μπορεί να λεχθεί όμως το ίδιο και για τη σύγκριση με τα αποτελέσματα του [31], όπου η συμφωνία είναι καλή μόνο στα αρχικά και τελικά στάδια των προσομοιώσεων. Στην § 4.2.2 δίνετε μια πιθανή ερμηνεία για τις αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν.

Με σκοπό τη μελέτη της υπερωδροφοβικότητας, μελετήθηκαν τριών ειδών επιφάνειες: επίπεδες (λείες), αποτελούμενες από πυλώνες παραλληλόγραμμου προφίλ και, τέλος, αποτελούμενες από πυλώνες τριγωνικού προφίλ. Από τις προσομοιώσεις που έγιναν προκύπτει ότι η αύξηση της τραχύτητας μιας επιφάνειας γενικά αυξάνει την υπερωδροφοβικότητά της. Συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε ότι σε συνθήκες όπου μια επίπεδη επιφάνεια δεν εμφανίζει υπερωδροφοβικότητα, η εισαγωγή πυλώνων μπορεί να οδηγήσει σε εκδήλωση υπερωδρόφοβης συμπεριφοράς. Έτσι, ενώ στην περίπτωση μιας επίπεδης επιφάνειας μια σταγόνα μετά την πρόσκρουσή της παραμένει προσκολλημένη στην επιφάνεια, αποκολλάται από την επιφάνεια όταν αυτή γίνει τραχεία (§ 5.3.1). Όπως βρέθηκε, η τάση για αποκόλληση αυξάνει καθώς αυξάνει η τραχύτητα της επιφάνειας. Έτσι, υπό τις ίδιες συνθήκες, μια επιφάνεια με πυλώνες τριγωνικού προφίλ εμφανίζει μεγαλύτερη υπερωδροφοβικότητα σε σχέση με μια επιφάνεια με πυλώνες παραλληλόγραμμου προφίλ (σελ. 41).

Από όλες τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν προκύπτει το γενικό συμπέρασμα ότι η υπερωδροφοβικότητα μιας επιφάνειας δεν είναι εγγενής της ιδιότητα. Από πρακτικής άποψης αυτό σημαίνει ότι με μοναδικά δεδομένα τη γεωμετρία και τη στατική γωνίας επαφής μιας επιφάνειας, δεν είναι δυνατό η επιφάνεια να χαρακτηριστεί ως υπερωδρόφοβη ή μη. Συγκεκριμένα, αποτελεί βασικό συμπέρασμα αυτής της εργασίας, ότι οι θερμοφυσικές ιδιότητες του ρευστού που αποτελεί τη σταγόνα, του ρευστού που περιβάλλει τη σταγόνα, ο συντελεστής διεπιφανειακής τάσης καθώς και η ταχύτητα πρόσκρουσης της σταγόνας στην επιφάνεια επηρεάζουν σημαντικά το κατά πόσο η επιφάνεια θα εκδηλώσει ή όχι υπερωδρόφοβη συμπεριφορά.

Για δεδομένη στατική γωνία επαφής και γεωμετρία της επιφάνειας υπάρχουν επτά ανεξάρτητες μεταβλητές που διέπουν το πρόβλημα: η πυκνότητα και το δυναμικό ιξώδες της σταγόνας, η πυκνότητα και το δυναμικό ιξώδες του περιβάλλοντος ρευστού, η ακτίνα και η ταχύτητα πρόσκρουσης της σταγόνας και ο συντελεστής διεπιφανειακής τάσης. Ωστόσο, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των αδιάστατων ομάδων, το πρόβλημα μπορεί να διατυπωθεί συναρτήσει μόνο τριών ανεξάρτητων μεταβλητών: τους αδιάστατους αριθμούς Reynolds, Bond και Weber (§ 5.1). Αυτή η προσέγγιση, πέραν του ότι απλοποιεί το πρόβλημα, παρέχει τη δυνατότητα να καθοριστούν περιοχές εντός των οποίων το

σύστημα αναμένεται να εμφανίζει παρεμφερή συμπεριφορά. Με βάση αυτή τη προσέγγιση, μελετήθηκαν τέσσερις διαφορετικές περιοχές για τους αδιάστατους αριθμούς Weber ( $We$ ) και Bond ( $Bo$ ):  $We \gg 1, Bo \ll 1$  (Περιοχή 1),  $We \ll 1, Bo \gg 1$  (Περιοχή 2),  $We \ll 1, Bo \ll 1$  (Περιοχή 3) και  $We \gg 1, Bo \gg 1$  (Περιοχή 4). Εντός των ορίων των προσομοιώσεων που εκτελέστηκαν βρέθηκε ότι υπερυδροφοβή συμπεριφορά εμφανίστηκε:

- στην Περιοχή 1 για επιφάνειες αποτελούμενες από πυλώνες παραλληλόγραμμου προφίλ με στατική γωνία επαφής  $135^\circ$
- στις περιοχές 1 και 3 για επιφάνειες αποτελούμενες από πυλώνες τριγωνικού προφίλ με στατική γωνία επαφής  $135^\circ$

Σε καμία από τις ανωτέρω περιοχές δεν εμφανίστηκε υπερυδροφοβή συμπεριφορά σε επίπεδες επιφάνειες.

## 6.2. Προτεινόμενη μελλοντική εργασία

---

Η μελλοντική έρευνα μπορεί να στηριχθεί σε δύο βασικές κατηγορίες. Η πρώτη, αφορά την εξέλιξη της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Υπάρχουν διάφορα σημεία στα οποία μπορεί να στηριχθεί κάποιος για περαιτέρω έρευνα, με βασικότερο την επέκταση του υπολογιστικού μοντέλου στις τρεις διαστάσεις. Πέραν αυτού, έχει ενδιαφέρον η περαιτέρω μελέτη της επίδρασης της γεωμετρίας των πυλώνων στην υπερυδροφοβηκότητα μιας επιφάνειας. Για παράδειγμα, πώς επιδρά η αναλογία ύψους, πλάτους και μεταξύ των πυλώνων απόστασης πέραν αυτής που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία. Επίσης, στην παρούσα εργασία θεωρήσαμε ότι η στατική γωνία επαφής είναι σταθερή καθ' όλο το μήκος των πυλώνων. Αν χρησιμοποιηθεί διαφορετική γωνία επαφής, τι αντίκτυπο θα έχει αυτό στην υπερυδροφοβηκότητα της επιφάνειας; Αυτά είναι ορισμένα ερωτήματα που αν απαντηθούν θα έχει πραγματοποιηθεί ένα επιπλέον βήμα στη μελέτη της υπερυδροφοβηκότητας των επιφανειών.

Η δεύτερη κατηγορία αφορά την έρευνα σε πειραματικό επίπεδο. Δηλαδή, θα είχε ενδιαφέρον η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων του παρόντος υπολογιστικού μοντέλου προσομοίωσης με πειραματικά αποτελέσματα. Για την υλοποίηση και επίλυση τέτοιων προβλημάτων σε πειραματικό επίπεδο, χρησιμοποιούνται συνήθως φωτογραφικές μηχανές υψηλής ταχύτητας για την καταγραφή της δυναμικής της πρόσκρουσης σταγονιδίων επάνω σε στερεές επιφάνειες, κάτι το οποίο οδηγεί σε αυξημένο κόστος εκτέλεσης πειραμάτων.

## 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] J. Jeevahan, M. Chandrasekaran, J. Britto, R. B. Durairaj και G. Mageshwaran, «Superhydrophobic surfaces: a review on fundamentals, applications and challenges,» 2018.
- [2] N. J. Shirtcliffe, G. Mchale, S. Atherton και M. I. Newton, «An introduction to superhydrophobicity,» *Advances in Colloid and Interface Science*, τόμ. 161, pp. 124-138, 2010.
- [3] W. Barthlott και C. Neinhuis, «Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces,» *Planta*, τόμ. 202, αρ. 1, pp. 1-8, 1997.
- [4] O. Pedersen, A. Winkel, T. D. Colmer και A. M. Ismail, «Internal aeration of paddy field rice (*Oryza sativa*) during complete submergence-importance of light and floodwater O<sub>2</sub>,» *New Phytologist*, τόμ. 197, pp. 1193-1203, 2012.
- [5] K. Tadanaga, N. Katata και T. Minami, «Formation process of super-water-repellent Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating films with high transparency by the sol-gel method,» *Communications of the American Ceramic Society*, τόμ. 80, pp. 3213-3216, 1997.
- [6] G. O. Ince, A. M. Coclite και K. K. Gleason, «CVD of polymeric thin films: applications in sensors, biotechnology, microelectronics/organic electronics, microfluidics, MEMS, composites and membranes,» *Reports on progress in physics*, τόμ. 75, 2012.
- [7] P. Roach, N. J. Shirtcliffe και M. I. Newton, «Progress in superhydrophobic surface development,» *Soft Matter*, τόμ. 4, pp. 224-240, 2007.
- [8] B. Bhushan, Y. C. Jung και K. Koch, «Micro-, Nano- and hierarchical structures for superhydrophobicity, self-cleaning and low adhesion,» *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, τόμ. 367, 2009.
- [9] I. Sas, R. E. Gorga, J. A. Joines και K. A. Thoney, «Literature review on superhydrophobic self-cleaning surfaces produced by electrospinning,» *Journal of polymer science*, τόμ. 50, 2012.
- [10] Y. Li, X. Wang και J. Sun, «Layer-by-layer assembly for rapid fabrication of thick polymeric films,» *Chemical Society Reviews*, τόμ. 41, 2012.
- [11] S. S. Latthe, H. Imai, V. Ganesan και A. V. Rao, «Superhydrophobic silica films by sol-gel co-precursor method,» *Applied Surface Science*, τόμ. 256, pp. 217-222, 2009.
- [12] L. B. Boinovich, A. M. Emelyanenko, V. K. Ivanov και A. S. Pashinin, «Durable icephobic coating for stainless steel,» *ACS Applied Materials and Interfaces*, τόμ. 5, pp. 2549-2554, 2013.
- [13] L. Cao, A. K. Jones, V. K. Sikka, J. Wu και D. Gao, «Anti-icing superhydrophobic coatings,» *Langmuir Letter*, τόμ. 25, pp. 12444-12448, 2009.
- [14] J. Ou, W. Hu, M. Xue, F. Wang και W. Li, «Superhydrophobic surfaces on light alloy substrates fabricated by a versatile process and their corrosion protection,» *ACS Applied Materials and Interfaces*, pp. 3101-3107, 2013.
- [15] T. Ishizaki, Y. Masuda και M. Sakamoto, «Corrosion resistance and durability of superhydrophobic surfaces formed on magnesium alloy coated with nanostructured cerium oxide film and fluoroalkylsilane molecules in corrosive NaCl aqueous solution,» *Langmuir*, τόμ. 27, pp. 4780-4788, 2011.
- [16] T. Wang, X. Hu και S. Dong, «A general route to transform normal hydrophilic cloths into superhydrophobic surfaces,» *Chemical Communications*, pp. 1849-1851, 2007.
- [17] H. Wang, Y. Xue, J. Ding, L. Feng, X. Wang και T. Lin, «Durable, self-healing superhydrophobic and superoleophobic surfaces from fluorinated-decyl polyhedral oligomeric silsesquioxane and hydrolyzed fluorinated alkyl silane,» *Angewandte Chemie*, τόμ. 123, pp. 11635-11638, 2011.

- [18] T. Sun, H. Tan, D. Han, Q. Fu και L. Jiang, «No platelet can adhere-largely improved blood compatibility on nanostructured superhydrophobic surfaces,» *Small*, τόμ. 1, pp. 959-963, 2005.
- [19] D. Khojasteh, N. M. Kazerooni, S. Salarian και R. Kamali, «Droplet impact on superhydrophobic surfaces: a review of recent developments,» *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2016.
- [20] D. Richard και D. Quere, «Bouncing water drops,» *Europhysics Letters*, τόμ. 50, pp. 769-775, 2000.
- [21] C. Clanet, C. Beguin, D. Richard και D. Quere, «Maximal deformation of an impacting drop,» *Journal of Fluid Mechanics*, τόμ. 517, pp. 199-208, 2004.
- [22] D. Bartolo, F. Bouamrine, E. Verneuil, A. Buguin, P. Silberzan και S. Moulinet, «Bouncing or sticky droplets: Impalement transitions on superhydrophobic micropatterned surfaces,» *Europhysics Letters*, τόμ. 74, pp. 299-305, 2006.
- [23] Y. C. Jung και B. Bhushan, «Dynamic effects induced transition of droplets on biomimetic superhydrophobic surfaces,» *Langmuir*, τόμ. 25, pp. 9208-9218, 2009.
- [24] S. P. Benito, C. Pirat, L. Lefferts, D. Lohse και P. A. Tsai, «Drop impact upon micro- and nanostructured superhydrophobic surfaces,» *Langmuir*, τόμ. 25, pp. 12293-12298, 2009.
- [25] L. Chen, Z. Xiao, P. C. Chan, Y. Lee και Z. Li, «A comparative study of droplet impact dynamics on a dual-scaled superhydrophobic surface and lotus leaf,» *Applied Surface Science*, τόμ. 257, pp. 8857-8863, 2011.
- [26] J. Sun, Y. Liang, Z. Lin και C. Liu, «Three-dimensional VOF simulation of droplet impacting on a superhydrophobic surface,» *Bio-Design and Manufacturing*, 2019.
- [27] A. Azimi, P. He, C. Rohrs και C. W. Yao, «Developing a novel continuum model of static and dynamic contact angles in a case study of water droplet on micro-patterned hybrid substrates,» *MRS Communications*, 2018.
- [28] C. Liu, L. Zhu, W. Bu και Y. Liang, «Superhydrophobic surfaces: From nature to biomimetic through VOF simulation,» *Micron*, 2018.
- [29] G. Tryggvason, R. Scardovelli και S. Zaleski, *Direct Numerical Simulations Of Gas-Liquid Multiphase Flows*, Cambridge University Press, 2011.
- [30] ANSYS, *Fluent User's Guide*, Ansys Inc., 2017.
- [31] S. Yun, «Bouncing of an ellipsoidal drop on a superhydrophobic surface,» *Scientific reports*, 2017.
- [32] R. Bhardwaj και D. Attinger, «Non-isothermal wetting during impact of millimeter-size water drop on a flat substrate: Numerical investigation and comparison with high-speed visualization experiments,» *International Journal of Heat and Fluid Flow*, pp. 1422-1435, 2008.
- [33] Y. D. Shikhmurzaev, *Capillary Flows with Forming Interfaces*, Chapman & Hall/CRC, 2007.
- [34] L. G. Leal, *Advanced Transport Phenomena*, Cambridge University Press, 2007.
- [35] R. L. Panton, *Incompressible Flow*, 4th επιμ., John Wiley & Sons, Inc., 2013.