ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της **Λαποκωνσταντάκη Καλλιόπης**

Υπολογισμός τριβών σε μικροκανάλια με διφασικές ροές

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

Ανδρέας Γ. Μπουντουβής, Καθηγητής
Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ 2017

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η μεταπτυχιακή αυτή εργασία σηματοδοτεί την ολοκλήρωση των μεταπτυχιακών σπουδών μου στο Δ.Π.Μ.Σ. Υπολογιστικής Μηχανικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή κ. Α. Μπουντουβή, για τη δυνατότητα που μου έδωσε να εκπονήσω την μεταπτυχιακή μου εργασία και να ασχοληθώ με αυτό το θέμα. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Γ.Πάσχο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, τις πολύτιμες συμβουλές του και την καθοδήγησή του καθ’ όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την αδιάκοπη υποστήριξη που μου παρείχαν καθ'όλη την διάρκεια των σπουδών μου μέχρι σήμερα.

Κ. Λαποκωνσταντάκη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η πολυφασική ροή σε μικροκανάλια έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια λόγω των πολυάριθμων εφαρμογών τους. Ο επιτυχής σχεδιασμός των μικροκαναλιών βασίζεται στην πλήρη κατανόηση της δυναμικής και της φυσικής της ροής. Όταν ασκείται πίεση στις πορώδεις επιφάνειες των μικροκαναλιών δημιουργούνται εσωτερικά μικρο-φυσαλίδες που επιδρούν στις απώλειες ενέργειας. Ειδικότερα, η πίεση (παροχή αέρα) στις πορώδεις επιφάνειες μπορεί να έχει θετική ή αρνητική επίδραση στις τριβές ανάλογα με την τιμή της. Μεγάλες παροχές αέρα αυξάνουν τις τριβές στο εσωτερικό του μικροκαναλιού, ειδικά όταν οι φυσαλίδες απομακρύνονται από την επιφάνεια. Επιπρόσθετα, σημαντικό ρόλο στις τριβές διαδραματίζει η γεωμετρία της φυσαλίδας. Έχει βρεθεί ότι υπάρχει γωνία επαφής της φυσαλίδας για την οποία οι απώλειες ενέργειας λόγω τριβών (Viscous Dissipation) γίνονται ελάχιστες.

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται αρχικά μια υπολογιστική προσομοίωση ενός 3-D μοντέλου, στο πρόγραμμα Ansys Fluent. Μελετάται η διφασική ροή σε ολόκληρο το πορώδες μικροκανάλι, όταν οι συνθήκες είναι χρονικά μεταβαλλόμενες. Πραγματοποιείται παραμετρική μελέτη της παροχής του αέρα και διαπιστώνεται ότι όταν αυτήαυξάνεται, οι απώλειες ενέργειας λόγω τριβών παρουσιάζουν σημαντική αύξηση λόγω της συσσωμάτωσης και απομάκρυνσης των φυσαλίδων από την επιφάνεια. Διαπιστώνεται ότι όταν η παροχή του αέρα έχει μια συγκεκριμένη τιμή (εν προκειμένω, 0.00311 ml/s) οι απώλειες ενέργειας λόγω τριβών γίνονται ελάχιστες, όπως υπολογίζοται από την εξίσωση Μηχανικής Ενέργειας. Ωστόσο, η υπολογιστική αυτή προσομοίωση δεν επιτρέπει τον προσδιορισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της φυσαλίδας που συνεισφέρουν θετικά στη μείωση των απωλειών. Λόγω της ανάγκης προσδιορισμού της γεωμετρίας της φυσαλίδας η μελέτη περιορίζεται σε ένα υπολογιστικό χωρίο που εστιάζει κοντά στον πόρο. Προσομοιώνεται με χρήση του προγράμματος Comsol Multiphysics, ένα διδιάστατο αδιάστατο υπολογιστικό χωρίο, στο οποίο περιέχεται η φυσαλίδα της οποίας τα τοιχώματα δεν παραμορφώνονται. Το μοντέλο επιλύεται σε μόνιμες συνθήκες και στη συνέχεια επεκτείνεται στις 3 διαστάσεις. Έπειτα από παραμετρική μελέτη της γωνίας επαφής της φυσαλίδας, του ποσοστού κάλυψης της επιφάνειας από τον πόρο κατά μήκος και κατά πλάτος, διαπιστώνεται ότι για να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες ενέργειας λόγω τριβών επιθυμείται μικρή γωνία επαφής της φυσαλίδας, μεγάλο ποσοστό κάλυψης της επιφάνειας από τον πόρο και οι πόροι να είναι όσο το δυνατό πλησιέστερα μεταξύ τους.

Λέξεις κλειδιά: διφασική ροή, πορώδες μικροκανάλι, απώλειες ενέργειας λόγω τριβών, παροχή αέρα, γεωμετρία φυσαλίδας.

ABSTRACT

Calculation of friction losses of two-phase flows in micro-channels
by
K. Lapokonstantaki

In recent years, the multiphase flow in micro-channels has been of particular interest due to numerous applications. In the case of concern in this thesis, external pressure is applied to the porous surfaces of micro-channels, introducing air in the form of micro-bubbles that attach to the internal walls. The micro-bubbles interact with the flowing liquid by either forming a slippery boundary layer that reduces friction or by forming a layer of obstacles that impedes flow and introduces additional friction. The type of interaction depends on the size of the micro-bubbles (large micro-bubbles – high friction, etc.) and the rate of detachment from the porous walls. Detachment occurs due to application of excessive external pressure that causes uncontrolled bubble growth or possibly due to shear stresses from the flowing liquid.

The effect of the bubble detachment to the friction losses is investigated with a 3D two-phase model of a micro-channel that is implemented in ANSYS-FLUENT. It is shown that there is a small but effective operating regime in which the friction losses are reduced. For the current case the detachment rate, which is quantifiable in terms of the permeating air flow rate, is in the neighborhood of 0.00311 μl / s.

The computational investigation of the effect of bubble size is focused on a single bubble in a unit cell with a model implemented in COMSOL Multiphysics. It is shown that the optimal "bubbly" boundary layer should be quite dense (pores in very close proximity) and the bubbles should have contact angles at ~13.5°-18°, where the more precise value depends on the geometry of the pore; two cases are investigated: pores shaped like narrow slits (translational symmetry, 2D) and pores with circular cross-section (3D).

Keywords: two-phase flow, porous microchannel, Viscous Dissipation, air flow, bubbles geometry

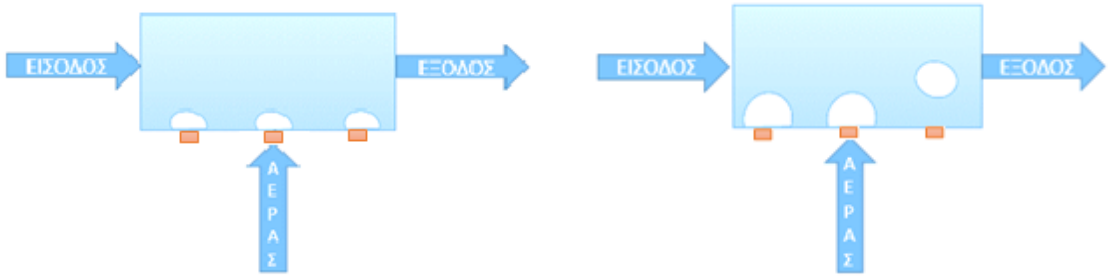
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^{Ο}: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πολυφασική ροή σε μικροκανάλια έχει αποκτήσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια λόγω των πολυάριθμων νέων εφαρμογών της μικρορευστομηχανικής, που υπόσχονται να παρέχουν τεχνολογικές καινοτομίες, οι οποίες δεν είναι πραγματοποιήσιμες με συμβατικά κανάλια. Οι μικρο-ρευστομηχανικές διατάξεις χρησιμοποιούνται για να καθοδηγήσουν μικρούς όγκους υγρών της κλίμακας των μικρο- και νανο- λίτρων. Σημαντικές εξελίξεις στον τομέα της κατασκευής σε μικρο-κλίμακα επέτρεψαν στους ερευνητές να κατασκευάσουν όλο και πιο περίπλοκες συσκευές [1], οι οποίες έχουν εφαρμογή στη βιολογία, στη χημεία και στη μηχανική. Ο επιτυχής σχεδιασμός των μικροκαναλιών βασίζεται στην κατανόηση της δυναμικής της ροής και επιτυγχάνεται κυρίως με πειραματικά μέσα αλλά και με αριθμητικά μοντέλα. Ωστόσο, τα αποτελέσματα των μοντέλων διαφέρουν μεταξύ τους κυρίως λόγω της δυσκολίας ρεαλιστικής προσέγγισης των πειραματικών εγκαταστάσεων. Η ακρίβεια και η αξιοπιστία των σημερινών μοντέλων θα μπορούσαν να βελτιωθούν σε μεγάλο βαθμό με τη λεπτομερή γνώση των πεδίων ροής, που έχει γίνει πρόσφατα δυνατή, με την πρόοδο στον τομέα της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (*CFD*) [1]. Από πρακτικής άποψης, η τριβή διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στις ροές σε μικροκανάλια.Επίσης, σε διφασικές ροές νερού-αερίου σε μικροκανάλια έχει διαπιστωθεί ότι δημιουργούνται φυσαλίδες εντός του καναλιού [3]. Τέλος, σε ορισμένες περιπτώσεις, έχει παρατηρηθεί μια λεπτή μεμβράνη υγρού μεταξύ της φυσαλίδας και του τοιχώματος του καναλιού [4]-[7].

Στην παρούσα εργασία μελετάται υπολογιστικά η διφασική ροή (νερού-αέρα) σε πορώδες μικροκανάλι, όπως φαίνεται στο *Σχήμα 1* και υπολογίζονται οι απώλειες ενέργειας λόγω τριβών. Ειδικότερα, στο *Σχήμα 1* παρουσιάζεται μία κάθετη τομή του μικροκαναλιού. Η είσοδος του νερού βρίσκεται αριστερά και η έξοδος δεξιά. Από την πορώδη επιφάνεια ασκείται πίεση (παροχή αέρα), η οποία έχει άμεση επίδραση στις απώλειες ενέργειας λόγω τριβών.



Σχήμα 1: *Σχηματική αναπαράσταση του πορώδους μικροκαναλιού στο οποίο ρέει νερό και αέρας εισέρχεται από τους πόρους με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται φυσαλίδες οι οποίες μεγαλώνουν και απομακρύνονται σταδιακά από την επιφάνεια.*

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της φυσαλίδας έχουν καθοριστικό ρόλο στα αποτελέσματα, όπως θα δούμε στη συνέχεια. Για το λόγο αυτό απαιτείται η εστίαση της μελέτης κοντά στον

πόρο, διότι το συνολικό κανάλι δεν επιτρέπει τον προσδιορισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της φυσαλίδας που συνεισφέρουν στην μείωση των τριβών.

1.2. ΧΡΗΣΗ ΜΙΚΡΟ-ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ

Οι μικρο-ρευστομηχανικές διατάξεις έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον και πολυάριθμες εφαρμογές στα εργαστήρια καθώς μπορούν να βελτιώσουν τον τρόπο εργασίας των επιστημόνων. Οι μικρότερες και πλήρως αυτοματοποιημένες συσκευές εκτελούν γρηγορότερα και με μεγαλύτερη ακρίβεια τις μετρήσεις. Υπάρχει ένα ευρύ πεδίο προοπτικών εφαρμογής, όπως η ιατρική παρακολούθηση των ασθενών σε γεωγραφικά απομακρυσμένες περιοχές. Το πεδίο της μικρο-ρευστομηχανικής αναπτύσσεται διαρκώς και έχει έντονο διεπιστημονικό χαρακτήρα.

1.3. ΡΟΗ ΣΕ ΥΠΕΡΥΔΡΟΦΟΒΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ

Η μείωση της οπισθέλκουσας σε υπερυδρόφοβες επιφάνειες παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον όταν το υγρό μεταφέρεται πάνω στη στερεή επιφάνεια. Οι υπερυδρόφοβες επιφάνειες σχηματίζονται είτε φυσικά είτε τεχνητά. Συχνά φέρουν μικροσκοπικές υφές που εγκλωβίζουν τα αέρια ανάμεσα στο στερεό και στο υγρό που ρέει πάνω του με αποτέλεσμα να δημιουργούνται φυσαλίδες. Οι μικροφυσαλίδες δημιουργούνται σε πολλά είδη πορωδών επιφανειών όπως γυάλινες επιφάνειες και επιφάνειες *«highly oriented pyrolytic graphite» (HOPG)*. Το στρώμα των φυσαλίδων που σχηματίζεται μπορεί να δημιουργήσει ένα ετερογενές οριακό στρώμα (στρώμα ολίσθησης), που μειώνει την επαφή τουυγρού πάνω στην στερεή επιφάνεια καθώς διέρχονται από την επιφάνεια των φυσαλίδων. Η έκταση της μείωσης της οπισθέλκουσας έχει δειχθεί ότι εξαρτάται από το σχήμα και τη σταθερότητα της φυσαλίδας [8].

1.4. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΦΥΣΑΛΙΔΩΝ

Η μείωση της οπισθέλκουσας δημιουργείται λόγω του σχηματισμού φυσαλίδων. Ωστόσο, όταν το υγρό εισέλθει στο μικροκανάλι και ρεύσει πάνω στη στερεή επιφάνεια, οι δημιουργούμενες φυσαλίδες σπάνε, λόγω άσκησης σημαντικής διάτμησης. Αυτό δε διευκολύνει τη μείωση της αντίστασης στην υπερυδρόφοβη επιφάνεια. Είναι λοιπόν απαραίτητο οι φυσαλίδες να σχηματίζονται συνεχώς. Έτσι δημιουργείται ένα στρώμα από φυσαλίδες. Η συνεχής δημιουργία φυσαλίδων στις στερεές επιφάνειες μπορεί να επιτευχθεί μέσω έγχυσης αερίου, ηλεκτρόλυσης και σπηλαίωσης. Ωστόσο αυτό είτε απαιτεί επιπλέον πηγές, όπως αέριο ή ηλεκτρόδια, είτε απαιτεί μια πρακτική με ροή υψηλής ταχύτητας για τη δημιουργία σπηλαίωσης στα μικροκανάλια [8]. Εναλλακτικά, αυτό το στρώμα φυσαλίδων μπορεί να δημιουργηθεί μέσω της αποσυμπίεσης, όπου οι φυσαλίδες θα αναπτυχθούν υπό πίεση μικρότερη της ατμοσφαιρικής. Πιο αναλυτικά, έχει διερευνηθεί ως τώρα πειραματικά και υπολογιστικά, ο μηχανισμός με τον οποίο μια σταγόνα, που βρίσκεται πάνω σε πορώδη

επιφάνεια, αρχίζει να κινείται και καθοδηγείται από την αποσυμπίεση, με αποτέλεσμα να κινείται προς μια κατεύθυνση. Έχει διαπιστωθεί ότι απαιτείται σημαντικά μικρότερη πίεση των 0.6 bar για να επιτυγχάνεται χαμηλότερη επιφανειακή τάση στα υγρά. Η αποσυμπίεση μπορεί ανάλογα με την ένταση της είτε να σταθεροποιήσει τη σταγόνα σε συγκεκριμένο σημείο της πορώδους επιφάνειας είτε να την ωθήσει προς μια κατεύθυνση [9].Η μέθοδος της αποσυμπίεσης μπορεί να γενικευτεί και σε πορώδη μικρο-κανάλια για τη δημιουργία και καθοδήγηση των φυσαλίδων.

Η πολυδιμεθυλοσιλοξάνη *(PDMS)* είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό για συσκευές με μικρορροές καθώς είναι υδρόφοβη και διαπερατή από αέρια. Ο αέρας μπορεί να εισέλθει στο κανάλι μέσω *PDMS* και οι φυσαλίδες μπορούν να αναπτυχθούν στην επιφάνειά του, ανάλογα με την πίεση που ασκείται εξωτερικά του μικροκαναλιού. Η ανάπτυξη των φυσαλίδων προκαλεί μια παλμική ροή καθώς και μείωση της οπισθέλκουσας, ενώ σχηματίζεται ένα στρώμα ολίσθησης μέσω της ανάπτυξης φυσαλίδων [8].

Όταν δημιουργούνται φυσαλίδες στην επιφάνεια οι συνοριακές συνθήκες αλλάζουν. Ειδικότερα, στην επιφάνεια που δεν καλύπτεται από φυσαλίδα ισχύει η συνθήκη μη ολίσθησης, ενώ στην επιφάνεια της φυσαλίδας ισχύει συνθήκη ολίσθησης. Αυτή η αλλαγή από μη ολισθαίνουσα επιφάνεια σε ολισθαίνουσα οδηγεί σε μείωση της οπισθέλκουσας του υγρού που ρέει μέσα στο πορώδες μικροκανάλι. Επιπλέον, όταν οι φυσαλίδες μεγαλώνουν και αποκολλώνται από την επιφάνεια παρατηρείται διακύμανση του ρυθμού ροής και περιορισμό της μείωσης της οπισθέλκουσας. Αυτή η διαδικασία εξηγεί την προέλευση και την εξέλιξη της μείωσης της οπισθέλκουσας σε επιφάνεια που καλύπτεται από φυσαλίδες. Συνεπώς, φαίνεται ότι η χρήση της μεθόδου αποσυμπίεσης μπορεί να έχει εφαρμογή στη μείωση της οπισθέλκουσας [8].

1.5. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΤΗΣ ΦΥΣΑΛΙΔΑΣ ΣΤΗ ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΟΠΙΣΘΕΛΚΟΥΣΑΣ

Η γεωμετρία της φυσαλίδας έχει καθοριστικό ρόλο στη μείωση της τριβής σε πορώδεις επιφάνειες.

Σε πορώδη μικρο-κανάλια όπου δημιουργούνται φυσαλίδες στο εσωτερικό τους, τα υγρά αναμένεται να εμφανίσουν μειωμένη τριβή. Ωστόσο, η γεωμετρία της φυσαλίδας (αέριο) μπορεί να ματαβάλλει τις ιδιότητες τέτοιων επιφανειών. Όταν η πίεση στο αέριο είναι παρόμοια με εκείνη στο υγρό η οπισθέλκουσα αναμένεται να μειωθεί χάρη στη δημιουργούμενη διεπιφάνεια υγρού-αερίου (επιφάνεια φυσαλίδας). Ωστόσο, όταν η πίεση στο αέριο είναι μεγαλύτερη από αυτή που επικρατεί στο υγρό, η επιφάνεια της φυσαλίδας κυρτώνει, με μέση καμπυλότητα που δίνεται από την σχέση Young-Laplace.

$$\Delta p = -\gamma \bar{\nabla} \cdot \mathbf{n} = 2\gamma H = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (1)$$

Όπου:

- Δp η διαφορά πίεσης εκατέρωθεν της διεπιφάνειας

- γ η επιφανειακή τάση
- $\mathbf{n}$ το διάνυσμα κάθετο στη διεπιφάνεια
- Η η μέση καμπυλότητα
- R_1, R_2 οι κύριες ακτίνες μέσης καμπυλότητας της διεπιφάνειας

Σε αυτή την περίπτωση, η προεξοχή του μηνίσκου μέσα στο υγρό περιορίζει τις ιδιότητες της πορώδους επιφάνειας να μειώνει την οπισθέλκουσα, οδηγώντας τις ροϊκές γραμμές προς την κατεύθυνση της διάτμησης [2].

Μερικές ερευνητικές ομάδες έχουν μελετήσει το φαινόμενο της ολίσθηση (ή της φαινομενικής ολίσθησης) όταν ασκείται πίεση στις πορώδεις υδρόφοβες επιφάνειες με αποτέλεσμα να δημιουργούνται φυσαλίδες στο εσωτερικό [2]. Οι μηνίσκοι των φυσαλίδων αέρα που δημιουργούνται στο εσωτερικό των επιφανειών φαίνεται ότι δεν επηρεάζονται από τις διατμητικές τάσεις. Αυτό οδηγεί σε μικρές αλλά αποτελεσματικές ταχύτητες ολίσθησης στη διεπιφάνεια, οι οποίες μπορεί να ενισχύσουν την μεταφορά του ρευστού [10]. Αντίθετα, στην περίπωση των σταθερών ημισφαιρικών φυσαλίδων που είναι απαλλαγμένες από τάσεις και η διάτμηση δεν είναι αμελητέα, οι τριβές αυξάνονται [11]. Η ολίσθηση τυπικά χαρακτηρίζεται από ένα μήκος ολίσθησης που είναι η φανταστική απόσταση κάτω από την επιφάνεια, στην οποία το πεδίο της ταχύτητας προεκβάλλεται στο μηδέν και υπολογίζεται με βάση το νόμο Navier [2,10].

Η μείωση της τριβής είναι σημαντική όταν τα συστήματα βρίσκονται στην κλίμακα των μικρο-μέτρων ή το μήκος ολίσθησης είναι πολύ μεγάλο. Ωστόσο, το εγγενές μήκος ολίσθησης των υδρόφοβων επιφανειών δεν υπερβαίνει τη δεκάδα των νανομέτρων. Συνεπώς, η επίδραση είναι μικρή για συσκευές της κλίμακας των μικρο-μέτρων, ενώ πρέπει να εξευρεθούν άλλα μέσα μείωσης της τριβής [12].

Μια ιδέα για τη μείωση των τριβών είναι η εκμετάλλευση των υπερυδρόφοβων επιφανειών. Σε μία υπερυδρόφοβη τραχεία επιφάνεια, όταν η φυσαλίδα έχει καθορισμένη γεωμετρία, το υγρό που βρίσκεται σε επαφή με το στερεό μπορεί είτε να γεμίζει τις αυλακώσεις της επιφάνειας, είτε να καλύπτει εν μέρει τη στερεή επιφάνεια και εν μέρει την αέρια. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί και στην νανο-κλίμακα. Οι διατμητικές τάσεις στο τμήμα της επιφανειακής ροής, που βρίσκεται σε επαφή με το άεριο, είναι ασήμαντες. Η τριβή είναι σημαντικά χαμηλότερη σε μια τέτοια υπερυδρόφοβη επιφάνεια σε σχέση με εκείνη που εμφανίζεται σε μία μη υπερυδρόφοβη επιφάνεια. Έχει βρεθεί ότι πειραματικά ότι οι υπερυδρόφοβες επιφάνειες μειώνουν την οπισθέλκουσα τόσο σε σωλήνες της μακροκλίμακα όσο και σε μικροκανάλια. Επίσης, αριθμητικές προσομοιώσεις δείχνουν μια παρόμοια επίδραση σε μοριακό επίπεδο [2]. Ωστόσο, έχει βρεθεί ότι όταν οι φυσαλίδες προεξέχουν έντονα πάνω στις υπερυδρόφοβες επιφάνειες, προκύπτουν αρνητικά μήκη ολίσθησης με αποτέλεσμα η ροή να επιβραδύνεται [12].

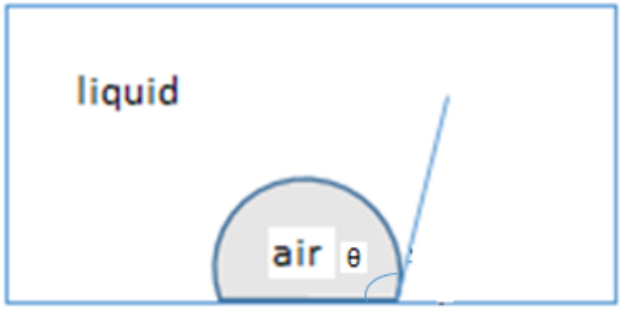
Η ροϊκή ολίσθηση έχει μελετηθεί κυρίως πάνω σε ένα στρώμα όμοιου μεγέθους φυσαλίδων. Ωστόσο, μια τέτοια κατάσταση δεν είναι απαραίτητα ρεαλιστική δεδομένου ότι στην πραγματικότητα οι φυσαλίδες δεν είναι όμοιες μεταξύ τους. Για να επιτευχθεί υπολογιστικά η μελέτη ενός στρώματος με μόνο δύο μεγέθη φυσαλίδων μπορεί να κατασκευαστεί μία επιφάνεια με πόρους αποκλειστικά δύο ακτίνων. Το ύψος των

φυσαλίδων που εμφανίζονται σε μια τέτοια δομή εξαρτάται από την πίεση που ασκείται στους πόρους. Όταν ασκείται μία συγκεκριμένη πίεση, οι φυσαλίδες που βρίσκονται σε μεγαλύτερους πόρους προεξέχουν περισσότερο σε σχέση με αυτές που βρίσκονται σε μικρότερους. Μπορεί να πει κανείς ότι, όταν η πίεση αυξάνεται, αυξάνεται ομοίως και το μήκος ολίσθησης αφού η τραχύτητα του συστήματος μειώνεται [13].

1.5.1. Επίδραση της γωνίας επαφής της φυσαλίδας στην τριβή

Η γεωμετρία της φυσαλίδας διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην οπισθέλκουσα ενός ρευστού. Η παρουσία μικρο-φυσαλίδων μπορεί να μη συνεισφέρει πάντα θετικά στη μείωση της τριβής. Η γεωμετρία της φυσαλίδας καθορίζει τη μετάβαση απο μειωμένη σε αυξημένη τριβή. Ειδικότερα, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μελέτης ενός διδιάστατου μοντέλου υπάρχει μία κρίσιμη γωνία επαφής της φυσαλίδας στη στερεή επιφάνεια, πάνω από την οποία η τριβή γίνεται μεγαλύτερη σε σχέση με μια λεία επιφάνεια. Η γεωμετρική μετάβαση φαίνεται να συμβαίνει για γωνία 65°. Επίσης, έχει διαπιστωθεί μια ασυμμετρία στα αποτελέσματα μεταξύ κυρτών και κοίλων φυσαλίδων, όπως επίσης και η ύπαρξη μιας γεωμετρικής μετάβασης από περιοχή χαμηλής σε περιοχή υψηλής τριβής για μία κρίσιμη γωνία επαφής της φυσαλίδας [2].

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί τί ορίζεται ως γωνία επαφής της φυσαλίδας στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία. Η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ επιφάνειας και φυσαλίδας σε ένα σύστημα αερίου-υγρού-στερεού ονομάζεται γωνία επαφής θ όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2: *Σχηματική αναπαράσταση της γωνίας επαφής της φυσαλίδας με την επιφάνεια.*

Ο έλεγχος της γεωμετρίας της φυσαλίδας μπορεί να βελτιστοποιήσει και την υδροδυναμική τριβή σε υπερυδρόφοβα υποστρώματα με παροχή αέρα-υγρού στη διεπιφάνεια. Ως εκ τούτου, η καθιέρωση μιας σταθερής και βέλτιστης γωνίας επαφής της φυσαλίδας είναι πολύ σημαντική. Οι υπερυδρόφοβες συσκευές μικρορροών επιτρέπουν την παρουσία σταθερών και ελεγχόμενων μικροφυσαλίδων στα όρια του μικροκαναλιού. Πειραματικά και αριθμητικά έχει εξεταστεί η επίδραση της γεωμετρίας των μικροφυσαλίδων στην ολίσθηση. Το πραγματικό μήκος ολίσθησης επιτυγχάνεται για ένα ευρύ φάσμα γωνιών επαφής των μικροφυσαλίδων, χρησιμοποιώντας μια τεχνική ροομετρίας μικροσωματιδιακής εικόνας *(Microparticle Image Velocimetry Technique).* Από αριθμητικά αποτελέσματα έχει βρεθεί ότι

υπάρχει ένα μέγιστο αποτελεσματικό μήκος ολίσθησης,όπως έχει οριστεί στην ενότητα 1.5., που αντιστοιχεί σε μια μείωση της οπισθέλκουσας κατά 23% για μια βέλτιστη γωνία επαφής 10°. Ομοίως πειραματικές μετρήσεις αντιστοιχούν σε μείωση της οπισθέλκουσας μέχρι και 21% όταν η γωνία επαφής είναι στην περιοχή από -2 ° έως 12 °. Τα πειραματικά και αριθμητικά αποτελέσματα δείχνουν μια μείωση στο μήκος ολίσθησης με την αύξηση της γωνίας επαφής όταν αυτή είναι μεγαλύτερη ή ίση με 10°. Τέτοιες συσκευές μικρορροών με ρυθμιζόμενη ολίσθηση είναι απαραίτητες για την ενίσχυση της διεπιφανειακής μεταφοράς του ρευστού και των σωματιδίων [14].

Σημειώνεται οι βέλτιστες γωνίες, που προαναφέρθηκαν, εξαρτώνται από τους περιορισμούς του καναλιού, που είναι ο λόγος του ύψους του καναλιού προς τη διάμετρο της φυσαλίδας που αντιστοιχεί στο μήκος του πόρου. Όταν αυξάνεται ο περιορισμός, η τιμή της βέλτιστης γωνίας επαφής μειώνεται. Συνεπώς, οι φυσαλίδες παρεμποδίζουν τη ροή σε ρηχά κανάλια [15].

1.5.2. Αλληλεπίδραση μήκους ολίσθησης και γωνίας επαφής της φυσαλίδας

Η ισχυρή εξάρτηση του αποτελεσματικού μήκους ολίσθησης από τη γωνία επαφής θ της φυσαλίδας έχει επιβεβαιωθεί αριθμητικά [16] . Έχει βρεθεί επίσης , ότι το μήκος ολίσθησης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την κατεύθυνση της ροής σε στρώμα επιμήκων φυσαλίδων (πόροι με μορφή σχισμών). Όταν η ροή είναι παράλληλη προς τις φυσαλίδες, το μήκος ολίσθησης είναι πάντα θετικό. Επίσης, οι ροϊκές γραμμές είναι ευθείες και δεν παρουσιάζεται «τραχύτητα» στην ροή. Στην περίπτωση της εγκάρσιας ροής το μήκος ολίσθησης είναι αρνητικό όταν η γωνία επαφής υπερβαίνει μια κρίσιμη τιμή. Τέλος, η επιφάνεια είναι τραχεία λόγω των προεξέχοντων φυσαλίδων, προκαλώντας αρνητικά μήκη ολίσθησης [10].

Ορισμένα χαρακτηριστικά της ροής κατά μήκος του τοιχώματος του αγωγού και της επιφάνειας της φυσαλίδας επιδρούν στο φαινόμενο της αρνητικής ολίσθησης. Τα αριθμητικά αποτελέσματα έδειξαν ότι με την αύξηση της γωνίας επαφής, η διατμητική τάση κοντά στα σημεία επαφής του τοιχώματος και της φυσαλίδας (ιδιάζον σημείο) μειώνεται, ενώ η στατική πίεση αυξάνεται και διαφέρει μεταξύ του εμπρός και πίσω μέρους της επιφάνειας της φυσαλίδας. Αυτό το τελευταίο αποτέλεσμα κυριαρχεί της κρίσιμης γωνίας επαφής, καταλήγοντας στο αρνητικό μήκος ολίσθησης.

Ωστόσο, ακόμη και η ύπαρξη μιας βέλτιστης γωνίας επαφής είναι σημαντική και παρατηρήθηκε τόσο στη θεωρία όσο και στις προσομοιώσεις. Παραμένει ένα ανοιχτό ερώτημα γιατί σε μια εγκάρσια ροή πάνω από ένα στρώμα φυσαλίδων, το μέγεθος της ολίσθησης είναι μέγιστο για μια πεπερασμένη μη μηδενική γωνία επαφής. Το πραγματικό μήκος ολίσθησης πάνω από ένα στρώμα φυσαλίδων εμφανίζει ένα μέγιστο για μια ορισμένη γωνία. Τα αριθμητικά και αναλυτικά αποτελέσματα αποκαλύπτουν ότι υπάρχουν δύο αντίθετες επιδράσεις που δρουν σε διαφορετικές κλίμακες και οδηγούν σε μια βέλτιστη γωνία για την οποία οι συνολικές απώλειες ενέργειας λόγω τριβών είναι ελάχιστες είναι ελάχιστη ή η αποτελεσματική ολίσθηση είναι μέγιστη.

Τα αριθμητικά αποτελέσματα αποκαλύπτουν ότι κοντά στα σημεία επαφής του τοιχώματος μη ολίσθησης και της επιφάνειας χωρίς διάτμηση της φυσαλίδας, ο ρυθμός απωλειών ενέργειας γίνεται μέγιστος όταν η φυσαλίδα είναι επίπεδη. Οι διαφορετικές οριακές συνθήκες του τοιχώματος και της φυσαλίδας αυξάνουν τη μεγάλη βαθμίδα ταχύτητας, οδηγώντας σε υψηλά ποσοστά απωλειών. Όταν αυξάνεται η γωνία επαφής της φυσαλίδας, οι απώλειες κοντά στις ασυνέχειες μειώνονται. Από την άλλη πλευρά, φυσαλίδες που προεξέχουν μέσα στο κανάλι της ροής ενεργούν ως εμπόδια και μειώνουν το αποτελεσματικό ύψος του καναλιού, αυξάνοντας έτσι τις απώλειες στον κύριο όγκο της ροής. Συνεπώς, η αύξηση της γωνίας επαφής της φυσαλίδας έχει δύο αντίθετες επιπτώσεις:

- Μείωση των απωλειών ενέργειας λόγω τριβών κοντά στα σημεία επαφής της επιφάνειας με τη φυσαλίδα
- Αύξηση των απωλειών ενέργειας λόγω τριβών (Viscous Dissipation) στον κύριο όγκο του καναλιού

Αυτό εξηγεί την ύπαρξη μιας βέλτιστης γωνίας επαφής μεγαλύτερης από 0° για την οποία οι συνολικές απώλειες στο κανάλι γίνονται ελάχιστες [10].

1.6. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ

1.6.1. Αρχή Διατήρησης της Ορμής (Εξισώσεις Navier-Stokes)

Η διαφορική εξίσωση ορμής αποτελεί τη μαθηματική διατύπωση του δεύτερου νόμου κίνησης του Newton για ένα ορισμένο σημείο του χώρου. Για την εξαγωγή της εξίσωσης αυτής εφαρμόζεται η αρχή διατήρησης της ορμής σε ένα ακίνητο όγκο ελέγχου απειροστού μεγέθους διαμέσου του οποίου διέρχται ένα ρευστό.

Η σχέση εκφράζεται μαθηματικά ως εξής [17-20]:

$$\rho\left(\frac{\mathrm{d}\mathbf{v}}{\mathrm{dt}}\right) = \rho\mathbf{g} - \nabla p + \mu\boldsymbol{\nabla}^{\mathbf{2}}\mathbf{v}\ (\mathbf{2})$$

όπου

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{\partial\mathbf{v}}{\partial t} + u\frac{\partial\mathbf{v}}{\partial x} + v\frac{\partial\mathbf{v}}{\partial y} + w\frac{\partial\mathbf{v}}{\partial z}$$

- u, v, w: είναι οι συντεταγμένες του διανύσματος της ταχύτητας στους άξονες x, y, z αντίστοιχα
- μ: το δυναμικό ιξώδες του ρευστού
- p: πίεση του ρευστού
- ρ: η πυκνότητα του ρευστού

Για μεγαλύτερη ευκολία στα κεφάλαια 3 και 4 χρησιμοποιείται η εξίσωση έπειτα από αδιαστατοποίηση.

Ειδικότερα θεωρούμε:

- Χαρακτηριστικό μήκος: L_0
- Χαρακτηριστική ταχύτητα: v_0
- Χαρακτηριστική πίεση: $p_0 = \frac{\mu v_0}{L_0}$

Οπότε οι αδιάστατες μεταβλητές προκύπτουν:

$$\breve{x} = \frac{x}{L_0}, \quad \breve{y} = \frac{y}{L_0}, \quad \breve{z} = \frac{z}{L_0} \ (3)$$

$$\breve{u} = \frac{u}{v_0}, \breve{v} = \frac{v}{v_0}, \quad \breve{w} = \frac{w}{v_0} \ (4)$$

$$\breve{p} = \frac{p}{p_0} \ (5)$$

Η εξίσωση γίνεται

$$\text{x:} \ \breve{u}\frac{\partial \breve{u}}{\partial \breve{x}} + \breve{v}\frac{\partial \breve{u}}{\partial \breve{y}} + \breve{w}\frac{\partial \breve{u}}{\partial \breve{z}} = -\frac{\partial \breve{p}}{\partial \breve{x}} + \frac{1}{Re}\left(\frac{\partial^2 \breve{u}}{\partial \breve{x}^2} + \frac{\partial^2 \breve{u}}{\partial \breve{y}^2} + \frac{\partial^2 \breve{u}}{\partial \breve{z}^2}\right) (6.1)$$

$$\text{y:} \ \breve{u}\frac{\partial \breve{v}}{\partial \breve{x}} + \breve{v}\frac{\partial \breve{v}}{\partial \breve{y}} + \breve{w}\frac{\partial \breve{v}}{\partial \breve{z}} = -\frac{\partial \breve{p}}{\partial \breve{y}} + \frac{1}{Re}\left(\frac{\partial^2 \breve{v}}{\partial \breve{x}^2} + \frac{\partial^2 \breve{v}}{\partial \breve{y}^2} + \frac{\partial^2 \breve{v}}{\partial \breve{z}^2}\right) \ (6.2)$$

$$\text{z:} \ \breve{u}\frac{\partial \breve{w}}{\partial \breve{x}} + \breve{v}\frac{\partial \breve{w}}{\partial \breve{y}} + \breve{w}\frac{\partial \breve{w}}{\partial \breve{z}} = -\frac{\partial \breve{p}}{\partial \breve{z}} + \frac{1}{Re}\left(\frac{\partial^2 \breve{w}}{\partial \breve{x}^2} + \frac{\partial^2 \breve{w}}{\partial \breve{y}^2} + \frac{\partial^2 \breve{w}}{\partial \breve{z}^2}\right) (6.3)$$

όπου $Re = \frac{v_0 L_0 \rho}{\mu}$

[17,20]

1.6.2. Εξίσωση Συνέχειας

Η Αρχή διατήρησης της μάζας για τον όγκο ελέγχου αφορά στιγμιαίους ρυθμούς. Η διαφορική μορφή της αρχής διατήρησης της μάζας είναι η ακόλουθη:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{v} = 0 \ (7)$$

όπου ρ η πυκνότητα του ρευστού

Αυτή είναι η εξίσωση συνέχειας, που περιγράφει το ρυθμό μετατροπής της πυκνότητας του ρευστού σε ένα συγκεκριμένο σημείο του χωρίου.
Στην περίπτωση όπου το ρευστό είναι σταθερής πυκνότητας τότε ισχύει:

$$\nabla \cdot \rho \mathbf{v} = 0$$

Στην περίπτωση της διφασικής ροής η εξίσωση συνέχειας επιλύεται για κάθε φάση (νερό και αέρας).

1.6.3. Volume of fluid

Το μοντέλο VOF μπορεί να μοντελοποιήσει δύο ή περισσοτέρα μη αναμίξιμα υγρά, επιλύοντας ένα ενιαίο σύνολο εξισώσεων ορμής και παρακολουθείται το κλάσμα του όγκου του καθενός από τα υγρά σε ολόκληρο το υπολογιστικό χωρίο.

Οι μεταβλητές και οι ιδιότητες σε οποιοδήποτε υπολογιστικό κελί είναι είτε αντιπροσωπευτικό ενός εκ των φάσεων είτε αντιπροσωπευτικό ενός μίγματος των φάσεων, ανάλογα με τις τιμές του κλάσματος όγκου του ρευστο. Με άλλα λόγια, αν a_q το κλάσμα όγκου του νερού στο υπολογιστικό κελί,τότε είναι δυνατές οι τρεις ακόλουθες περιπτώσεις:

$a_q = 0$: όταν το κελί δεν περιέχει νερό

$a_q = 1$: όταν το κελί περιέχει μόνο νερό

$0 < a_q < 1$: όταν το κελί περιέχει μίγμα νερού-αέρα.

Ο εντοπισμός της διεπιφάνειας μεταξύ των δύο φάσεων επιτυγχάνεται με τη λύση της εξίσωσης συνέχειας για το κλάσμα όγκου του ενός εκ των δύο φάσεων [21]:

$$\frac{1}{\rho_q}\left[\frac{\partial}{\partial t}(a_q\rho_q) + \frac{\partial(a_q\rho_q u)}{\partial x} + \frac{\partial(a_q\rho_q v)}{\partial y} + \frac{\partial(a_q\rho_q w)}{\partial z}\right] = S_{a_q} + \sum_{p=1}^{n}(\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp})$$

Όπου $\dot{m}_{qp}$ είναι η μεταφορά μάζας από τη φάση q (στη φάση p, $\dot{m}_{pq}$ είναι η μεταφορά μάζας από τη φάση p (νερό) στη φάση q (αέρας). Ο όρος πηγής S_{a_q}στο δεύτερο μέλος θεωρείται μηδέν για το νερό. Για τον αέρα υπάρχει όρος πηγής καθώς εισάγουμε παροχή αέρα στο χωρίο.

Επειδή τα ρευστά (νερό και αέρας θεωρούνται ασυμπίεστα) η εξίσωση γίνεται:

$$\frac{\partial a_q}{\partial t} + u\frac{\partial a_q}{\partial x} + v\frac{\partial a_q}{\partial y} + w\frac{\partial a_q}{\partial z} = S_{a_q} \quad (8)$$

Όπου *u, v, w*: είναι οι συντεταγμένες του διανύσματος της ταχύτητας στους άξονες x, y, z αντίστοιχα.

Η εξίσωση αυτή ονομάζεται εξίσωση κλάσματος όγκου (volume fraction equation) και θα επιλυθεί μόνο για τη δευτερεύουσα φάση, ενώ το κλάσμα όγκου της πρωτεύουσας φάσης θα βρεθεί από τον ακόλουθο περιορισμό:

$$\sum_{q=1}^{n} a_q = 1$$

όπου n ο αριθμός των φάσεων (n=2) [21]

1.6.4. Εξίσωση Μηχανικής Ενέργειας

Η μακροσκοπική εξίσωση μηχανικής ενέργειας για ακίνητο όγκο ελέγχου έχει την ακόλουθη μορφή:

$$\frac{d}{dt}\iiint_{OE}\left(\frac{v^2}{2}+gz\right)\rho dV+\oiint_{EE}\left(\frac{v^2}{2}+\frac{p}{\rho}\right)\rho(\mathbf{v}\cdot\mathbf{n})dA+\dot{W}_l\ =0\ (9)$$

Η φυσική διατύπωση της εξίσωσης έχει ως εξής:

1ος όρος: Ρυθμός συσσώρευσης κινητικής και δυναμικής ενέργειας στον όγκο ελέγχου

2ος όρος: Ρυθμός καθαρής εκροής κινητικής ενέργειας, δυναμικής ενέργειας και έργου πίεσης από τον όγκο ελέγχου διαμέσου της επιφάνειας ελέγχου, λόγω ροής του ρευστού.

3ος όρος: Ρυθμός απωλειών ενέργειας λόγω τριβών στο εσωτερικό του όγκου ελέγχου

Σε μόνιμες συνθήκες η εξίσωση (9) γράφεται:

$$\dot{W}_l=-\oiint_{EE}\left(\frac{v^2}{2}+\frac{p}{\rho}\right)\rho(\mathbf{v}\cdot\mathbf{n})dA\ \ (10)$$

Όπου:

- p: πίεση του ρευστού
- ρ: η πυκνότητα του ρευστού
- A: η επιφάνεια ελέγχου

[20]

1.6.5. Υπολογισμός Απωλειών Ενέργειας Λόγω Τριβών-Viscous Dissipation

Ο αδιάστατος ρυθμός απωλειών ενέργειας λόγω τριβών (κατ'όγκο), στην περίπτωση του ασυμπίεστου ρευστού δίνεται από τη σχέση [10,17]:

$$\breve{\Phi}=2\cdot\left[\left(\frac{\partial\breve{u}}{\partial\breve{x}}\right)^2+\left(\frac{\partial\breve{v}}{\partial\breve{y}}\right)^2+\left(\frac{\partial\breve{w}}{\partial\breve{z}}\right)^2\right]+\left(\frac{\partial\breve{u}}{\partial\breve{y}}+\frac{\partial\breve{v}}{\partial\breve{x}}\right)^2+\left(\frac{\partial\breve{v}}{\partial\breve{z}}+\frac{\partial\breve{w}}{\partial\breve{y}}\right)^2+\left(\frac{\partial\breve{u}}{\partial\breve{z}}+\frac{\partial\breve{w}}{\partial\breve{x}}\right)^2$$
$$-\frac{2}{3}\cdot\left[\left(\frac{\partial\breve{u}}{\partial\breve{x}}\right)+\left(\frac{\partial\breve{v}}{\partial\breve{y}}\right)+\left(\frac{\partial\breve{w}}{\partial\breve{z}}\right)\right]\ (11)$$

όπου $\breve{\Phi}=\frac{\Phi {L_0}^2}{\mu u_0^2}$

- $\breve{u}$, $\breve{v}$, $\breve{w}$: είναι οι αδιάστατες συντεταγμένες του διανύσματος της ταχύτητας στους άξονες $\breve{x}$, $\breve{y}$, $\breve{z}$ αντίστοιχα
- μ: το δυναμικό ιξώδες του ρευστού
- u_0: η χαρακτηριστική ταχύτητα

- L_0: το χαρακτηριστικό μήκος

Οι συνολικές απώλειες ενέργειας λόγω τριβών σε ένα τρισδιάστατο χωρίο και σε ένα διδιάστατο χωρίο υπολογίζονται σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$\breve{\Phi}_V = \iiint_V \breve{\Phi} dV \ (12) \qquad \& \qquad \breve{\Phi}_A = \iint_A \breve{\Phi} dA \ (13)$$

όπου V ο όγκος ελέγχου και A η επιφάνεια ελέγχου [10].

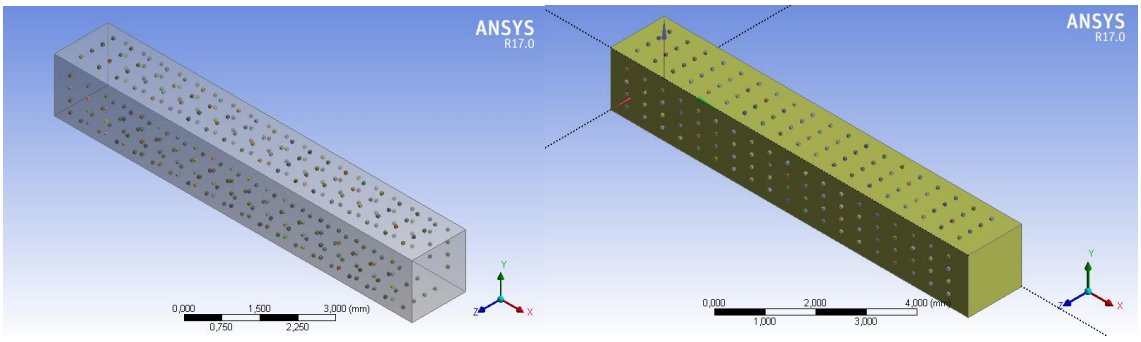
Όπως είναι φανερό σε κάθε υπολογιστική προσομοίωση που χρησιμοποιείται διαφορετικός κώδικας, οι τριβές υπολογίζεται με διαφορετική αλλά ισοδύναμη εξίσωση.

2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^{O}:ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΡΙΒΩΝ ΔΙΦΑΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΣΕ ΜΙΚΡΟΚΑΝΑΛΙ - ANSYS-Fluent

Αρχικά κατασκευάζεται ένα 3-D μοντέλο το οποίο προσομοιώνει ένα πορώδες μικροκανάλι. Η προσομοίωση πραγματοποιείται στο πρόγραμμα ANSYS-Fluent.

2.1. ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

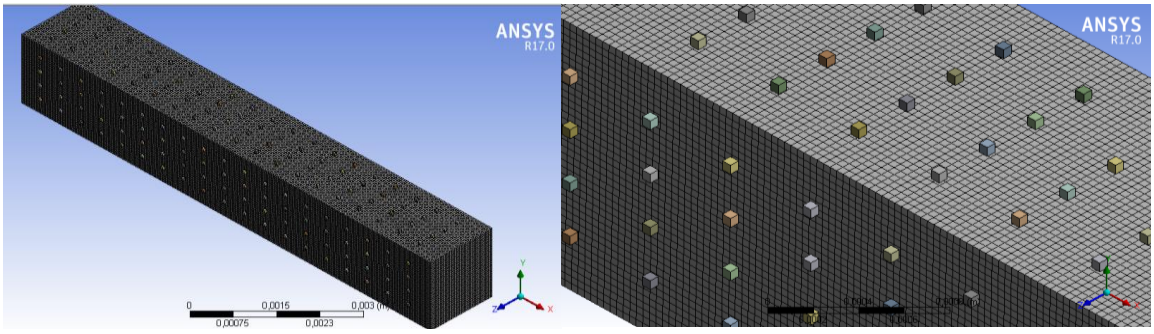
Το κανάλι απαρτίζεται από το κυρίως τμήμα στο οποίο βρίσκεται το βασικό τμήμα της ροής του νερού και τα πορώδη τοιχώματα, που αποτελούν εισόδους αέρα ώστε να σχηματίζονται οι φυσαλίδες. Η γεωμετρία αναπαριστάται από υπολογιστικό χωρίο τετραγωνικής διατομής με μικρούς κυβικούς όγκους (πόροι) που είναι προσαρτημένοι ομοιόμορφα στην εξωτερική επιφάνεια. Οι διαστάσεις υπολογιστικού χωρίου όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3 είναι 10.0 mm x 1.5 mm x 1.5 mm, ενώ οι πόροι έχουν ακμή 0.05 mm. Κάθε επιφάνεια διαθέτει 76 πόρους.



***Σχήμα 3**: Αναπαράσταση υπολογιστικού χωρίου διαστάσεων 10.0 mm x 1.5 mm x 1.5 mm και πόρων ακμής 0.05 mm για την επίλυσης των εξισώσεων.*

2.2. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

Κατασκευάζεται δομημένο πλεγμα (Σχήμα 4) με κυβικά κελιά μεγέθους $4 \cdot 10^{-5}$ m x $4 \cdot 10^{-5} m$ x $4 \cdot 10^{-5}$ m.

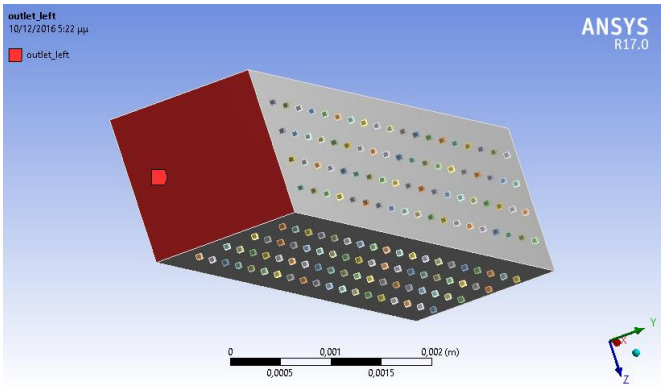


***Σχήμα 4**: Αναπαράσταση του δομημένου πλέγματος του υπολογιστικού χωρίου (πλήθος κελιών: 358416).*

Ο συνολικός αριθμός των υπολογιστικών κελιών του πλέγματος είναι 358416 και ο αριθμός των κόμβων ανέρχεται στους 381161.

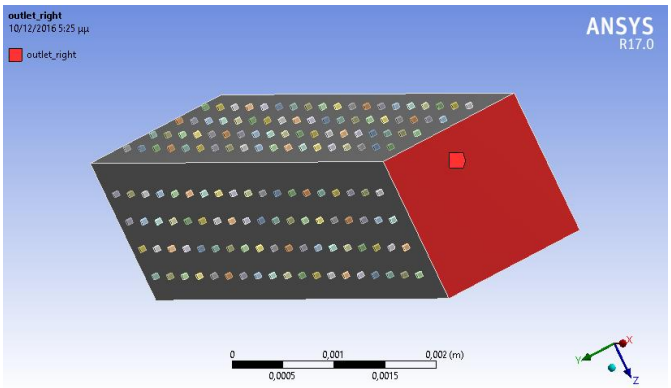
2.3. ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Inlet: Ως είσοδο του νερού θεωρήσαμε την αριστερή επιφάνεια του μικροκαναλιού (Σχήμα 5).



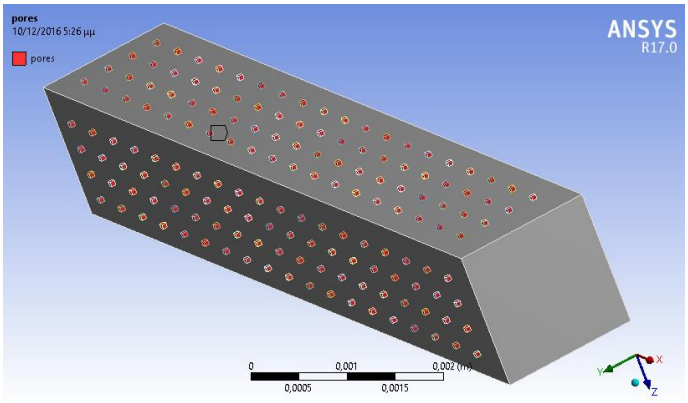
***Σχήμα 5**: Η αριστερή επιφάνεια του υπολογιστικού χωρίου ορίζεται ως είσοδος του νερού.*

Outlet: Ως έξοδο θεωρήσαμε την δεξιά επιφάνεια του μικροκαναλιού (Σχήμα 6).



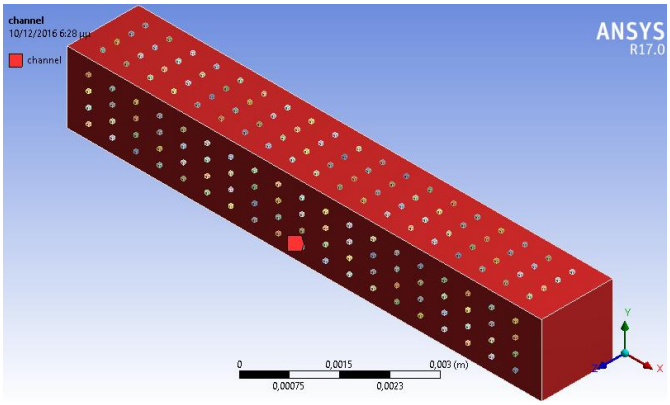
***Σχήμα 6**: Η δεξιά επιφάνεια του υπολογιστικού χωρίου ορίζεται ως έξοδος.*

Pores: Ως πόρους θεωρήσαμε τα κυβικά τμήματα στην επιφάνεια του καναλιού από τα οποία εισέρχεται ο αέρας (Σχήμα 7).



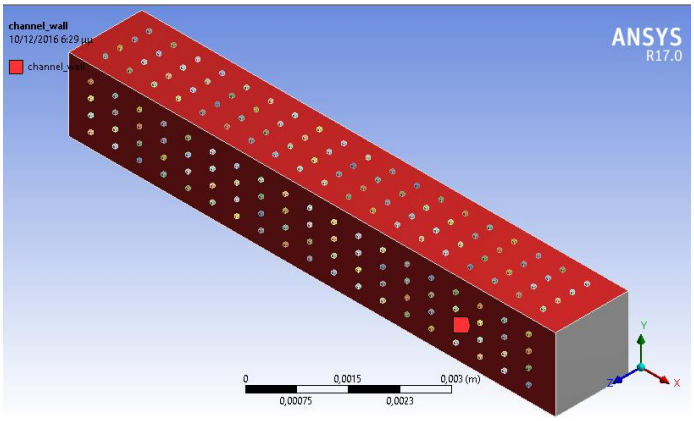
Σχήμα 7*: Τα κυβικά τμήματα στην επιφάνεια του καναλιού ορίζονται ως πόροι, από τους οποίους εισέρχεται ο αέρας στο μικροκανάλι.*

Channel: Ως κανάλι θεωρήσαμε το ορθογώνιο παραλληλόγραμμο τμήμα δίχως τους πόρους από το οποίο διέρχεται το νερό και εντός του οποίου σχηματίζονται οι φυσαλίδες (Σχήμα 8).



Σχήμα 8*: Το ορθογώνιο παραλληλόγραμμο χωρίς τους πόρους αποτελεί το κανάλι με διφασική ροή .*

Channel_wall: Οι τέσσερις μεγάλες πλευρές του υπολογιστικού χωρίου, ορίστηκαν ως τοιχώματα (Σχήμα 9).



Σχήμα 9*: Οι τέσσερις μεγάλες πλευρές αποτελούν τα τοιχώματα του υπολογιστικού χωρίου.*

2.4. ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ

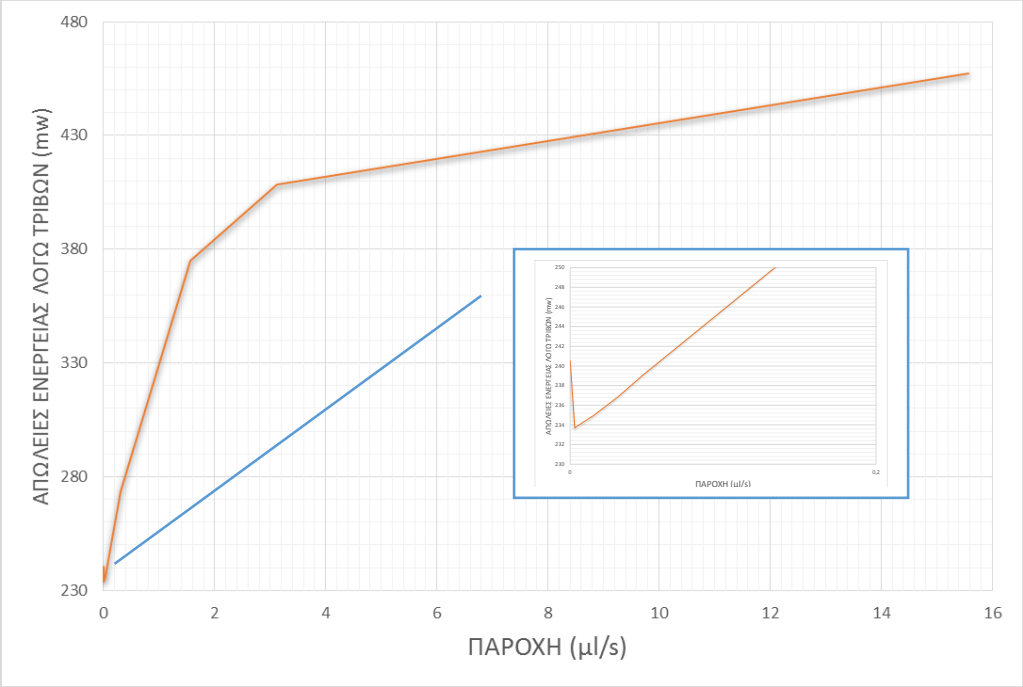
Ως κριτήριο για τον τερματισμό του επιλύτη μας έχουμε είτε την επιλογή δήλωσης ενός μέγιστου αριθμού επαναλήψεων είτε την δήλωση ενός κατώτατου ορίου του υπολοίπου (residual). Εμείς επιλέξαμε $max_{residual}=10^{-3}$ και μέγιστο αριθμό επαναλήψεων 2000.

2.5. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

- ✓ Προσομοίωση του προβλήματος ως *transient* για τη μελέτη της χρονικής μεταβολής του φαινομένου.
- ✓ Προσομοίωση διφασικής ροής *(Volume of fluid)* με χρήση Ρητής Μεθόδου (Explicit Formulation) κατά την οποία υπολογίζεται η κατάσταση του συστήματος σε μεταγενέστερο χρόνο από την κατάσταση του συστήματος στην τρέχουσα χρονική στιγμή.
- ✓ Τα υλικά *(materials)* που χρησιμοποιούνται για την προσοσμοίωση της διαδικασίας είναι νερό *(water-liquid)* και αέρας *(air)* όπως ορίζονται από την βάση δεδομένων του Fluent.
- ✓ *Cell Zone Conditions*: Εισάγονται δύο ζώνες συνθηκών επίλυσης. Η πρώτη απαρτίζεται από το κυρίως κανάλι από το οποίο διέρχεται η κυρίως ροή του νερού και διαμορφώνονται οι φυσαλίδες. Η δεύτερη περιλαμβάνει τους πόρους στους οποίους εισάγεται πηγή μάζας αέρα, τιμή που μελετάται παραμετρικά.
- ✓ *Συνοριακές συνθήκες*: Στην είσοδο του καναλιού *(outlet_left)* ορίζεται η ταχύτητα εισόδου του νερού με χρήση *udf* (Παράρτημα Ι) ώστε η ροή να είναι πλήρως αναπτυγμένη. Με τη θεώρηση ότι η παροχή του νερού στο κανάλι είναι 2 ml/s, υπολογίζεται η μέση ταχύτητα στην είσοδο ίση με 0.9 m/s.
  Για την μοντελοποίηση της εξόδου ορίζεται το σύνορο *(outlet_right)* ως *outflow* διότι οι λεπτομέρειες της ταχύτητας ροής και η πίεση δεν είναι γνωστές πριν τη λύση του προβλήματος της ροής. Τα εσωτερικά τοιχώματα ορίζονται αυτόματα από το Fluent, ενώ τα εξωτερικά τοιχώματα ορίζονται ως *No Slip Stationary walls* με προσδιορισμό της γωνίας επαφής *(Wall Adhesion)*.
- ✓ Ως μέθοδος επίλυσης για την ταχύτητα και την πίεση ορίζεται η μέθοδος *PISO.*

2.6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Πραγματοποιήθηκε παραμετρική μελέτη της ογκομετρικής παροχής αέρα μέσω των πόρων. Για κάθε περίπτωση υπολογίστηκαν οι απώλειες λόγω τριβών εντός του μικροκαναλιού με χρήση της εξίσωσης (10), σε σχέση με την παροχή του αέρα (Σχήμα 10).



Σχήμα 10: *Διάγραμμα μέσης τιμής απωλειών ενέργειας λόγω τριβών (mW) συναρτήσει της παροχής του αέρα μέσω των πόρων (Παροχή (μl/s)).*

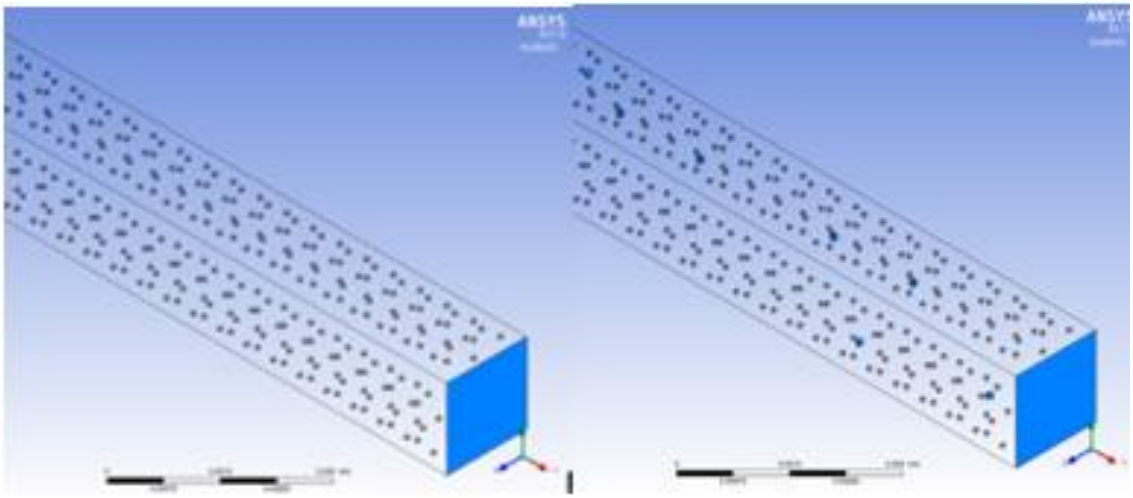
Σύμφωνα με τα παραπάνω, όταν η παροχή αέρα είναι κοντά στο 0.0031 μl/s οι απώλειες τείνουν στην τιμή 0.23 mW που είναι μικρότερη σε σχέση με την περίπτωση μηδενικής παροχής αέρα από τους πόρους, που ανέρχεται στα 0.24 mW.

Είναι φανερό ότι για υψηλές τιμές παροχών οι απώλειες ενέργειας λόγω τριβών αυξάνονται. Επίσης, παρουσιάζεται μια έντονη διακύμανση των απωλειών ενέργειας όταν η παροχή αέρα είναι μικρή Για την εκτενέστερη μελέτη του φαινομένου παρατίθεται το διάγραμμα απωλειών ως προς το χρόνο μόνο για ορισμένες τιμές της πηγής αέρα. Όταν η πηγή μάζας του αέρα είναι 15.57 μl/s οι απώλειες παρουσιάζουν έντονη διακύμανση μεταξύ των τιμών 0.52 mW και 0.38 mW (Σχήμα 11). Για μικρότερη παροχή αέρα η διακύμανση μειώνεται, το ίδιο και οι απώλειες λόγω τριβών. Η διακύμανση των απωλειών οφείλεται στην συσσωμάτωση των φυσαλίδων ή και στην αποκόλληση τους από την επιφάνεια.

Σχήμα 11: *Διάγραμμα απωλειών ενέργειας λόγω τριβών συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές τιμές παροχής αέρα από τους πόρους, με σκοπό την μελέτη της διακύμανσης των απωλειών.*

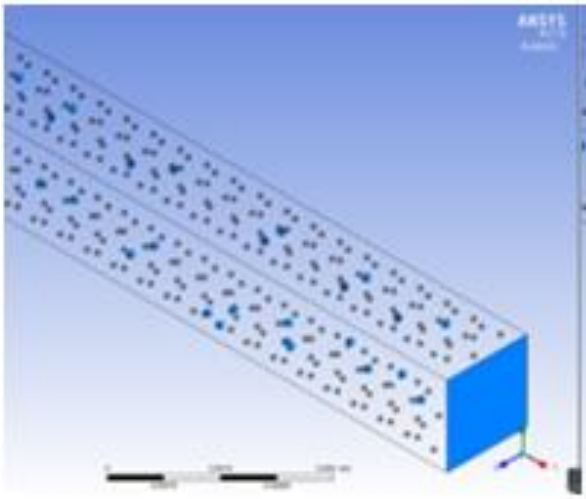
Για την περαιτέρω κατανόηση της συμπεριφοράς των φυσαλίδων με την αλλαγή παροχής αέρα, παρουσιάζονται ενδεικτικά στιγμιότυπα των προσομοιώσεων, για ακραίες τιμές της παροχής. Καθώς αέρας εισέρχεται από τους πόρους τις επιφάνειας, δημιουργούνται φυσαλίδες στο εσωτερικό των πορώδων επιφανειών που αναπτύσσονται και ρέουν προς την έξοδο. Όταν η παροχή του αέρα είναι πολύ μικρή (Σχήμα 12) οι φυσαλίδες δημιουργούνται πολύ αργά σε αντίθεση με την περίπωση που η παροχή αέρα είναι μεγάλη και φυσαλίδες δημιουργούνται ταχύτατα (Σχήμα 13).

Mass source: 0.0031 μl/s

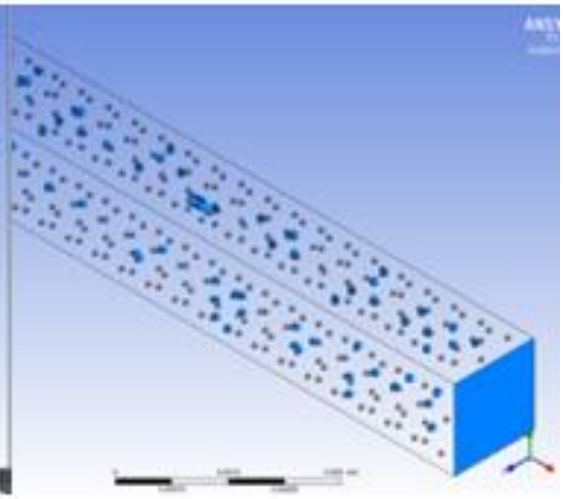


t=0.0001 s

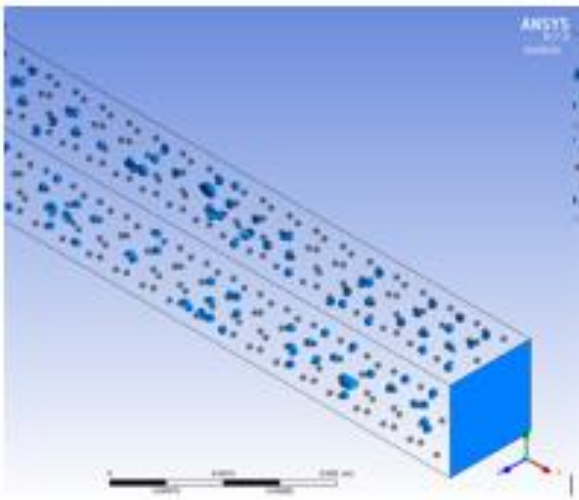
t=0.016 s



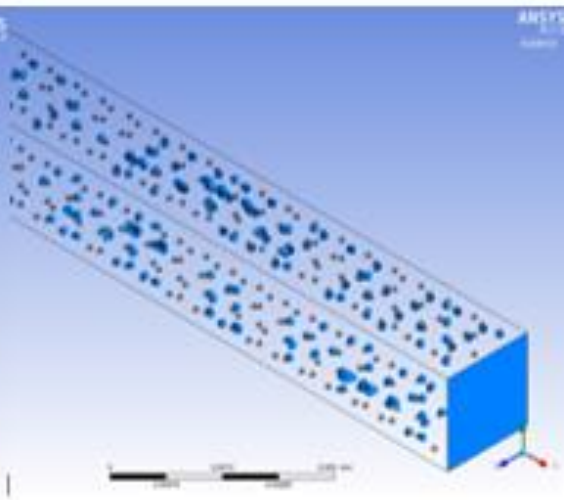
t=0.018 s



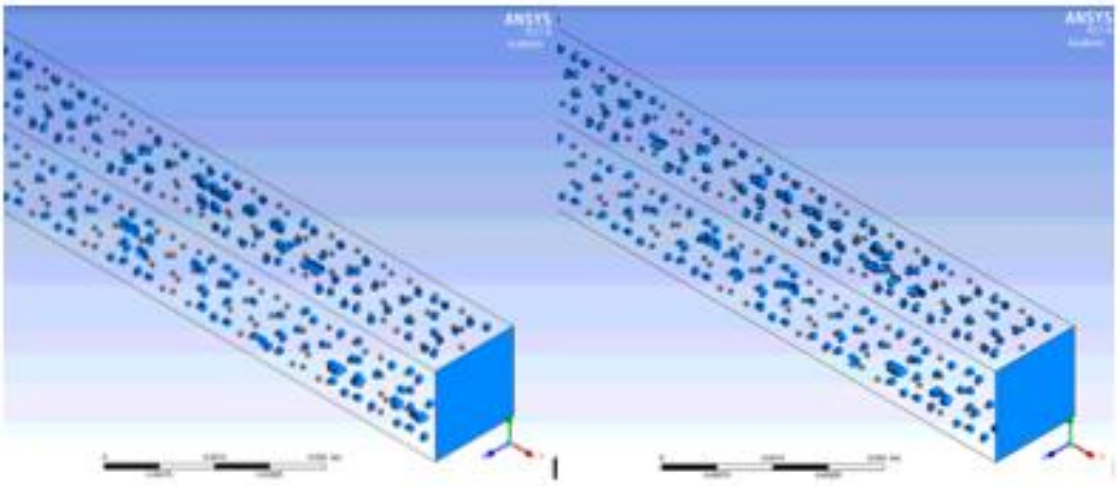
t=0.02 s



t=0.022 s

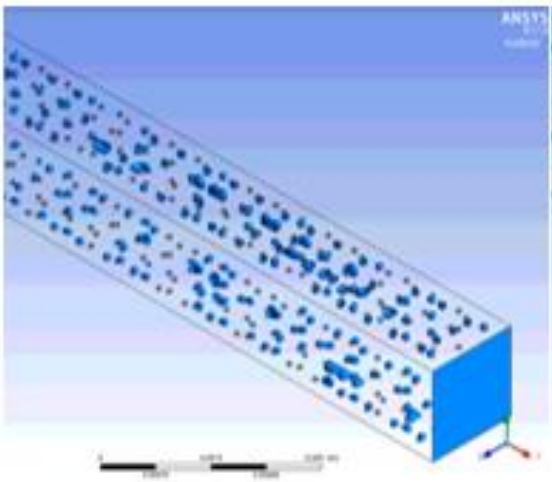


t=0.024 s

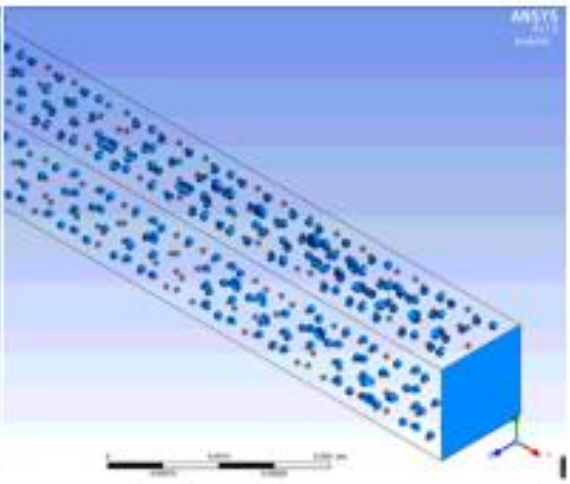


t=0.026 s

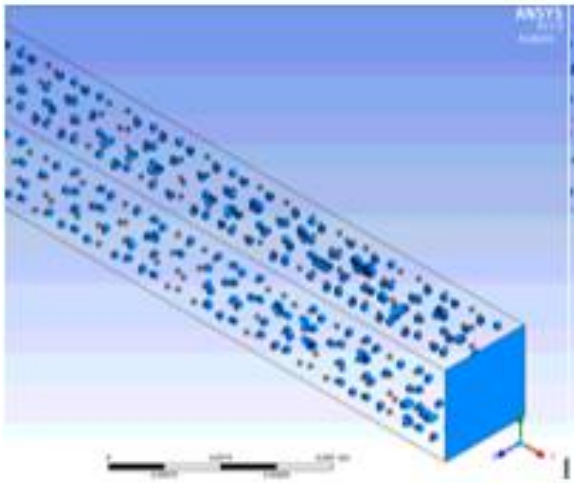
t=0.028 s



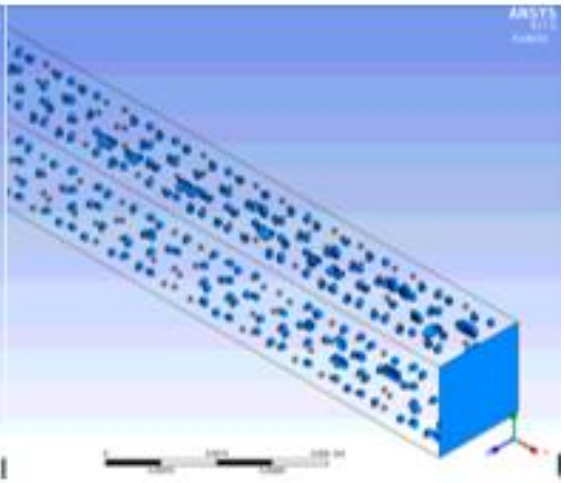
t=0.03 s



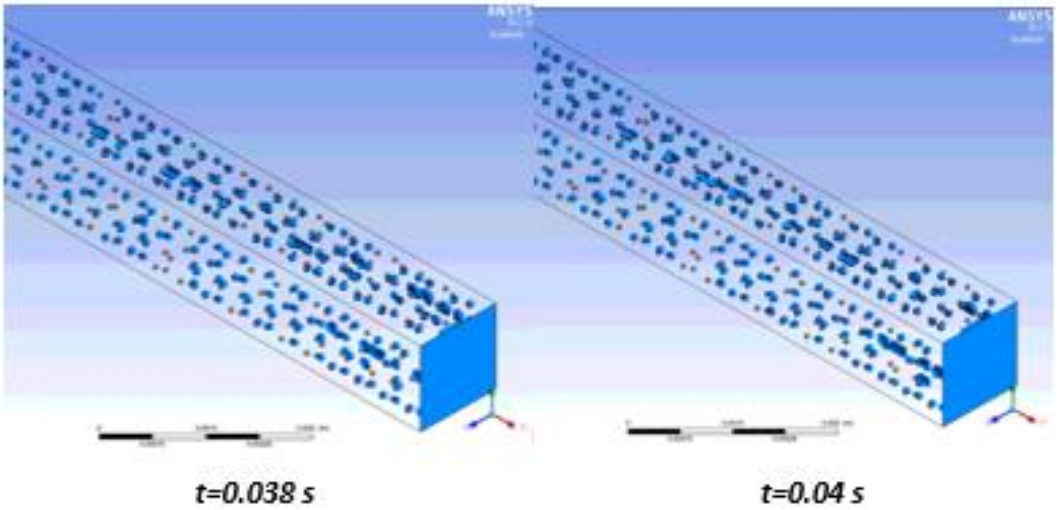
t=0.032 s



t=0.034 s

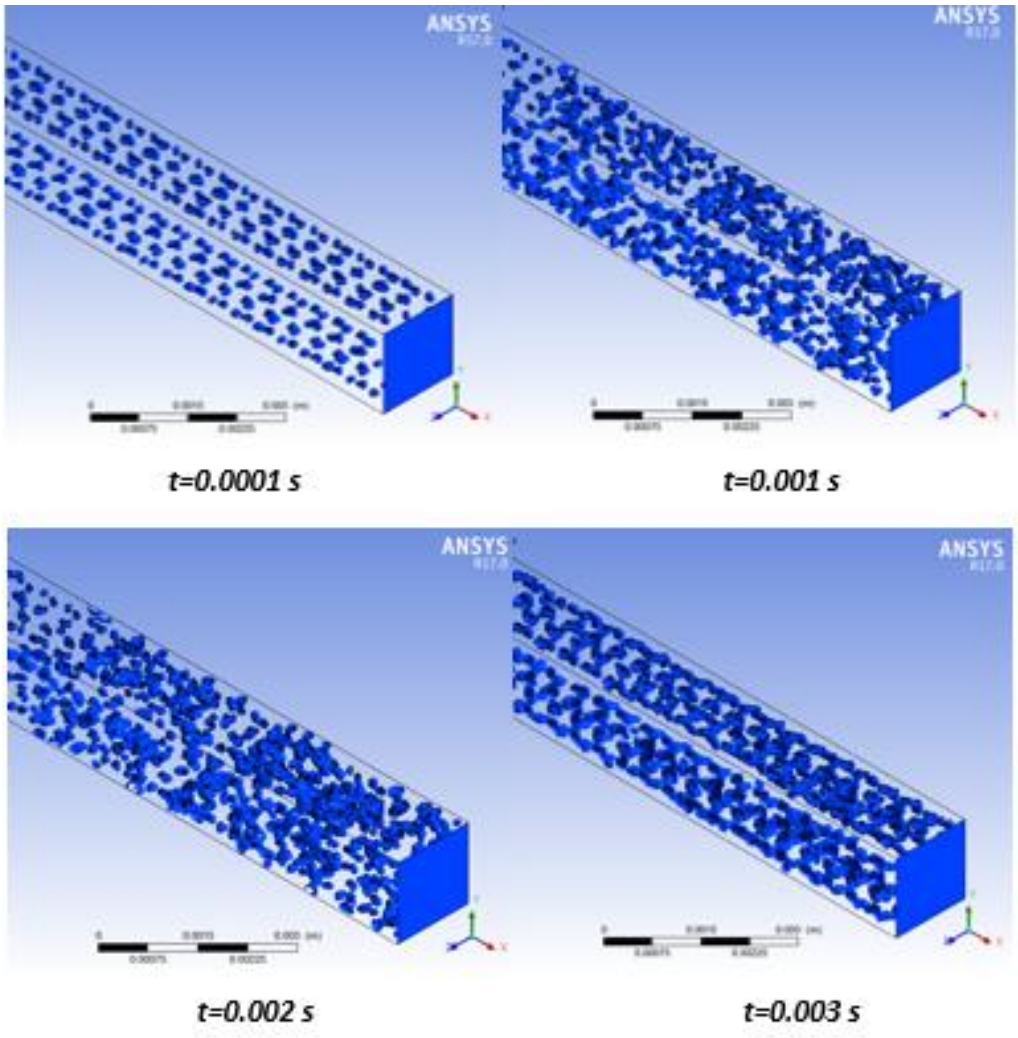


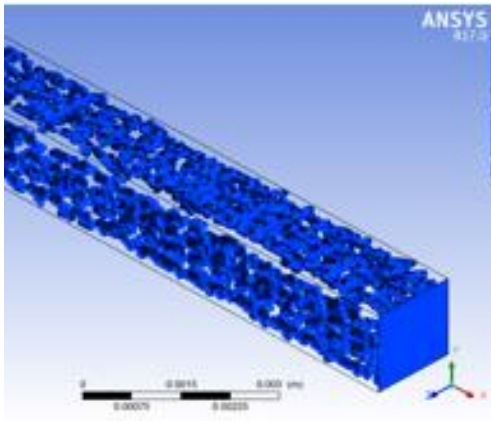
t=0.036 s

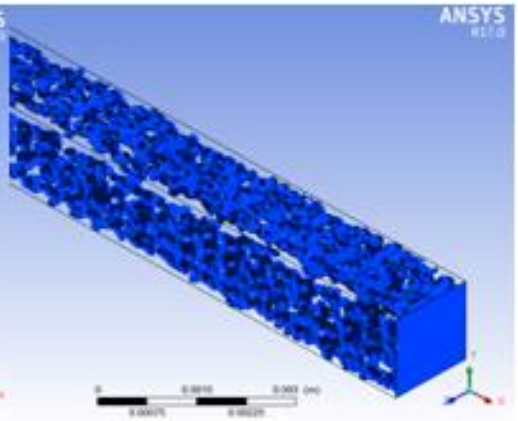


Σχήμα 12: *Στιγμιότυπα* της προσομοίωσης με παροχή αέρα 0.0031 μl/s. Οι επιφάνειες (μπλε χρώμα) αντιπροσωπεύουν τη διεπιφάνεια νερού αέρα.

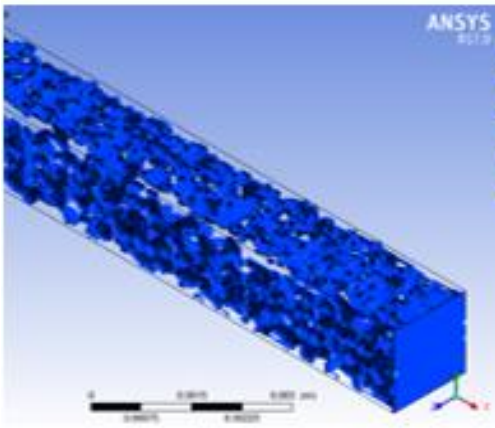
Mass source: 15.57 μl/s

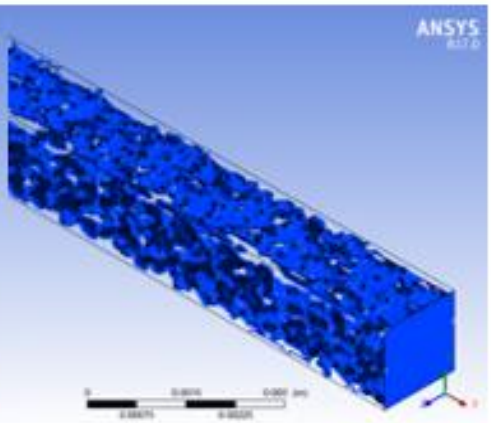




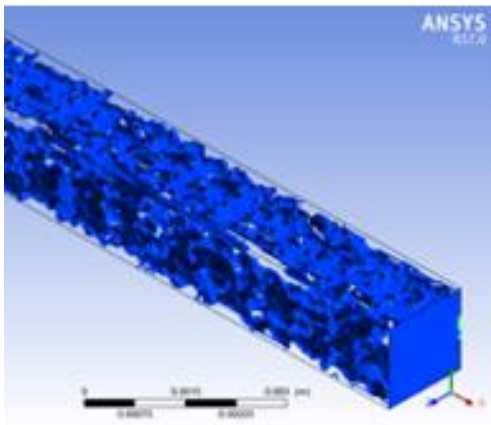


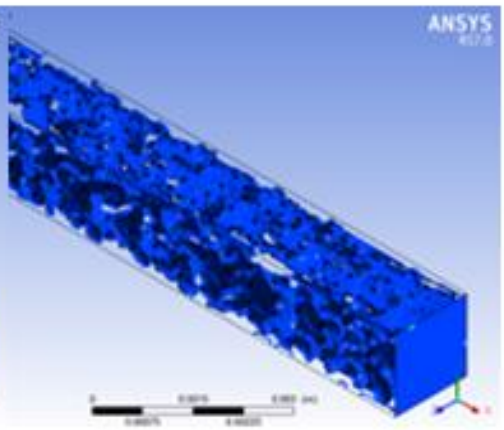
t=0.004 s *t=0.005 s*



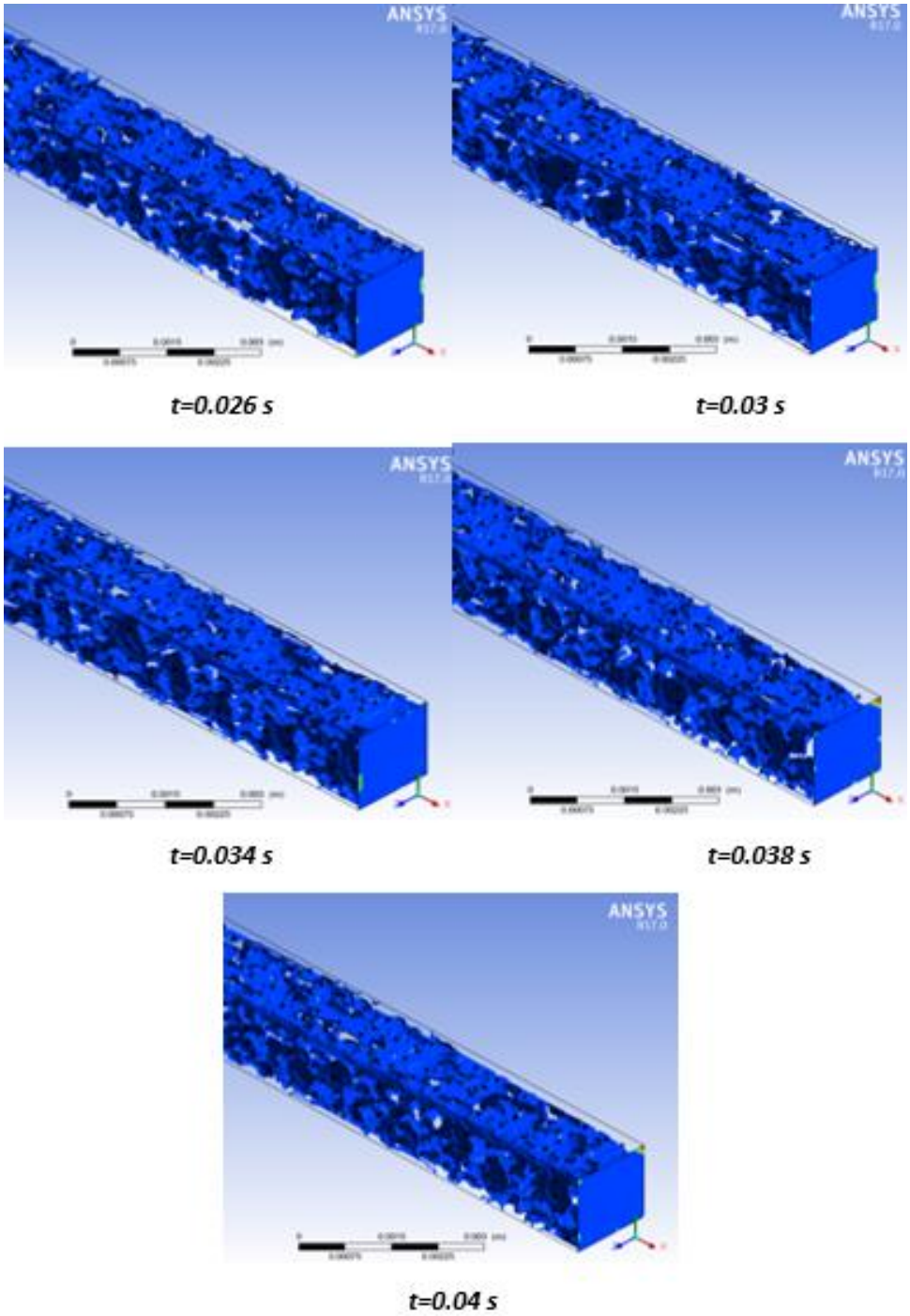


t=0.01 s *t=0.014 s*





t=0.018 s *t=0.022 s*

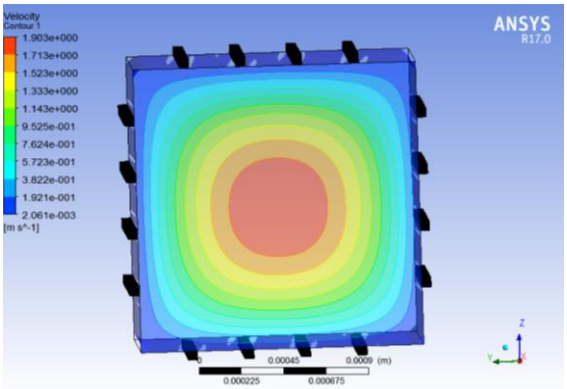


Σχήμα 13: *Στιγμιότυπα* της προσομοίωσης με παροχή αέρα *15.57 μl/s*. Οι επιφάνειες (μπλε χρώμα) αντιπροσωπεύουν τη διεπιφάνεια νερού αέρα.

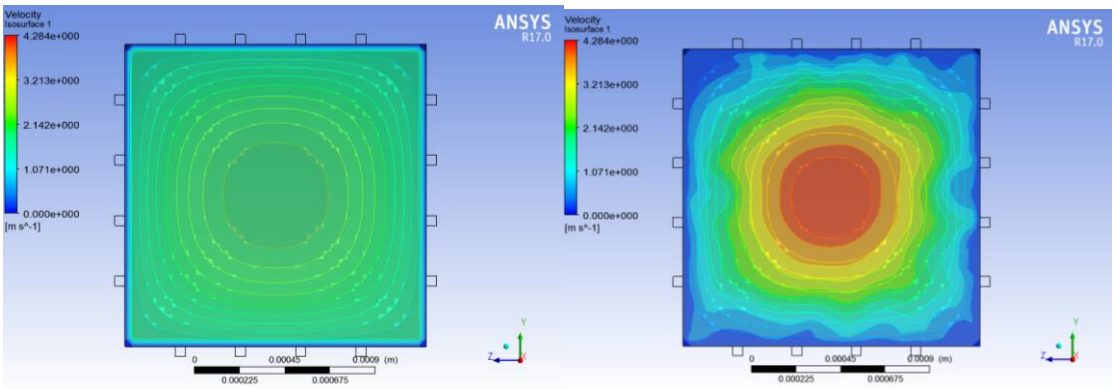
Προφίλ ταχύτητας στην είσοδο-έξοδο

Η ταχύτητα στην είσοδο είναι διαμορφωμένη, όπως φαίνεται από τα ακόλουθο *διάγραμμα ισοϋψών* (Σχήμα 14) και ανεξάρτητα από την παροχή του αέρα, διατηρείται σταθερή και διαμορφωμένη σύμφωνα με την εξίσωση που έχει εισαχθεί. Ωστόσο στην έξοδο η ταχύτητα δεν είναι σταθερή καθώς επηρεάζεται από τις εξερχόμενες φυσαλίδες αέρα. Όταν είναι

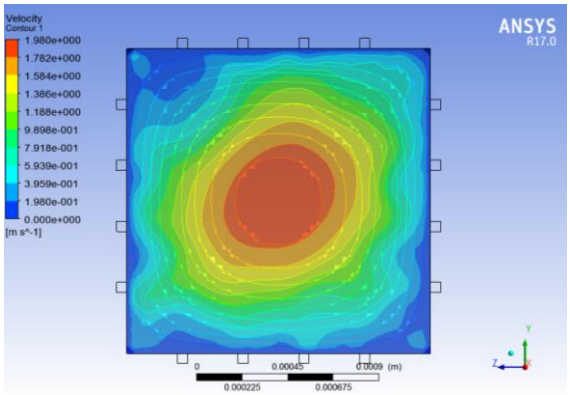
μεγάλη η πηγή μάζας αέρα παρουσιάζονται αλλοιώσεις στο προφίλ της ταχύτητας (Σχήμα 15) ιδιαίτερα στα άκρα που έρχονται σε επαφή με τις φυσαλίδες που εξέρχονται από το μικροκανάλι. Αντίθετα για μικρές παροχές αέρα, οι φυσαλίδες που δημιουργούνται παρουσιάζουν μικρότερη κινητικότητα και κατά την έξοδό τους από το μικροκανάλι δεν επιδρούν στο προφιλ της ταχύτητας (Σχήμα 16).



Σχήμα 14: *Προφίλ της ταχύτητας στην είσοδο του μικροκαναλιού όταν η παροχή αέρα ισούται με 15.57 μl/s. Το προφίλ της ταχύτητας στην είσοδο είναι όμοιο για όλες τις περιπτώσεις.*

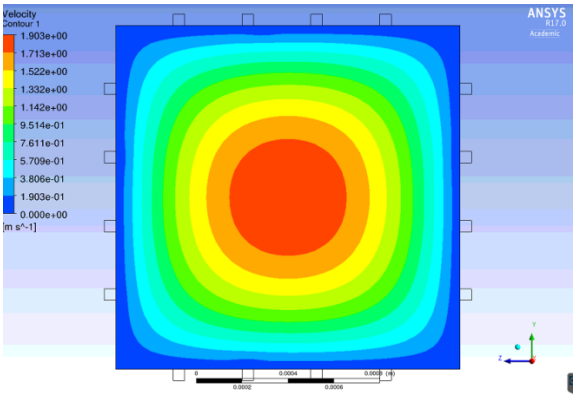


t: 0.0001 s **t: 0.02 s**



t: 0.04 s

Σχήμα 15: *Προφίλ της ταχύτητας στην έξοδο του μικροκαναλιού όταν η παροχή αέρα ισούται με 15.57 μl/s. Το προφίλ της ταχύτητας στην έξοδο μεταβάλλεται συνεχώς για μεγάλες παροχές αέρα.*



t: 0.04 s

Σχήμα 16: *Προφίλ της ταχύτητας στην έξοδο του μικροκαναλιού όταν η παροχή αέρα ισούται με 0.0031 μl/s. Το προφίλ της ταχύτητας στην έξοδο διατηρείται πρακτικά σταθερό για μικρές παροχές αέρα.*

2.7. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Μέσω της υπολογιστικής προσομοίωσης της ροής νερού σε πορώδες μικροκανάλι που πραγματοποιήθηκε μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι σημαντική επίδραση στις απώλειες παίζει η παροχή αέρα από τους πόρους του μικροκαναλιού. Ειδικότερα, μεγάλη παροχή αέρα δεν επιφέρει μείωση των απωλειών ενέργειας λόγω τριβών σε αντίθεση με παροχές μικρότερες από 0.0467 μl/s που ελαττώνουν τις απώλειες. Επιπρόσθετα, όσο αυξάνεται η παροχή του αέρα φυσαλίδες δημιουργούνται ταχύτατα και ρέουν προς την έξοδο δημιουργώντας συσσωματώματα. Αυτό οδηγεί σε διακύμανση των απωλειών. Τα παραπάνω οδηγούν στην ανάγκη προσέγγισης του φαινομένου σε μικρότερη κλίμακα κοντά στη φυσαλίδα ώστε να διαπιστωθεί πως η γεωμετρία και το μέγεθος της φυσαλίδας επιδρά στη ροή.

3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3° : ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΡΙΒΩΝ ΣΕ 2-D ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΧΩΡΙΟ – COMSOL Multiphysics 5.2.

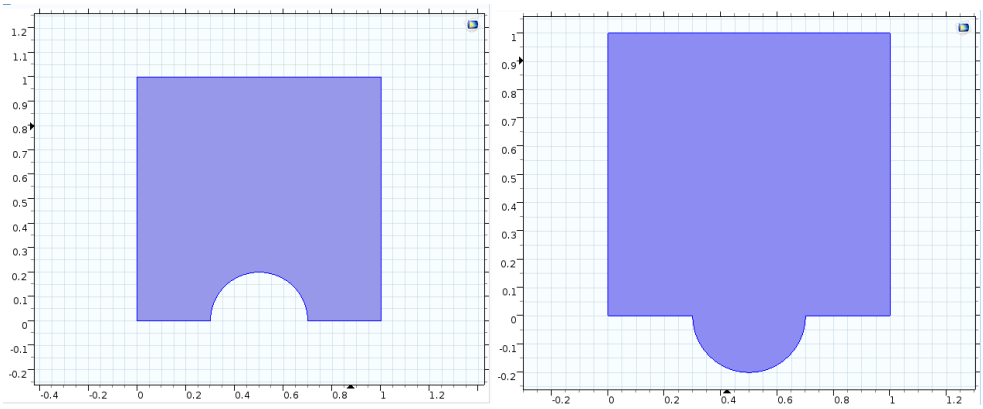
3.1. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΧΩΡΙΟΥ (2-D)-ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ COMSOL Multiphysics 5.2

Λόγω της ανάγκης για περαιτέρω έρευνα των αποτελεσμάτων που λήφθηκαν από την προσομοίωση του υπολογιστικού χωρίου στο προηγούμενο κεφάλαιο, κατασκευάστηκε ένα 2-D μοντέλο, σε πρόγραμμα COMSOL Multiphysics 5.2. Το υπολογιστικό χωρίο περιορίζεται σε μια περιοχή κοντά στην πορώδη επιφάνεια που αναπτύσσεται η φυσαλίδα και η επίλυση πραγματοποιείται θεωρώντας μόνιμες συνθήκες *(Steady state)* κοντά στην επιφάνεια.

3.2. ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

Το υπολογιστικό χωρίο στο οποίο θα υπολογιστούν οι εξισώσεις είναι ουσιαστικά το χωρίο που περιέχει το ρευστό που επιλύουμε κοντά στην αναπτυσσόμενη φυσαλίδα. Το χωρίο απαρτίζεται από το κυρίως τμήμα στο οποίο βρίσκεται το βασικό τμήμα της ροής του νερού και το πορώδες τοίχωμα, πάνω στο οποίο σχηματίζεται η φυσαλίδα. Η φυσαλίδα κατασκευάζεται γεωμετρικά, ώστε να επιτευχθεί η παραμετρική μελέτη της επίδρασης της γωνίας επαφής στις απώλειες *(Viscous Dissipation)*.

Οι διαστάσεις υπολογιστικού χωρίου όπως φαίνεται και στο Σχήμα 17 είναι 1.0 x 1.0, καθώς επιλέχθηκε να κατασκευαστεί αδιάστατο μοντέλο, ώστε να μην υπάρχει επίδραση των διαστάσεων κατά την επίλυση της υπολογιστικής προσομοίωσης. Η ακτίνα του πόρου δίνεται από τη σχέση $\frac{chord}{2\cdot\sin(angle)}$, όπου *chord* και *angle* παράμετροι που αναλύονται στην αντίστοιχη παράγραφο.



Σχήμα 17: *Αναπαράσταση της γεωμετρίας της υπολογιστικής προσομοίωσης* 2-D μοντέλου σε πρόγραμμα COMSOL Multiphysics 5.2 *για θετικές γωνίες επαφής (αριστερά) και αρνητικές γωνίες επαφής (δεξιά).*

Ειδικότερα, για μεγαλύτερη ευκολία χρησιμοποιείται η αδιάστατη μορφή της εξίσωσης Navier-Stokes (σχέσεις 6.1-6.2).

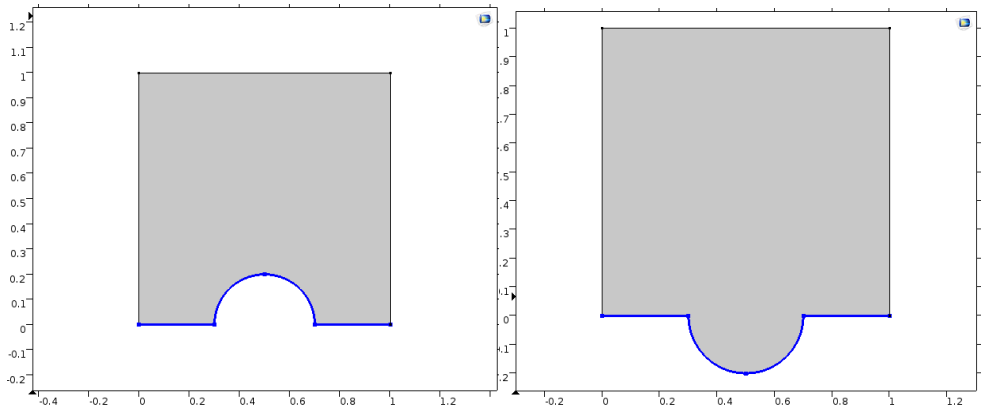
Ειδικότερα θεωρούμε:

- Χαρακτηριστικό μήκος: $L_0 = 5 \cdot 10^{-5} m$
- Χαρακτηριστική ταχύτητα: $v_0 = 0.000257 \ \frac{m}{s}$

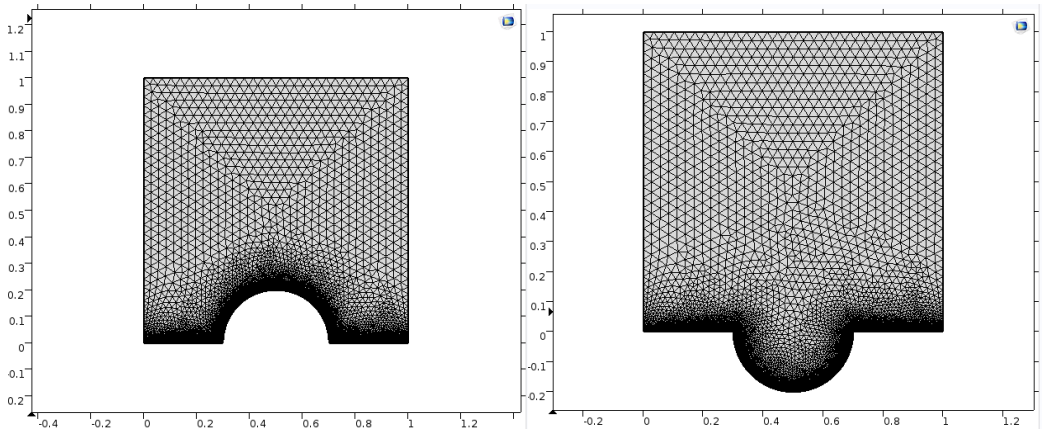
Όπου v_0 είναι η μέση ταχύτητα του ρευστού-νερού που εισέρχεται στο μικροκανάλι και L_0η απόσταση από το τοίχωμα στην οποία μελετάται η ροή.

3.3. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

Το πλέγμα είναι μη δομημένο, τριγωνικών στοιχείων και είναι επιλεκτικά πιο πυκνό κοντά στη φυσαλίδα (Σχημα 18-19) .



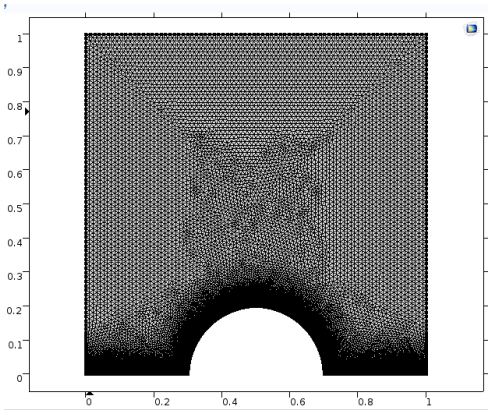
Σχήμα 18: *Πύκνωση του πλέγματος κοντά στην επιφάνεια της φυσαλίδας μέσω καθορισμού του μεγέθους των στοιχείων από* $1.9 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-3}$.



Σχήμα 19: *Διακριτοποίηση υπολογιστικού χωρίου με χρήση μη δομημένου πλέγματος.*

Για το έλεγχο *της ανεξαρτησίας της λύσης από το πλέγμα,* έγινε πύκνωση του πλέγματος (Σχήμα 20), ιδιαίτερα κοντά στο σύνορο όπου απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια στα

αποτελέσματα. Για τον λόγο αυτό, κοντά στην επιφάνεια της φυσαλίδας το μέγεθος των υπολογιστικών κελιών υποδεκαπλασιάστηκε. Ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε για γωνίες επαφής μεγαλύτερες του μηδενός.

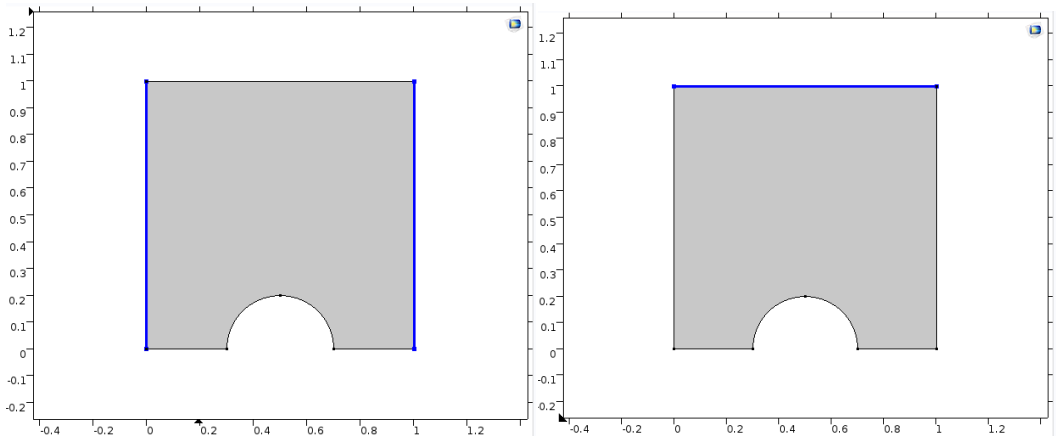


Σχήμα 20: *Διακριτοποίηση υπολογιστικού χωρίου με χρήση πυκνού μη δομημένου πλέγματος με σκοπό τον έλεγχο της ανεξαρτησίας της λύσης από το πλέγμα.*

Τα αποτελέσματα έδειξαν πως δεν έχει σημαντική επίδραση η πύκνωση του πλέγματος καθώς οι αλλαγές παρατηρούνται σε ποσοστό 0.005 %. Για το λόγο αυτό επιλέγεται το αραιότερο πλέγμα ώστε να επιτυγχάνεται ο μικρότερος δυνατός υπολογιστικός χρόνος.

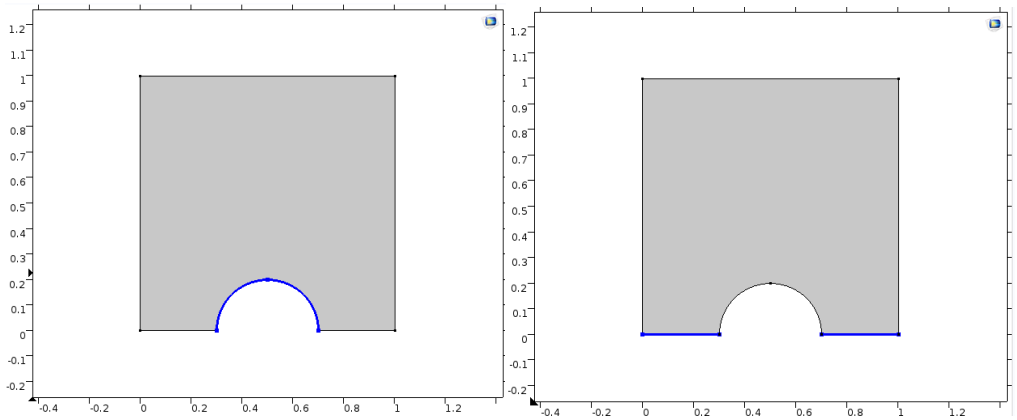
3.4. ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος ορίζονται από το πεδίο *Laminar Flow του προγράμματος Comsol Multiphysics 5.2*. Το χωρίο έχει οριστεί ως *periodic* στην x διεύθυνση (Σχήμα 21) όπου τόσο η ταχύτητα όσο και η πίεση στην είσοδο και στην έξοδο είναι ίσες μεταξύ τους. Στην πάνω επιφάνεια ορίζεται ταχύτητα $U_W = 1$.



Σχήμα 21: *Προσδιορισμός συνοριακών συνθηκών για τις πλαϊνές ως periodic (αριστερή εικόνα) και για την πάνω επιφάνεια του υπολογιστικού χωρίου* $U_W = 1$ *(δεξιά εικόνα).*

Στα κάτω τοιχώματα ορίζεται συνθήκη μη ολίσθησης στα οποίο η ταχύτητα ειναι μηδέν, ενώ στο τοίχωμα της φυσαλίδας υπάρχει ολίσθηση *(Σχήμα 22)*.



Σχήμα 22: *Προσδιορισμός συνοριακών συνθηκών.Στην επιφάνεια της φυσαλίδας επικρατεί συνθήκη ολίσθησης (αριστερή εικόνα) και στο υπόλοιπο κάτω τοίχωμα επικρατεί συνθήκη μη ολίσθησης (δεξιά εικόνα).*

Επίσης ορίζεται ένα μηδενικό σημείο πίεσης, που αποτελεί σημείο αναφοράς. Τέλος, οι εξισώσεις επιλύονται για ρ=1 και μ=(1/Re), ώστε να επιτευχθεί η αδιαστατοποίηση του μοντέλου.

Στο σημείο αυτό είναι σκόπιμο να αναφερθεί ότι η επιφάνεια της φυσαλίδας (Σχήμα 22-αριστερά) δε παραμορφώνεται αλλά ισχύει η συνθήκη ολίσθησης πάνω στην επιφάνεια.

3.5. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

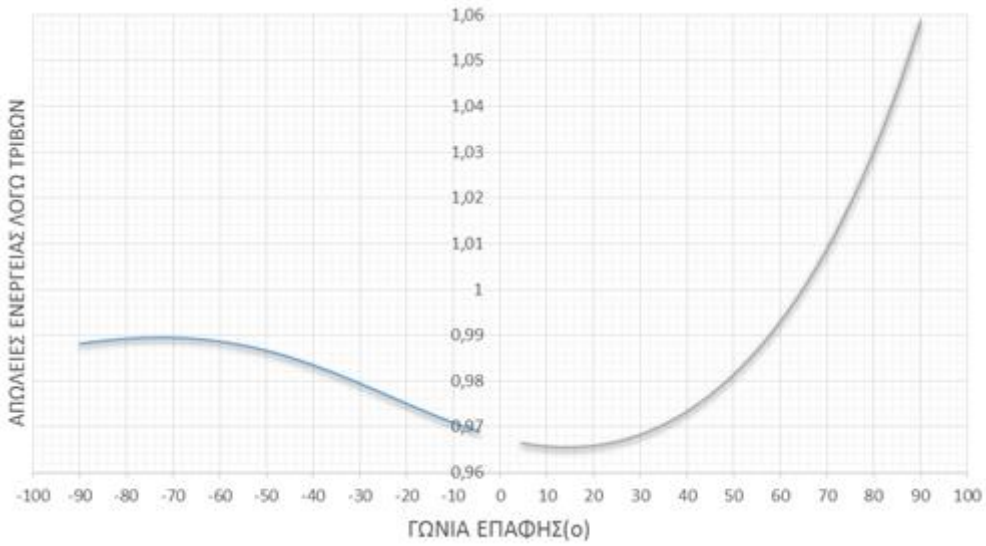
Οι παράμετροι που μελετώνται παραμετρικά είναι η γωνία επαφής της φυσαλίδας με την επιφάνεια *(angle)* και το ποσοστό κάλυψης της επιφάνειας από το μήκος του πόρου *(chord).* Επιλέγεται σταθερή τιμή $Re = 0.012726$ θεωρώντας ότι από το μικροκαναλιού ρέει νερό, όπως και στο 3-D μοντέλο που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ειδικότερα, οι γωνίες επαφής αλλάζουν παραμετρικά μέσω αλλαγής της γεωμετρίας. Μετακίνηση του κέντρου του κύκλου κατά τον y άξονα σύμφωνα με τη σχέση $-\frac{chord}{2\cdot\tan(angle)}$ και αλλαγή της διάστασης της ακτίνας σύμφωνα με τη σχέση $\frac{chord}{2\cdot\sin(angle)}$ επιφέρει αλλάγές στην γωνία επαφής της επιφάνειας της φυσαλίδας με το τοίχωμα.

Κατά την επίλυση επιλέγονται 20 διαφορετικές γωνίες από $0° - 90°$ καθώς και 11 ποσοστά κάλυψης της επιφάνειας από τον πόρο, που κυμαίνονται από $20\ \% - 90\ \%$ της επιφάνειας. Έπειτα από την εύρεση μιας βέλτιστης γωνίας επαφής το πρόβλημα διερευνάται για 20 γωνίες κοντά στο ελάχιστο.

Η ίδια διαδικασία πραγματοποιείται και για αρνητικές γωνίες επαφής $(-90° - 0°)$. Η μόνη διαφορά εμφανίζεται στο πρόσημο στη σχέση μετακίνησης του κύκλου που σχηματίζεται.

3.6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

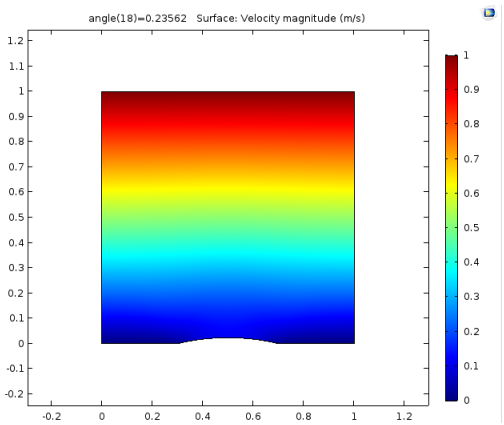
Αρχικά, πραγματοποιείται παραμετρική μελέτη της γωνίας επαφής της φυσαλίδας ως προς την επιφάνεια με σκοπό την εύρεση μιας γωνίας επαφής για την οποία οι απώλειες ενέργειας λόγω τριβών *(Viscous Dissipation-σχέση 11)* γίνονται ελάχιστες. Το ελάχιστο εμφανίζεται στις θετικές τιμές γωνιών. Ειδικότερα, το ελάχιστο εμφανίζεται στην τιμή των 13.5° όπου απώλειες αντιστοιχούν σε 0.9656 (αδιάστατο) (Σχήμα 23).



Σχήμα 23: *Διάγραμμα απωλειών ενέργειας λόγω τριβών (Viscous Dissipation) συναρτήσει της γωνίας επαφής της φυσαλίδας με την επιφάνεια, εύρεση ελαχίστου στις θετικές γωνίες επαφής* (13.5°).

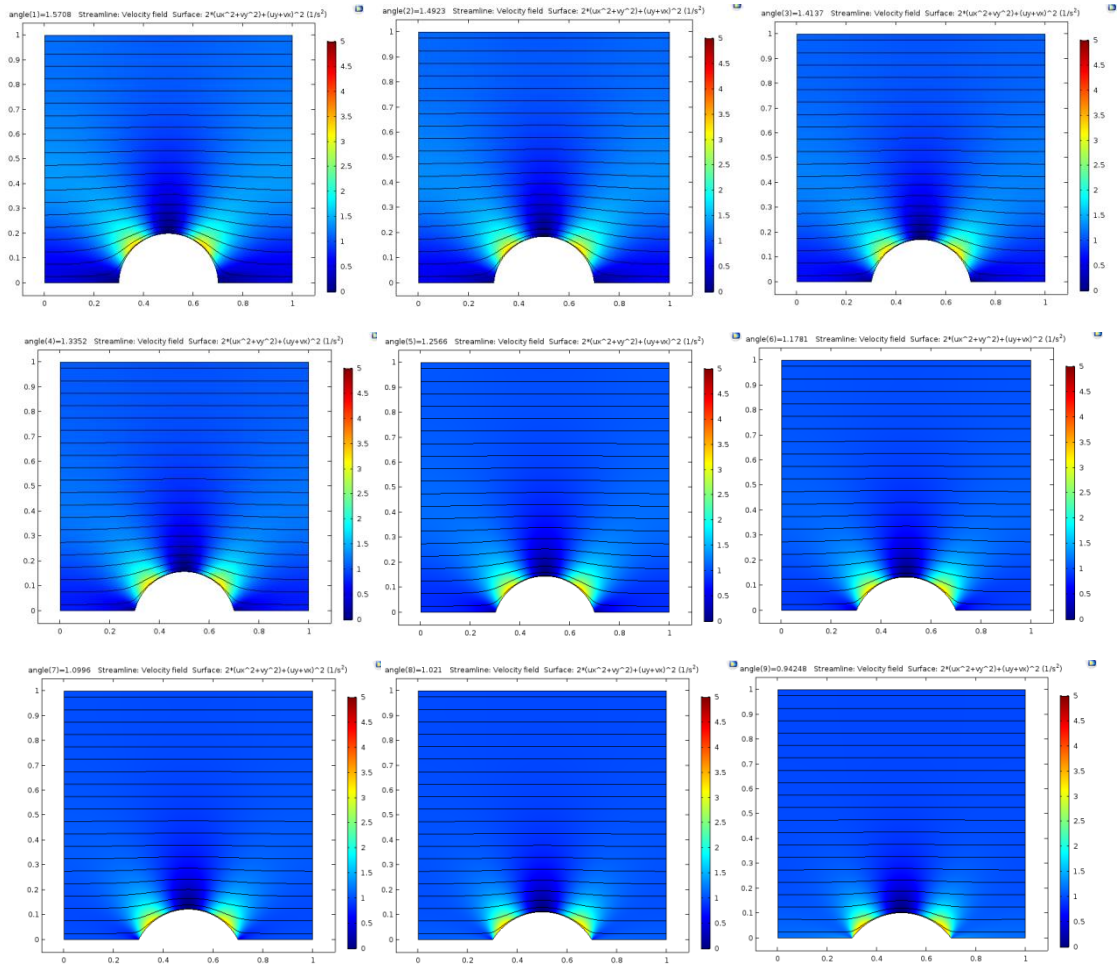
Η τιμή της γωνίας επαφής 13.5° συνάδει με βιβλιογραφικά δεδομένα που δείχνουν ότι οι ελάχιστες απώλειες ενέργειας λόγω τριβών προκύπτουν για γωνίες επαφής κοντά στις 9° [10].

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το *διάγραμμα ισοϋψών* (Σχήμα 24) του μέτρου της ταχύτητας για την γωνία επαφής στην οποία παρουσιάζεται το ελάχιστο.



Σχήμα 24: *Προφίλ της ταχύτητας στο υπολογιστικό χωρίο όταν η γωνία επαφής ισούται με* 13.5° *ώστε να εμφανίζονται οι ελάχιστες απώλειες λόγω τριβών.*

Ακολουθούν τα *διαγράμματα ισοϋψών* των απωλειών ενέργειας λογω τριβών (Viscous Dissipation) (Σχήμα 25), όπως έχει υπολογιστεί από τις αδιάστατες εξισώσεις Navier-Stokes καθώς και οι ροϊκές γραμμές για διαφορετικές γωνίες επαφής.

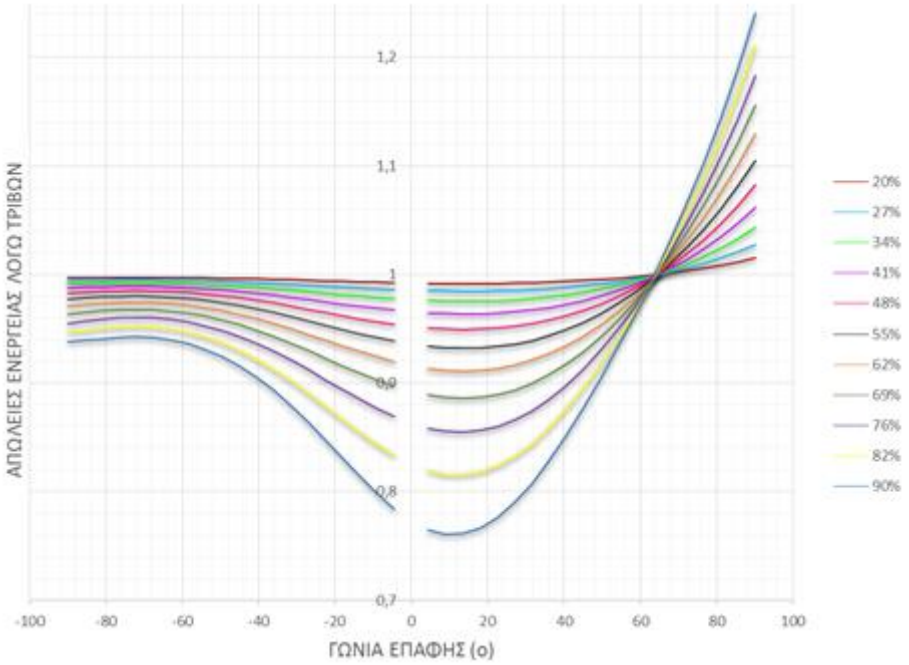


Σχήμα 25: *Διάγραμμα ισοϋψών* των απωλειών ενέργειας λόγω τριβών (Viscous Dissipation), όπως έχει υπολογιστεί από τις αδιάστατες εξισώσεις Navier-Stokes, και οι ροϊκές γραμμές για τις διαφορετικές γωνίες επαφής.

Οι αποτελέσματα δείχνουν μια σταδιακή αλλαγή της κατανομής της απώλειας ενέργειας λόγω τριβών όταν μεταβάλλεται η γωνία επαφής θ. Για μικρές γωνίες, ο ρυθμός απωλειών είναι μεγαλύτερός κοντά στις γωνίες της φυσαλίδας, όπου η συνθήκη μη ολίσθησης πάνω στο τοίχωμα μετατρέπεται απότομα σε συνθήκη ολίσθησης. Η απότομη αλλαγή προκαλεί ιδιάζουσα συμπεριφορά του πεδίου ταχυτήτων-πίεσης ακριβώς στα σημεία αλλαγής της συνοριακής συνθήκης (ιδιάζοντα σημεία) που μεταφράζεται σε τοπικά αυξημένες απώλειες. Καθώς αυξάνεται η γωνία επαφής η ιδιάζουσα συμπεριφορά φθίνει με αποτέλεσμα τη μείωση των τοπικών απωλειών κοντά στα ιδιάζοντα σημεία (Σχήμα 23, αύξηση από 0° σε 13.5°). Ταυτόχρονα όμως με την αύξηση της γωνίας επαφής, η φυσαλίδα δρα σαν εμπόδιο στη ροή και έτσι οι τοπικές απώλειες εντείνονται σε σημεία πιο κοντά στο κέντρο της

φυσαλίδας (Σχήμα 25), με αποτέλεσμα την αύξηση των συνολικών απωλειών πέρα από τη βέλτιστη γωνία επαφής (Σχήμα 23, αύξηση από 13.5° και άνω).

Στη συνέχεια, για όλες τις διαφορετικές γωνίες επαφής ελέγχεται η επίδραση του ποσοστού κάλυψης του χωρίου από τον πόρο, που κυμαίνεται από 20 % – 90 %. Είναι φανερό από το Σχήμα 26 – Πίνακας 1 ότι αύξηση του ποσοστού κάλυψης επιφέρει σταδιακή μείωση των απωλειών. Μάλιστα στην περίπτωση όπου το ποσοστό κάλυψης είναι πολύ μεγάλο, το ελάχιστο μετατοπίζεται από τις 13.5° στις 9°.



Σχήμα 26: *Διάγραμμα* απωλειών ενέργειας λόγω τριβών (Viscous Dissipation), *συναρτήσει της γωνίας επαφής της φυσαλίδας, για διαφορετικά ποσοστά κάλυψης.*

Πίνακας 1: Viscous Dissipation (αδιάστατο) για διάφορες γωνίες επαφής (γραμμές) και ποσοστά κάλυψης (στήλες). Με κίτρινο χρώμα σημειώνεται η ελάχιστη τιμή των απωλειών για κάθε στήλη.

	20 %	27 %	34 %	41 %	48 %	55 %	62 %	69 %	76 %	82 %	90 %
18.0	0.99168	0.98473	0.97551	0.96389	0.94964	0.93241	0.91171	0.88678	0.85634	0.81804	0.76659
13.5	0.99166	0.98467	0.97542	0.96375	0.94942	0.93207	0.91120	0.88597	0.85498	0.81557	0.76150
9.0	0.99174	0.9848	0.97562	0.96404	0.94981	0.93259	0.91185	0.88673	0.85578	0.81614	0.76098
4.5	0.99190	0.98510	0.97610	0.96474	0.95080	0.93392	0.91360	0.88898	0.85860	0.81960	0.76492

Για την εκτενέστερη μελέτη του φαινομένου πραγματοποιείται έλεγχος της επίδρασης των γωνιών κοντά στη γωνία που εμφανίζεται το ελάχιστο. Ειδικότερα μελετώνται 20 διαφορετικές γωνίες από 4.5° έως 31.5°. Σύμφωνα με τα αριθμητικά αποτελέσματα για τιμές του ποσοστού κάλυψης της επιφάνειας από τον πόρο πάνω από 62 % το ελάχιστο μετατοπίζεται σε μικρότερες γωνίες επαφής, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 2. Η διαφορά των δύο πινάκων (Πίνακας 1 και 2) έγκειται στο γεγονός ότι στον δεύτερο Πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εκτενέστερη μελέτης των γωνιών επαφής κοντά στις ελάχιστες απώλειες, ώστε να μπορούν να προσδιοριστούν με μεγαλύτερη ακρίβεια οι γωνίες

επαφής για κάθε ποσοστό κάλυψης στις οποίες οι απώλειες ενέργειας λόγω τριβών γίνονται ελάχιστες.

Πίνακας 2: Viscous Dissipation (αδιάστατο) για διάφορες γωνίες επαφής (γραμμές) και ποσοστά κάλυψης (στήλες). Με κίτρινο χρώμα σημειώνεται η ελάχιστη τιμή των απωλειών για κάθε στήλη.

	20 %	**27 %**	**34 %**	**41 %**	**48 %**	**55 %**	**62 %**	**69 %**	**76 %**	**82 %**	**90 %**
14.5	0.99166	0.98467	0.97542	0.96374	0.94941	0.93207	0.91120	0.88600	0.85508	0.81584	0.76220
13.0	0.99167	0.98468	0.97544	0.96377	0.94943	0.93209	0.91121	0.88598	0.85497	0.81549	0.76123
11.6	0.99169	0.98471	0.97548	0.96383	0.94952	0.93220	0.91135	0.88612	0.85509	0.81548	0.76078
10.2	0.99171	0.98475	0.97554	0.96392	0.94965	0.93237	0.91157	0.88638	0.85536	0.81570	0.76068

Είναι φανερό ότι όσο μεγαλώνει το ποσοστό κάλυψης, η βέλτιστη γωνία επαφής γίνεται μικρότερη ενώ οι απώλειες ενέργειας λόγω τριβών στα ιδιάζονται σημεία αυξάνονται. Ωστόσο, οι συνολικές απώλειες ελαχιστοποιούνται.

3.7. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της υπολογιστικής προσομοίωσης που μελετήθηκε διαπιστώθηκε ότι ολικό ελάχιστο των απωλειών ενέργειας λόγω τριβών εμφανίζεται όταν η γωνία επαφής της φυσαλίδας με την επιφάνεια είναι κοντά στις 13°, και το ποσοστό κάλυψης της επιφάνειας από τον πόρο είναι 90 %. Στα διαγράμματα ισοϋψών είναι φανερή η αύξηση των απωλειών ενέργειας λόγω τριβών στα ιδιάζοντα σημεία ιδιαίτερα όταν οι γωνίες επαφής είναι μικρές. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα αυτά με βιβλιογραφικά δεδομένα [10] οι ελάχιστες δυνατές απώλειες επιτυγχάνονται όταν η γωνία επαφής είναι μικρή (9°), ενώ τα διάγραμματα ισοϋψών έχουν αντίστοιχη μορφή.

4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4°:ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΡΙΒΩΝ ΣΕ 2-D ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΧΩΡΙΟ – COMSOL Multiphysics 5.2.

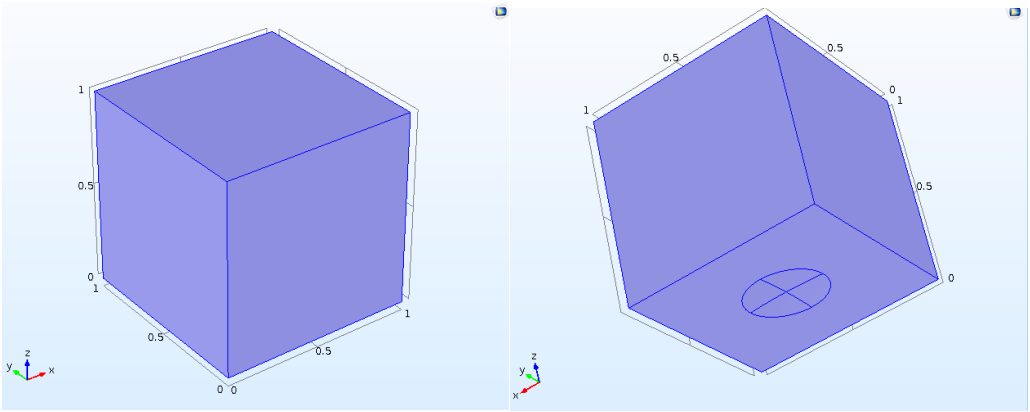
4.1. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΧΩΡΙΟΥ (3-D)-ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ COMSOL Multiphysics 5.2

Για περαιτέρω έρευνα των αποτελεσμάτων που λήφθηκαν από την προσομοίωση του υπολογιστικού χωρίου στο προηγούμενο κεφάλαιο, κατασκευάστηκε ένα 3-D μοντέλο σε πρόγραμμα *COMSOL Multiphysics 5.2*. Το υπολογιστικό χωρίο περιορίζεται σε μια περιοχή κοντά στην πορώδη επιφάνεια που αναπτύσσεται η φυσαλίδα και η επίλυση πραγματο-ποιείται θεωρώντας μόνιμες συνθήκες *(Steady state)* κοντά στην επιφάνεια, όπως και προηγουμένως.

4.2. ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

Το υπολογιστικό χωρίο στο οποίο επιλύονται οι εξισώσεις είναι το ίδιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, με την προσθήκη της τρίτης διάστασης. Η φυσαλίδα κατασκευάζεται γεωμετρικά ώστε να επιτευχθεί η παραμετρική μελέτη της επίδρασης της γωνίας επαφής, του μήκους του πόρου και της απόστασης των πόρων στις απώλειες *(Viscous Dissipation)*.

Οι διαστάσεις υπολογιστικού χωρίου, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 27, είναι 1.0 x 1.0 x 1.0 καθώς επιλέχθηκε να κατασκευαστεί αδιάστατο μοντέλο ώστε να μην υπαρχει επίδραση των διαστάσεων κατά την επίλυση της υπολογιστικής προσομοίωσης. Η ακτίνα του πόρου δίνεται από τη σχέση $\frac{chord}{2\cdot\sin(angle)}$, όπου *chord* και *angle* παράμετροι που αναλύονται στην αντίστοιχη παράγραφο.

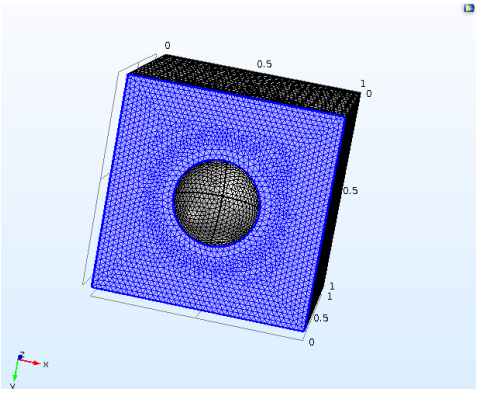


Σχήμα 27: *Αναπαράσταση της γεωμετρίας της υπολογιστικής προσομοίωσης* 3-D μοντέλου σε πρόγραμμα COMSOL Multiphysics 5.2 *για θετικές γωνίες επαφής.*

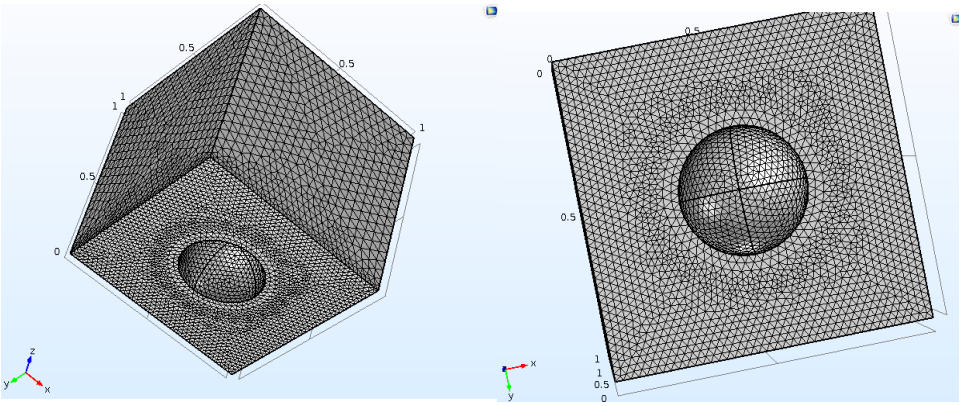
Οι εξισώσεις επιλύονται στο υπολογιστικό χωρίο αδιάστατες, σύμφωνα με το προηγούμενο κεφάλαιο και στις τρεις διαστάσεις (6.1-6.3).

4.3. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

Το πλέγμα είναι μη δομημένο και αποτελείται από τριγωνικές πυραμίδες. Το μέγεθος των στοιχείων κοντά στην επιφάνεια που βρίσκεται η φυσαλίδα είναι $2.5 \cdot 10^{-2} - 2.6 \cdot 10^{-2}$ (Σχήμα 28-Σχήμα 29).

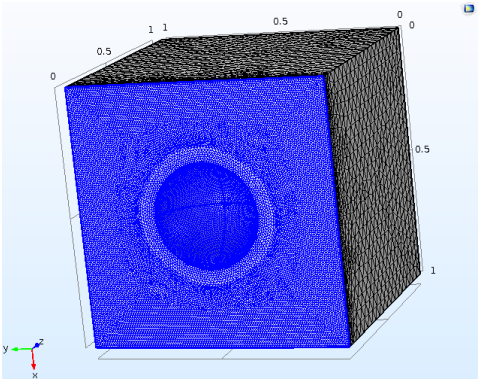


Σχήμα 28: *Πύκνωση του πλέγματος κοντά στην επιφάνεια της φυσαλίδας μέσω καθορισμού του μεγέθους των στοιχείων από* $2.5 \cdot 10^{-2} - 2.6 \cdot 10^{-2}$.



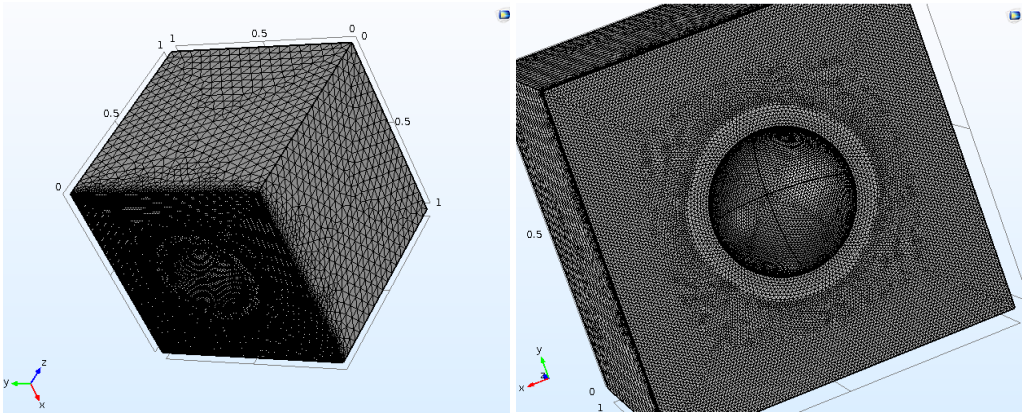
Σχήμα 29: *Διακριτοποίηση υπολογιστικού χωρίου με χρήση μη δομημένου πλέγματος.*

Στη συνέχεια για μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα επιλέγεται ένα πυκνότερο πλέγμα για το οποίο το μέγεθος των στοιχείων κοντά στην επιφάνεια που βρίσκεται η φυσαλίδα είναι $9.0 \cdot 10^{-3} - 9.1 \cdot 10^{-3}$ (Σχήμα 30-Σχήμα 31).



Σχήμα 30: *Πύκνωση του πλέγματος κοντά στην επιφάνεια της φυσαλίδας μέσω καθορισμού του μεγέθους των στοιχείων από* $9.0 \cdot 10^{-3} - 9.1 \cdot 10^{-3}$.

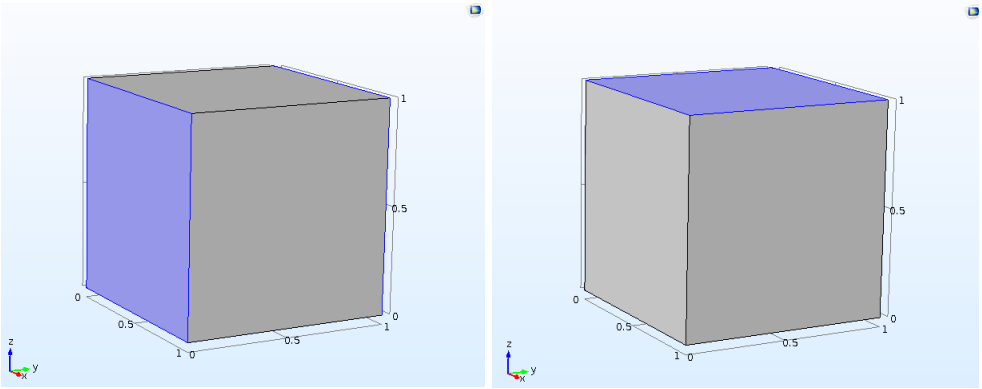
Ενώ στο υπόλοιπο χωρίο ορίστηκε από τις επιλογές που δίνονται από το πρόγραμμα *COMSOL Multiphysics* ως *finer*.



Σχήμα 31: *Διακριτοποίηση υπολογιστικού χωρίου με χρήση μη δομημένου πλέγματος.*

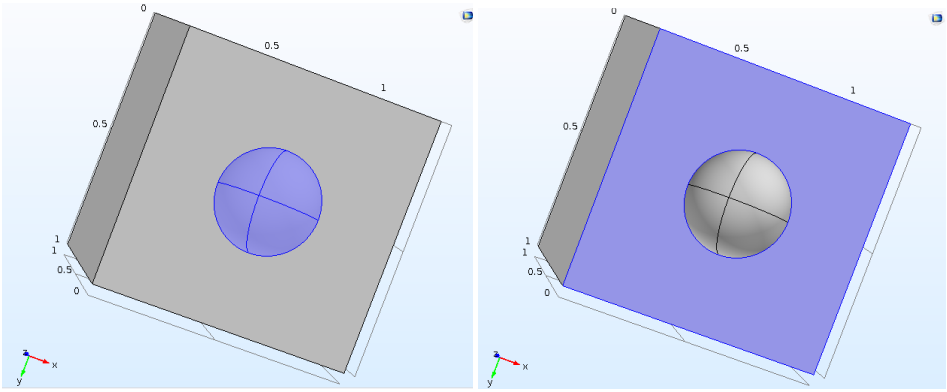
4.4. ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος ορίζονται από το πεδίο *Laminar Flow* του προγράμματος *Comsol Multiphysics 5.2*. Η ταχύτητα όσο και η πίεση στην είσοδο και στην έξοδο (y διεύθυνση) είναι ίσες μεταξύ τους (Σχήμα 32). Στην πάνω επιφάνεια ορίζεται ταχύτητα $U_W = 1$ στην y διεύθυνση, ενώ στις άλλες διευθύνσειςς η ταχύτητα ισούται με μηδέν.



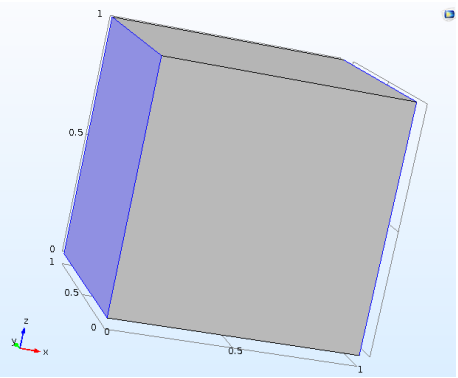
Σχήμα 32: *Προσδιορισμός συνοριακών συνθηκών για τις πλαϊνές ως periodic (αριστερή εικόνα) και για την πάνω επιφάνεια του υπολογιστικού χωρίου ως Sliding Wall με* $U_W = 1$ *(δεξιά εικόνα)* στην y διεύθυνση .

Στο κάτω τοίχωμα ορίζεται συνθήκη μη ολίσθησης στο οποίο η ταχύτητα ειναι μηδέν, ενώ στο τοίχωμα της φυσαλίδας ορίζεται συνθήκη ολίσθησης *(Σχήμα 33)*.



Σχήμα 33: *Προσδιορισμός συνοριακών συνθηκών για την επιφάνεια της φυσαλίδας ως Slip Boundary condition (αριστερή εικόνα) και το υπόλοιπο κάτω τοίχωμα ως τοίχωμα No slip (δεξιά εικόνα).*

Το χωρίο είναι συμμετρικό στην x διεύθυνση (Σχήμα 34). Ισχύει ότι $u \cdot n = 0$ και $K - (K \cdot n)n = 0$, όπου $K = [\mu(\nabla u + (\nabla u)^T]n$.

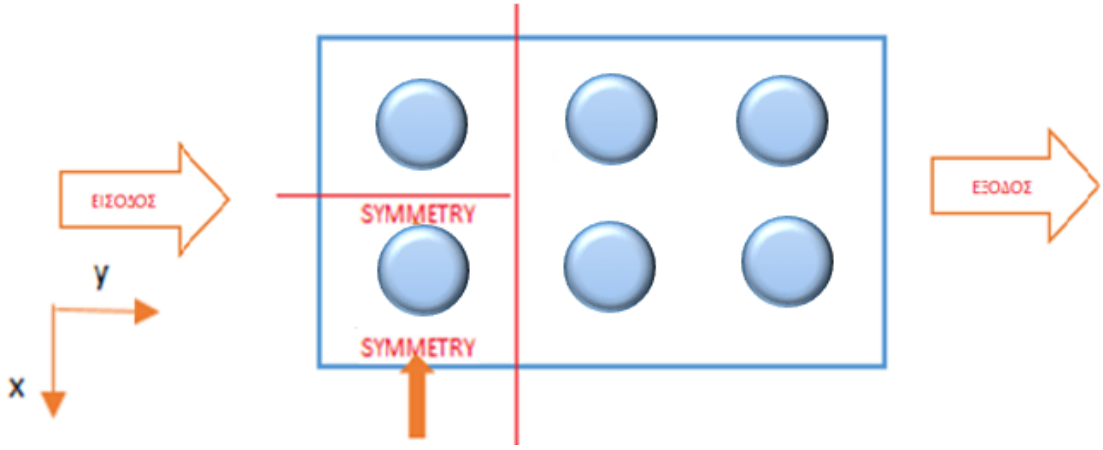


Σχήμα 34: *Προσδιορισμός οριακών συνθηκών για τις πλαϊνές ως symmetry στην* x *διεύθυνση.*

Επίσης ορίζεται ένα μηδενικό σημείο πίεσης, που αποτελεί σημείο αναφοράς. Τέλος, οι εξισώσεις επιλύονται για ρ=1 και μ=(1/Re), ώστε να επιτευχθεί η αδιαστατοποίηση του μοντέλου.

4.5. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Οι παράμετροι που μελετώνται παραμετρικά είναι η γωνία επαφής της φυσαλίδας με την επιφάνεια *(angle)*, το ποσοστό κάλυψης της επιφάνειας από τον πόρο κατα μήκος *(chord)* και κατά πλάτος *(depth).* Για να γίνει πιο κατανοητή η διαφορά ανάμεσα στο προσδιορισμό του ποσοστού κάλυψης της επιφάνειας από τον πόρο και της απόστασης των πόρων κατασκευάζεται το ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 35). Η απόσταση των πόρων μεταβάλλεται κατά τη x διεύθυνση, δηλαδή την διευθυνση όπου έχει οριστεί ως συνοριακή συνθήκη Symmetry.



Σχήμα 35: *Σχηματική αναπαράσταση κάτοψης υπολογιστικού χωρίου. Αριστερά είναι η είσοδος του νερού, δεξιά η έξοδος. Το βέλος δείχνει το χωρίο που προσομοιώνεται στην συγκεκριμένη παράγραφο και τις πλευρές που έχουν οριστεί οι αντίστοιχες συνοριακές συνθήκες.*

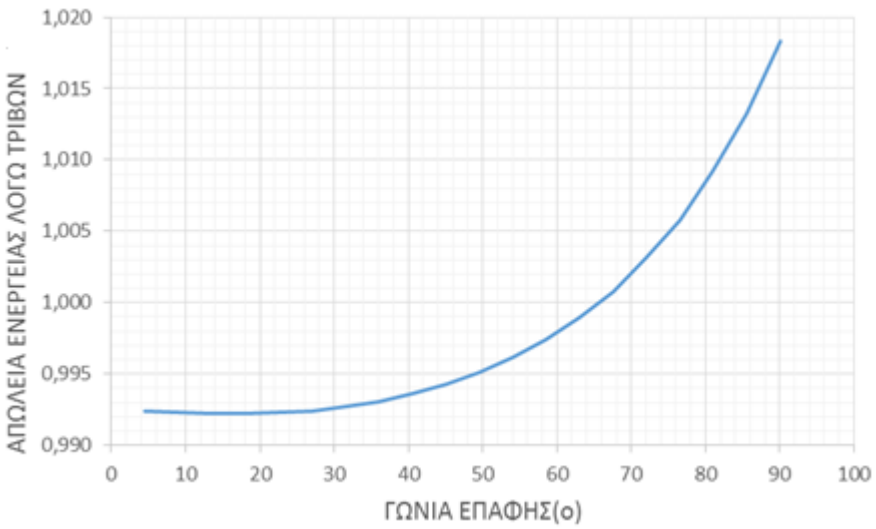
Επιλέγεται σταθερή τιμή $Re = 0.012726$ θεωρώντας ότι από το μικροκανάλι ρέει νερό. Ειδικότερα, οι γωνίες επαφής αλλάζουν παραμετρικά μέσω αλλαγής της γεωμετρίας. Μετακίνηση του κέντρου του κύκλου κατά τον z άξονα σύμφωνα με τη σχέση $-\frac{chord}{2\cdot\tan(angle)}$ και αλλαγή της διάστασης της ακτίνας σύμφωνα με τη σχέση $\frac{chord}{2\cdot\sin(angle)}$ επιφέρει αλλάγές στην γωνία επαφής της επιφάνειας της φυσαλίδας με το τοίχωμα. Η απόσταση των πόρων μελετάται παραμετρικά αλλάζοντας την τιμή του *depth* και ορίζοντας ότι η σφαίρα μετακινείται στον y άξονα κατά $\frac{depth}{2}$ και ηεπιφάνεια στην y διεύθυνση του κύβου ορίζεται από το *depth.*

Κατά την επίλυση επιλέγονται 20 διαφορετικές γωνίες από $0° - 90°$ καθώς και 11 διαφορετικές τιμές για το ποσοστό κάλυψης της επιφάνειας από τον πόρο, που κυμαίνονται από $20\ \% - 90\ \%$. Έπειτα από την εύρεση μιας βέλτιστης γωνίας επαφής το πρόβλημα διερευνάται για 20 γωνίες κοντά στο ελάχιστο. Επίσης, για 6 τιμές κοντά στο ελάχιστο

διερευνάται η επίδραση του ποσοστού κάλυψης της επιφάνειας του πόρου κάτά πλάτος (ποσοστό μείωσης έως $-40\ \%$ και ποσοστό αύξησης έως $100\ \%$). Δε μελετώνται αρνητικές γωνίες καθώς τα αποτελέσματα από την 2-D προσομοίωση, που μελετήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, έδειξαν ότι η ελάχιστη τιμή των απωλειών εμφανίζεται για θετικές γωνίες επαφής.

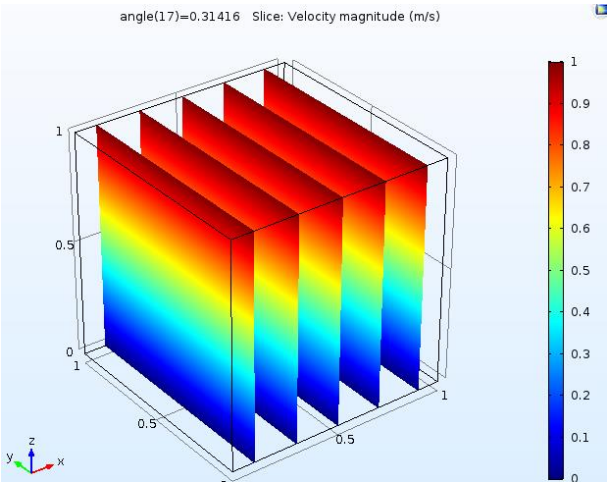
4.6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για την εύρεση της γωνίας για την οποία η τιμή των απωλειών ενέργειας λόγω τριβών *(Viscous Dissipation),* που υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση 11, γίνεται ελάχιστη στην 3-D προσομοίωση πραγματοποιείται παραμέτρική μελέτη της γωνίας επαφής της φυσαλίδας ως προς την επιφάνεια (Σχήμα 36). Διαπιστώνεται ότι η τιμή των απωλειών ενέργειας λόγω τριβών γίνεται ελάχιστη 0.99291 (αδιάστατο) όταν η γωνία επαφής είναι $18°$.



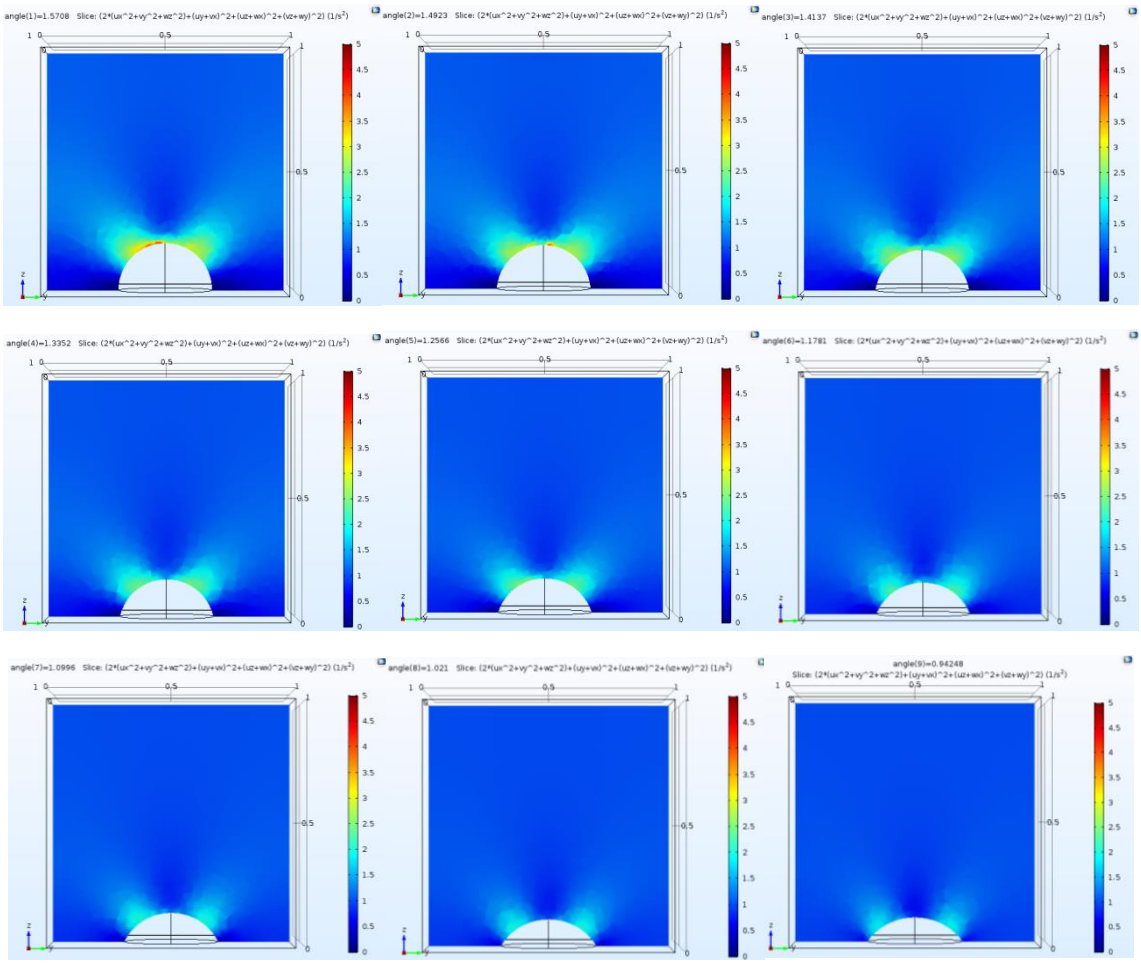
Σχήμα 36: *Διάγραμμα απωλειών ενέργειας λόγω τριβών (Viscous Dissipation) συναρτήσει της γωνίας επαφής της φυσαλίδας με την επιφάνεια, εύρεση ελαχίστου στις* $18°$.

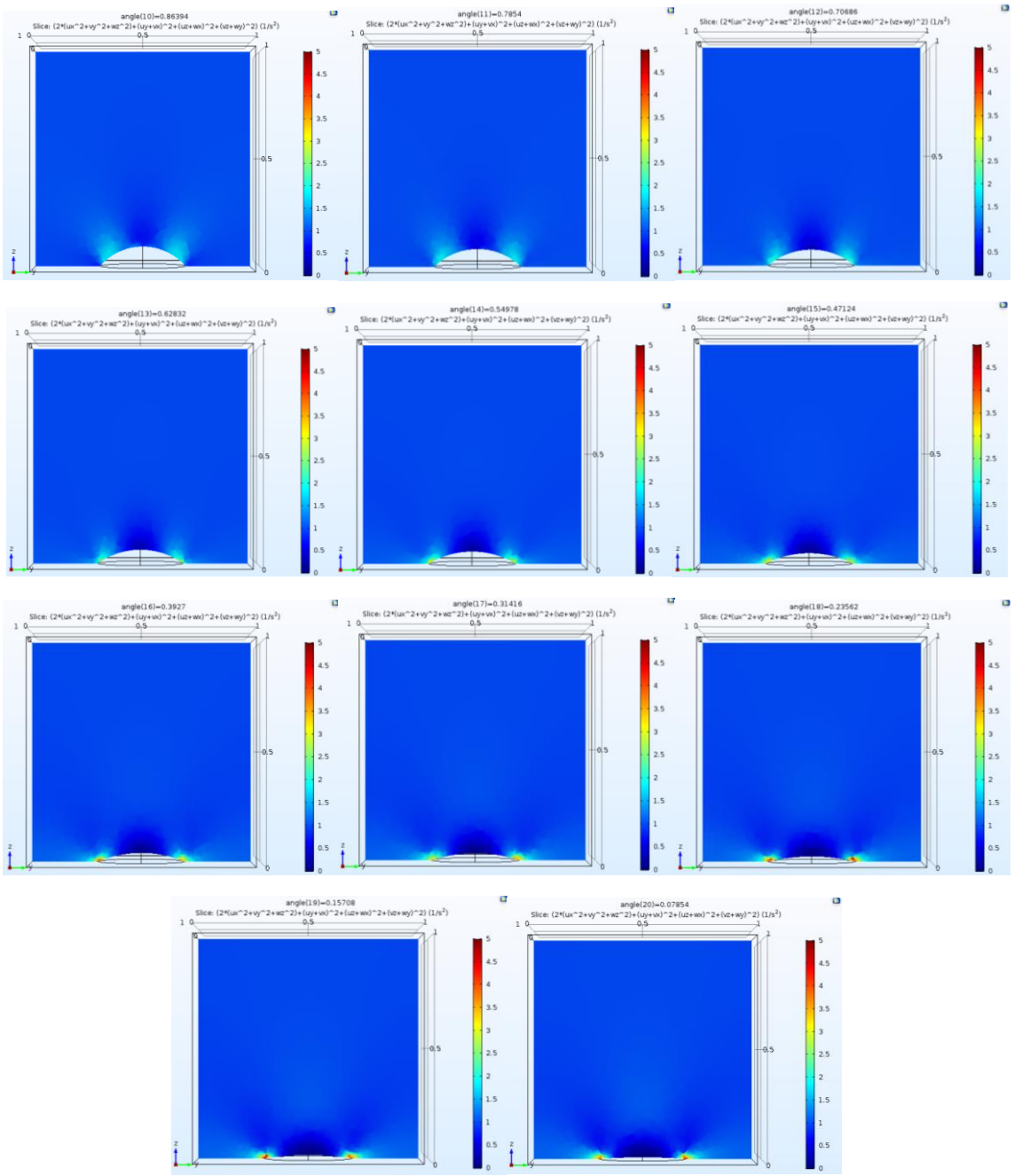
Στη συνέχεια παρουσιάζεται το *διάγραμμα ισοϋψών* της ταχύτητας (Σχήμα 37) για την γωνία επαφής στην οποία παρουσιάζεται το ελάχιστο. Η ροή είναι διαμορφωμένη 0 στην επιφάνεια, σύμφωνα με τη συνθήκη μη ολίσθησης, και 1 στην πάνω επιφάνεια, όπως ορίζεται από τις συνοριακές συνθήκες.



Σχήμα 37: *Προφίλ της ταχύτητας στο υπολογιστικό χωρίο όταν η γωνία επαφής ισούται με* $18°$*ώστε να εμφανίζονται ελάχιστες απώλειες ενέργειας λόγω τριβών (Viscous Dissipation).*

Ακολουθούν τα *διαγράμματα ισοϋψών* των απωλειών ενέργειας λόγω τριβών *(Viscous Dissipation) (Σχήμα 38)*, όπως έχουν υπολογιστεί από τις αδιάστατες εξισώσεις *Navier-Stokes* με τη χρήση του αραιού πλέγματος αλλά και του πυκνού.

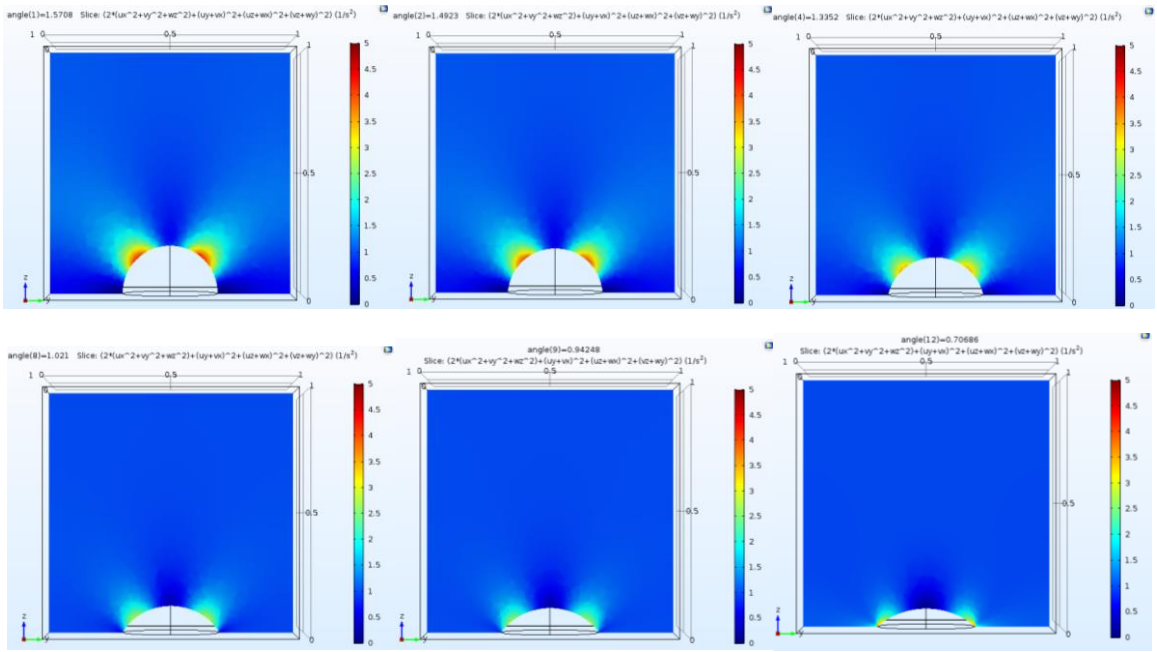




Σχήμα 38: *Διάγραμμα ισοϋψών των απωλειών ενέργειας λόγω τριβών (Viscous Dissipation), όπως έχει υπολογιστεί από τις αδιάστατες εξισώσεις Navier-Stokes, για διαφορετικές γωνίες επαφής από* $90°$ *έως* $0°$.

Διαπιστώνουμε ότι οι απώλειες ενέργειας λόγω τριβών παρουσιάζουν μικρότερες τιμές κοντά στις γωνίες της φυσαλίδας, που το τοίχωμα μεταβαίνει από συνθήκη μη ολίσθησης σε συνθήκη ολίσθησης, σε σχέση με την 2-D υπολογιστική προσομοίωση. Αυτό οφείλεται στη διαμόρφωση του πλέγματος. Οι έντονη αύξηση των απωλειών που παρουσιάζεται κοντά στο όριο στο 2-D χωρίο, περιορίζεται σε μια πολύ μικρή περιοχή που απαιτεί πυκνότερο πλέγμα που μελετάται στη συνέχεια. Ωστόσο, στο σύνολό τους οι απώλειες είναι αντίστοιχες με την 2-D υπολογιστική προσομοίωση.

Διαπιστώνεται ότι η τιμή των απωλειών ενέργειας λόγω τριβών (Viscous Dissipation) όταν χρησιμοποιείται το πυκνότερο πλέγμα γίνεται ελάχιστη 0.99219 όταν η γωνία επαφής είναι $18°$ (Σχήμα 39). Η απόκλιση ανάμεσα σε αραιό και πυκνό πλέγμα είναι 0.07 %. Τα διαγράμματα ισοϋψών των απωλειών ενέργειας λόγω τριβών είναι πιο λεπτομερή όπως φαίνονται παρακάτω.



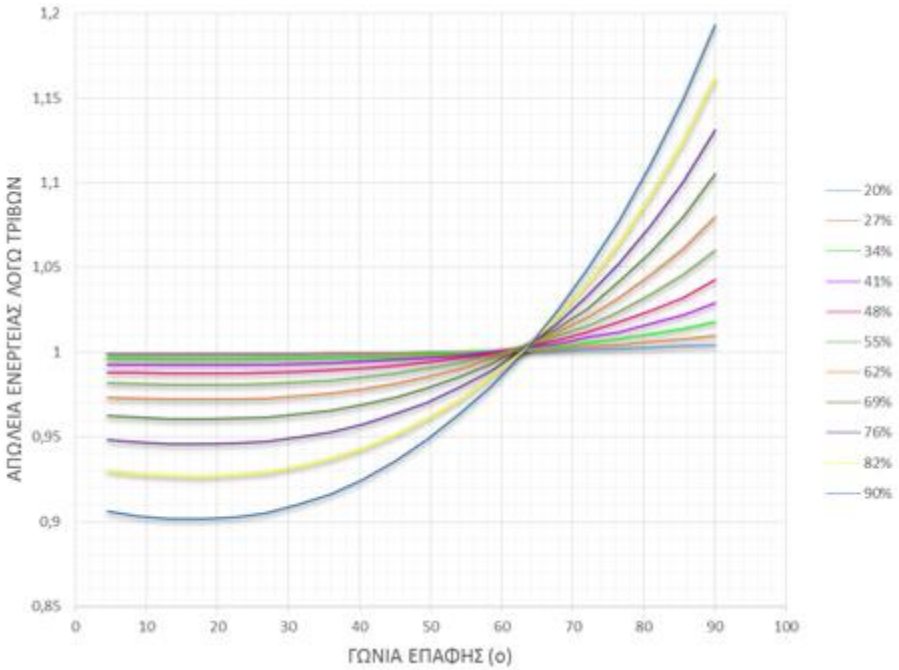
Σχήμα 39: *Διάγραμμα ισοϋψών* των απωλειών ενέργειας λόγω τριβών (Viscous Dissipation), όπως έχει υπολογιστεί από τις αδιάστατες εξισώσεις Navier-Stokes, για διαφορετικές γωνίες επαφής..

Είναι φανέρο ότι κοντά στην επιφάνεια της φυσαλίδας είναι μεγάλη η επίδραση του πλέγματος για την 3-D υπολογιστική προσομοίωση. Ωστόσο τα αριθμητικά αποτελέσματα κοντά στο ελάχιστο δεν διαφέρουν ιδιαίτερα. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται αρχικά για την παραμετρική μελέτη το αραιό πλέγμα.

Τα αποτελέσματα δείχνουν μια σταδιακή αλλαγή της κατανομής των απωλειών ενέργειας λόγω τριβών όταν μεταβάλεται η γωνία επαφής θ. Για μικρές γωνίες οι απώλειες είναι μεγαλύτερες κοντά στις γωνίες της φυσαλίδας, όπου η συνθήκη μη ολίσθησης πάνω στο τοίχωμα μεταβαίνει σε συνθήκη ολίσθησης χωρίς διάτμηση στην επιφάνεια της φυσαλίδας. Έτσι, η ροή του ρευστού κοντά στην επιφάνεια είναι σημαντικά μεγαλύτερη για μικρές γωνίες επαφής, ώστε να εμφανίζονται μεγάλη κλίση της ταχύτητας και κατά συνέπεια μεγάλες απώλεις κοντά στις γωνίες.

Στη συνέχεια, για όλες τις διαφορετικές γωνίες επαφής ελέγχεται η επίδραση του ποσοστού κάλυψης της επιφάνειας από τον πόρο, που κυμαίνονται από $20\ \% - 90\ \%$. Είναι φανερό από το Σχήμα 40 ότι αύξηση του ποσοστού κάλυψης επιφέρει σταδιακή μείωση των απωλειών (Viscous Dissipation), ενώ όταν η γωνία επαφής της φυσαλίδας είναι $63\ °$ το ποσοστό κάλυψης δεν επιδρά στις απώλειες. Γενικά το ελάχιστο σε όλες τις περιπτώσεις

εμφανίζεται στις 18 °, με εξαίρεση την περίπτωση όπου το ποσοστό κάλυψης είναι 27 % που το ελάχιστο παρουσιάζεται για τη γωνία 13.5°.



Σχήμα 40: *Διάγραμμα απωλειών ενέργειας λόγω τριβών (Viscous Dissipation) συναρτήσει της γωνίας επαφής της φυσαλίδας με την επιφάνεια, για τις διαφορετικές τιμές του ποσοστού κάλυψης της επιφάνειας από τον πόρο.*

Με την αύξηση της γωνίας επαφής, η διατμητική τάση κοντά στα σημεία επαφής του τοιχώματος και της φυσαλίδας μειώνεται, ενώ η στατική πίεση αυξάνεται και διαφέρει μεταξύ της εμπρός και πίσω μισής διεπιφάνειας της φυσαλίδας [10], με αποτέλεσμα να δημιουργούνται μεγάλες τριβές για μεγάλες γωνίες επαφής. Σε μεγάλες γωνίες επαφής και υψηλό ποσοστό κάλυψης διαφαίνεται λοιπόν ότι οι απώλειες ενέργειας λόγω τριβών είναι σημαντικές. Αυτό συμβαίνει διότι οι φυσαλίδες είναι πολύ κοντά μεταξύ τους και προεξέχουν έντονα με αποτέλεσμα η επιφάνεια ναι είναι τραχεία και το ρευστό που ρέει στην επιφάνεια της φυσαλίδας να ασκεί σε αυτή σημαντικές πιέσεις με αποτέλεσμα οι τριβές να αυξάνονται.

Πίνακας 3: Viscous Dissipation (αδιάστατο) για διάφορες γωνίες επαφής (γραμμές) και ποσοστά κάλυψης (στήλες). Με κίτρινο χρώμα σημειώνεται η ελάχιστη τιμή των απωλειών για κάθε στήλη.

	20 %	27 %	34 %	41 %	48 %	55 %	62 %	69 %	76 %	82 %	90 %
22.5	0.99923	0.99796	0.99580	0.99245	0.98761	0.98098	0.97223	0.96086	0.94620	0.92729	0.90256
18.0	0.99920	0.99793	0.99573	0.99234	0.98752	0.98081	0.97199	0.96054	0.94573	0.92664	0.90136
13.5	0.99920	0.99792	0.99576	0.99240	0.98758	0.98094	0.97219	0.96076	0.94602	0.92702	0.90169

Στη συνέχεια πραγματοποιείται εκτενέστερος έλεγχος κοντά στο ελάχιστο όπου το ελάχιστο παρουσιάζει διακυμάνεις μεταξύ 18.9° και 15.3°.

Πίνακας 4: Viscous Dissipation (αδιάστατο) για διάφορες γωνίες επαφής κοντά στο ελάχιστο (γραμμές) και ποσοστά κάλυψης (στήλες). Με κίτρινο χρώμα σημειώνεται η ελάχιστη τιμή των απωλειών για κάθε στήλη.

	20 %	27 %	34 %	41 %	48 %	55 %	62 %	69 %	76 %	82 %	90 %
22.5	0.99924	0.99796	0.99578	0.99242	0.98761	0.98096	0.97224	0.96085	0.94617	0.92732	0.90253
18.9	0.99921	0.99792	0.99571	0.99235	0.98753	0.98085	0.97202	0.96054	0.94575	0.92671	0.90138
15.3	0.99920	0.99793	0.99572	0.99238	0.98752	0.98088	0.97203	0.96063	0.94586	0.92670	0.90131
11.7	0.99921	0.99796	0.99579	0.99245	0.98765	0.98105	0.97236	0.96104	0.94636	0.92735	0.90218
8.1	0.99921	0.99799	0.99585	0.99258	0.98789	0.98142	0.97283	0.96163	0.94719	0.92861	0.90377

Ακολουθεί η παραμετρική μελέτη της επίδρασης της απόστασης ανάμεσα στους πόρους. Αυτό επιτυγχάνεται επιδρώντας στο πλάτος του υπολογιστικού χωρίου ως προς τον x άξονα όπου έχει οριστεί ως συνοριακή συνθήκη Symmetry. Διαπιστώνεται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση ανάμεσα στους πόρους τόσο μεγαλύτερες είναι οι απώλειες λόγω τριβών. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 5.

Πίνακας 5: Viscous Dissipation (αδιάστατο) για διάφορες γωνίες επαφής (γραμμές) και ποσοστά κάλυψης της επιφάνειας των πόρων κατά πλάτος της επιφάνειας (στήλες). Με κίτρινο χρώμα σημειώνεται η ελάχιστη τιμή των απωλειών για κάθε στήλη.

	- 40 %	- 88 %	+ 16 %	+ 44 %	+ 72 %	+ 100 %
22.5	0.59294	0.87297	1.15298	1.43299	1.71301	1.99301
18.9	0.59287	0.87291	1.15293	1.43296	1.71295	1.99297
15.3	0.59288	0.87290	1.15295	1.43295	1.71296	1.99295
11.7	0.59294	0.87299	1.15301	1.43301	1.71303	1.99302

Είναι φανερό από τα αποτελέσματα ότι καθώς υπάρχει διακύμανση στη βέλτιστη γωνία επαφής για τις διαφορετικές αποστάσεις των πόρων. Ωστόσο, η ποσοστιαία απόκλιση βρίσκεται στα πλαίσια του σφάλματος.

4.7. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Σύμφωνα με την 3-D υπολογιστική προσομοίωση για τον έλεγχο της επίδρασης της γωνίας επαφής της φυσαλίδας, του ποσοστού κάλυψης της επιφάνειας κατά μήκος και κατά πλάτος του πόρουπροσδιορίζονται οι αντίστοιχες τιμές ώστε να επιτυγχάνονται οι ελάχιστες δυνατές απώλειες, που υπολογίζονται σύμφωνα με τη σχέση 11. Τα αποτελέσματα αυτά δίνουν τη δυνατότητα κατανόησης ότι για να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες ενέργειας λόγω τριβών πρέπει η φυσαλίδα να δημιουργεί έναν μηνίσκο που καλύπτει τον πόρο δημιουργώντας μικρές γωνίες επαφής , ενώ ο πόρος επιθυμείται να είναι κατά το δυνατό μεγαλύτερος ώστε να επιτυγχάνεται μεγάλο ποσοστό κάλυψης. Η απόσταση μεταξύ των πόρων πρέπει να είναι η ελάχιστη δυνατή. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι σημαντική η επίδραση του πλέγματος όχι τόσο στα αριθμητικά αποτελέσματα όσο στην κατανομή των τιμών κοντά στην επιφάνεια της φυσαλίδας, που οι διακυμάνσεις είναι έντονες.

5. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο:ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μέσω της υπολογιστικής προσομοίωσης της ροής νερού σε πορώδες μικροκανάλι που πραγματοποιήθηκε μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι σημαντική επίδραση στις απώλειες παίζει η παροχή αέρα από τους πόρους του μικροκαναλιού. Ειδικότερα, μεγάλη παροχή αέρα δεν επιφέρει μείωση των απωλειών ενέργειας λόγω τριβών σε αντίθεση με παροχές μικρότερες από 0.0467 ml/s που ελαττώνουν τις απώλειες. Επιπρόσθετα, όσο αυξάνεται η παροχή του αέρα φυσαλίδες δημιουργούνται ταχύτατα και ρέουν προς την έξοδο δημιουργώντας συσσωματώματα. Αυτό οδηγεί σε διακύμανση των απωλειών. Τα παραπάνω οδηγούν στην ανάγκη προσέγγισης του φαινομένου σε μικρότερη κλίμακα κοντά στη φυσαλίδα ώστε να διαπιστωθεί πως η γεωμετρία και το μέγεθος της φυσαλίδας επιδρά στη ροή.

Τα αποτελέσματα αυτά συνάδουν με βιβλιογραφικά δεδομένα που αναφέρουν ότι αν η τιμή της γωνίας επαφής της φυσαλίδας με την επιφάνεια περάσει μια κρίσιμη τιμή, η τριβή της επιφάνειας γίνεται μεγαλύτερη από εκείνη της επίπεδης επιφάνειας χωρίς ολίσθηση. Επομένως, η γεωμετρία των φυσαλίδων διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στις τριβές που αναπτύσσονται στο μικροκανάλι κατά είσοδο του ρευστού στο εσωτερικό του και μπορεί να μην συνεισφέρει θετικά στην μείωση της τριβής [2].

Για το λόγο αυτό ακολούθησε η παραμετρική μελέτη της γεωμετρίας της φυσαλίδας σε υπολογιστικό χωρίο κοντά στην επιφάνεια του πόρου. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της υπολογιστικής προσομοίωσης που μελετήθηκε διαπιστώθηκε ότι ολικό ελάχιστο των απωλειών ενέργειας λόγω τριβών εμφανίζεται όταν η γωνία επαφής της φυσαλίδας με την επιφάνεια είναι κοντά στις 13°, και το ποσοστό κάλυψης της επιφάνειας από τον πόρο είναι 90 %. Στα διαγράμματα ισοϋψών είναι φανερή η αύξηση των απωλειών ενέργειας λόγω τριβών στα ιδιάζοντα σημεία ιδιαίτερα όταν οι γωνίες επαφής είναι μικρές. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα αυτά με βιβλιογραφικά δεδομένα [10] οι ελάχιστες δυνατές απώλειες επιτυγχάνονται όταν η γωνία επαφής είναι μικρή (9°), ενώ τα διάγραμματα ισοϋψών έχουν αντίστοιχη μορφή.

Τα αριθμητικά αποτελέσματα αποκαλύπτουν ότι κοντά στα σημεία επαφής του τοιχώματος μη ολίσθησης και της επιφάνειας χωρίς διάτμηση της φυσαλίδας, ο ρυθμός απωλειών ενέργειας γίνεται μέγιστος όταν η φυσαλίδα είναι επίπεδη. Οι διαφορετικές οριακές συνθήκες του τοιχώματος και της φυσαλίδας αυξάνουν τη μεγάλη βαθμίδα ταχύτητας, οδηγώντας σε υψηλά ποσοστά απωλειών. Όταν αυξάνεται η γωνία επαφής της φυσαλίδας, οι απώλειες κοντά στις ασυνέχειες μειώνονται. Ο υπολογισμός των απωλειών στα σημεία επαφής του τοιχώματος μη ολίσθησης με τη φυσαλίδα, ενισχύει αυτήν την παρατήρηση. Από την άλλη πλευρά, φυσαλίδες που προεξέχουν μέσα στο κανάλι της ροής ενεργούν ως εμπόδια και μειώνουν το αποτελεσματικό ύψος του καναλιού, αυξάνοντας έτσι τις απώλειες στον κύριο όγκο της ροής. Συνεπώς, η αύξηση της γωνίας επαφής της φυσαλίδας έχει δύο αντίθετες επιπτώσεις:

- Μείωση των απωλειών ενέργειας λόγω τριβών κοντά στα σημεία επαφής της επιφάνειας με τη φυσαλίδα
- Αύξηση των απωλειών ενέργειας λόγω τριβών (Viscous Dissipation) στον κύριο όγκο του καναλιού

Αυτό εξηγεί την ύπαρξη μιας βέλτιστης γωνίας επαφής μεγαλύτερης από 0° για την οποία οι συνολικές απώλειες στο κανάλι γίνονται ελάχιστες [10].

Για την υλοποίηση μιας 3-D υπολογιστικής προσομοίωσης για τον έλεγχο της επίδρασης της γωνίας επαφής της φυσαλίδας, του ποσοστού κάλυψης της επιφάνειας από τον πόρο κατά μήκος και κατά πλάτος του προσδιορίζονται οι αντίστοιχες τιμές ώστε να επιτυγχάνονται οι ελάχιστες δυνατές απώλειες λόγω τριβών (Viscous Dissipation). Τα αποτελέσματα αυτά δίνουν τη δυνατότητα κατανόησης ότι για να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες πρέπει η φυσαλίδα να δημιουργεί έναν μηνίσκο που καλύπτει τον πόρο δημιουργώντας μικρές γωνίες επαφής ($8.1° \; έως \; 22.5°$), ενώ ο πόρος επιθυμείται να είναι κατά το δυνατό μεγαλύτερος ($ποσοστό \; κάλυψης \; 90 \; \%$). Η απόσταση μεταξύ των πόρων πρέπει να είναι η ελάχιστη δυνατή. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι σημαντική η επίδραση του πλέγματος όχι τόσο στα αριθμητικά αποτελέσματα όσο στην κατανομή των τιμών κοντά στην επιφάνεια της φυσαλίδας.

Το θέμα της γεωμετρίας του πλέγματος στην περίπτωση των τρισδιαστάσεων φυσαλίδων πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω, σύμφωνα με βιβλιογραφικά δεδομένα. Πειραματικά, η κατασκευή της ελεγχόμενης πορώδους επαφάνειας ή το προσχεδιασμένο πλέγμα της φυσαλίδας θα παρουσιάσει συναρπαστικές ευκαιρίες για την χαρτογράφηση και την βελτιστοποίηση των ιδιοτήτων τριβής στις υπερυδρόφοβες επιφάνειες [2].

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. R. M. Santos and M. Kawaji, 2010. “Numerical modeling and experimental investigation of gas-liquid slug formation in a micro channel T-junction”. International Journal of Multiphase Flow, 36(4), 314-323.
2. A. M. J. Davis and E. Lauga, 2009. “Geometric transition in friction for flow over a bubble mattress”. Physics of Fluids 21(1), 011701
3. A. Kawahara, P. M. Y. Chung and M. Kawaji, 2002. “Investigation of two-phase flow pattern, void fraction and pressure drop in a microchannel”. International Journal of Multiphase Flow 28(9), 1411-1435.
4. S. Irandoust and B. Andersson, 1989. “Liquid film in Taylor flow through a capillary”. Industrial and Engineering Chemistry Research 28(11), 1684–1688.
5. K. Fukagata, N. Kasagi, P. Ua-arayaporn, and T. Himeno, 2007. “Numerical simulation of gas-liquid two phase flow and convective heat transfer in a micro tube”. International Journal of Heat and Fluid Flow 28(1), 72-82
6. G. Rosengarten, D.J.E. Harvie and J. Cooper-White, 2006. “Contact angle effects on microdroplet deformation using CFD”. Applied Mathematical Modelling 30(10), 1033-1042.
7. T. Taha and Z. F. Cui, 2006. “CFD modelling of slug flow inside square capillaries”. Chemical Engineering Science 61(2), 665-675.
8. Y. Gao, J. Li, H. C. Shum and H. Chen, 2016. “Drag Reduction by Bubble-Covered Surfaces Found in PDMS Microchannel through Depressurization”. Langmuir 32(19), 4815-4819.
9. N. Vourdas, G. Pashos, G. Kokkoris, A.G. Boudouvis and V.N. Stathopoulos, 2016. “Droplet mobility manipulation on porous media using backpressure”. Langmuir 32(21), 5250-5258
10. A. S. Haase, J. A. Wood and R. G. H. Lammertink, 2016. “Why bumpy is better: The role of the dissipation distribution in slip flow over a bubble mattress”. Physical Reviews Fluids 1(5), 054101.
11. D. Legendre and C. Colin, 2008. “Enhancement of wall friction by fixed cap bubbles”. Physics of Fluids 20(5), 051704.
12. A. Steinberger, C. Cottin-Bizonne, P. Kleimann and E. Charlaix, 2007. “High friction on a bubble mattress”, Nature Materials 6(9), 665-668.
13. J. Hyväluoma, C. Kunert and J. Harting, 2011. “Simulations of slip flow on nanobubble-laden surfaces”, Journal of Physics: Condensed Matter 23(18), 184106.
14. E. Karataya, A. S. Haase, C. W. Visser, C. Sun, D. Lohse, P. A. Tsai, and R. G. H. Lammertink, 2013. “Control of slippage with tunable bubble mattresses”. PNAS Early Edition 110(21), 8422–8426.
15. C. J. Teo and B. C. Khoo, 2014. “Effects of interface curvature on Poiseuille flow through microchannels and microtubes containing superhydrophobic surfaces with transverse grooves and ribs”. Microfluid Nanofluid 17(5), 891-905.
16. J. Hyväluoma and J. Harting, 2008. “Slip Flow Over Structured Surfaces with Entrapped Microbubbles”. Physical Review Letters 100(24), 246001.

17. R. B. Bird, W.E.Stewart and E.N.Lightfoot, 2002. “Transport Phenomena (2nd Edition)”
18. F. M. White, 2011. “Fluid Mechanics (7th Edition)”
19. H. K. Versteeg and W. Malalasekera, 2007. “An Introduction to Computational Fluid Dynamics, the Finite Volume Method (2nd Edition)”
20. Α. Θ. Παπαϊωάννου, 2002. “Μηχανική των Ρευστών (Β΄ ΕΚΔΟΣΗ) ”
21. ANSYS, 2006. Chapter 23.3.2 Volume Fraction Equation, In: User's Guide Ansys Fluent 6.3

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

UDF-Ansys Fluent

Το udf είναι γραμμένο σε γλώσσα προφραμματισμού C, ώστε να είναι δυνατή η αναγνώρισή του από το πρόγραμμα Fluent.

```
/*********************************************************************
vprofile.c

UDF for specifying steady-state velocity profile boundary condition

*********************************************************************/

        DEFINE_PROFILE(inlet_x_velocity, thread, i)
        {
         real x[ND_ND];                /* this will hold the position vector */
         real y;
         real z;
         real um; /* mean velocity */
         real Ly; /* height of the domain */
         real Lz; /* width of the domain */
         real a;
         real b;
         real alpha;
         real m;
         real n;
         face_t f;


         um = 0.9;
         Ly = 15e-4;
         Lz = 15e-4;

         a = Lz/2;
         b = Ly/2;
         alpha = b/a;
         m = 1.7 + 0.5*pow(alpha,(-1.4));
         if (alpha <= 1./3)
           n = 2;
         else
           n = 2 + 0.3*(alpha - 1./3);


         begin_f_loop(f, thread)
```

```
    {
      F_CENTROID(x,f,thread);
      y = x[1];
      z = x[2];
      F_PROFILE(f, thread, i) =  um * ((m+1)/m) * ((n+1)/n) * (1-pow(ABS((y-b)/b),n)) *
(1-pow(ABS((z-a)/a),m));
    }
  end_f_loop(f, thread)
}
```