



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»

**ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΝΑΝΟΕΠΙΣΤΗΜΗΣ
ΚΑΙ ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ**



**Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές»**

Αξιολόγηση καινοτόμων μικρορευστονικών διατάξεων με τη μέθοδο της οπτικής παγίδευσης

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Της Γεωργίας Πολυδεύκη**

Επιβλέπουσα: Μυρσίνη Μακροπούλου

Αθήνα, Φεβρουάριος, 2018

Πρόλογος – Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στον Τομέα Φυσικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών “Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές”, με επιβλέπουσα την Καθηγήτρια κ. Μ. Μακροπούλου και τα μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής κ. Χ. Μάρκου, Διευθυντή Ερευνών του Ινστιτούτου Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. Δημόκριτος και τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Γ. Τσιγαρίδα. Το κυρίως θέμα της εργασίας αφορούσε στην *αξιολόγηση μικρορευστονικών διατάξεων σε συνδυασμό με την τεχνική της οπτικής παγίδευσης*. Στις μελέτες που έγιναν με τη μέθοδο της προσομοίωσης, εξετάστηκε η συμπεριφορά ενός ρευστού (συγκεκριμένα νερού) κατά τη διέλευσή του μέσα από τα μικρορευστονικά κανάλια. Η προσπάθεια της παρουσίασης με περιεκτικό και κατανοητό τρόπο των αποτελεσμάτων που πάρθηκαν από τις προσομοιώσεις, σε συνδυασμό με το προσφερόμενο θεωρητικό υπόβαθρο από τη μηχανική των ρευστών και την οπτική, καθώς και με τα εξαγόμενα των πειραμάτων που έλαβαν χώρα για το σκοπό αυτό, συγκεντρώνεται στην παρούσα εργασία.

Ολοκληρώνοντας την μεταπτυχιακή μου εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους όσους βοήθησαν στην επιτυχή ολοκλήρωση της.

Πρώτα απ’ όλα, θέλω να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα της μεταπτυχιακής εργασίας μου, καθηγήτρια κ. Μ. Μακροπούλου για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση της κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου, καθώς και για την υπομονή και προθυμία της να συνδράμει στην επίλυση οποιουδήποτε προβλήματος προέκυψε σε αυτό το διάστημα.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον καθηγητή κ. Ανδρέα Μπουντουβή της σχολής των Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π., για την πολύτιμη βοήθεια του στην χρήση του λογισμικού Comsol Multiphysics, χωρίς την οποία δε θα ήταν δυνατή η ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Οφείλω ευχαριστίες στον επίκουρο καθηγητή κ. Γ.Τσιγαρίδα για τη βοήθεια, το ενδιαφέρον και τις υποδείξεις του επάνω στο κομμάτι των προσομοιώσεων του

κεφαλαίου 3, με τη χρήση του λογισμικού Comsol με το οποίο αρχικά δεν ήμουν εξοικειωμένη.

Επίσης, ευχαριστώ τον κ. Χ. Μάρκου για τη συμμετοχή του στην τριμελή επιτροπή αξιολόγησης και το χρόνο που διέθεσε ώστε να καταστεί δυνατή κι επιτυχής η τελική μορφή και παρουσίαση αυτής της προσπάθειας.

Θέλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου και στη μεταδιδακτορική ερευνήτρια κ. Δ. Κοτσιφάκη για το πολύτιμο θεωρητικό και πειραματικό υλικό που μου παρείχε και που βοήθησε στην επίτευξη ενός πιο ολοκληρωμένου αποτελέσματος, καθώς και για τις χρήσιμες υποδείξεις της επάνω στη μορφή της εργασίας.

Επίσης είμαι ευγνώμων σε όλη την επιστημονική ομάδα η οποία αποτελείται από τους: κ. Δ. Κοτσιφάκη, κ. Μ. Mackenzie, κ. Μ. Μακροπούλου, κ. Α. Kär, κ. Α. Σεραφεντινίδη για την εμπιστοσύνη που έδειξαν να συμμετάσχω στην επιστημονική μελέτη, η οποία φέρει τον τίτλο “Geometrical effect characterization of femtosecond-laser manufactured glass microfluidic chips based on optical manipulation of sub-micro particles” και δημοσιεύτηκε το Δεκέμβρη του 2017 στο επιστημονικό περιοδικό *Optical Engineering*.

Θέλω να ευχαριστήσω θερμά τους γονείς μου Πολυδεύκη Ιωάννη και Μαρία και την αδερφή μου Πολυδεύκη Περσεφόνη για την αγάπη τους και την συμπαράστασή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους εκείνους που βοήθησαν με οποιονδήποτε τρόπο και με υποστήριξαν στην πορεία μου κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών μου στη Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η οπτική παγίδευση αποτελεί μία πρωτοποριακή μη-επεμβατική τεχνική η οποία παρέχει τη δυνατότητα του ανέπαφου χειρισμού της ύλης, σε μικρομετρικές και νανομετρικές κλίμακες, χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες του φωτός. Οι οπτικές δυνάμεις που είναι υπεύθυνες για το μικροχειρισμό της ύλης οφείλονται στη μεταφορά της ορμής του φωτός και πιο συγκεκριμένα της ακτινοβολίας laser, που λόγω της μονοχρωματικότητας, συμφωνίας και εξαιρετικής κατευθυντικότητας που διαθέτει διευκολύνει την παγίδευση και μεταφορά των μικροδομών. Ταυτόχρονα η μικρορευστονική είναι ένας ανερχόμενος τομέας της τεχνολογίας που επιτρέπει τον ακριβή χειρισμό πολύ μικρών ποσοτήτων ενός υγρού δείγματος. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας αυτής έχει σαν βασικό στόχο την κατασκευή φορητών συσκευών σε ευρεία κλίμακα. Ανήκει στην κατηγορία των λεγόμενων LOC(Lab-on-a-chip) συσκευών, που στην ουσία ενσωματώνουν μία ή περισσότερες εργαστηριακές λειτουργίες σε ένα μόνο τσιπ μερικών mm² έως λίγων cm². Ο συνδυασμός της μεθόδου της οπτικής παγίδευσης με τα μικρορευστονικά κυκλώματα μπορεί να δώσει ένα πλήρες εργαστήριο μικρομετρικής κλίμακας με πολλές δυνατότητες.

Στο πρώτο κεφάλαιο αυτής της εργασίας γίνεται μία αναφορά στην προέλευση των οπτικών δυνάμεων, την ανακάλυψή τους, καθώς και για το πώς εξελίχθηκαν σε χρήσιμο εργαλείο για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών σε πολλούς επιστημονικούς κλάδους. Αφού προηγηθεί μια σύντομη ιστορική αναδρομή που περιλαμβάνει τις βασικότερες κατηγορίες των οπτικών παγίδων, ακολουθεί η φυσική μελέτη των δυνάμεων αυτών μέσω των νόμων της γεωμετρικής αλλά και της κυματικής οπτικής.

Η μικρορευστονική ως υποκατηγορία της μηχανικής των ρευστών, οι φυσικοί νόμοι που διέπουν τα ασυμπίεστα ρευστά και πώς αυτοί διαφοροποιούνται όταν αφορούν σε ροή μέσα στα μικρορευστονικά κανάλια, οι παραδοχές και οι απλοποιήσεις που εφαρμόζονται σε κυκλώματα της τάξεως των μικρόμετρων ή νανόμετρων εξετάζονται στο δεύτερο κεφάλαιο αυτής της εργασίας. Επίσης αναφέρονται οι διαφορετικές μέθοδοι και τα υλικά κατασκευής των συγκεκριμένων κυκλωμάτων με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Ακόμα μελετάται ο τρόπος με τον οποίο έχει συμβάλει η ανάπτυξη της μικρορευστονικής και η εφαρμογές της και σε διαφορετικούς κλάδους της επιστήμης και της βιομηχανίας.

Το τρίτο κεφάλαιο αποτελεί το σημαντικότερο τμήμα αυτής της αναφοράς και περιλαμβάνει το κομμάτι των προσομοιώσεων για τις οποίες χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Comsol Multiphysics. Σε αυτό παρατίθενται τα βήματα της διαδικασίας κατασκευής του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε, από τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά (διαστάσεις, συμμετρίες, σχήμα) έως τη διακριτοποίηση του (επιλογή και κατασκευή πλέγματος βάσει της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων) και την επιλογή των εξισώσεων της ρευστομηχανικής που κυριαρχούν τόσο στα άκρα του κυκλώματος, όσο και στο κυρίως κανάλι. Η επιλογή κάθε νέας παραμέτρου που εισάγεται έως ότου το μοντέλο ολοκληρωθεί συνοδεύεται και από την αντίστοιχη θεωρητική προσέγγιση με σκοπό την αιτιολόγηση της.

Στο τρίτο κεφάλαιο συμπεριλαμβάνονται επίσης και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων τα οποία ήταν αναμενόμενα και σύμφωνα με τη θεωρία της δυναμικής των ρευστών. Συγκεκριμένα παρατηρήθηκε ότι η ταχύτητα ροής του υγρού στο κυρίως κανάλι αυξάνει όσο οι διαστάσεις μικραίνουν. Επίσης διαπιστώθηκε πως η τιμή της ταχύτητας στην είσοδο του μικρορευστονικού κυκλώματος είναι μικρότερη από το άθροισμα των τιμών των ταχυτήτων του ρευστού όταν αυτό διαρρέει τα δύο κυρίως κανάλια του κυκλώματος το οποίο επίσης συνάδει με την εξίσωση αρχής διατήρησης μάζας.

Τέλος έγιναν συγκρίσεις για τις μέγιστες τιμές των ταχυτήτων σε ισεμβαδικά κανάλια με σταθερό πλάτος ($10\mu\text{m}$) και μεταβαλλόμενο ύψος και αντιστρόφως (με σταθερό ύψος $h=10\mu\text{m}$ και μεταβαλλόμενο πλάτος) και οι διαφορές που βρέθηκαν δικαιολογούνται και είναι μέσα στα όρια των σφαλμάτων που μπορεί να προκύψουν κατά τη διαδικασία της διακριτοποίησης και οφείλονται στη γεωμετρική κατασκευή του μοντέλου.

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε και η διαδικασία προκειμένου να γίνει αξιολόγηση των μικρορευστονικών κυκλωμάτων με τη μέθοδο της οπτικής παγίδευσης, περιγράφονται στο κεφάλαιο τέσσερα. Τα εξαγόμενα του πειράματος κατά το μεγαλύτερο μέρος συμφωνούν με τα αποτελέσματα που έδωσαν οι προσομοιώσεις για διαστάσεις (ύψος και πλάτος) καναλιών μικρότερων των $15\mu\text{m}$. Για διαστάσεις μεγαλύτερες των $15\mu\text{m}$ υπήρξε μία απόκλιση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και αυτών που έδωσαν οι προσομοιώσεις που όμως δικαιολογείται βάσει της θεωρίας αντίστασης ροής.

Τέλος στο παράρτημα αυτής της εργασίας παρατίθενται ενδεικτικά κάποια από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τα μικρορευστονικά κανάλια όλων των διαστάσεων όπως: το προφίλ της ταχύτητας του υγρού που διαρρέει το κανάλι συναρτήσει του ύψους του καναλιού, το πεδίο των ταχυτήτων του υγρού στο επίπεδο xy και η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της ταχύτητας [$\mu\text{m/s}$] του υγρού κατά μήκος του ευθυγράμμου τμήματος (του επιπέδου xy) που διέρχεται από το μέσο του καναλιού.

Abstract

Optical trapping is an innovative, non-invasive technique for manipulating micro/nano-scale particles by using the properties of light. A highly focused monochromatic laser beam provides the optical force as a result of the change in its momentum. Optical forces turned out to be a very flexible tool for trapping and manipulating microstructures.

At the same time microfluidics is an emerging field in technology which deals with the behavior and precise control of fluids samples that are geometrically constrained to a small, typically sub-millimeter, scale. The major goal of this field of technology is the mass manufacturing of so-called LOC (lab-on-a-chip) devices that integrate one or several laboratory functions on a single integrated circuit of only millimeters to a few square centimeters. The combination of the optical trapping technique and microfluidics can provide a fully equipped laboratory at micro and nano scale with many applications.

In the first chapter of this thesis a reference to the origins and discovery of the optical forces is being made as well as to the development of optical trapping and its applications in many scientific disciplines. After a brief historical overview on different types of optical trappings, the laws of wave and geometrical optics and their usage in describing the optical forces are being analyzed.

Microfluidics as a subcategory of fluid mechanics, the physical laws and principles that govern incompressible fluid flow and how they are being applied to microminiaturized devices are topics which are being included in the second chapter of this thesis. The techniques and materials which are used in order to build a microfluidic system in addition to their advantages and disadvantages are also being mentioned.

The main topic of this thesis was the simulations of a fluid flowing through a microfluidic channel in order to determine the behavior and the velocity profile of the fluid. The applied simulation software which was used was Comsol Multiphysics. In chapter three the process of building the 3D model which was used (geometry, symmetries, shape), the discretization of it via finite element method and characteristic equations of fluid dynamics which govern fluid motion of the liquid in the microfluidic devices are included. Each time a new parameter is being added to

the system of equations the theoretical background which is based on is also being analyzed.

This chapter also includes the simulation outcomes that were quite expected since they agreed with the law of conservation of mass. In particular a reduction in the channel's dimensions leads to an increase in fluid's velocity. It was also observed that the velocity's magnitude close to the entrance of the channel is less than the sum of the magnitudes of the liquid's velocities when the latter flows through the main channels of the device. This phenomenon also can be explained with the principle of mass conservation.

Finally the maximum velocities of equal-areas cross sections of the channels are listed and there has also been a comparison between them. The deviance of this comparison was unsurprising because of the numerical errors that result from discretization process.

The details of the experimental setup used in order for the microfluidics systems to be tested and evaluated through the process of optical trapping are included in chapter four. The outcomes of the experiment were relatively close by those yielded by simulation, especially for channel width and height values less than 15 μm . For channel dimension values, larger than 15 μm the simulation results were not consistent with the experimental ones. This discrepancy can be explained by the flow resistance theory.

Information and results of the simulations which pertained to microfluidic channels of each and every dimension have been placed in the appendix. This set of information is relevant to velocity profile of the liquid as a function of channel's height, velocity field in the xy plane as well as the minimum and the maximum speed lengthwise along the line passing through the centre of the main channel.

Περιεχόμενα

Πρόλογος-Ευχαριστίες	2
Περίληψη/Summary.....	4

Κεφάλαιο 1: Οπτική παγίδευση

1.1 Εισαγωγή στην οπτική παγίδευση.....	11
1.2 Ιστορική αναδρομή.....	11
1.3 Στοιχεία από τη Φυσική της οπτικής παγίδευσης.....	16
1.3.1 Εισαγωγικά.....	16
1.3.2 Ανάλυση της δύναμης F και Φυσική αρχή της οπτικής παγίδευσης.....	17
1.3.3 Δύναμη σκέδασης.....	18
1.3.4 Δύναμη βαθμίδας.....	18
1.3.5 Κυματική οπτική και Σκέδαση Rayleigh.....	19
1.3.6 Γεωμετρική οπτική- Ορμή και πίεση ακτινοβολίας.....	22
1.3.7 Σκέδαση Mie.....	24
1.3.8 Υπολόγισμός Δύναμης για διαστάσεις σωματιδίων συγκρίσιμες με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας.....	29
1.3.9 Υπολογισμός οπτικής δύναμης σε μη-σφαιρικά σωματίδια.....	30

Κεφάλαιο 2: Μικρορευστονική

2.1 Εισαγωγικά	32
2.2 Μικρή ιστορική αναδρομή-Προέλευση της μικρορευστονικής.....	33
2.3 Μικρορευστονικά κυκλώματα-Περιγραφή.....	35
2.4 Τρόποι κατασκευής -Υλικά.....	35
2.5 Τεχνικές κατασκευής.....	39
2.5.1 Εισαγωγικά.....	39
2.5.2 Φωτολιθογραφία.....	40
2.5.3 Μαλακή Λιθογραφία.....	42
2.5.4 Μικρομηχανική με laser(lasermicromachining).....	44
2.6 Φυσική των μικρορευστονικών διατάξεων.....	45
2.6.1 Εισαγωγικά.....	45
2.6.2 Θεμελιώδεις αρχές της Δυναμικής των ρευστών και Μαθηματική διατύπωση αυτών.....	45
2.6.3 Εξισώσεις Navier-Stokes και εφαρμογή σε μικρορευστονικά κανάλια.....	50
2.7 Έγχυση και ροή ρευστού στα μικρορευστονικά κανάλια.....	56
2.7.1 Εισαγωγικά.....	56
2.7.2 Τρόποι επίτευξης ροής στα μικρορευστονικά κανάλια.....	56

Κεφάλαιο 3: Προσομοιώσεις

3.1 Εισαγωγή.....	62
-------------------	----

3.2 COMSOL και Συνθήκες προσομοιώσεων.....	63
3.2.1 Γεωμετρία.....	63
3.2.2 Υλικά.....	65
3.2.3 Μοντέλο ροής.....	66
3.2.4 Εξισώσεις-Συνθήκες.....	67
3.2.5 Πλέγμα.....	85
3.2.6 Μελέτη-Υπολογισμός λύσεων.....	87
3.2.7 Λύσεις-Αποτελέσματα.....	89
3.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων για κανάλια διαφορετικών διαστάσεων.....	92

Κεφάλαιο 4: Πείραμα

4.1 Εισαγωγή	97
4.2 Διάταξη και διεξαγωγή του πειράματος.....	98
4.3 Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και προσομοιώσεων.....	104

Βιβλιογραφία - Αναφορές.....	107
-------------------------------------	------------

Παράρτημα.....	113
-----------------------	------------

Κεφάλαιο 1

1. Οπτική παγίδευση

1.1 Εισαγωγή στην οπτική παγίδευση

Ο όρος οπτική παγίδευση αναφέρεται σε μία πρωτοποριακή μη-επεμβατική τεχνική, η οποία παρέχει τη δυνατότητα του ανέπαφου χειρισμού της ύλης, σε μικρομετρικές και νανομετρικές κλίμακες, χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες του φωτός και πιο συγκεκριμένα της ακτινοβολίας laser, που, λόγω της μονοχρωματικότητας, συμφωνίας και εξαιρετικής κατευθυντικότητας που διαθέτει, διευκολύνει την παγίδευση και μεταφορά των μικροδομών. Πρόκειται δηλαδή για μία μέθοδο πολύ μεγάλης ακρίβειας για τον πλήρη έλεγχο της δυναμικής μικρο-νάνο σωματιδίων. Οι οπτικές δυνάμεις που είναι υπεύθυνες για το μικροχειρισμό της ύλης οφείλονται στη μεταφορά της ορμής του φωτός και είναι της τάξης των μερικών pN, μέγεθος αρκετά υπολογίσιμο σε μικρομετρικές κλίμακες.

1.2 Ιστορική αναδρομή

Η προέλευση της οπτικής παγίδευσης τοποθετείται στα τέλη του 19^{ου} αιώνα με τις εργασίες του Maxwell, ο οποίος, με την ηλεκτρομαγνητική θεωρία που ανέπτυξε, συνέδεσε το φως ως ηλεκτρομαγνητικό κύμα με την ορμή. Όσο περισσότερο προσεγγίζονταν θεωρητικά η αλληλένδετη σχέση του φωτός ως ηλεκτρομαγνητικού κύματος και ορμής, τόσο επιβεβαιώνονταν οι πρώτες εξηγήσεις που δόθηκαν από τον Kepler, ο οποίος πίστευε ότι οι απωστικές δυνάμεις του ήλιου στις ουρές των κομητών πηγάζουν από τη πίεση ακτινοβολίας του ηλιακού φωτός. Πολύ πριν την ανακάλυψη των laser, παρατηρήσεις που έγιναν με λεπτομερείς και περίτεχνες πειραματικές διατάξεις απέδειξαν ποιοτικά [1,2] και ποσοτικά [3] την ύπαρξη της πίεσης ακτινοβολίας. Ωστόσο ο οπτικός μικροχειρισμός ως μέσο περιορισμού/παγίδευσης και μετακίνησης σωματιδίων απαιτούσε πολύ απότομες κλίσεις της έντασης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου του φωτός, οι οποίες ήταν δυνατόν να επιτευχθούν μόνο με πηγές laser. Η αρχή έγινε από τον A. Ashkin το 1970, με το περίφημο άρθρο του «Acceleration and trapping of particles by radiation pressure» στο επιστημονικό περιοδικό Physical Review Letters, ο οποίος χρησιμοποίησε μια

ισχυρά εστιασμένη δέσμη laser με σκοπό να μπορεί να ελέγξει την κίνηση σωματιδίων.

Αυτό που παρατήρησε δεν ήταν μόνο η επιτάχυνση τους λόγω της δύναμης ακτινοβολίας αλλά και μια “άλλη” δύναμη η οποία τραβούσε τα διαφανή σωματίδια με δείκτη διάθλασης μεγαλύτερο από αυτόν του περιβάλλοντα χώρου, προς τη διεύθυνση του οπτικού άξονα, αναγκάζοντάς τα να αλλάξουν πορεία. Επιπλέον υλοποίησε και παρουσίασε την ιδέα μιας οπτικής παγίδας που χρησιμοποιούσε δύο ελαφρά αποκλίνουσες αντιδιαμετρικά δέσμες laser, όπου οι αντίθετες οπτικές δυνάμεις πίεσεως παγίδευαν τα σωματίδια στο χώρο (σε υγρή και αέρια κατάσταση). Η βασική σκέψη-οδηγός στα πειράματα αυτά ήταν ο χειρισμός της κίνησης των υπό εξέταση σωματιδίων έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ακεραιότητα στη δομή τους και η αποφυγή φαινομένων που θα οδηγούσαν σε σφάλματα και θα αλλοίωναν τα αποτελέσματα (όπως θερμικά φαινόμενα λόγω ακατάλληλου μήκους κύματος ή ισχύος). Ο A. Ashkin χρησιμοποίησε ισχύ δέσμης παγίδευσης της τάξεως των mW και διαφανή μικροσφαιρίδια πολυστυρενίου, καταφέροντας έτσι να παρατηρήσει μέσω μικροσκοπίου την ακινητοποίηση και παγίδευσή τους καθώς πλησίαζαν τη δέσμη laser.

Μέσα σε σύντομο χρονικό διάστημα κι άλλες διατάξεις οπτικής παγίδευσης έκαναν την εμφάνισή τους συμπεριλαμβανομένης της παγίδας οπτικής αιώρησης, όπου βαρυτικές δυνάμεις εξουδετέρωναν την πίεση ακτινοβολίας [4]. Ο στόχος όμως ήταν να βρεθούν παγίδες για ακόμη μικρότερα σωματίδια. Το 1985 ο C.Chu και η ομάδα του [5] βασισμένοι σε μια ιδέα των T.W. Hänsch και A.L. Schawlow [6] που αφορούσε την ψύξη ατόμων Na, κατασκεύασαν μία διάταξη 6 δεσμών laser που ήταν γραμμικά πολωμένες στις 90° ανά δύο. Με αυτό τον τρόπο είχαν ένα ζεύγος δεσμών laser σε κάθε άξονα συντεταγμένων. Η ιδέα της συγκεκριμένης διάταξης θα επέτρεπε την παγίδευση των σωματιδίων στο χώρο με ταυτόχρονο περιορισμό της κινητικότητάς τους. Τα “προς παγίδευση άτομα” αναγκαστικά θα παγιδεύονταν από τουλάχιστον ένα ζεύγος δεσμών laser προς όποια κατεύθυνση κι αν κινούνταν. Η μέθοδος αυτή ονομάστηκε “Doppler cooling” λόγω του φαινομένου Doppler στο οποίο στηρίχτηκε, ενώ η δέσμη laser που παγίδευε τα άτομα ονομάστηκε από τον Chu “οπτική μελάσα” λόγω της “παχύρρευστης” εικόνας που παρουσίαζε.

Ένα πολύ σημαντικό βήμα στο τομέα του οπτικού μικροχειρισμού έγινε το 1986 όταν ο A. Ashkin σε συνεργασία με τον C. Chu δημιούργησαν την “οπτική παγίδα βαθμίδας μονής δέσμης” γνωστή σήμερα με το όνομα “οπτική λαβίδα”

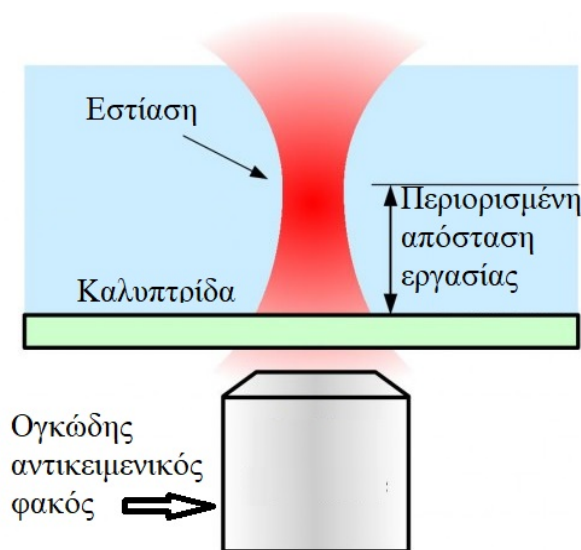
(optical tweezers) [7]. Σε αυτήν τη διάταξη επιτυγχάνεται μέσω φακών με μεγάλο αριθμητικό άνοιγμα (NA) ισχυρή εστίαση μιας δέσμης laser με αποτέλεσμα την εξουδετέρωση των φαινομένων σκέδασης από την ελκτική δύναμη που δρα στην διεύθυνση διάδοσης και αναγκάζει τα σωματίδια να παρεκκλίνουν της πορείας τους. Με αυτόν τον τρόπο κατέστη δυνατή η οπτική παγίδευση στο χώρο διηλεκτρικών σωματιδίων των οποίων οι διαστάσεις κυμαίνονταν από 25nm έως 10μm [7]. Την ίδια περίοδο έγινε από τους ίδιους μία προσπάθεια παγίδευσης σωματιδίων πολυστυρενίου και πυριτίου μεγαλύτερων διαστάσεων, η οποία όμως δεν είχε το επιθυμητό αποτέλεσμα καθώς η αυξημένη ισχύς της δέσμης (απαραίτητης για σταθερή παγίδευση) που χρησιμοποιήθηκε, τάξεως ενός περίπου Watt, επέφερε βλάβες σε κάποια από τα σωματίδια. Αυτό αποτέλεσε και την αιτία για να τεθούν οι βάσεις για τη μέτρηση της μέγιστης δύναμης της οπτικής παγίδας. Όπως διαπιστώθηκε η μέτρηση της δύναμης ήταν δυνατό να γίνει με τη χρήση των νόμων της ρευστομηχανικής όταν τα σωματίδια κινούνταν μέσα σε υγρό.

Όλες αυτές οι ανακαλύψεις αποτέλεσαν τη βάση για την ανάπτυξη μεθόδων μέτρησης των οπτικών δυνάμεων και βαθμονόμησης των διατάξεων, καθώς και ένας μεγάλος αριθμός τεχνολογικών βελτιώσεων που οδήγησαν στην εξέλιξη των οπτικών παγίδων σε εργαλεία με πολλές εφαρμογές. Από τη δεκαετία του '90 και μετά, ερευνητές βιοφυσικοί όπως ο C. Bustamante [8] ο J. Spudich [9] και ο S. Block [10], με μία σειρά από εργασίες και δημοσιεύσεις πρωτοπόρησαν στον τομέα της φασματοσκοπίας, χρησιμοποιώντας οπτικές παγίδες για τον εντοπισμό και την παρατήρηση των δυνάμεων συνοχής που χαρακτηρίζουν τα κινητήρια μόρια (όπως κάποιες κατηγορίες πρωτεϊνών) τα οποία ευθύνονται για την κίνηση και τη μηχανική δράση των κυττάρων. Η οπτική παγίδευση τους επέτρεψε την έρευνα σε νανοκλίμακα των ιδιοτήτων σε μεμονωμένα μόρια. Το 1997 απονέμεται το βραβείο Νόμπελ στη φυσική στους C. Chu, C. Cohen-Tannoudji και W. D. Phillips για την “ανάπτυξη μεθόδων επιβράδυνσης και παγίδευσης ατόμων με δέσμη laser”. Σε συνέντευξη που είχε δώσει ο C. Chu περιέγραφε πως πρώτος ο A. Ashkin είχε οραματιστεί την οπτική παγίδευση ως μέθοδο παγίδευσης ατόμων, όμως είχε φτάσει στο να παγιδεύει μεγαλύτερα σωματίδια (διαμέτρου 10 έως 10.000 nm). Τελικά ο C. Chu ήταν αυτός που βελτίωσε αυτή την τεχνική ώστε να μπορέσει να παγιδεύσει άτομα τάξης 0,1 nm με την μαγνητο-οπτική παγίδα (magneto-optical trap) [11]. Επίσης τη δεκαετία του '90 ξεκίνησαν οι πρώτες προσπάθειες ένταξης των οπτικών ινών στην τεχνολογία της οπτικής παγίδευσης. Οι οπτικές ίνες εμφανίζονταν ως μία εναλλακτική λύση σε

κάποια “προβλήματα” που παρουσίαζαν οι συμβατικές οπτικές παγίδες, τα οποία τις καθιστούσαν δύσχρηστες ως ένα βαθμό, όπως:

- **Ογκώδεις και ακριβοί φακοί**

Οι “συμβατικές” οπτικές παγίδες (Σχήμα 1.1) απαιτούσαν αντικειμενικούς φακούς υψηλού αριθμητικού ανοίγματος, οι οποίοι είναι ογκώδεις, ακριβοί και παρουσιάζουν μειονεκτήματα, όπως είναι η περιορισμένη απόσταση εργασίας (απόσταση μεταξύ της καλυπτρίδας ή του ακάλυπτου δείγματος και της επιφάνειας του αντικειμενικού φακού σε θέση εστίασεως) και η ανάγκη για διαφανή υποστρώματα.



Σχήμα 1.1:

Η απόσταση εργασίας ενός αντικειμενικού φακού μεγάλου αριθμητικού ανοίγματος (προσαρμογή στα ελληνικά από[67])

- **Αλλοίωση του δείγματος και μεγάλες διαστάσεις**

Οιοπτικές λαβίδες του τύπου των οπτικών ινών ουσιαστικά δεν αλλοιώνουν το δείγμα, επειδή ενσωματώνονται εύκολα σε αυτό, καθιστώντας την πρόσβαση στο σωματίδιο ευκολότερη και γενικά παρουσιάζουν ελευθερία στην κίνησή τους μέσα στο μέσο. Το σύστημα λειτουργεί έτσι σαν ένας μικροσκοπικός “καθετήρας” συγκριτικά με τις συμβατικές οπτικές παγίδες που θα λέγαμε ότι αποτελούν μια μεγάλη “πλατφόρμα”.

- **Ειδικά υλικά**

Σε αντίθεση με τις συμβατικές, οι οπτικές παγίδες τύπου οπτικών ινών δεν απαιτούν ειδικά υλικά ως υποστρώματα ή συγκεκριμένου πάχους.

Δύο είναι οι βασικές κατηγορίες οπτικών παγίδων τύπου οπτικών ινών.

1. Μονής οπτικής ίνας (Single fiber optical tweezers) [12] η οποία όμως παρουσιάζει δυσκολία στην ανύψωση του σωματιδίου και ως εκ τούτου στην παγίδευση σωματιδίων σε τρεις διαστάσεις.
2. Αντιδιαμετρικώς διαδιδόμενων διπλών οπτικών ινών (Counter-propagating dual fiber optical tweezers ή Optical cell rotator) [13] που όμως δεν είναι επαρκώς εύκαμπτη.

Γενικότερα στα μειονεκτήματα των οπτικών παγίδων με χρήση οπτικών ινών θα συμπεριλαμβάναμε επίσης την “αδύναμη” εστίαση και κατ’ επέκταση την μειωμένη αποτελεσματικότητα στην παγίδευση, ιδιότητες πολύ σημαντικές τις οποίες οι “συμβατικές” οπτικές παγίδες πληρούν.

Μέσα στα επόμενα χρόνια έγιναν τροποποιήσεις αυτών των διατάξεων ή προτάθηκαν νέες με σκοπό τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας της οπτικής παγίδας με τη χρήση οπτικών ινών. (Multimode fiber-based traps [13], Inclined dual fiber optical tweezers [14]. Η πρώτη τροποποίηση στις υπάρχουσες μέχρι εκείνη τη στιγμή διατάξεις επήλθε το 1993, όταν ο C. Constable και η ομάδα του ήταν οι πρώτοι που ενέταξαν οπτικές ίνες μέσω των οποίων θα μεταφέρονταν οι δέσμες laser στην κατά τ’ άλλα γνωστή διάταξη οπτικής παγίδευσης των δύο αντιδιαμετρικώς διαδιδόμενων δεσμών laser [12]. Η διάταξη αυτή είχε το πλεονέκτημα της σχετικά ελεύθερης μετατόπισης των δύο οπτικών ινών και κατ’ επέκταση των δεσμών laser και συγχρόνως επέτρεπε την τοποθέτηση οργάνων μέτρησης του προς εξέταση δείγματος. Ακολούθησαν το 2000 οι J. Guck και J. Käs [15], ο οποίος ελέγχοντας την ισχύ της δέσμης στα δύο ελεύθερα άκρα της οπτικής ίνας κατάφερε να “επιμηκύνει” τα σωματίδια γεγονός που μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση ιξωδοελαστικών ιδιοτήτων των κυττάρων και διηλεκτρικών σωματιδίων.

Το 2003 η τεχνική της οπτικής παγίδευσης εφαρμόστηκε και στον τομέα του διαχωρισμού των κυττάρων με τον M. Ozkan [16] να σχεδιάζει μια T-τύπου διασταύρωση μικροδιαύλου για την εκτροπή κυττάρων που έρεαν μέσα σε διάλυμα χρησιμοποιώντας την οπτική παγίδα για να ακινητοποιήσει και να συγκεντρώσει ταυτόχρονα συγκεκριμένα κύτταρα-στόχους σε ξεχωριστά δοχεία συλλογής. Επίσης το 2004 ο J. Enger [17] με μία Y-τύπου διασταύρωση σε συνδυασμό με οπτική παγίδα κατάφερε να προχωρήσει σε διαχωρισμό κυττάρων. Και στις δύο προηγούμενες περιπτώσεις προκειμένου να γίνει η επίδειξη του εγχειρήματος οι

δέσμες Laser λειτουργούσαν χειροκίνητα και τα κύτταρα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν πολύ λίγα. Ένα επαρκώς λειτουργικό σύστημα διαχωρισμού κυττάρων παρουσιάστηκε από τον M. Wang το 2005 [18]. Ηδιάταξη αποτελούνταν από δύο πηγές laser, μία στο κοντινό υπέρυθρο που χρησίμευε ως “οπτικός διακόπτης” και μία στο ορατό για την ανίχνευση και τη μέτρηση του φθορισμού. Παράλληλα με το διαχωρισμό κυττάρων που επετεύχθη, ο J. Enger και ο M. Wang εισήγαγαν στις διατάξεις τους μικρορευστονικά κυκλώματα εγκαινιάζοντας μια νέα εποχή όσον αφορά στην οπτική παγίδευση. Τα μικρορευστονικά κανάλια, για τα οποία θα γίνει εκτενέστερη αναφορά στις επόμενες παραγράφους, επιτρέπουν τη ροή ρευστού δείγματος τάξης 10^{-6} - 10^{-12} λίτρων, όπου τα κύτταρα μεταφέρονται, καθοδηγούνται, διαχωρίζονται και απομονώνονται.

Από το 2005 και μετά ακολούθησαν πολλές διατάξεις που συνδύαζαν τα μικρορευστονικά συστήματα με τις οπτικές παγίδες και μέχρι σήμερα αποτελούν έναν πολλά υποσχόμενο κλάδο με εφαρμογές σε όλα σχεδόν τα επιστημονικά πεδία.

1.3 Στοιχεία από την Φυσική της οπτική παγίδευσης

1.3.1 Εισαγωγικά

Η “οπτική λαβίδα” ή σύμφωνα με την επίσημη επιστημονική ορολογία “οπτική παγίδα δύναμης βαθμίδας μονής δέσμης” αποτελεί ένα μη-επεμβατικό εργαλείο που επιτρέπει την παγίδευση και το χειρισμό μικροδομών (με δείκτη διάθλασης μεγαλύτερο από αυτόν του περιβάλλοντος μέσου) τάξης μεγέθους των μικροδομών από μερικές δεκάδες nm έως μερικές δεκάδες μm. Η λειτουργία της οπτικής λαβίδας έχει τις βάσεις της στη οπτική δύναμη που ασκείται όταν μία δέσμη laser χτυπά επάνω σε διαφανή διηλεκτρικά σωματίδια με δείκτη διάθλασης έστω n_2 (όπως π.χ. βιολογικά κύτταρα ή μικροοργανισμούς), τα οποία βρίσκονται συνήθως μέσα σε υγρό περιβάλλον με δείκτη διάθλασης n_1 . Στις περισσότερες περιπτώσεις ισχύει $n_2 > n_1$.

Η ισχυρή εστίαση της δέσμης laser στο εσωτερικό του προς μελέτη σωματιδίου επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός αντικειμενικού φακού μεγάλου αριθμητικού ανοίγματος (Numerical Aperture) και της δύναμης που η δέσμη ασκεί στο σωματίδιο, δίνοντάς μας έτσι τη δυνατότητα να παρέμβουμε μόνο στην περιοχή που επιθυμούμε, με την ένταση της δέσμης να παίρνει εκεί την μέγιστη τιμή και σχεδόν μηδενική στην οριακή επιφάνεια του. Αντικείμενο πολλών ερευνών υπήρξε ο

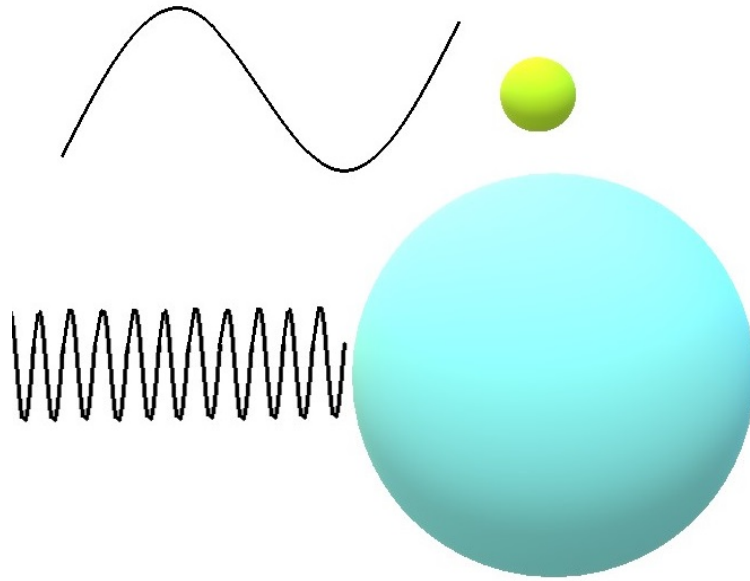
ποιοτικός και ποσοτικός προσδιορισμός αυτών των δυνάμεων και κατ' επέκταση των ιδιοτήτων του δείγματος που σχετίζονται με αυτές. Σημειώνουμε επίσης ότι η οπτική παγίδευση χρησιμοποιείται ευρέως και βρίσκει πολλές εφαρμογές σε επιστήμες όπως η φυσική, η βιολογία, η ιατρική.

1.3.2 Ανάλυση της δύναμης F και φυσική αρχή της οπτικής παγίδευσης

Ήταν το 1970 όταν πρώτος ο A. Ashkin με μία διάταξη που αποτελείτο από μια υψηλής εστίασης δέσμη laser και έναν αντικειμενικό φακό ενός συνηθισμένου μικροσκοπίου παρατήρησε πως τα μη βιολογικά μικροσωματίδια που αποτελούσαν το δείγμα του, αφενός ωθούνταν προς την διεύθυνση διάδοσης της δέσμης αλλάζοντας έτσι την πορεία τους και αφετέρου επιταχύνονταν κατά μήκος αυτής.

Αυτό ήταν αποτέλεσμα της δράσης δύο “ανταγωνιστικών” δυνάμεων. Μιας συντηρητικής δύναμης βαθμίδας στη διεύθυνση της χωρικής (αξονικής και εγκάρσιας) βαθμίδας του φωτός και μιας μη-συντηρητικής δύναμης σκέδασης στη διεύθυνση διάδοσης του φωτός αντίστοιχα. Αυτονόητο είναι λοιπόν πως για να επιτευχθεί η οπτική παγίδευση θα πρέπει η δύναμη βαθμίδας να είναι ισχυρότερη της δύναμης σκέδασης αφού στην ουσία η πρώτη είναι αυτή που αφενός σπρώχνει τα σωματίδια προς το κέντρο της δέσμης (αξονική) και αφετέρου δρα ως παγίδα στο σημείο αυτό (εγκάρσια).

Το διάνυσμα της ολικής δύναμης που θα ασκηθεί στο σωματίδιο εξαρτάται από το μέγεθος του σωματιδίου ως προς το μήκος κύματος της δέσμης καθώς και από την κατεύθυνση αυτής. Στις επόμενες παραγράφους θα μελετήσουμε τις δυνάμεις αυτές διακρίνοντας δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση θα θεωρήσουμε τις διαστάσεις του προς παγίδευση σωματιδίου πολύ μικρότερες από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας δέσμης, ενώ στη δεύτερη περίπτωση οι διαστάσεις του σωματιδίου είναι πολύ μεγαλύτερες από το μήκος κύματος της φωτεινής δέσμης (Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.2). Ο λόγος που το κάνουμε αυτό είναι ότι για κάθε μία από αυτές τις περιπτώσεις διαφέρει η θεωρητική προσέγγιση για την περιγραφή των δυνάμεων σκέδασης και βαθμίδας και κατ' επέκταση η φύση αυτών. Στην πρώτη περίπτωση την εξήγηση για την προέλευση των δυνάμεων αυτών μας τη δίνει η κυματική οπτική, ενώ για την δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιούμε τη γεωμετρική οπτική προκειμένου να ερμηνεύσουμε και να αιτιολογήσουμε την εμφάνιση τους.



Σχήμα 1.2:

Οι δύο περιπτώσεις σωματιδιακής προσέγγισης των δυνάμεων βαθμίδας και σκέδασης ανάλογα με το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (Rayleigh(κίτρινο σωματίδιο, και Mie (γαλάζιο σωματίδιο)

1.3.3 Δύναμη σκέδασης

Όταν η δέσμη φωτός, ορμής p_i , προσπίπτει επάνω στην διηλεκτρική επιφάνεια ένα μέρος των φωτονίων θα απορροφηθεί ενώ τα υπόλοιπα θα σκεδαστούν σε διάφορες κατευθύνσεις. Στην περίπτωση που η σκέδαση είναι ισοτροπική, όλες οι συνιστώσες αλληλοαναιρούνται πλην αυτής στη διεύθυνση διάδοσης. Η δύναμη σκέδασης εμφανίζεται κάθε φορά που μια φωτεινή δέσμη προσπίπτει σε κάποιο σώμα.

1.3.4 Δύναμη βαθμίδας

Η δύναμη αυτή εμφανίζεται στην περίπτωση που η κλίση του ηλεκτρικού πεδίου του φωτός είναι μεγάλη. Αυτό στην ουσία αντιστοιχεί σε απότομες μεταβολές του πεδίου που επιτυγχάνονται με μία δέσμη laser. Η δύναμη βαθμίδας είναι “προϊόν” της απορρόφησης του φωτός από το σωματίδιο διαμέσου της επιφάνειας του.

1.3.5 Κυματική Οπτική και Σκέδαση Rayleigh

Όταν η ακτίνα του σωματιδίου είναι σημαντικά μικρότερη ($\sim 1/20$) του μήκους κύματος της ακτινοβολίας ($r \ll \lambda$) το στιγμιαίο ηλεκτρικό πεδίο που αυτό “αντιλαμβάνεται” είναι ομοιόμορφο σε όλη του την έκταση, συνεπώς ικανοποιούνται οι συνθήκες για σκέδαση Rayleigh (μοριακή), οπότε η προσέγγιση του δίπολου μπορεί να εφαρμοστεί για την περιγραφή της συμπεριφορά ενός σωματιδίου υπό την

επίδραση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος [19]. Σε αυτήν την περίπτωση η διεύθυνση της δύναμης είναι ανεξάρτητη του σχήματος του σωματιδίου.

Η οπτική δύναμη μπορεί να περιγραφεί από δύο συνιστώσες που δρουν επάνω στο σωματίδιο, αν το θεωρήσουμε σαν ένα παλλόμενο ηλεκτρικό δίπολο το οποίο αλληλεπιδρά με το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο της προσπίπτουσας δέσμης. Η μία από αυτές της συνιστώσες είναι η δύναμη σκέδασης και η άλλη η δύναμη βαθμίδας. Αυτό που αλλάζει σε σχέση με τη Mie- προσέγγιση (Γεωμετρική Οπτική) είναι η *προέλευση των δυνάμεων που επάγονται στο σωματίδιο*, από τη στιγμή που λαμβάνονται υπόψη οι ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες του φωτός.

Καθώς το ηλεκτρικό πεδίο ταλαντώνεται αρμονικά με το χρόνο, το επαγόμενο σημειακό δίπολο ακολουθεί τις μεταβολές του πεδίου και αρχίζει να συμπεριφέρεται σαν παλλόμενο ηλεκτρικό δίπολο εκπέμποντας δευτερογενή ακτινοβολία η οποία σκεδάζεται προς όλες τις κατευθύνσεις. Αν επιπλέον η προσπίπτουσα δέσμη είναι πολωμένη και υπολογίσουμε το έργο W που παράγεται στο δίπολο από την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (η ενέργεια αυτή μεταφέρεται στο υλικό) αποδεικνύεται ότι κατά το χρονικό διάστημα στο οποίο το φορτισμένο σωματίδιο απορροφά ενέργεια $E = W$ αφαιρείται από το οδεύον κύμα ορμή $|\vec{p}| = E/c$ κατά τη διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αλλαγή του μεγέθους της έντασης και της διεύθυνσης της φωτεινής δέσμης [20]. Έτσι η μεταφερόμενη από τη δέσμη ορμή μεταβάλλεται και σαν συνέπεια της μεταβολής αυτής είναι η εμφάνιση της *δύναμης σκέδασης* επάνω στο σωματίδιο.

Η δύναμη σκέδασης η οποία οφείλεται στην απορρόφηση και την επανεκπομπή της ακτινοβολίας από το δίπολο, έχει τη διεύθυνση διάδοσης της προσπίπτουσας δέσμης και δίνεται από τον τύπο [21]:

$$\vec{F}_{\text{scat}} = \frac{n_1 I_0 \sigma}{c} \quad (1.1)$$

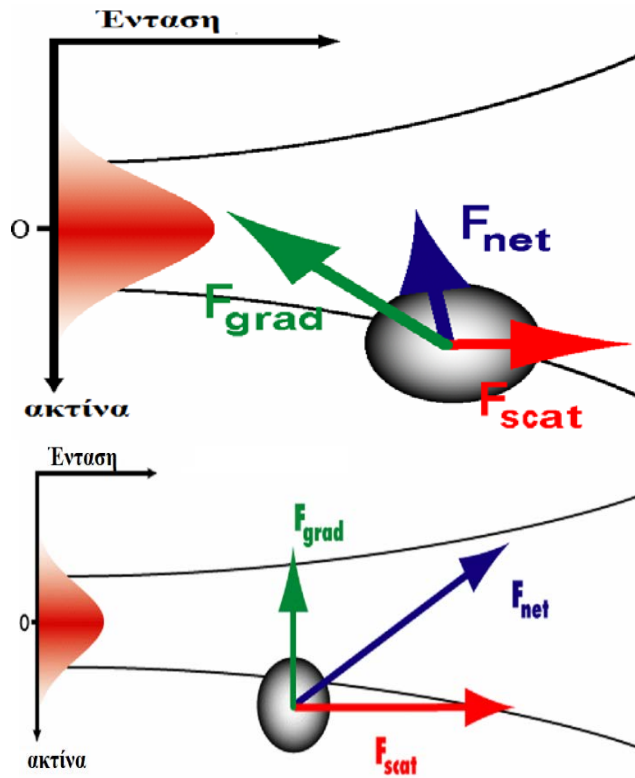
όπου $\sigma = \frac{128\pi^5 r^6}{3\lambda^4} \cdot \frac{m^2-1}{m^2+2}$, η διατομή σκέδασης της σφαίρας, n_1 ο δείκτης διάθλασης του περιβάλλοντος μέσου, r η ακτίνα του σωματιδίου, I_0 η ένταση της προσπίπτουσας δέσμης, c η ταχύτητα του φωτός στο κενό, λ το μήκος κύματος της ακτινοβολίας στο μέσο και $m = \frac{n_1}{n_2}$ (σχετικός δείκτης διάθλασης), όπου n_2 ο δείκτης διάθλασης του μέσου.

Όπως γνωρίζουμε, όταν σε ένα φορτισμένο σωματίδιο προσπίπτει ένα οδεύον επίπεδο ηλεκτρομαγνητικό κύμα, τότε αυτό δέχεται δύναμη Lorentz λόγω του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου του φωτός. Συγκεκριμένα το πεδίο που δημιουργείται από το σκεδαζόμενο φως συμβάλει με αυτό του προσπίπτοντος δημιουργώντας ένα ανομοιογενές ηλεκτρικό πεδίο. Το δίπολο μέσα σε αυτό το πεδίο θα δεχτεί δύναμη στη διεύθυνση βαθμίδας του πεδίου [22]. Η άλλη συνιστώσα, η *δύναμη βαθμίδας*, ουσιαστικά είναι η δύναμη Lorentz που ασκείται στο επαγόμενο από το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο του φωτός δίπολο. Η δύναμη βαθμίδας δίνεται από τον τύπο [23]:

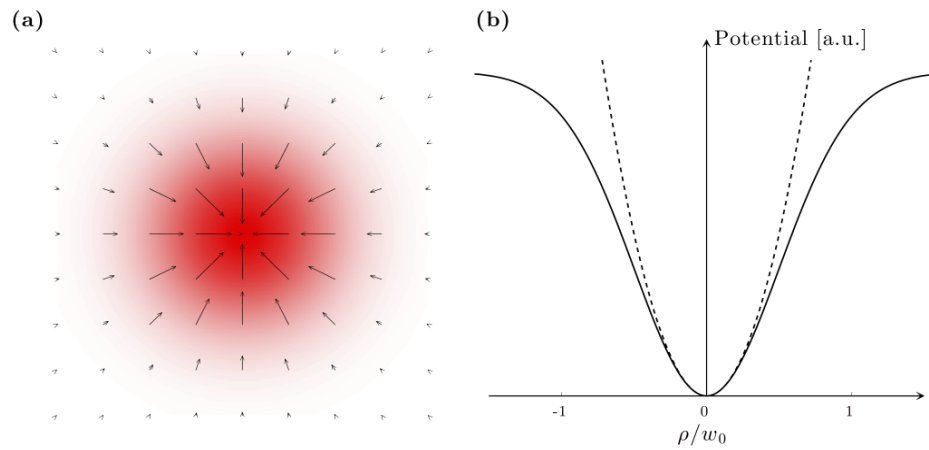
$$\vec{F}_{\text{grad}} = 2\pi \frac{\alpha}{cn_1^2} \nabla I_0 \quad (1.2)$$

όπου $\alpha = n_1 r^3 \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)$, με το α , να εκφράζει την πολωσιμότητα του σωματιδίου. Η δύναμη βαθμίδας είναι ανάλογη της έντασης του πεδίου βαθμίδας με φορά προς την περιοχή που η ένταση παίρνει τη μέγιστη τιμή της, όταν $m > 1$.

Στα σχήματα (1.3) και (1.4) που ακολουθούν φαίνονται αφενός οι δυνάμεις σκέδασης και βαθμίδας για ισχυρά εστιασμένη και ελαφρώς αποκλίνουσα δέσμη ((1.3)) και το πεδίο οπτικών δυνάμεων μέσα στο οποίο βρίσκεται το διηλεκτρικό σωματίδιο το οποίο έχει δείκτη διάθλασης μεγαλύτερο από αυτόν του περιβάλλοντα χώρου καθώς και το οπτικό δυναμικό που παράγεται από το αντίστοιχο (αστρόβιλο) οπτικό πεδίο ((1.4)).



Σχήμα 1.3: Οι δυνάμεις βαθμίδας και σκέδασης στην περίπτωση μιας ισχυρά εστιασμένης δέσμης laser (επάνω) και στην περίπτωση μιας ελαφρώς αποκλίνουσας δέσμης laser (κάτω) [24]



Σχήμα 1.4: Δύναμη Βαθμίδας. (a) Κατανομή της φωτεινής έντασης μίας Γκαουσιανής δέσμης στο βάθος και η αντίστοιχες οπτικές δυνάμεις (βέλη) σε ένα διηλεκτρικό σωματίδιο με δείκτη διάθλασης μεγαλύτερο του περιβάλλοντος μέσου. (b) “Οπτικό” δυναμικό κατά μήκος της ακτινικής διεύθυνσης (συνεχής γραμμή) και η προσέγγιση του από ένα αρμονικό δυναμικό (διακεκομμένη γραμμή)[25]

1.3.6 Γεωμετρική οπτική - Ορμή και πίεση ακτινοβολίας

Γνωρίζουμε ότι μία φωτεινή δέσμη ως ηλεκτρομαγνητικό κύμα μεταφέρει μέσω των φωτονίων της ορμή

$$|\vec{p}| = \frac{nE}{c} \quad (1.3)$$

όπου, E η ενέργεια των φωτονίων, n ο δείκτης διάθλασης του μέσου διάδοσης και c η ταχύτητα του φωτός στο κενό. Εάν η δέσμη αυτή προσπέσει σε μία διηλεκτρική επιφάνεια, τότε, ανάλογα με τις οπτικές ιδιότητες της επιφάνειας μπορεί να συμβεί ανάκλαση, σκέδαση, απορρόφηση ή συνδυασμός αυτών, οπότε θα μεταβληθεί η ορμή των φωτονίων και, σύμφωνα με το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα, λόγω της μεταβολής της ορμής των φωτονίων θα ασκηθεί από την επιφάνεια στη δέσμη μια δύναμη μέτρου:

$$|\vec{F}| = \left| \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} \right| = \frac{n \Delta E}{c \Delta t} = \frac{nQP}{c} \quad (1.4)$$

όπου P η ισχύς της προσπίπτουσας δέσμης, Q ένας παράγοντας ποιότητας που περιγράφει το ποσό της ορμής που μεταφέρθηκε τελικά στην επιφάνεια-στόχο και ορίζεται ως

$$Q = 2\pi f_r \frac{\text{Ενέργεια που αποθηκεύεται}}{\text{Ενέργεια που χάνεται}} \quad (1.5)$$

και f_r η συχνότητα της πηγής της δέσμης.

($Q=2$ για πλήρη ανάκλαση και $Q=1$ για πλήρη απορρόφηση [26])

Από τον νόμο δράσης-αντίδρασης του Νεύτωνα η δέσμη θα ασκήσει με τη σειρά της μια ίση κατά μέτρο και αντίθετης φοράς δύναμη στην επιφάνεια, η οποία αν διαιρεθεί με το εμβαδό S αυτής μας δίνει την πίεση P_{pres} που ασκείται από τη φωτεινή δέσμη στην επιφάνεια-στόχο και θα είναι:

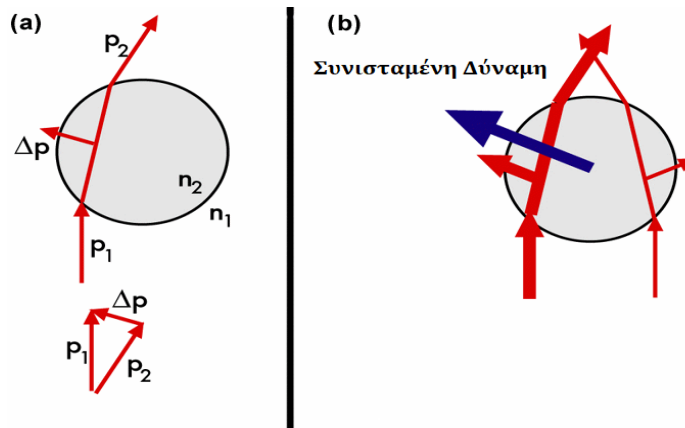
$$P_{\text{pres}} = \frac{|\vec{F}|}{S} = \frac{nQP}{cS} = \frac{nQI}{c} \quad (1.6)$$

όπου:

I , ορίζεται ως ένταση της φωτεινής δέσμης ή η ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας, και αντιστοιχεί στο ρυθμό μεταφοράς της ενέργειας της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μέσω των φωτονίων της στη μοναδιαία επιφάνεια η οποία είναι κάθετη στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος [27] και $P = \frac{\Delta E}{\Delta t}$ η ισχύς της φωτεινής δέσμης. Από την παραπάνω σχέση καταλαβαίνουμε πως αν γνωρίζουμε την ένταση I της δέσμης και τον δείκτη διάθλασης του μέσου διάδοσης μπορούμε να έχουμε μια πρώτη εικόνα του μεγέθους της δύναμης και επομένως και της πίεσης της ακτινοβολίας. Όπως ήδη αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, η δέσμη φέρει αρχική ορμή $|\vec{p}_i| = n_1 E / ch$ (h : η σταθερά του Planck). Ένα μέρος της δέσμης θα ανακλαστεί κι ένα τμήμα θα διαδοθεί στο σωματίδιο αφού υποστεί αλλαγή πορείας λόγω διάθλασης. Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ορμής θα πρέπει στο σύνορο των δύο μέσων (του σωματιδίου και του περιβάλλοντος υγρού) να ισχύει

$$\Delta \vec{p} = \vec{p}_i + \vec{p}_R - \vec{p}_T \quad (1.7)$$

όπου \vec{p}_i η ορμή της προσπίπτουσας δέσμης, \vec{p}_R η ορμή της ανακλώμενης και \vec{p}_T η ορμή της διαδιδόμενης στο σωματίδιο δέσμης [26]. Η μεταβολή αυτή επάνω στη διεπιφάνεια επάγει τη δύναμη \vec{F} της σχέσης (1.4) η οποία απεικονίζεται στο σχήμα 1.5.



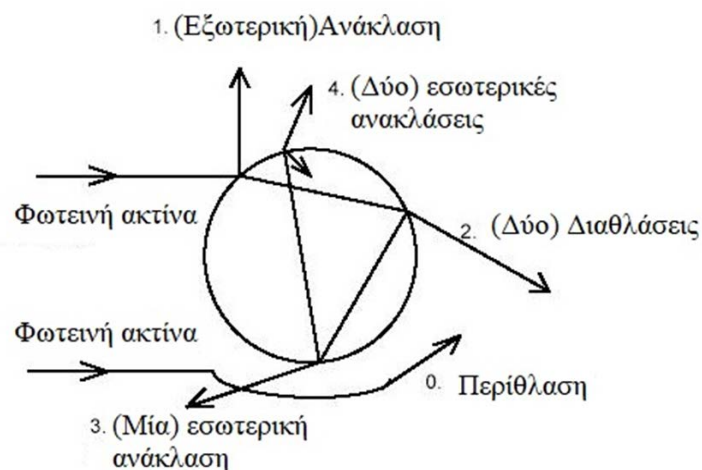
Σχήμα 1.5:

Η ορμή (κόκκινα βέλη) μιας φωτεινής ακτίνας (a) και δύο φωτεινών ακτίνων διαφορετικής έντασης (b), κατά την πρόσπτωση και διάδοσή τους σε μία σφαίρα. Με το μπλε βέλος απεικονίζεται η ολική δύναμη επαναφοράς λόγω μεταβολής της ορμής των φωτονίων [24]

1.3.7 Σκέδαση Mie

Το 1908 ο G. Mie περιέγραψε με επιτυχία το φαινόμενο της σκέδασης ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος φωτός όταν αυτό προσπίπτει σε ένα σφαιρικό σωματίδιο [28]. Από τότε η θεωρία του Mie έγινε ένα βασικό εργαλείο για τον χαρακτηρισμό σωματιδίων βάσει του υπολογισμού των δυνάμεων πίεσης και ακτινοβολίας του φωτός που ασκούνται σε αυτά. Οι δυνάμεις αυτές είχαν εξέχουσα σημασία μιας και συνδέονταν με τον “οπτικό χειρισμό” τους καθώς και με τις φυσικές ιδιότητες των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Ωστόσο στη θεωρητική προσέγγιση του Mie όπου οι ακτίνες των σωματιδίων είναι πολύ μεγαλύτερες από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας ($r \gg \lambda$), τόσο το μέγεθος όσο και η διεύθυνση των δυνάμεων που ασκούνται σε αυτά εξαρτώνται από το σχήμα τους με αποτέλεσμα η παγίδευση να περιορίζεται σε σφαιρικού και ελλειψοειδούς σχήματος σωματίδια.

Αναλυτικότερα στην προσέγγιση Mie ακολουθούνται οι κανόνες της απλής γεωμετρικής οπτικής όπου το φως θεωρείται άθροισμα πολλών φωτεινών ακτίνων. Οι ακτίνες αυτές όταν προσπίπτουν πάνω σε ένα ομογενές σωματίδιο, το οποίο έχει διαφορετικό δείκτη διάθλασης από αυτόν του μέσου διάδοσης, ένα μέρος τους θα υποστεί μερική κατοπτρική ανάκλαση και ένα άλλο θα διαδοθεί στο σωματίδιο αφού υποστεί μερική διάθλαση στη διεπιφάνεια των δύο μέσωνόπως χαρακτηριστικά φαίνεται στο σχήμα 1.6.

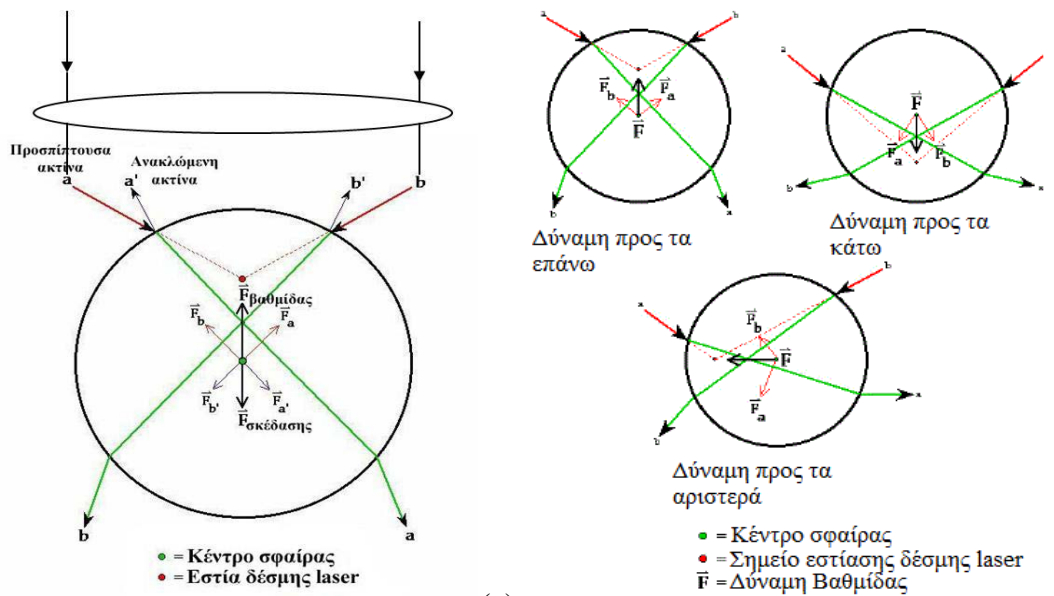


Σχήμα 1.6:

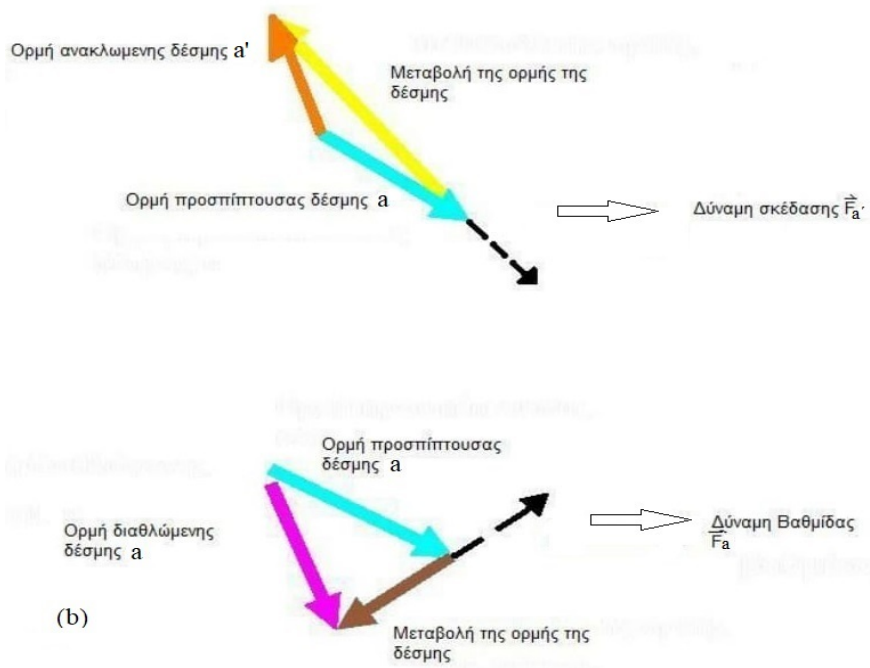
Πρόσπτωση φωτεινών ακτίνων σε σφαιρικό σωματίδιο και τρόποι αλληλεπίδρασης με αυτό (απόδοση στα Ελληνικά από:[54])

Η διάθλαση αυτή αντιστοιχεί σε μεταβολή της ορμής των φωτονίων της δέσμης συνεπώς μιας ίσης και αντίθετης φοράς μεταβολής της ορμής του σωματιδίου (τρίτος

νόμος του Νεύτωνα). Η δύναμη που εμφανίζεται και που οφείλεται στη μεταβολή της ορμής της προσπίπτουσας ακτίνας ως προς τη διαθλώμενη, είναι η *δύναμη βαθμίδας*. Αντίστοιχα η απορρόφηση και μερική ανάκλαση που υφίσταται η δέσμη επίσης λόγω μεταβολής της ορμής του φωτός επάγει μια δεύτερη δύναμη στο σωματίδιο. Η δύναμη αυτή είναι η *δύναμη σκέδασης*. Στο σχήμα 1.7 φαίνονται δύο προσπίπτουσες ακτίνες a και b μιας δέσμης laser σε ένα διηλεκτρικό σωματίδιο και η πορεία τους διαμέσου του αντικειμενικού φακού καθώς και η φορά της δύναμης βαθμίδας σε σχέση με την κέντρο της δέσμης laser((a)), η διανυσματική αναπαράσταση της μεταβολής της ορμής των φωτονίων της ακτίνας a και της ίσης και αντίθετης μεταβολής της ορμής του σφαιρικού σωματιδίου ((b)), και η συνολική δύναμη που ασκείται στο σωματίδιο ανάλογα με τη θέση στην οποία βρίσκεται σε σχέση με τη δέσμη laser ((c)).

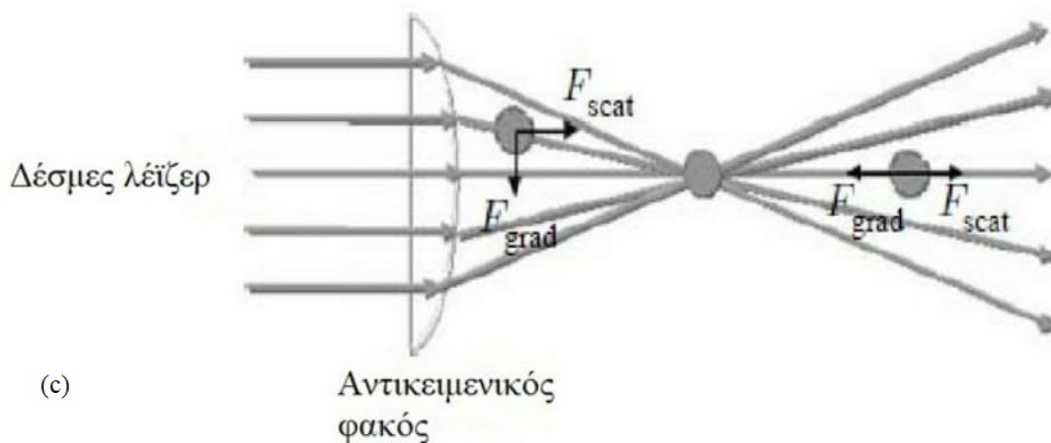


(a)



Σχήμα 1.7:

- (a): Απεικόνιση της πορείας δύο ακτίνων μιας εστιασμένης δέσμης laser, a και b , διερχόμενης μέσα από έναν αντικειμενικό φακό, η οποία προσπίπτει σε ένα σφαιρικό διηλεκτρικό σωματίδιο και των δυνάμεων σκέδασης και βαθμίδας που ασκούνται σε αυτό [29].
- (b): Η διανυσματική αναπαράσταση της μεταβολής της ορμής των φωτονίων της ακτίνας a και της ίσης και αντίθετης μεταβολής της ορμής του σφαιρικού σωματιδίου. Η συνιστώσα της δύναμης βαθμίδας προέρχεται από τη μεταβολή της ορμής της προσπίπτουσας ακτίνας ως προς τη διαθλώμενη ακτίνα που αντιστοιχεί σε μια ίση και αντίθετη φοράς μεταβολή της ορμής [44]



- (c): Όταν το προς παγίδευση σωματίδιο βρίσκεται εκτός της εστίας της δέσμης. Η συνολική μεταβολή της ορμής ή η συνολική οπτική δύναμη που θα ασκηθεί στο σωματίδιο το “τραβάει” προς το κέντρο. Όταν το σωματίδιο βρεθεί στο κέντρο της δέσμης, οι συνιστώσες της σκέδασης αλληλοαναιρούνται, εκτός αυτής με διεύθυνση του άξονα διάδοσης, η οποία με τη σειρά της αλληλοαναιρείται με την αξονική δύναμη βαθμίδας [30]

Ο αναλυτικός υπολογισμός των δυνάμεων με βάση το γεωμετρικό μοντέλο έγινε από τον A. Ashkin θεωρώντας μια δέσμη παράλληλων ακτίνων διερχόμενες από έναν αντικειμενικό φακό να εστιάζονται σε ένα σημείο. Επιγραμματικά θα αναφερθούμε στα αποτελέσματα αυτών των υπολογισμών και τις παραμέτρους τους.

- P: Ισχύς προσπίπτουσας ακτίνας
- n_2, n_1 : Δείκτες διάθλασης του σωματιδίου και του μέσου αντίστοιχα
- θ : Γωνία πρόσπτωσης ακτίνας
- r : Γωνία διάθλασης
- $\frac{n_1 P}{c}$: Ορμή φωτονίων προσπίπτουσας δέσμης laser
- T, R: Συντελεστές Fresnelδιάδοσης και ανάκλασης αντίστοιχα

Στους παραπάνω υπολογισμούς η απορρόφηση θεωρήθηκε μηδενική και το σωματίδιο ως μια διηλεκτρική σφαίρα. Η συνισταμένη δύναμη που τελικά θα ασκηθεί στο σωματίδιο θα είναι το άθροισμα της ανακλώμενης ακτίνας RP και του άπειρου πλήθους των εσωτερικά διαθλώμενων και ανακλώμενων ακτίνων, των οποίων η ισχύς θα φθίνει σταδιακά. Οι εξισώσεις που δίνουν την αξονική και εγκάρσια συνιστώσα της τελικής συνισταμένης δίνονται από τους τύπους [31]:

$$\vec{F}_z = \vec{F}_{sc} = \frac{n_1 P}{c} \left\{ 1 + R \cos 2\theta - \frac{T[\cos(2\theta - 2r) + R \cos 2\theta]}{1 + R^2 + 2R \cos 2r} \right\} \quad (1.6)$$

$$\vec{F}_y = \vec{F}_{grad} = \frac{n_1 P}{c} \left\{ R \sin 2\theta - \frac{T^2[\sin(2\theta - 2r) + R \sin 2\theta]}{1 + R^2 + 2R \cos 2r} \right\} \quad (1.7)$$

όπου F_{sc} είναι η δύναμη σκέδασης και F_{gr} η δύναμη βαθμίδας. Επομένως η ο τύπος για τη συνολική οπτική δύναμη στη Mie προσέγγιση θα πάρει τη μορφή:

$$|\vec{F}| = \sqrt{F_{sc}^2 + F_{grad}^2} \quad (1.8)$$

Αξίζει να σημειωθεί πως όταν ο δείκτης διάθλασης του σωματιδίου είναι μεγαλύτερος από αυτόν του περιβάλλοντος μέσου, η δύναμη βαθμίδας θα είναι στη διεύθυνση της ακτινοβολίας και θα συντελεί στην οπτική παγίδευση. Στην αντίθετη περίπτωση η δύναμη βαθμίδας έχει φορά αντίθετη από αυτήν της κλίσης του πεδίου με αποτέλεσμα να εμποδίζουν την οπτική παγίδευση.

Όταν οι μετατοπίσεις του σφαιριδίου από τη θέση ισορροπίας είναι μικρές (~ 100 nm) η δύναμη βαθμίδας είναι ανάλογη της μετατόπισης από τη θέση ισορροπίας. Η οπτική παγίδα δηλαδή συμπεριφέρεται σαν ελατήριο υπακούοντας στο νόμο του Hooke, με σταθερά k ανάλογη της έντασης του φωτός.

Συνοψίζοντας θα λέγαμε πως το γεωμετρικό μοντέλο αγνοεί τελείως τις κυματικές ιδιότητες του φωτός και αντιμετωπίζει την προσπίπτουσα δέσμη ως ένα σύνολο οπτικών ακτίνων κάνοντας χρήση της γεωμετρικής οπτικής, ενώ το ηλεκτρομαγνητικό μοντέλο θεωρεί το φως σαν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα που αλληλεπιδρώντας με το σωματίδιο το μετατρέπει σε ένα παλλόμενο σημειακό δίπολο το οποίο συμπεριφέρεται ανάλογα.

1.3.8 Υπολόγισμός δύναμης για διαστάσεις σωματιδίων συγκρίσιμες με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας

Σχετικά με την ενδιάμεση περιοχή, όπου το μέγεθος των σωματιδίων είναι συγκρίσιμο με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, καμία από τις παραπάνω θεωρητικές προσεγγίσεις για τον υπολογισμό των δυνάμεων δεν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Η περίπτωση αυτή, περιλαμβάνει δύο στάδια υπολογισμών.

Στο πρώτο στάδιο αντιμετωπίζεται το “πρόβλημα” της περίθλασης του φωτός και υπολογίζεται το πεδίο που δημιουργείται γύρω από το σωματίδιο.

Στο δεύτερο στάδιο προσδιορίζεται η δύναμη που ασκείται στο σωματίδιο κάνοντας χρήση του τανυστή τάσεων (τανυστής ηλεκτρομαγνητικού πεδίου) του C. Maxwell [43].

Αρχικά, για σωματίδια σφαιρικού σχήματος, η γενικευμένη θεωρία Lorenz – Mie αποτέλεσε έναν ικανοποιητικό τρόπο υπολογισμού του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Αργότερα η χρήση της επεκτάθηκε και σε άλλες γεωμετρίες (κυλινδρικά και ελλειπτικού κυλίνδρου σχήματος αντικείμενα).

Η ίδια θεωρία χρησιμοποιήθηκε και για τον υπολογισμό των οπτικών δυνάμεων σε σφαιρικά σωματίδια.

Για μη σφαιρικά σωματίδια το πρόβλημα της περίθλασης αντιμετωπίζεται με διάφορες μεθόδους. Για την ανάλυση της δύναμης η οποία ασκείται σε σωματίδια που έχουν σχήμα ελλειπτικού ή μη κυλίνδρου, εφαρμόζεται επιτυχώς η MMP (Multiple Multipole Method) μέθοδος.

1.3.9 Υπολογισμός οπτικής δύναμης σε μη-σφαιρικά σωματίδια

Ο υπολογισμός της δύναμης που ασκείται σε σωματίδια ακαθορίστου σχήματος νανομετρικών ή μικρομετρικών διαστάσεων προϋποθέτει τον ακριβή καθορισμό της κατανομής του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου σε ολόκληρη την επιφάνεια του σωματιδίου.

Για λόγους απλούστευσης αφενός τα σωματίδια θεωρούνται δισδιάστατα με την τρίτη διάσταση να εκτείνεται στο άπειρο, αφετέρου ο υπολογισμός της δύναμης σε διαφορετικές θέσεις γύρω από την περιοχή εστίασης της δέσμης (διαδιδόμενη στη z-κατεύθυνση), διευκολύνεται εάν η τελευταία αναλυθεί σε ένα διακριτό φάσμα πεπερασμένων επίπεδων κυμάτων ώστε να προσδιοριστεί το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο για κάθε κατεύθυνση χωριστά [43]. Έστω ότι το σωματίδιο βρίσκεται στο σημείο (x, z) αναφορικά με το σημείο εστίασης της δέσμης. Το πλάτος A της m τάξης του επιπέδου κύματος 1.3.θα δίνεται από τη σχέση:

$$A_m = \frac{e^{-i\sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 - \left(\frac{m2\pi}{\Lambda}\right)^2} z}}{\Lambda} \int_{-\frac{\Lambda}{2}}^{\frac{\Lambda}{2}} \alpha_{\text{Inc}}(x) e^{-im\frac{2\pi}{\Lambda}x} dx \quad (1.9)$$

όπου α_{Inc} η κατανομή πλάτους στο σημείο εστίασης της δέσμης, Λ η περιοδικότητα του πεδίου του επίπεδου κύματος η οποία έχει παρθεί αρκετά μεγάλη (στην συγκεκριμένη περίπτωση $\Lambda=20\lambda$) και m η τάξη περίθλασης.

Στην περίπτωση που η δέσμη είναι Γκαουσιανή το α_{Inc} δίνεται από τη σχέση:

$$\alpha_{\text{Inc}}(x) = E_0 e^{-\left(\frac{x}{\omega}\right)^2} \quad (1.10)$$

όπου E_0 , το πλάτος της δέσμης και ω το σημείο εστίασης. Ωστόσο η εξίσωση της τελικής δέσμης που χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς δεν είναι αυτή που περιγράφεται από τη σχέση (1.10) καθώς στην περίπτωση μιας ισχυρά εστιασμένης Γκαουσιανής δέσμης τα φθίνοντα κύματα δεν αλληλεπιδρούν με το σωματίδιο και ως εκ τούτου δε συνεισφέρουν στους υπολογισμούς [43].

Η μέθοδος MMP εφαρμόστηκε στην επίλυση του προβλήματος αλληλεπίδρασης ενός επίπεδου κύματος με ένα κυλινδρικό σωματίδιο. Βάσει αυτής της ημί-αναλυτικής μεθόδου η περιγραφή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου σε περιοχές με ομογενή διηλεκτρική σταθερά, γίνεται χρησιμοποιώντας γνωστές αναλυτικές λύσεις της

κυματοσυνάρτησης. Το πεδίο περιγράφεται ως υπέρθεση από τα πεδία που δημιουργούν πολύπολα τα οποία βρίσκονται σε διαφορετικά σημεία. Τα πολύπολα εκφράζονται ως συναρτήσεις Hankel πρώτης τάξης [43].

Πρόκειται για συναρτήσεις των οποίων οι λύσεις παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον στη Φυσική λόγω των τεχνολογικών τους εφαρμογών αφού περιγράφουν ένα φυσικό σύστημα και παριστάνουν διάδοση κυμάτων (ηλεκτρομαγνητικών, ακουστικών, κλπ). Ειδικότερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι λύσεις οι οποίες συμπεριφέρονται ως κυλινδρικά ή σφαιρικά κύματα σε μεγάλες αποστάσεις από τις πηγές που τα δημιουργούν [70]. Στη συγκεκριμένη περίπτωση πάρθηκαν εβδομήντα πέντε πολύπολα για την προσέγγιση των αριθμητικών αποτελεσμάτων. Στη επιφάνεια του σωματιδίου έγινε δειγματοληψία σε 500 σημεία. Εάν θεωρηθεί ότι τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία σε ολόκληρη την επιφάνεια του σωματιδίου υπολογίζονται για κάθε διεύθυνση διάδοσης, το πεδίο σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου θα δίνεται ως υπέρθεση της απόκρισης του επίπεδου κύματος πολλαπλασιαζόμενης με την κατάλληλη σταθερά πλάτους A_m [43].

Από τη στιγμή που θα βρεθεί το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, στο δεύτερο στάδιο γίνεται χρήση του τανυστή τάσεων του Maxwell προκειμένου να υπολογιστεί η δύναμη που ασκείται στο σωματίδιο. Στις οπτικές συχνότητες (συχνότητες συντονισμού του πεδίου που παράγει η δέσμη laser) μόνο ο μέσος χρόνος της δύναμης είναι παρατηρήσιμος ο οποίος υπολογίζεται από το ολοκλήρωμα [59]:

$$\langle f(t) \rangle = \frac{1}{\Delta T} \int_t^{t+\Delta T} f(t') dt' \quad (1.11)$$

και είναι σημαντικός ειδικά στην περίπτωση κυμάτων της μορφής $f(t) = A \sin(\omega t)$ (ω : γωνικά συχνότητα, A : πλάτος ταλάντωσης). Για ένα σωματίδιο που βρίσκεται μέσα σε ένα ισοτροπικό μέσο η δύναμη δίνεται από τη σχέση:

$$\langle F \rangle = \int_S \left\{ \frac{\epsilon}{2} \text{Re}[(\vec{E} \cdot \vec{n}) \vec{E}^*] - \frac{\epsilon}{4} (\vec{E} \cdot \vec{E}^*) \vec{n} + \frac{\mu}{2} \text{Re}[(\vec{H} \cdot \vec{n}) \vec{H}^*] - \frac{\mu}{4} (\vec{H} \cdot \vec{H}^*) \vec{n} \right\} dl' \quad (1.12)$$

όπου S η επιφάνεια του σωματιδίου και \vec{n} το κάθετο στην επιφάνεια διάνυσμα με φορά προς τα έξω [43].

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η σωστή εφαρμογή του αλγορίθμου και να είναι αξιόπιστα τα αποτελέσματα που πάρθηκαν έγιναν συγκρίσεις με αποτελέσματα που

είχαν παρθεί από προηγούμενους υπολογισμούς καθώς και για διαφορετικές ακτίνες σωματιδίων. Ως μέσο διάδοσης στους υπολογισμούς πάρθηκε ο αέρας.

Κεφάλαιο 2

2 Μικρορρευστονική

2.1 Εισαγωγικά

Η μικρορρευστονική είναι ένας ανερχόμενος τομέας της τεχνολογίας που επιτρέπει τον ακριβή χειρισμό πολύ μικρών ποσοτήτων ενός υγρού δείγματος, συνήθως της τάξης των nL ή ακόμα και pL. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας αυτής έχει σαν βασικό στόχο την κατασκευή φορητών συσκευών σε ευρεία κλίμακα προκειμένου να πραγματοποιούνται απ'ευθείας μετρήσεις και λήψεις αποτελεσμάτων χωρίς να απαιτείται εξειδικευμένο προσωπικό και ακριβός εργαστηριακός εξοπλισμός.

Ο χειρισμός τέτοιας τάξης μεγέθους δειγμάτων επιτυγχάνεται μέσω των λεγόμενων “μικρορρευστονικών διατάξεων”, ένα είδος συσκευών αποτελούμενο από κανάλια που η μία τους τουλάχιστον διάσταση είναι της τάξεως των μm. Ενδεικτικά θα μπορούσαμε να πούμε πως μία τέτοια διάταξη διαστάσεων 10μm×10μm×10μm περιέχει 1pL υγρού δείγματος [32].

Λόγω των μικρών τους διαστάσεων, ο αριθμός Reynolds, στον οποίο θα γίνει εκτενέστερη αναφορά στις επόμενες παραγράφους, συσχετίζει τις αδρανειακές δυνάμεις με τις δυνάμεις ιξώδους και τις περισσότερες φορές είναι μικρότερος της μονάδας. Αυτό συνεπάγεται τη στρωτή ροή του ρευστού και συγχρόνως ανάμιξη ρευστών μόνο λόγω διάχυσης. Στα πλεονεκτήματα της μικρορρευστονικής θα μπορούσε ακόμα να συμπεριληφθεί η ταχεία επεξεργασία του δείγματος, η μείωση των εν δυνάμει βλαβερών παραπροϊόντων και το σχετικά χαμηλό κόστος των κατ'εξοχήν αποδοτικών δοκιμών-αναλύσεων σε τομείς όπως η βιολογία και η ανακάλυψη καινούργιων φαρμάκων. Οι μικρορρευστονικές διατάξεις αυτού του τύπου ανήκουν στην κατηγορία των λεγόμενων LOC (Lab-on-a-chip) συσκευών, που στην ουσία ενσωματώνουν μία ή περισσότερες εργαστηριακές λειτουργίες σε ένα μόνο τσιπ μερικών mm² έως λίγων cm² με σκοπό τον αυτοματοποιημένο και αποτελεσματικό έλεγχο του δείγματος [32]. Οι πρώτες εφαρμογές των μικρορρευστονικών διατάξεων βρήκαν έδαφος στον τομέα της αναλυτικής χημείας, ωστόσο τα τελευταία χρόνια οι δυνατότητες που παρέχουν (λόγω του χρονικού και χωρικού ελέγχου στο μικρορρευστονικό κύκλωμα) στη μελέτη της απόκρισης

βιολογικών κυττάρων σε διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες λαμβάνουν όλο και περισσότερης προσοχής.

Προφανώς η κλασική φυσική είναι οδηγός στη μελέτη σε μικροκλίμακες (και όχι η κβαντομηχανική), ωστόσο όταν γίνεται αναφορά για τέτοιων τάξεων κλίμακες η ύλη συμπεριφέρεται διαφορετικά και αυτό γίνεται πολύ εμφανές στον τρόπο που διαφοροποιείται η ροή του ρευστού. Η προσφορά της μικρορευστονικής δε θα μπορούσε να περιοριστεί μόνο στην επιστήμη (λόγω της μελέτης των ρευστών σε μικροκανάλια), αλλά και στην τεχνολογία (λόγω κατασκευής των μικρορευστονικών συσκευών για εφαρμογές όπως η προαναφερόμενη lab-on-a-chip).

2.2 Μικρή ιστορική αναδρομή-Προέλευση της μικρορευστονικής

Αρχικά οι μικρορευστονικές συσκευές κατασκευάζονταν βασιζόμενες στην τεχνολογία που παρείχε η μικροηλεκτρονική. Αργότερα αναπτύχθηκαν ειδικές τεχνικές για την παραγωγή μικρορευστονικών συστημάτων και η μελέτη παραγωγής τέτοιων διατάξεων αποτέλεσε ξεχωριστό επιστημονικό πεδίο. ακολουθεί μια περιληπτική ιστορική αναδρομή στις βάσεις της μικρορευστονικής στις επόμενες σειρές, βασισμένη στην ανασκόπηση «The origins and the future of microfluidics» από τον G.M. Whitesides.

Ιστορικά, το πεδίο της μικρορευστονικής έχει τέσσερις αρχικούς τομείς για την εμφάνιση και την ανάπτυξή του: την μοριακή ανάλυση, τη βιο-άμυνα, την μικρομοριακή βιολογία και την μικροηλεκτρονική. Συγκεκριμένα:

- Μικρομοριακή ανάλυση

Πρόκειται για ένα είδος χημικής ανάλυσης και ταυτοποίησης μικρών ποσοτήτων ύλης, όπως η ηλεκτροφόρηση τριχοειδών (capillary electrophoresis-CE, [33]), η αέριος χρωματογραφία (gas chromatography-GC,[34]) και η υγρή χρωματογραφία υψηλής πίεσης (high pressure liquid chromatography-HPLC). Αυτές οι μέθοδοι (σε συνδυασμό και με τις εξαιρετικές δυνατότητες των laser στον τομέα της οπτικής ανίχνευσης) έδωσαν τη δυνατότητα για υψηλή ανάλυση και μεγάλη ευαισθησία χρησιμοποιώντας πολύ μικρές ποσότητες δείγματος. Αναπτύχθηκε αρχικά τη δεκαετία του '60 και πρόκειται για μία μέθοδο διαχωρισμού ηλεκτρικά φορτισμένων σωματιδίων, βάσει του φορτίου και του μεγέθους τους. Η τεχνική χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα, επιβεβαιώνοντας πως η μικροανάλυση όχι μόνο έδωσε το έναυσμα για

την μικρορρευστονική να αναπτυχθεί, αλλά παρείχε επίσης και κάποιες τεχνικές επάνω στις οποίες βασίστηκε η νέα αυτή τεχνολογία.

- Βιοάμυνα

Η αφύπνιση στα επιστημονικά πεδία της βιολογίας και της χημείας που κλιμακώθηκε μετά την ψυχροπολεμική περίοδο, έγινε η αφορμή ώστε ο οργανισμός DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) των ΗΠΑ, να χρηματοδοτήσει σε μεγάλο βαθμό τις έρευνες επάνω στη μικρορρευστονική τη δεκαετία του '90. Η βιοάμυνα παραμένει ένας σημαντικός τομέας στην άμυνα των ΗΠΑ. Χαρακτηριστική εφαρμογή είναι μία μικρορρευστονικού τύπου συσκευή που έχει τη δυνατότητα να ανιχνεύει το βακτήριο του άνθρακα καθώς και άλλες μορφές ύποπτων οργανισμών. Το εύκολο στη μεταφορά μικρορρευστονικού τύπου σύστημα ανακτά κύτταρα από το δείγμα και αναλύει το DNA σε λιγότερο από μία ώρα, ενώ έως εκείνη τη στιγμή η διαδικασία αυτή έπαιρνε από 1-3 ημέρες στο εργαστήριο.

- Μοριακή Βιολογία

Τις τελευταίες δεκαετίες η μικρορρευστονική έχει κάνει ταχύτατη πρόοδο δίνοντας τη δυνατότητα για γρηγορότερες, φθηνότερες και πιο ακριβείς μεθόδους ανάλυσης και επεξεργασίας του DNA στον τομέα της γενετικής που μελετά το γονιδίωμα των οργανισμών, γνωστό ως γονιδιωματική. Ο S.R. Quake [35], καθηγητής στο πανεπιστήμιο του Στάνφορντ ηγήθηκε μιας εξαιρετικά εξελιγμένης έρευνας επάνω στην αλληλουχία του DNA. Η δυνατότητα να προσδιορίζεται η ακριβής σειρά των νουκλεοτιδίων στο μόριο του DNA σε μερικές εβδομάδες αντί μηνών, στάθηκε η αιτία ώστε να ιδρύσει μία εταιρεία την Helicos, εφαρμόζοντας εκεί μικρορρευστονικές μεθόδους. Από τότε πολλές μικρορρευστονικές εφαρμογές υλοποιήθηκαν σε αντίστοιχες έρευνες καθώς ερευνητές και εταιρείες έχουν μπει σε ενός είδους “κούρσας” για την ταξινόμηση ανθρώπινων γονιδιωμάτων για το ποσό των μόλις 1000 δολαρίων.

- Μικροηλεκτρονική

Ενώ οι τρεις προηγούμενοι τομείς παρείχαν ορισμένα εργαλεία και υλικό για την μικρορρευστονική, η μικροηλεκτρονική ήταν αυτή που έδωσε “σάρκα και οστά” στη μικρορρευστονική όπως την ξέρουμε σήμερα. Η μεγάλη ανάπτυξη της μικροηλεκτρονικής την ίδια περίοδο (αν και προηγούνταν κατά πολύ) παρείχε στους

ανθρώπους την τεχνογνωσία ώστε να καταστεί δυνατή η κατασκευή κυκλωμάτων μεγάλης ακρίβειας σε μικροκλίμακα. Τα πρώτα υλικά από τα οποία κατασκευάστηκαν μικρορευστονικές διατάξεις ήταν το πυρίτιο και το γυαλί και η μικροηλεκτρονική μέθοδος που εφαρμόστηκε ήταν η φωτολιθογραφία. Τελικά το πυρίτιο αντικαταστάθηκε από υλικά με πιο κατάλληλες ιδιότητες όπως η ανθεκτικότητα, το χαμηλότερο κόστος, η αδιαφάνεια στο ορατό ή την υπεριώδη ακτινοβολία. Ιδιότητες πολύ σημαντικές μια που το φως είναι αυτό που τις περισσότερες φορές χρησιμοποιείται ως μέσο διέγερσης ή προκειμένου να προσδιοριστούν και να ελεγχθούν τα αποτελέσματα των δοκιμών (οπτική ανίχνευση). Το πιο δημοφιλές από αυτά τα υλικά υπήρξε το PDMS (πολυδιμεθυλοσιλοξάνη), το οποίο είναι ένα μαλακό, διαφανές ελαστικό πολυμερές που είναι διαπερατό από το CO₂ (διοξείδιο του άνθρακα) και το οξυγόνο. Χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο από τους ερευνητές σε συνδυασμό με τη “μαλακή λιθογραφία” λόγω της ευκολίας του στη χρήση και τις γρήγορες μεθόδους παρασκευής. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν κι άλλα φθηνότερα υλικά ως εναλλακτική λύση, όπως το θερμοπλαστικό και το χαρτί. Σε κάθε περίπτωση η χρήση διαφορετικών υλικών με διαφορετικές φυσικές και χημικές ιδιότητες ή και συνδυασμός αυτών είναι εφικτός στην κατασκευή των μικρορευστονικών διατάξεων δίνοντας έτσι τη δυνατότητα σε αυτά τα κυκλώματα να ικανοποιούν συγκεκριμένες ανάγκες, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής για την οποία προορίζονται.

2.3 Μικρορευστονικά κυκλώματα - Περιγραφή

Ένα μικρορευστονικό κύκλωμα αποτελείται από ενσωματωμένα μικροκανάλια τα οποία αναπτύχθηκαν με χάραξη ή χύτευση σε ένα υλικό (γυαλί, πυρίτιο ή πολυμερές). Τα μικροκανάλια αυτά συνδέονται μεταξύ τους έτσι ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή λειτουργία (μίξη, άντληση, διαχωρισμός, έλεγχος του βιοχημικού περιβάλλοντος).

Το δίκτυο των καναλιών που βρίσκεται μέσα στο μικρορευστονικό κύκλωμα είναι συνδεδεμένο με το εξωτερικό περιβάλλον μέσω διάτρητων εισόδων και εξόδων του κυκλώματος, λειτουργώντας ως μία διαχωριστική επιφάνεια ανάμεσα στον μακρόκοσμο και τον μικρόκοσμο. Μέσω αυτών των οπών χορηγούνται και απομακρύνονται τα ρευστά από τα μικρορευστονικά κανάλια (είτε μέσω αγωγών, συρίγγων ή μικρότερων οπών) χρησιμοποιώντας είτε εξωτερικά ενεργητικά συστήματα (συσκευές ρύθμισης της πίεσης, έγχυση μέσω συρίγγων ή περισταλτικών

αντλιών) ή βασιζόμενα σε παθητικούς τρόπους (υδροστατική πίεση). Αυτές οι “θύρες” δίνουν τη δυνατότητα στο ρευστό να περνάει μέσα από κανάλια διαφορετικής διαμέτρου που συνήθως έχουν ένα φάσμα από 5 έως 500 μm. Τα μικροκυκλώματα αυτά μπορεί να είναι δύο ή τριών διαστάσεων. Τα τρισδιάστατα κυκλώματα είναι πιο σύνθετα και παρέχουν καλύτερη διαχείριση του υγρού δείγματος διότι επιτρέπουν τη παράλληλη χρήση εξωτερικών συσκευών.

2.4 Τρόποι κατασκευής-Υλικά

- Πυρίτιο

Αποτελεί το πρώτο υλικό που χρησιμοποιήθηκε για κατασκευή μικρορευστονικών κυκλωμάτων αν και γρήγορα αντικαταστάθηκε από το γυαλί και τα πολυμερή. Η χημική σύσταση του στηρίζεται στις ομάδες σιλανόλης (-Si-OH). Τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα του πυριτίου είναι η θερμική αγωγιμότητα, η χημική σταθερότητα (υψηλή αντίσταση στους οργανικούς διαλύτες), η ευκολία που το χαρακτηρίζει στην διαδικασία εναπόθεσης μετάλλου, η σταθερή “ηλεκτροσωμωτική ροή” (electroosmotic mobility) που αποτελεί σημαντική ιδιότητα καθώς και η μηχανική αντοχή του. Η τελευταία είναι χρήσιμη στην νανορευστονική, όπου η μελέτη των ρευστών πραγματοποιείται σε κανάλια άκμπτων τοιχωμάτων νανομετρικής κλίμακας με διαστάσεις <50nm. Ωστόσο η μηχανική αντοχή του πυριτίου λειτουργεί και σαν μειονέκτημα από τη στιγμή που δεν καθιστά εύκολο τον χειρισμό του συγκεκριμένου υλικού, ειδικά όταν πρόκειται για κατασκευές ενεργών μικρορευστονικών εξαρτημάτων όπως οι βαλβίδες και οι αντλίες. Η χρήση του πυριτίου δεν ενδείκνυται για εφαρμογές που απαιτούν οπτική ανίχνευση λόγω αδιαφάνειας. Επίσης δεν έχει κάποιες από τις ιδιότητες που απαιτούνται για εργασίες που αφορούν στα ζωντανά κύτταρα θηλαστικών (όπως η διαπερατότητα στα αέρια), ενώ μειονέκτημά είναι το ακριβό κόστος του. Τέλος λόγω της χρήσης επικίνδυνων χημικών ουσιών που απαιτούνται κατά την κατασκευή του χρειάζεται η λήψη ειδικών προστατευτικών μέτρων.

- Γυαλί

Πρόκειται για μια πλήρως καθορισμένης χημικής σύστασης επιφάνεια, πολύ υψηλής ποιότητας οπτική διαφάνεια, συμπεριφέρεται ως μονωτής του ηλεκτρισμού, παρουσιάζει χαμηλή θερμική αγωγιμότητα καθώς και εξαιρετική αντίσταση στις υψηλές πιέσεις, ιδιότητες που το καθιστούν υλικό επιλογής για πολλές εφαρμογές.

Όπως συμβαίνει και με το πυρίτιο βασικό στοιχείο της χημικής του σύστασης είναι η ομάδα σιλανόλης (-Si-OH).

Το γυαλί είναι επίσης βιοσυμβατό υλικό, χημικά αδρανές, δεν έχει δώσει δείγματα απορρόφησης οργανικών ενώσεων, είναι υδρόφιλο με σταθερή ηλεκτροσωμωτική ροή και επιτρέπει επαρκείς επιστρώσεις. Λόγω της σκληρότητας του σαν υλικό καθώς και του υψηλού κόστους, υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί που καθιστούν τη χρήση του σχετικά δύσκολη στον τομέα της μικρορευστονικής.

Προστατευτικά μέτρα, αποστειρωμένο περιβάλλον, υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις αποτελούν μερικούς μόνο από τους παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη και να τηρηθούν κατά την διαδικασία παραγωγής των κυκλωμάτων από γυαλί.

- Πολυμερή

Πρόκειται για υλικά που είναι πολύ δημοφιλή εξαιτίας της χαμηλής τους τιμής, ενώ είναι ανθεκτικά και παρασκευάζονται εύκολα και γρήγορα. Αρκετά πολυμερή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή μικροκυκλωμάτων όπως τα: PS (πολυστυρένιο), PVC (πολυβινυλοχλωρίδιο), PC (πολυκαρβονικό), COC (συμπολυμερές κυκλικής ολεφίνης), PMMA (πολυμεθακρυλικό μεθύλιο) και PDMS (πολυδιμεθυλοσιλοξάνιο). Το τελευταίο, το οποίο είναι ένα οργανικό πολυμερές με βάση σιλικόνης, προτιμάται στις εργαστηριακές έρευνες λόγω του χαμηλού κόστους και της ευκολίας στην κατασκευή του.

PDMS

Το πολυδιμεθυλοσιλοξάνιο ή για ευκολία PDMS είναι ένα ορυκτό οργανικό πολυμερές (περιέχει σιλικόνη και άνθρακα). Ο εμπειρικός τύπος του PDMS είναι $[\text{SiO}(\text{CH}_3)_2]_n$, όπου n ο αριθμός των μονομερών που συνθέτουν το πολυμερές και ο χημικός του είναι $\text{CH}_3[\text{Si}(\text{CH}_3)_2\text{O}]_n\text{Si}(\text{CH}_3)_3$.

Όπως φαίνεται, αποτελείται από έναν σκελετό ανόργανου πυριτίου-οξυγόνου (...-Si-O-Si-O-...), με οργανικές πλευρικές ομάδες προσαρτημένες στα άτομα του τετρασθενούς πυριτίου.

Τα κύρια προτερήματα που παρουσιάζει το PDMS σαν υλικό είναι: [32,35]

- Διαπερατότητα στα αέρια και ιδιαίτερα στο οξυγόνο (γεγονός που το καθιστά ιδανικό για καλλιέργεια κυττάρωνόπου η παροχή οξυγόνου είναι απαραίτητη) αλλά όχι στο νερό
- Είναι ανθεκτικό και οπτικά διαφανές άρα μπορεί να συνδυαστεί με τεχνικές οπτικής μικροσκοπίας (Διευκολύνει την παρατήρηση του περιεχομένου στα μικροκανάλια).
- Μη τοξικό (ιδανικό για ζωντανά κύτταρα)
- Βιοσυμβατό
- Χημικά αδρανές
- Μη-εύφλεκτο

Το κυριότερο μειονέκτημα του υλικού αυτού είναι η υδροφοβικότηταμε αποτέλεσμα η εισαγωγή υδατικών διαλυμάτων στα μικροκανάλια να παρουσιάζει αφενός αρκετή δυσκολία και αφετέρου εάν η αναλυτέα ουσία είναι υδρόφοβη να προσροφάται από την επιφάνεια του PDMS αφήνοντας υδροφοβικά κατάλοιπα και ως εκ τούτου να “παρεμβαίνει” στη διαδικασία της ανάλυσης του δείγματος. Τέλος η διαπερατότητα του στους υδρατμούς που πολλές φορές οδηγεί στην απορρόφηση τους μέσα στα μικρορευστονικά κανάλια προκαλεί περιορισμούς στη χρήση τους.

Το PDMS μπορεί να ποικίλει στη μορφή του από υγρό(μικρόν) έως ημιστερεό (μεγάλο n). Τα τελευταία χρόνια έγιναν ορισμένες τροποποιήσειςστην επιφάνεια του συγκεκριμένου υλικού βασισμένες είτεσε φυσικές μεθόδους, όπως η μέθοδος επεξεργασίας αέριας φάσης ή σε αμιγώς χημικές μεθόδους αλλά και συνδυασμός φυσικών και χημικών μεθόδων έτσι ώστε να αποφευχθούν υδροφοβικά φαινόμενα. Δίνεται έτσι η δυνατότητα στην επιφάνεια του πολυμερούς να καταστεί υδρόφιλη για περιορισμένο χρονικό διάστημα (περίπου μισή ώρα),ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα εφίζηξης υδροφοβικών και αρνητικά φορτισμένων μορίων με τη μορφή ρύπων. Σε κάθε περίπτωση βέβαια(οξειδωσης ή μη) το PDMS δεν επιτρέπει στο νερό, τη μεθανόλη και την αιθανόλη να εισχωρήσουν και να προκαλέσουν παραμορφώσεις. Αντιθέτως εάν έρθει σε επαφή με δισοπροπυλαμίνη, χλωροφόρμιο, αιθέρα, ακετόνη, προπανόλη και πυριδίνη διογκώνεται, γεγονός που κάνει απαγορευτική τη χρήση του για εφαρμογές που περιλαμβάνουν αυτού του είδους τα υλικά.

Ένα ακόμη μειονέκτημα που παρουσιάζει το PDMS είναι η μικρή του αντοχή σε υψηλές πιέσεις καθώς αυτό μπορεί να αλλάξει τη γεωμετρία των καναλιών όπως επίσης και η γήρανση του ως υλικό με αποτέλεσμα οι ιδιότητες του να μεταβάλλονται

με το πέρασμα του χρόνου. Μειονέκτημα επίσης είναι η περίπτωση όπου οι δεσμοί μεταξύ των μορίων του υλικού είναι ασθενείς καταλήγοντας να σπάσουν, τα μόρια να διαφύγουν και να αναμειχθούν με το προς εξέταση δείγμα. Τέλος, αν και η διαφάνεια του στο φως είναι επιθυμητή, κάποιες φορές μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα λόγω της θέρμανσης του εξεταζόμενου υγρού από τηνακτινοβολία, ακολούθως της εξάτμισής του με αποτέλεσμα μέρος του δείγματος αλλά και της διαφάνειας να “χαθεί”, αφού το εξεταζόμενο υγρό προκαλεί θάμβωση στα τοιχώματα του κυκλώματος δυσκολεύοντας την παρατήρηση.

Στον πίνακα 1 αναγράφονται οι βασικές ιδιότητες των υλικών που προαναφέρθηκαν

Πίνακας 2.1:

Βασικές ιδιότητες υλικών κατασκευής μικρορευστονικώνκυκλωμάτων [45]:

Υλικά	Πυρίτιο	Γυαλί	Πολυμερές
Κόστος υλικών	Ακριβό	Σχετικά ακριβό	Φθινό
Ευκολία κατασκευής	Διαθέσιμο στη βιομηχανία των ημιαγωγών, εμπλέκονται μια σειρά από διεργασίες και χημικά	Περιορισμός στη γεωμετρία λόγω της ισοτροπίας της εγχάραξης	Υψηλή επεξεργασιμότητα
Μαζική παραγωγή	Ναι, αργή διεργασία, υψηλό κόστος	Ναι, αργή διεργασία, υψηλό κόστος	Ναι, γρήγορη διεργασία, χαμηλό κόστος
Οπτικές ιδιότητες	Αδιαφανές	Διαφανές	Διαφανές, μπορεί να απορροφά στο UV
Θερμική αγωγιμότητα	~1.4W/mK	~1W/mK	~0.1W/mK
Βιοσυμβατότητα	Συνήθως χρήζει επιφανειακής τροποποίησης	Ναι	Εξαρτάται από το πολυμερές και την εφαρμογή
Υψηλή θερμοκρασία αποστείρωσης	Ναι, δυνατή	Ναι, δυνατή	Τείνουν να παραμορφωθούν
Ηλεκτρική αγωγιμότητα	Ημιαγωγός	Μονωτής	Μονωτής

2.5 Τεχνικές κατασκευής

2.5.1 Εισαγωγικά

Υπάρχουν διαφορετικοί τρόποι κατασκευής ενός μικρορευστονικού κυκλώματος και οι τεχνικές που ακολουθούνται σχετίζονται με είδος του κυκλώματος, τη χρήση για την οποία προορίζεται και το υλικό από το οποίο θέλουμε να είναι φτιαγμένο.

Όλες αυτές οι τεχνικές βελτιώνονται με το χρόνο, το κόστος τους μειώνεται και η απόδοση τους αυξάνεται. Γενικά θα μπορούσαμε να κατατάξουμε αυτές τις τεχνικές σε τέσσερις ομάδες.

Α΄ομάδα: Ξηρή ή υγρή εγχάραξη, χρησιμοποιείται κυρίως για την κατασκευή μικρορευστονικών κυκλωμάτων από πυρίτιο ή γυαλί.

Β΄ομάδα: Θερμοφόρηση, π.χ. θερμή ανάγλυφη αποτύπωση και χύτευση με έγχυση

Γ΄ομάδα: Απ' ευθείας χάραξη με laser

Δ΄ομάδα: Χύτευση του υλικού (πολυμερές συνήθως) χρησιμοποιώντας την ειδική μέθοδο της μαλακής λιθογραφίας.

Ενδεικτικά θα αναφέρουμε τη μέθοδο της φωτολιθογραφίας που χρησιμοποιείται για την κατασκευή της μήτρας και σε δύο μεθόδους εγχάραξης κυκλωμάτων, τη μέθοδο της μαλακής λιθογραφίας και την χάραξη με laser (ανήκει στις λεγόμενες maskless patterning techniques) η οποία είναι μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος.

2.5.2 Φωτολιθογραφία

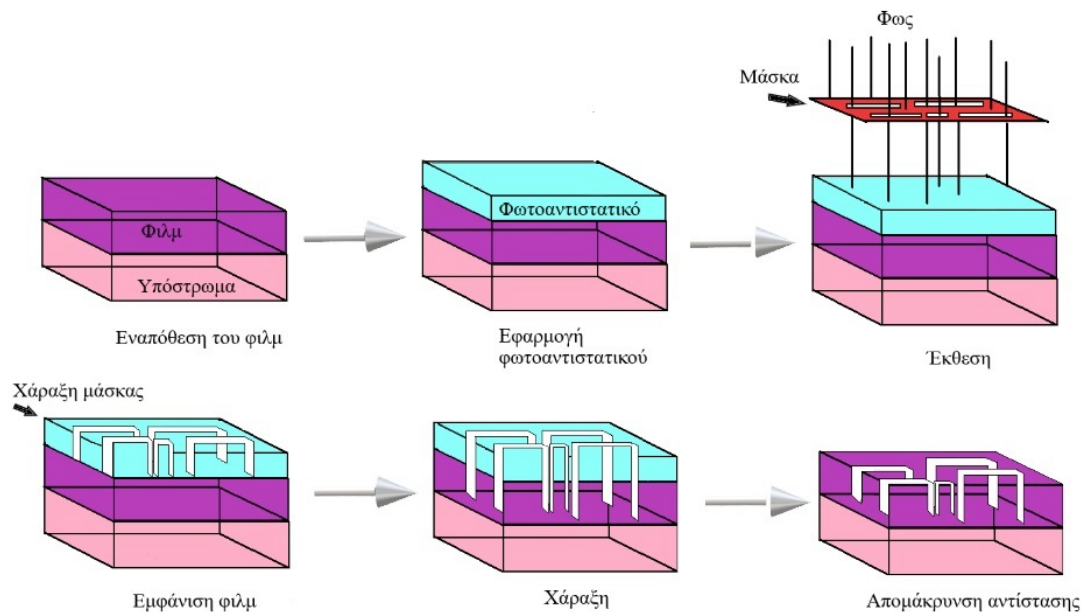
Όπως ήδη αναφέρθηκε στις προηγούμενες παραγράφους, η φωτολιθογραφία ήταν η τεχνική που χρησιμοποιήθηκε κυρίως στους ημιαγωγούς στον τομέα της μικροηλεκτρονικής. Συνδέθηκε άμεσα με τις μικρορευστονικές συσκευές λόγω των δυνατοτήτων που παρείχε στην επεξεργασία των φωτοαντιστατικών υλικών.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την κατασκευή της λιθογραφικής μήτρας μέσα στην οποία το υλικό θα αποκτήσει το επιθυμητό σχήμα. Πρόκειται για μία αδιαφανή πλάκα ή ταινία με διαφανείς περιοχές, όπου επιτρέπει στο φως να διέρχεται (χρήση

φακών μεγάλου NA για καλύτερη εστίαση) μέσα από συγκεκριμένες και προκαθορισμένες περιοχές. Η μήτρα στην ουσία παίζει το ρόλο ενός αρνητικού φωτογραφικού φιλμ που επιτρέπει την διέλευση του φωτός με τέτοιο τρόπο ώστε να αποτυπώνεται επάνω σε ένα υπόστρωμα το επιθυμητό σχήμα. Τα υλικά κατασκευής της ποικίλουν καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν γυαλί, χαλαζίας, πολυεστερική ταινία και SU-8, ένα φωτοαντιστατικό υλικό με δυνατότητα απορρόφησης υπεριώδους ακτινοβολίας (i-line 365 nm) σε βάθος μεγαλύτερο των 500 μm.

Συνοπτικά η τεχνική κατασκευής της μήτρας θα μπορούσαμε να πούμε πως περιλαμβάνει τα εξής βήματα(σχήμα 2.1):

1. Σχεδιασμός μέσω ειδικού προγράμματος σε ηλεκτρονικό υπολογιστή
2. Προετοιμασία του υποστρώματος: Περιλαμβάνει ένα δισκίο πυριτίου (Si) και ένα λεπτό στρώμα silicagel (διοξείδιο του πυριτίου στην κρυσταλλική του μορφή ή χαλαζίας) που στην ουσία αποτελεί τη μήτρα επάνω στο Si. Αυτό είναι ένα πολύ σημαντικό βήμα στην τεχνική αυτή αφού κάποιες φορές μπορεί να χρησιμοποιηθούν περισσότερες από μία μήτρες με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η ευθυγράμμιση κάθε μήτρας με την επόμενη και την προηγούμενη.
3. Επικάλυψη με φωτοαντιστατικό: Επικάλυψη δισκίου με ένα ειδικό υλικό (photoresist) που είτε καταστρέφεται από την υπεριώδη ακτινοβολία (positive photoresist), είτε σκληραίνει (negative photoresist) όταν εκτεθεί σε αυτήν.
4. Ευθυγράμμιση της μάσκας
5. Έκθεση: Γίνεται έκθεση του δισκίου σε υπεριώδη ακτινοβολία μέσω της μάσκας η οποία φέρει το σχέδιο της επιθυμητής μορφής του τελικού κυκλώματος.
6. Εμφάνιση: Η περιοχή του photoresist που φωτίζεται από την υπεριώδη ακτινοβολία είτε καταστρέφεται και απομακρύνεται (positive photoresist), είτε σκληραίνει και μένει επάνω στο υμένιο SiO₂ στα σημεία όπου φωτίστηκαν (negative photoresist).
7. Χάραξη: Γίνεται υγρή απόξεση (wet etching), δηλαδή αφαίρεση υλικού με οξύ (συνήθως HF). Αφαιρείται από όλη την επιφάνεια το στρώμα του SiO₂ εκτός από εκεί που υπάρχει ακόμα το photoresist το οποίο και το προστατεύει.
8. Απομάκρυνση του φωτοαντιστατικού: Τέλος με την αφαίρεση του εναπομένου στρώματος (photoresist) προκύπτει η επιθυμητή μορφοποίηση του Si.



Σχήμα 2.1:
Βήματα κατασκευής της μήτρας

2.5.3 Μαλακή Λιθογραφία

Πρόκειται ίσως για την πιο δημοφιλή τεχνική κατασκευής μικρορευστονικών διατάξεων, όπου τα μικροκυκλώματα σχηματίζονται επάνω στο ελαστομερές υλικό μέσω μιας πλακέτας που έχει κατασκευαστεί και φέρει τοπογραφικά χαρακτηριστικά χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της λιθογραφίας.

Αρχικά η χάραξη επάνω στο γυαλί και το πυρίτιο ήταν μια ακριβή χρονοβόρα διαδικασία και απαιτούσε πρόσβαση σε ειδικές εγκαταστάσεις.

Τελικά το PDMS επικράτησε ως υλικό αφού συνδύαζε τα απαραίτητα χαρακτηριστικά ώστε να καλύπτει τις ανάγκες των περισσότερων εφαρμογών για τις οποίες προορίζονταν το εκάστοτε κύκλωμα και χρησιμοποιείται ευρέως για τέτοιου είδους εφαρμογές.

Με την τεχνική αυτή μπορούν να κατασκευαστούν συστήματα τριών διαστάσεων, τα οποία προσφέρουν πολλές δυνατότητες με βασικότερη την τοποθέτηση διατάξεων εισροής και εκροής του υγρού, κάτι που συνήθως είναι απαραίτητο.

Τα στάδια της μεθόδου της μαλακής λιθογραφίας, όπως απεικονίζονται και στο σχήμα 2.2, είναι τα εξής:

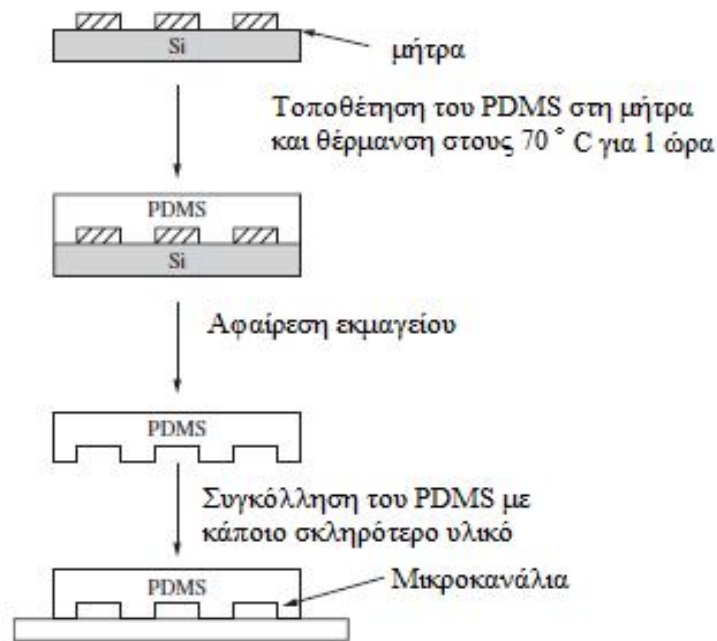
1. Τοποθέτηση υλικού στη μήτρα: Ημήτρα που έχει ήδη κατασκευαστεί χρησιμοποιείται για την παραγωγή αρνητικών αντιγράφων των καναλιών του δικτύου επάνω στο PDMS. Να σημειωθεί εδώ πως το PDMS που παρέχεται σαν υλικό συνήθως αποτελείται από δύο ουσίες. Μία βάση κι έναν παράγοντα σκλήρυνσης. Αυτές οι ουσίες πρέπει να αναμειχθούν (δημιουργία σταυροδεσμών και δημιουργία ελαστομερούς) σε αναλογία βάρους 10:1, αναλογία που όμως ενδέχεται να αλλάξει ανάλογα με τις επιθυμητές ιδιότητες του κυκλώματος, να γίνει εξαέρωση του μίγματος και μετά να τοποθετηθεί επάνω στη μήτρα.

Κατά την ανάμιξη και την ανάδευση των δύο συστατικών μπορεί να δημιουργηθούν ανεπιθύμητες φυσαλίδες. Σε αυτή την περίπτωση και αν κριθεί απαραίτητο το δείγμα τοποθετείται σε έναν ειδικό θάλαμο όπου γίνεται άντληση στην πλειοψηφία των φυσαλίδων αυτών.

Το ιξώδες του PDMS είναι τέτοιο που διευκολύνει την εναπόθεσή του σε μήτρες. Αφενός είναι τόσο παχύρευστο ώστε να μην υπάρχουν διαρροές από τη μήτρα, αφετέρου είναι αρκετά ρευστό ώστε να υπάρχει ομοιογένεια κατά την τοποθέτησή του στην επιφάνεια.

2. Ψήσιμο: Το στερεό και ταυτόχρονα εύπλαστο ελαστομερές θερμαίνεται σε φούρνο για περίπου μία ώρα ή αφήνεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος έως ότου στερεοποιηθεί. Η προτίμηση των αγώγιμων υλικών στην κατασκευή της μήτρας βοηθάει ώστε να μεταφέρεται εύκολα η θερμότητα από αυτήν στο PDMS.
3. Αφαίρεση εκμαγείου: Το ελαστομερές και εύπλαστο εκμαγείο του PDMS απομακρύνεται προσεκτικά από τη μήτρα η οποία είναι έτοιμη να χρησιμοποιηθεί ξανά για να παραχθεί ένα καινούργιο καλούπι αφού το PDMS λόγω χημικής σύστασης δεν προκαλεί φθορές σε αυτή.
4. Συγκόλληση: Είναι πολύ ευκολότερο να σφραγιστούν τα κανάλια που κατασκευάστηκαν από PDMS σε σχέση με αυτά που έχουν κατασκευαστεί από γυαλί, πυρίτιο ή θερμοπλαστικά υλικά καθώς δεν απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες, πιέσεις και τάσεις. Στην περίπτωση που είναι επιθυμητή η σφράγιση καναλιών από γυαλί, απαιτείται θερμοκρασία ~600 °C και διαφορές δυναμικού της τάξεως των 500-1500 Volt. Στην περίπτωση του PDMS αυτό μπορεί να γίνει σε συνθήκες περιβάλλοντος του εργαστηρίου. Στη φάση αυτή

το τμήμα του PDMS που φέρει επάνω του τα μικροκανάλια συγκολλάται με μία καλυπτρίδα προκειμένου να σχηματιστεί το τελικό κύκλωμα που θα αποτελείται από τη βάση της επιλογής μας και τοιχώματα από PDMS. Υπάρχουν περιπτώσεις που είναι επιθυμητή η συγκόλληση του με ένα άλλο στρώμα PDMS. Σε κάθε περίπτωση θέλουμε η συγκόλληση με την εκάστοτε επιφάνεια να εμποδίζει τις φθορές καθώς και τις διαρροές του δείγματος. Η επιλογή του τρόπου με τον οποίο θα συγκολληθεί εξαρτάται από τις πιέσεις που πρόκειται να δεχθεί το μικρορευστονικό κύκλωμα. Εάν αυτές δεν ξεπερνούν τα 5 psi και αν είναι επιθυμητή η αποκόλληση των δύο υλικών μετά το πέρας των μετρήσεων τότε για τη συγκόλληση αρκεί η απλή επαφή τους που οδηγεί σε σχηματισμό van der Waals δεσμών, οι οποίοι κρατούν επαρκώς το υγρό εντός των καναλιών καθώς και τα δύο στρώματα σε επαφή.



Σχήμα 2.2:

Στάδια της μαλακήςλιθογραφίας(απόδοση στα Ελληνικά από: [36])

2.5.4 Μικρομηχανική με laser (lasermicromachining)

Η ακτινοβολία laser παρουσιάζει ορισμένες εξαιρετικές ιδιότητες όπως η συνοχή στο χώρο, η μονοχρωματικότητα, η υψηλή εστίαση, το υψηλό ποσοστό ενεργειακής πυκνότητας που τη χαρακτηρίζει και η δημιουργία πολύ μικρής διάρκειας και μεγάλης

ακρίβειας παλμών, που καθιστούν σημαντική τη χρήση της στον τομέα της “μικρομηχανικής”.

Το υλικό αφαιρείται με εκτομή (αποκόπτεται) με τη χρήση του laser, μέθοδος η οποία βασίζεται κυρίως στην απορρόφηση των φωτονίων της δέσμης. Η απορρόφηση από το υλικό μπορεί φυσικά να συμβεί για συγκεκριμένο μήκος κύματος. Η απορροφούμενη ενέργεια έχει σαν αποτέλεσμα τη θέρμανση του υλικού, την τήξη του, την εξάτμιση ή τη μετουσίωσή του. Τα παλμικά laser που παράγουν σειρές από παλμούς με διάρκεια από picosecond έως femtosecond επιτυγχάνουν αποκοπή του υλικού ως αποτέλεσμα της απορρόφησης πολλαπλών φωτονίων σε πολύ υψηλές ενεργειακές πυκνότητες. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να κατασκευαστούν κυκλώματα από διαφανή υλικά στο μήκος κύματος της συγκεκριμένης laser ακτινοβολίας.

Η διάρκεια και η ενέργεια του παλμού, η ταχύτητα της μεταφορικής κίνησης της δέσμης, ο ρυθμός επαναληψιμότητας είναι σημαντικοί παράμετροι στην κατασκευαστική διαδικασία. Επηρεάζουν τον ρυθμό αποκοπής του υλικού και την έκταση της περιοχής η οποία επηρεάζεται από τη θερμοκρασία και κατά συνέπεια τη ποιότητα της κατασκευής. Τα πολύ μικρής παλμικής συχνότητας laser (τάξεως picosecond ή femtosecond) επιτρέπουν ακόμα και σε υλικά που παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία στις υψηλές θερμοκρασίες να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή μικρορευστονικών διατάξεων διότι η θερμική ισχύς εισόδου είναι σχεδόν ανύπαρκτη. Επιπλέον το επιθυμητό σχέδιο του κυκλώματος μπορεί να αποτυπωθεί επάνω στο γυαλί με υψηλής έντασης παλμικό femtosecond laser που επιτρέπει άμεση αποκοπή του υλικού. Επιπλέον τα femtosecond laser μπορούν να χρησιμοποιηθούν, ώστε να μεταβάλλουν το εσωτερικό τμήμα του γυαλιού κατά τον επιθυμητό τρόπο.

2.6 Φυσική των μικρορευστονικών διατάξεων

2.6.1 Εισαγωγικά

Γενικά, στη ροή ενός ρευστού έχουμε κίνηση των μορίων του από ένα σημείο σε ένα άλλο συναρτήσει του χρόνου. Σε ένα τυπικό δείγμα όγκου ρευστού, περιέχεται πολύ μεγάλος αριθμός μορίων που καθιστά αδύνατη την μελέτη της κίνησής τους μεμονωμένα. Αντ’ αυτού υποθέτουμε ότι το ρευστό αποτελεί ένα συνεχές μέσο το οποίο αποτελείται από στοιχειώδεις όγκους ρευστού οι οποίοι αλληλεπιδρούν μεταξύ τους καθώς και με το περιβάλλον τους. Κάθε τέτοιο ρευστό σωματίδιο περιέχει μεγάλο αριθμό μορίων ώστε να μπορεί η ροή να περιγραφεί βάσει αυτών των

σωματιδίων αντί μέσω μεμονωμένων μορίων. Συνήθως μελετάται η επιτάχυνση και η ταχύτητα αυτών των σωματιδίων. Στο σύνολο αυτών των σωματιδίων βασίζεται η υπόθεση του ρευστού ως συνεχούς μέσου.

2.6.2 Θεμελιώδεις αρχές της Δυναμικής των Ρευστών και Μαθηματική διατύπωση αυτών

Οι καθοριστικοί παράγοντες για τη ροή ενός ρευστού είναι: Η ταχύτητα, η πίεση, η πυκνότητα, το ιξώδες, η ειδική θερμότητα και η θερμοκρασία. Όλοι αυτοί οι παράγοντες συνοψίζονται και συσχετίζονται στις σχέσεις που ακολουθούν.

1. Αρχή διατήρησης της μάζας – Εξίσωση Συνέχειας

Με την κίνηση ενός ρευστού η μάζα μεταφέρεται με την πάροδο του χρόνου από τη μία θέση του πεδίου ροής σε μία άλλη, χωρίς όμως να υφίσταται καμία μεταβολή. Στα ομογενή ρευστά η αρχή διατήρησης της μάζας οδηγεί στην εξίσωση της συνέχειας, η οποία συνδέει τις μεταβολές ως προς το χώρο και τον χρόνο της πυκνότητας και της ταχύτητας του ρευστού [46].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (2.1)$$

Όταν η ροή είναι σταθερή έχουμε $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$, η σχέση (2.1) γράφεται $\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) = 0$

Επίσης για ασυμπίεστα ρευστά (σταθερή πυκνότητα) ισχύει: $\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0$

2. Αρχή διατήρησης (μεταβολής) της ορμής – Εξίσωση κίνησης

Η αρχή της μεταβολής της ορμής είναι το γνωστό αξίωμα της κίνησης του Νεύτωνα, κατά το οποίο η μεταβολή της ορμής ισούται με τη συνισταμένη όλων των δυνάμεων που ασκούνται σε αυτό. Η αρχή αυτή οδηγεί στις εξισώσεις κίνησης, οι οποίες συνδέουν τα κινηματικά χαρακτηριστικά της ροής (επιτάχυνση) με τα αντίστοιχα δυναμικά (δυνάμεις). Σύμφωνα με το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα έχουμε ότι [46]:

$$\vec{F} = m\vec{a} \rightarrow \frac{\vec{F}}{V} = \vec{f}_a = \frac{m}{V}\vec{a} = \rho \frac{d\vec{u}}{dt} \quad (2.2)$$

Όπου m η μάζα ενός σώματος (η ενός συστήματος), \vec{a} η επιτάχυνση που αποκτά το σώμα, V και \vec{u} ο όγκος και η ταχύτητα του σώματος αντίστοιχα.

Στην περίπτωση των ρευστών η παραπάνω εξίσωση ανάγεται στις εξισώσεις Navier-Stokes και παίρνει την εξής μορφή:

$$\rho \frac{d\vec{u}}{dt} = \rho \left[\frac{\partial}{\partial t} \vec{u} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right] = \rho \vec{F}_m - \vec{\nabla} P + \mu \vec{\nabla}^2 \vec{u} \quad (2.3)$$

όπου:

- $\vec{u} = u(x(t), y(t), z(t), t)$ η ταχύτητα του ρευστού
- $\frac{d\vec{u}}{dt}$: Μεταβολή της ορμής “τοπικά” συναρτήσει του χρόνου $\left(\frac{\partial}{\partial t}\right)$ και “μεταθετικά” $\left(q \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z}\right)$, λόγω της μετακίνησης του ρευστού σωματιδίου στο χώρο.
- $\rho \vec{F}_m$: Συνολικές δυνάμεις οι οποίες ασκούνται σε ολόκληρο τον όγκο του ρευστού σωματιδίου μέσω ενός εξωτερικού πεδίου, όπως π.χ. η βαρύτητα και οι δυνάμεις ηλεκτρομαγνητικής φύσεως.
- $-\vec{\nabla} P = \frac{dF_{\text{pressure}}}{dV}$: Κάθετη επιφανειακή δύναμη
- $\mu \vec{\nabla}^2 \vec{u} = \frac{d\vec{F}_\eta}{dV}$: Εφαπτομενική επιφανειακή δύναμη

Μια ειδική περίπτωση των παραπάνω εξισώσεων είναι το ρευστό να είναι *ιδανικό* ($\mu=0$) με σταθερή πυκνότητα ρ , οπότε οι εξισώσεις Navier-Stokes καλούνται εξισώσεις Euler και παίρνουν τη μορφή:

$$\rho \frac{d\vec{u}}{dt} = \rho \vec{F}_m - \vec{\nabla} P \quad (2.4)$$

3. Αρχή διατήρησης της ενέργειας (Πρώτο θερμοδυναμικό αξίωμα) – Εξίσωση ενέργειας

Το πρώτο θερμοδυναμικό αξίωμα εκφράζει την αρχή διατήρησης της ενέργειας σε οποιαδήποτε μορφή αυτή νοείται (μηχανική, θερμική, χημική, κλπ)

$$dQ = dW + dE \quad (2.5)$$

όπου:

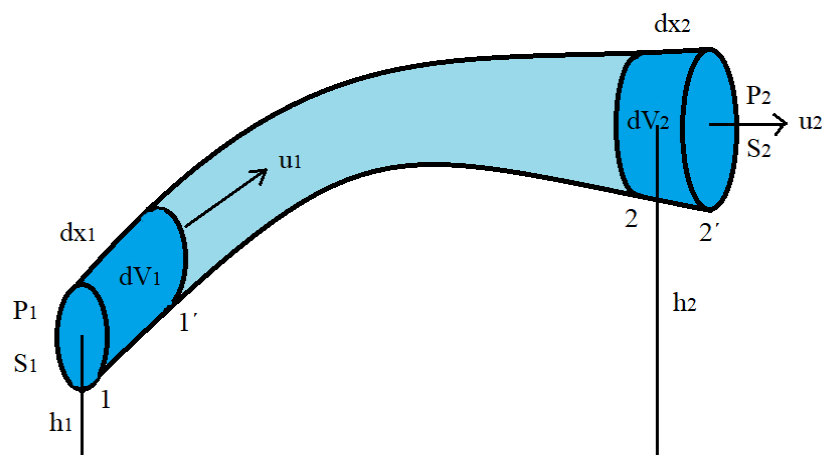
- dQ : Το προσφερόμενο ποσό θερμότητας σε ένα σύστημα μάζας
- dW : Το παραγόμενο από το σύστημα έργο λόγω μεταβολής της εσωτερικής ενέργειας αυτού
- dE : Η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας του συστήματος

Όπως ήδη αναφέρθηκε, όταν $\mu=0$ (ιδανικά ρευστά) από τις εξισώσεις Navier-Stokes προκύπτουν οι εξισώσεις Euler. Η ολοκλήρωση του συστήματος αυτών των εξισώσεων είναι δυνατή κατόπιν ορισμένων παραδοχών που οδηγούν στην απλοποίηση της μορφής τους. Συγκεκριμένα δεχόμαστε ότι:

- Η ροή είναι σταθερή (μηχρονοεξαρτώμενη), ισχύει δηλαδή: $\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = 0$
- Το πεδίο των συνολικών δυνάμεων \vec{F}_m είναι συντηρητικό, οπότε υπάρχει μία βαθμωτή συνάρτηση Ω για την οποία θα ισχύει: $\vec{F}_m = -\nabla\Omega$
- Έχουμε ήδη υποθέσει ότι το ρευστό είναι ομογενές και ασυμπίεστο συνεπώς η τιμή της πυκνότητάς του ρ , παραμένει σταθερή

Η ολοκλήρωση των εξισώσεων του Euler οδηγεί στο “νόμο του Bernoulli” ο οποίος αποτελεί μία έκφραση της αρχής διατήρησης της ενέργειας (κατά μήκος μιας ρευματικής γραμμής της ροής) [46].

Θεωρούμε την ποσότητα του ρευστού μεταξύ δύο επιφανειών κάθετων στη ροή στα σημεία 1 και 2 όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3. Μετά από ένα στοιχειώδες χρονικό διάστημα οι δύο τερματικές επιφάνειες μετατοπίζονται εξ αιτίας της ροής κατά dx_1 και dx_2 στα σημεία 1' και 2'. Επειδή η ενέργεια της ποσότητας του ρευστού μεταξύ των σημείων 1' και 2 παραμένει αμετάβλητη, η ολική μεταβολή dE είναι ίση προς τη διαφορά της ενέργειας της ποσότητας στην περιοχή μεταξύ των σημείων 2 και 2' μείον την ενέργεια της ποσότητας στην περιοχή μεταξύ των σημείων 1 και 1' (προφανώς οι δύο περιοχές περιέχουν ίσες μάζες ρευστού).



Σχήμα 2.3:
Δύο τμήματα της ροής ενός ρευστού μεταξύ δύο σημείων

Επειδή $dW = dE$

$$p_1 dV_1 + dmgh_1 + \frac{1}{2} dm\vec{u}_1^2 = p_2 dV_2 + dmgh_2 + \frac{1}{2} dm\vec{u}_2^2 \quad (2.6)$$

Η εξίσωση αυτή ισχύει για δύο τυχόντα σημεία, επομένως ισχύει και για κάθε στοιχειώδη ποσότητα του ρευστού. Προκύπτει έτσι ο νόμος Bernoulli για τις ενέργειες

$$pdV + dmgh + \frac{1}{2} dm\vec{u}^2 = C' \quad (2.7)$$

όπου C' σταθερή ποσότητα και διαιρώντας τον με το στοιχειώδη όγκο dV προκύπτει ο νόμος Bernoulli με διαστάσεις πίεσης (σχέση 2.8).

$$\frac{1}{2} \rho \vec{u}^2 + \rho\Omega + P = C \quad (2.8)$$

όπου:

- $\frac{1}{2} \rho \vec{u}^2$: Η “δυναμική” πίεση, η οποία αποτελεί το μέτρο της κινητικής ενέργειας του υγρού
- $\rho\Omega$: Η “υψομετρική” πίεση που εκφράζει την πίεση η οποία αποτελεί το μέτρο της δυναμικής ενέργειας λόγω ύψους. Στο βαρυτικό πεδίο ο ουσιαστικός μηχανισμός ο οποίος καθορίζει την τιμή της είναι η βαρυτική δύναμη η οποία ασκείται στο ρευστό λόγω του βάρους του υπερκείμενου υγρού ($\Omega=gh$).
- P : Η “στατική” πίεση, η οποία μεταφέρεται σε όλη την έκταση του υγρού και συνδέεται με τις εξωτερικές δυνάμεις που προκαλούν τη ροή του. Εκφράζει το μηχανικό έργο που παράγεται από τις δυνάμεις αυτές σε κάθε μονάδα όγκου του ρευστού
- C : είναι μία σταθερά η οποία έχει την ίδια τιμή κατά μήκος μίας ρευματικής γραμμής.

Οι τρεις παραπάνω σχέσεις εκφράζουν ενέργεια ανά μονάδα όγκου.

Επομένως σύμφωνα με το θεώρημα του Bernoulli: κατά μήκος μιας ρευματικής γραμμής, το άθροισμα της στατικής, της δυναμικής και της υψομετρικής πίεσεως παραμένει σταθερό.

Εάν επιπλέον η ροή είναι αστρόβιλη, $\vec{\nabla} \times \vec{u} = 0$, τότε η σταθερά C έχει παντού την ίδια τιμή.

Λόγω της σπουδαιότητας των εξισώσεων Navier-Stokes στην μελέτη της κίνησης ενός ρευστού, ακολουθεί μια πιο αναλυτική εικόνα που θα συμπεριλαμβάνει τις παραδοχές που γίνονται στη μελέτη ρευστών σε μικρορευστονικά κυκλώματα.

2.6.3 Εξισώσεις Navier-Stokes και εφαρμογή σε μικρορευστονικά κανάλια

Σύμφωνα με την εξίσωση Navier-Stokes (σε μια πιο γενική μορφή) και για ασυμπίεστο Νευτώνειο ρευστό ισχύει για την δύναμη F [55]:

$$\vec{F} = \rho \left[\frac{\partial}{\partial t} \vec{u} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right] = \vec{f}_{\text{pressure}} + \vec{f}_{\text{friction}} + \vec{f}_{\text{volume}} \quad (2.9)$$

Το αριστερό μέλος της 2.9 αναφέρεται στη μεταβολή της ορμής λόγω:

- 1) Μεταβολής της ταχύτητας συναρτήσεως του χρόνου σε μια συγκεκριμένη θέση
- 2) Επιτάχυνσης του ρευστού (μετάβαση ρευστού από μία μεγαλύτερης σε μια μικρότερης διατομής κανάλι)

Στο δεξιό μέλος της ίδιας εξίσωσης δίνονται οι δυνάμεις που επιδρούν στο ρευστό και είναι οι:

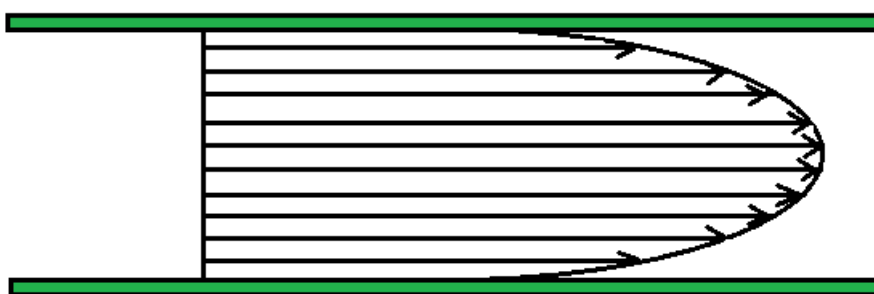
- 1) Βαθμίδα πίεσης
- 2) Δυνάμεις τριβής (ιξώδους)
- 3) Συνολικές δυνάμεις

Οι απλοποιήσεις-παραδοχές που συνήθως εφαρμόζονται στη μελέτη των ρευστών μέσα σε μικρορευστονικά κανάλια αφορούν στην *επίδραση της βαρυτικής δύναμησης* οποία γενικά *παραλείπεται*.

Σε ένα υγρό που βρίσκεται σε ισορροπία π.χ. νερό ($\rho=1000 \text{ Kg/m}^3$) μέσα σε ένα μικρορευστονικό κανάλι έστω $h=100\mu\text{m}$ επιδρά η επιτάχυνση της βαρύτητας $g=9.81 \text{ m/s}^2$. Υπολογίζεται ότι η πίεση που θα ασκείται σε αυτό λόγω βαρύτητας θα ισούται με $P=9.81 \cdot 10^{-6} \text{ bar}$ (η οποία είναι πολύ χαμηλή)

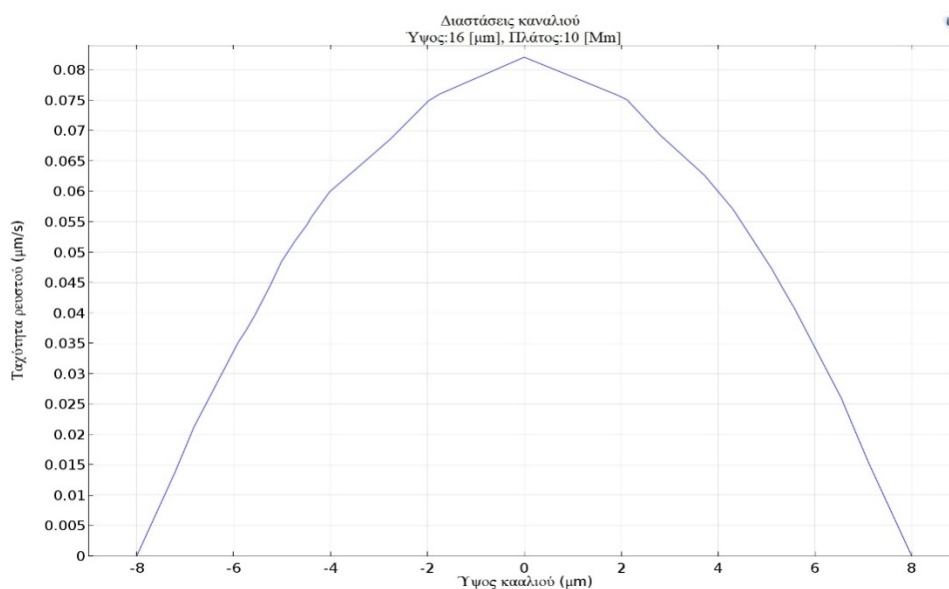
Επίσης η ροή θεωρείται *στρωτή*. Αν ένα ρευστό, που βρίσκεται σε σχετική κίνηση με μία επιφάνεια, κινείται κατά στρώματα παράλληλα μεταξύ τους με χαμηλές σχετικά ταχύτητες, τα στρώματα αυτά κινούνται ομαλά το ένα επί του άλλου, οπότε η ροή χαρακτηρίζεται ως στρωτή και *κυριαρχούν οι ιξώδεις δυνάμεις*. Χαρακτηριστικό αυτού του είδους της ροής είναι η μηδενική τιμή της ταχύτητας στα τοιχώματα της επιφάνειας (γνωστή και ως συνθήκη μη –ολίσθησης) και η εμφάνιση της μέγιστης τιμής της ταχύτητας στο κέντρο του καναλιού όπως την αποδώσαμε στο σχήμα 2.4.

Επιπλέον όλα τα σωματίδια που διέρχονται από ένα σημείο έχουν την ίδια ταχύτητα. Τοδε προφίλ της ταχύτητας για στρωτή ροή μέσα σε κυλινδρικό σωλήνα είναι παραβολικό και συνάδει με το προφίλ της ταχύτητας στα μικρορευστονικά κανάλια ελλειπτικού σχήματος στη μελέτη των οποίων στηρίχτηκαν οι προσομοιώσεις και τα πειράματα που συμπεριλήφθηκαν στην παρούσα εργασία. Στο σχήμα 2.5 απεικονίζεται η γραφική παράσταση της ταχύτητας του ρευστού, όπως προέκυψε από προσομοίωση που πραγματοποιήσαμε με το λογισμικό Comsol Multiphysics.



Στρωτή ροή

Σχήμα 2.4 :
Προφίλ ταχύτητας στρωτής ροής μέσα σε κυλινδρικό σωλήνα



Σχήμα 2.5:
Γραφική παράσταση της ταχύτητας του ρευστού (αποτέλεσμα προσομοίωσης) συναρτήσει του ύψους ενός ελλειπτικού καναλιού διαστάσεων 10-16 μm

Έχει παρατηρηθεί πως αν η ταχύτητα ροής υπερβεί κάποιο συγκεκριμένο όριο, εμφανίζονται ισχυρές διαταραχές και δημιουργούν στροβιλισμούς οι οποίοι προκαλούν ανάμιξη των στρωμάτων του ρευστού μεταξύ τους και δημιουργείται έτσι μία εντελώς διαφορετική μορφή ροής που ονομάζεται *τυρβώδης* και χαρακτηρίζεται από χαώδεις ή τυχαίες μεταβολές του πεδίου ροής του ρευστού. Αυτό συμβαίνει λόγω της σημαντικής αύξησης των δυνάμεων τριβής που δημιουργούνται μεταξύ του ρευστού και της στέρεης επιφάνειας η οποία το περιβάλλει. Στη ροή αυτή κυρίαρχο ρόλο παίζουν οι αδρανειακές δυνάμεις αφού τείνουν να παράγουν χαοτικές δίνες.

Πρώτος ο Βρετανός φυσικός Reynolds (1883) προσδιόρισε τις παραμέτρους που επηρεάζουν τη ροή και καθόρισε ένα αδιάστατο μέγεθος το οποίο μας δίνει ένα μέτρο της αναλογίας των αδρανειακών δυνάμεων προς τις ιξώδεις και κατά συνέπεια ποσοτικοποιεί την σχέση αυτών των δυνάμεων για δεδομένες συνθήκες ροής.

Οι δυνάμεις αδράνειας είναι ανάλογες του γινομένου της μάζας επί τη μεταβολή της ταχύτητας. Η μάζα διαιρούμενη με τον χρόνο είναι η παροχή μάζας η οποία ισούται με το γινόμενο της πυκνότητας ρ επί το εμβαδόν διατομής A της ροής επί την (μέση) ταχύτητα u (m/s)

$$\text{Δυνάμεις αδράνειας} \propto (\rho Au)u$$

Οι δυνάμεις τριβής είναι ανάλογες προς το γινόμενο της διατμητικής τάσης επί το εμβαδόν της επιφάνειας εφαρμογής

$$\text{Δυνάμεις τριβής} \propto \mu \frac{d\bar{u}}{dy} A \propto \mu \frac{\bar{u}}{d} A$$

Όπου d η διάμετρος του αγωγού. Στην περίπτωση που ο αγωγός δεν είναι κυκλικός χρησιμοποιείται η υδραυλική διάμετρος $d_h = 4 \frac{A}{C}$, όπου A η επιφάνεια διατομής και C η βρεχόμενη περίμετρος του αγωγού.

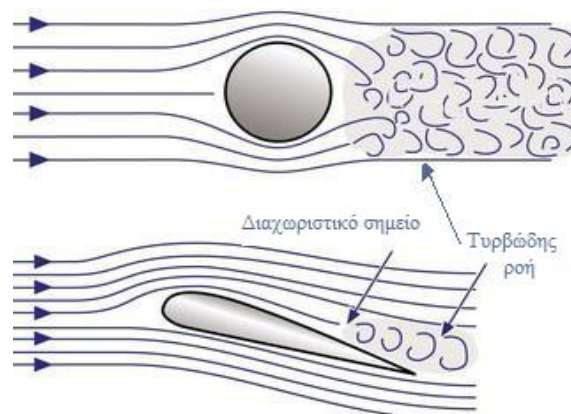
Διαιρώντας τις δυνάμεις αδράνειας με τις δυνάμεις τριβής, προκύπτει μία έκφραση του αριθμού Reynolds

$$Re = \frac{(\rho A \bar{u}^2)}{\mu \bar{u} d_h} = \frac{\rho \bar{u} d_h}{\mu} = \frac{\bar{u} d_h}{\nu} \quad (2.10)$$

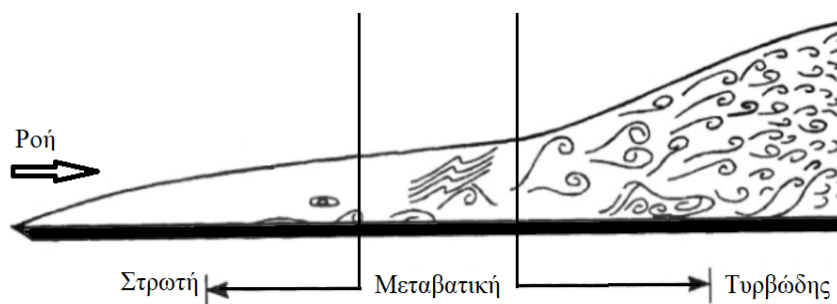
όπου ο όρος μ/ρ είναι το κινητικό ιξώδες σε m^2/s [56]

- Ο αριθμός Reynolds αποτελεί τη σπουδαιότερη αδιάστατη ποσότητα στη μελέτη των μικρορευστονικών κυκλωμάτων
- Χαμηλοί αριθμοί Reynolds είναι τυπικοί σε μικρορευστονικά κανάλια όπου κυριαρχούν οι ιξώδεις δυνάμεις

Η τιμή του Re κατά την οποία αρχίζει η μετάβαση ροής από μεταβατική σε τυρβώδη λέγεται κρίσιμος αριθμός Reynolds (critical Reynolds number). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μετάβαση της ροής από στρωτή σε τυρβώδη δεν είναι μία απότομη και σύντομη διαδικασία. Καθώς ο αριθμός Reynolds αυξάνεται σε μία αρχικά στρωτή ροή, εμφανίζονται σποραδικά έντονες διακυμάνσεις ταχύτητας μικρής διάρκειας. Όσο ο αριθμός Reynolds συνεχίζει να αυξάνεται οι θύλακες με έντονες διακυμάνσεις ταχύτητας εμφανίζονται με μεγαλύτερη συχνότητα και διάρκεια, ενώ στα ενδιάμεσα χρονικά διαστήματα η ροή είναι στρωτή. Σε υψηλότερες τιμές του αριθμού Reynolds, οι θύλακες έντονων διακυμάνσεων ενώνονται μεταξύ τους, οπότε η ροή γίνεται ολοκληρωτικά τυρβώδης. Η ροή που εμφανίζει διαδοχικές περιόδους στρωτής και τυρβώδους ροής ονομάζεται μεταβατική (σχήμα 2.6 και 2.7).



Σχήμα 2.6:
Μετάβαση στρωτής ροής σε μεταβατική και τυρβώδη [57]



Σχήμα 2.7:
Μορφές ροής επάνω σε επίπεδη πλάκα (απόδοση στα Ελληνικά από: [42])

- Ο κρίσιμος αριθμός Reynolds, Re_c αντιστοιχεί σε μία κρίσιμη ταχύτητα

$$\vec{u}_c = Re_c \frac{\mu}{\rho d}$$

- Σε ένα μικρορευστονικό κανάλι η ταχύτητα ροής του ρευστού πολύ δύσκολα θα πάρει την τιμή που αντιστοιχεί στην u_c ($d=100\mu\text{m} \rightarrow u_c=25\text{m/s}$)
- Η διεθνώς αποδεκτές τιμές του κρίσιμου αριθμού Reynolds για ροή σε κλειστό αγωγό είναι: $2000 < \text{Re} < 4000 \rightarrow$ μεταβατική ροή, $\text{Re} > 4000 \rightarrow$ τυρβώδης ροή, χωρίς ωστόσο αυτό να σημαίνει ότι δεν έχουν παρατηρηθεί και αποκλίσεις από αυτούς τους αριθμούς σχετικά με το είδος της ροής ενός ρευστού).
- Η επικρατέστερη συνοριακή συνθήκη είναι η συνθήκη μη-ολίσθησης ($\vec{u}=0$)

Ένα από τα χαρακτηριστικά της ροής των πραγματικών ρευστών είναι η λεγόμενη *συνάφεια*, η οποία προέρχεται από τη δύναμη επαφής μεταξύ του υγρού και των τοιχωμάτων του αγωγού που ρέει το υγρό. Όπου υπάρχει επαφή, το ρευστό κινείται με την ίδια ταχύτητα με το στερεό. Δεδομένου ότι η ροή του ρευστού γίνεται μέσα σε μικροκανάλια άκαμπτων ή σκληρών επιφανειών τα μόρια του υγρού που βρίσκονται σ' επαφή με τα τοιχώματα παρουσιάζουν μηδενική ταχύτητα, σε αντίθεση μ' εκείνα που βρίσκονται στο κέντρο του αγωγού και παρουσιάζουν μέγιστη ταχύτητα.

- Αμελητέα φαινόμενα συναγωγής

Σύμφωνα με τη θερμοδυναμική η ενέργεια συναλλάσσεται μεταξύ των συστημάτων υπό τη μορφή έργου και θερμότητας. Η έννοια του συστήματος αναφέρεται σε μία διάταξη ή συνδυασμό διατάξεων, που περιέχουν μία υπό μελέτη ποσότητα μάζας. Επίσης ως θερμότητα ορίζεται η μορφή ενέργειας που μεταδίδεται μέσα από το όριο ενός θερμοδυναμικού συστήματος συγκεκριμένης θερμοκρασίας προς ένα άλλο σύστημα –ή στο περιβάλλον- που βρίσκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία, λόγω ακριβώς αυτής της διαφοράς θερμοκρασίας των δύο συστημάτων. Από τον ορισμό της θερμότητας γίνεται αντιληπτό ότι η θερμότητα μπορεί να οριστεί μόνο στα όρια ενός συστήματος (το ίδιο το σύστημα δεν περιέχει θερμότητα), κατά τη διαδικασία της μεταφοράς της προς ένα άλλο σύστημα και για όσο χρόνο διαρκεί η μεταφορά μέχρι να επέλθει θερμοκρασιακή ισορροπία στα δύο συστήματα. Μετάδοση θερμότητας είναι στην ουσία η μεταφορά ενέργειας λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς [47]. Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί μηχανισμοί μεταφοράς ενέργειας. Ο πρώτος αναφέρεται σε ακίνητο μέσο και ονομάζεται αγωγή (conduction). Ο δεύτερος μηχανισμός αναφέρεται σε μετάδοση θερμότητας μεταξύ μιας στερεής επιφάνειας και

ενός κινούμενου ρευστού (και εμπίπτει στη συγκεκριμένη περίπτωση μελέτης του υγρού μέσα στα μικρορευστονικά κανάλια) και ονομάζεται συναγωγή (convection). Ο τρίτος μηχανισμός στηρίζεται στο γεγονός ότι κάθε σώμα πεπερασμένης θερμοκρασίας εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Σε αυτήν την περίπτωση μεταξύ δύο σωμάτων διαφορετικής θερμοκρασίας θα υπάρχει μετάδοση θερμότητας χωρίς την ανάγκη παρουσίας κάποιου ενδιάμεσου σώματος λόγω θερμικής ακτινοβολίας (thermal radiation) [47]. Όπως ήδη αναφέρθηκε ο μηχανισμός μετάδοσης ενέργειας που θα μας απασχολήσει είναι αυτός της συναγωγής. Στην περίπτωση των κινούμενων ρευστών συνυπάρχουν δύο τρόποι μετάδοσης της θερμότητας-ενέργειας.

Αφενός η διάχυση ή η μεταφορά ενέργειας λαμβάνει χώρα μέσω των σωματιδιακών αλληλεπιδράσεων. Τα μόρια του ρευστού με υψηλότερη θερμοκρασία, διαθέτουν υψηλότερη ενέργεια την οποία μεταδίδουν στα γειτονικά τους μόρια χαμηλότερης ενέργειας μέσω των μεταξύ τους τυχαίων συγκρούσεων.

Ο δεύτερος τρόπος μεταφοράς θερμικής ενέργειας συνδέεται με τη μακροσκοπική κίνηση του ίδιου του ρευστού όπου τα στοιχειώδη σωματίδια που απαρτίζουν τα στοιχεία του ρευστού, μεταφέρουν μαζί με τη μάζα τους και την ενέργεια που σχετίζεται με την τυχαία μεταφορική κίνησή τους, την εσωτερική περιστροφή καθώς και την ταλάντωση τους (Συναγωγή). Έτσι η συνολική μετάδοση θερμικής ενέργειας είναι το άθροισμα της μετάδοσης λόγω συγκρούσεων και της μετάδοσης λόγω της μεταφοράς ενέργειας των σωματιδίων μέσω της μακροσκοπικής κίνησης του ρευστού [47].

Κατά αντιστοιχία με τον αριθμό Reynolds για το είδος της ροής που επικρατεί υπάρχει ο αριθμός *Peclet* που σχετίζεται με το κυρίαρχο φαινόμενο της μεταφοράς μάζας (και κατ'επέκταση θερμικής ενέργειας) μέσω του ρευστού και στην ουσία είναι ο λόγος του ρυθμού μεταφοράς μέσω συναγωγής προς τον ρυθμό μεταφοράς μέσω διάχυσης.

Ο αριθμός Peclet είναι ένα αδιάστατο μέγεθος και ορίζεται ως εξής:

$$Pe = \frac{|\vec{u}|l}{D} \quad (2.11)$$

όπου \vec{u} είναι η ταχύτητα του ρευστού, l το χαρακτηριστικό μήκος (μία διάσταση που αλλάζει ανάλογα με το φυσικό σύστημα που περιγράφεται) και $D(m^2/s)$ ο συντελεστής διάχυσης [58]. Όταν ο αριθμός Peclet είναι μεγαλύτερος της μονάδας το

φαινόμενο της μεταφοράς μέσω συναγωγής επικρατεί του αντίστοιχου μέσω διάχυσης. Αυτό όμως συμβαίνει συνήθως για συστήματα μεγαλύτερων της μικρομετρικής κλίμακας διαστάσεων. Επίσης ο αριθμός Peclet είναι ανάλογος των διαστάσεων του συστήματος έχει παρατηρηθεί ότι σε πολύ μικρές κλίμακες, η διάχυση συνεισφέρει πολύ περισσότερο στη μεταφορά θερμικής ενέργειας σε σχέση με το μηχανισμό της συναγωγής.

Συνοψίζοντας θα λέγαμε ότι και η συναγωγή είναι μία πολύ ταχύτερη διαδικασία από τη διάχυση, για πολύ μικρούς όγκους ρευστού, όπως ο όγκος ενός ρευστού που βρίσκεται μέσα σε ένα μικρορευστονικό κανάλι, ο επικρατέστερος τρόπος μεταφοράς μάζας έχει παρατηρηθεί να είναι αυτός της διάχυσης.

- Ασυμπίεστα ρευστά

Όπως ήδη αναφέρθηκε τα μικρορευστονικά κυκλώματα χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση υγρών κυρίως δειγμάτων, γεγονός που αυτομάτως μας επιτρέπει να κάνουμε χρήση των εξισώσεων Navier-Stokes για πρακτικώς ασυμπίεστα ρευστά.

Οι ανωτέρω παραδοχές δύναται να εφαρμοστούν συνολικά ή επιλεκτικά αναλόγως την εκάστοτε ροή

2.7 Έγχυση και ροή ρευστού στα μικρορευστονικά κανάλια

2.7.1 Εισαγωγικά

Οι βασικές μέθοδοι με τις οποίες επιτυγχάνεται η ροή ενός ρευστού μέσα σε ένα μικρορευστονικό κύκλωμα είναι δύο (δύναται να υπάρχουν κάποιοι συνδυασμοί, παραλλαγές ή/και τροποποιήσεις). Αφενός η λεγόμενη “εξαναγκασμένη ροή”(pressure driven flow) ή ροή λόγω διαφοράς πίεσης και αφετέρου η “έγχυση με σύριγγα”(Syringe pump).

2.7.2 Τρόποι επίτευξης ροής στα μικρορευστονικά κανάλια

- Εξαναγκασμένη (στρωτή) ροή (Laminar pressure driven flow)

Σε αυτή τη μέθοδο, η παροχή Q , κατά το ρευστοδυναμικό ανάλογο του νόμου του Ohm ($I = \frac{V}{R}$), δίνεται από τη σχέση $Q = \frac{\Delta P}{R}$, όπου το Q αντιστοιχεί στην ένταση του

ρεύματος που διαρρέει ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, ΔP είναι η η πτώση πίεσης κατά μήκος του καναλιού και αντιστοιχεί στη διαφορά δυναμικού και $R = \frac{8\mu l}{\pi r^4}$ η υδραυλική αντίσταση ροής η οποία είναι εννοιολογικά ανάλογη της ηλεκτρικής αντίστασης του κυκλώματος, όπου μ το ιξώδες του ρευστού, l η απόσταση μεταξύ των σημείων με διαφορά πίεσης ΔP , και r η ακτίνα του καναλιού [60]. Η διαφορά στην πίεση μπορεί να επιτευχθεί είτε δημιουργώντας κενό αέρος στην έξοδο του κυκλώματος ενώ η είσοδος αφήνεται ακάλυπτη, είτε μέσω ενός ρυθμιστή πίεσης αέρα ο οποίος ασκεί εξωτερική πίεση στο δοχείο που περιέχει το δείγμα το οποίο θέλουμε να εισάγουμε και να εξασφαλίσουμε τη ροή του μέσα στο μικρορευστονικό κανάλι. Καθώς επιβάλλουμε εξωτερική πίεση στο φιαλίδιο με το ρευστό δείγμα, ο αέρας σπρώχνει την επιφάνεια του ρευστού το οποίο αναγκάζεται, να διαφύγει μέσω της εξόδου – οπής του δοχείου. Λόγω του ότι η πίεση που ασκείται μέσω της συσκευής (ρυθμιστή πίεσης αέρα) είναι ελεγχόμενη, καθίσταται δυνατή η διαχείριση της ποσότητας του υγρού στην έξοδο. Κατά αυτόν τον τρόπο το δείγμα ελεγχόμενα αλλά και σχεδόν άμεσα εισάγεται στο κύκλωμα.

- Απευθείας έγχυση του υγρού με σύριγγα μέσα στο κανάλι (Syringe pump)

Πρόκειται ίσως για την πιο διαδεδομένη μέθοδο χορήγησης ενός ρευστού σε μία μικρορευστονική συσκευή. Η εισαγωγή του δείγματος στο κύκλωμα σε αυτή την περίπτωση επιτυγχάνεται διαμέσου μίας σύριγγας η οποία έχει προσαρμοστεί κατάλληλα επάνω σε μηχανικό σύστημα γραμμικής κίνησης, που καθορίζει την ταχύτητα με την οποία θα μετακινηθεί το έμβολο της σύριγγας. Εάν επιπλέον γνωρίζουμε τη διάμετρο της σύριγγας, η συσκευή έχει τη δυνατότητα να προσαρμόσει την γραμμική ταχύτητα στην επιθυμητή παροχή του ρευστού μέσα στο κανάλι ακολουθώντας στην ουσία τον τύπο: $Q = vS$, όπου Q : η παροχή, v : η ταχύτητα του εμβόλου και S : το εμβαδό της διατομής του. Ωστόσο όταν έχουμε να κάνουμε με μικρορευστονικά κανάλια τάξης μεγέθους μικρομέτρων τα πράγματα δεν είναι τόσο απλά. Στο σχεδιάγραμμα που ακολουθεί (οι πληροφορίες περιέχονται στην ιστοσελίδα:[60]) παρατίθενται συνοπτικά οι κύριες παράμετροι της συγκεκριμένης μεθόδου έγχυσης καθώς και ο τρόπος που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητά της. Επίσης στο σχήμα 2.8 απεικονίζονται οι δύο προαναφερθείσες μέθοδοι έγχυσης ενός υγρού σε ένα μικρορευστονικό κύκλωμα.

Εγγυση με σύριγγα

Ευστάθεια

* από τις προδιαγραφές του μηχανικού συστήματος

Πίεση εμβόλου \Leftrightarrow χορήγηση όγκου ρευστού (ανάλογος με τη διάμετρο της σύριγγας)

Όσο μικρότερος ο όγκος του ρευστού που θέλουμε να εισάγουμε στο κύκλωμα, τόσο μικρότερη και η μετακίνηση του εμβόλου \Leftrightarrow step by step

Για μικρές ογκομετρικές παροχές (μικροί όγκοι ρευστού) έχουμε φαινόμενα ταλαντώσεων και παλμών λόγω των πολύ μικρών κινήσεων του εμβόλου

Αντιμετώπιση

- * Μικρότερης διαμέτρου σύριγγα
- * Αύξηση ελαστικότητας του συστήματος (εάν είναι εφικτό) η οποία όμως μειώνει την απόδοση
- * Χρήση συμπληρωματικών εξαρτημάτων

Χρόνος αποκατάστασης

(Ο χρόνος που χρειάζεται το σύστημα ώστε η ροή να φτάσει και να παραμείνει στα πλαίσια του 2-5% της επιθυμητής τελικής ροής)

Εξαρτώνται

* από τις προδιαγραφές του μηχανικού συστήματος

* από την $R_{\text{fluidic}} = \frac{\Delta P}{Q}$ του συστήματος

* από την ενδοτικότητα του συστήματος $C(\text{compliance}) = \frac{V}{\Delta P}$

(το σύστημα περιλαμβάνει τις σύριγγες, τα κανάλια και όλο το κύκλωμα σαν σύνολο)

* από την ελαστικότητα, την ικανότητα δηλαδή αντίστασης του συστήματος σε δυνάμεις παραμόρφωσης καθώς και τον χρόνο επανόδου στο αρχικό σχήμα και μέγεθος

Ορισμένες φορές προσπαθώντας να επιτύχουμε την επιθυμητή παροχή (κατάλληλη πίεση εισόδου-εξόδου) οδηγούμαστε σε παραμόρφωση του συστήματος αντί στη ροή του ρευστού μέσα στα κανάλια

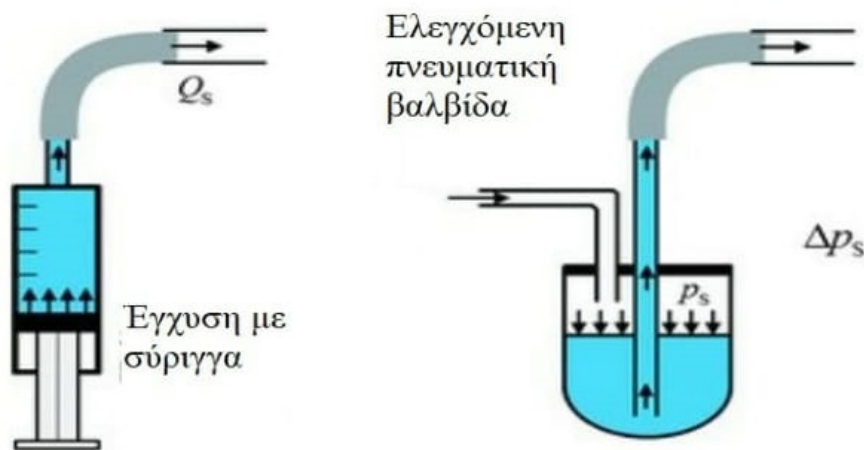
Η παραμόρφωση του συστήματος έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του ρυθμού αύξησης της πίεσης και κατ'επέκταση την καθυστέρηση σταθεροποίησης της ογκομετρικής παροχής

Στην περίπτωση που έχουμε μεγάλο όγκο δείγματος και μικρό μηχανικό βήμα υπάρχει περίπτωση για ένα μικρό χρονικό διάστημα το μοτέρ της σύριγγας να σταματήσει να κινείται

Ένα ακόμη πρόβλημα που μπορεί να εμφανιστεί οφείλεται στην μηχανική επαφή ανάμεσα στο μοτέρ και τα πιστόνια, η οποία εάν δεν είναι μεγάλης ακρίβειας αρχικά δε θα έχουμε κίνηση του εμβόλου και στη συνέχεια θα υπάρξουν απότομα τινάγματα στο μοτέρ λόγω τριβών.

Αντιμετώπιση

- * Αποφυγή της ελαστικότητας (όταν και όσο μπορούμε) στο σύστημα
- * Ελαχιστοποίηση της R_{fluidic} του κυκλώματος
- * Χρήση συμπληρωματικών εξαρτημάτων



Σχήμα 2.7:
Οι δύο διαφορετικές μέθοδοι έγχυσης ρευστού [37]

Κλείνοντας την παράγραφο με τις μεθόδους έγχυσης ενός ρευστού σε μικρορευστονικά κυκλώματα, θα μπορούσαμε επιγραμματικά να επισημάνουμε τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε μίας από τις μεθόδους που προαναφέρθηκαν.

Πίνακας 2.1:
Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα μεθόδων έγχυσης ρευστού σε μικρορευστονικά κανάλια [60]

Έγχυση με σύριγγα	Εξαναγκασμένη ροή
Πλεονεκτήματα	Πλεονεκτήματα
<ul style="list-style-type: none"> • Γρήγορη εγκατάσταση της πειραματικής διάταξης 	<ul style="list-style-type: none"> • Γρήγορος χρόνος απόκρισης
<ul style="list-style-type: none"> • Η διανεμηθείσα ποσότητα του ρευστού παραμένει γνωστή για μεγάλης χρονικής διάρκειας πειράματα 	<ul style="list-style-type: none"> • Υψηλή ευστάθεια και ροή χωρίς φαινόμενα ταλαντώσεων
<ul style="list-style-type: none"> • Η μέγιστη πίεση που δημιουργείται μέσω της έγχυσης με σύριγγα μπορεί να είναι της τάξης μερικών εκατοντάδων bars 	<ul style="list-style-type: none"> • Δυνατότητα χειρισμού ρευστών όγκων αρκετών λίτρων • Επιτρέπει τον ταυτόχρονο έλεγχο παροχής και πίεσης όταν χρησιμοποιείται μετρητής ροής
Μειονεκτήματα	Μειονεκτήματα

<ul style="list-style-type: none"> • Χρόνος απόκρισης (1) 	<ul style="list-style-type: none"> • P_{max}: 8 bar
<ul style="list-style-type: none"> • Γνώση της (πραγματικής) παροχής (2) 	<ul style="list-style-type: none"> • Πιθανές επιστροφές στη ροή του ρευστού (7)
<ul style="list-style-type: none"> • Περιορισμένος χορηγούμενος όγκος ρευστού (3) 	
<ul style="list-style-type: none"> • Εμφάνιση φαινομένων παλμών-ταλαντώσεων (4) 	
<ul style="list-style-type: none"> • Πιθανότητα να καταστραφεί η συσκευή (5) • Δεν υπάρχει δυνατότητα μέτρησης της πίεσης (6) 	

- (1) Χρόνος απόκρισης: Στις μικρορευστονικές διατάξεις, χρόνος απόκρισης, είναι ο χρόνος που μεσολαβεί ανάμεσα στην ένδειξη της έναρξης της ροής στο κανάλι και της πρώτης αλλαγής στη ροή στις ενδείξεις του μόνιτορ ή της κάμερας του χρήστη που διεξάγει το πείραμα. Ο χρόνος αυτός είναι δυνατόν να ποικίλει από δευτερόλεπτα έως και ώρες ανάλογα την αντίσταση και την ενδοτικότητα του συστήματος.
- (2) Χωρίς τη χρήση μετρητών ροής, είναι αδύνατο να γνωρίζουμε την παροχή κατά την περίοδο μετάβασης (όταν αλλάζουμε το ρυθμό ροής στο σύστημα) η οποία μπορεί να διαρκέσει από δευτερόλεπτα έως και ώρες.
- (3) Η ποσότητα – όγκος του προς χορήγηση ρευστού είναι περιορισμένη.
- (4) Εάν κάποιο κανάλι φράξει π.χ. λόγω σκόνης ή φυσαλίδων, έχουμε συνεχόμενη αύξηση της πίεσης στη συσκευή η οποία μπορεί να οδηγήσει στην καταστροφή της.
- (5) Για να είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε την πίεση μέσα στο μικρορευστονικό κύκλωμα απαιτείται η χρήση μετρητή της πίεσης.
- (6) Δυνάμεις που μπορούν να προκαλέσουν μεταβολή στην κινητική κατάσταση ενός σώματος λέγονται “αστάθμιστες” (unbalanced) και στην ουσία πρόκειται για δυνάμεις οι οποίες δεν είναι ίσες και αντίθετες. Τέτοιες δυνάμεις μπορούν να προκαλέσουν

- Κίνηση ενός ακίνητου αντικειμένου
- Επιτάχυνση ή επιβράδυνση ενός κινούμενου αντικειμένου
- Ακινητοποίηση ενός κινούμενου αντικειμένου
- Αλλαγή κατεύθυνσης ενός αντικειμένου

Δεδομένου ότι η πίεση ορίζεται ως η ασκούμενη δύναμη προς το εμβαδό της επιφάνειας στην οποία ασκείται καταλαβαίνουμε ότι κατά αντίστοιχο τρόπο θα ορίζεται και η “αστάθμιστη” πίεση (unbalanced pressure). Όταν εμφανίζεται αστάθμιστη πίεση στο σύστημα, μπορεί η ροή να αντιστραφεί, ειδικά όταν αλλάζουμε συχνά τη ροή και έχουμε παραπάνω από ένα κανάλια εισόδου.

Κεφάλαιο 3

3 Προσομοιώσεις

3.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία έγινε μία προσπάθεια μελέτης και κατανόησης της συμπεριφοράς της στρωτής ροής ενός ασυμπίεστου ρευστού (συγκεκριμένα νερού) σε ένα μικρορευστονικό κανάλι, μέσω κατάλληλης υπολογιστικής προσομοίωσης. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για το σκοπό αυτό ήταν το Comsol Multiphysics. Όπως όλα τα προγράμματα που βασίζονται στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση προβλημάτων, έτσι και η δομή του Comsol αποτελείται από τρία βασικά τμήματα, το Προ (Pre), το Μετά (Post) και τον Παράγοντα Επίλυσης (Solver). Συνοπτικά, το έργο που επιτελεί το κάθε τμήμα ξεχωριστά κατανέμεται ως εξής:

Προ:

Η “αποστολή” της Προ-διαδικασίας είναι η δημιουργία του μοντέλου που περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

- Τον σχεδιασμό και τη γεωμετρική κατασκευή
- Την διακριτοποίηση της γεωμετρίας, την επιλογή και κατασκευή του πλέγματος
- Την επιλογή του φυσικού μοντέλου και τον καθορισμό των ιδιοτήτων του
- Την επιλογή των υλικών μαζί με τις ιδιότητες που συμπεριλαμβάνονται από το πρόγραμμα ή που ορίζονται από τον χρήστη
- Τις επιβαλλόμενες οριακές συνθήκες.

Παράγοντας Επίλυσης:

Αφού οριστούν όλες οι απαραίτητες παράμετροι μέσω της Προ-διαδικασίας, ένα αρχείο κειμένου που περιλαμβάνει όλα αυτά τα δεδομένα σε συγκεκριμένη μορφή (συνήθως Nastran) δημιουργείται και αποστέλλεται στον παράγοντα επίλυσης. Η δουλειά του τελευταίου είναι να “διαβάσει” τα δεδομένα που του έχουν αποσταλεί και να τα επεξεργαστεί χρησιμοποιώντας εξειδικευμένους αλγόριθμους και να δώσει τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Στην πραγματικότητα ο παράγοντας επίλυσης είναι ο

“εγκέφαλος” του προγράμματος”. Περιέχει όλους τους αλγόριθμους μέσω των οποίων θα αναλυθούν τα δεδομένα και θα επεξεργαστούν ώστε να καταλήξουν σε ένα αποτέλεσμα και κατ’ επέκταση στον προσδιορισμό των λύσεων.

Μετά:

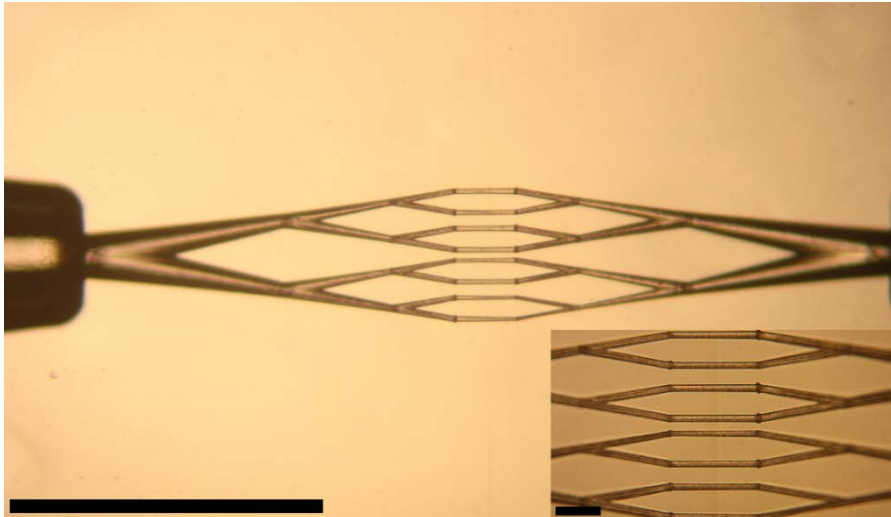
Τα αποτελέσματα του παράγοντα επίλυσης, ως δεδομένα θα σταλούν με τη σειρά τους στο Μετά – τμήμα του προγράμματος το οποίο θα τα παρουσιάσει σε μία μορφή κατανοητή για τον χρήστη (π.χ. διαγράμματα, γραφήματα, πίνακες).

Οι περισσότερες προσομοιώσεις βασίστηκαν στις πραγματικές διαστάσεις των κυκλωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στην διεξαγωγή του πειράματος. Ωστόσο προκειμένου να έχουμε μια όσο το δυνατόν πιο εμπειστατωμένη και σαφή άποψη για το πώς οι διαστάσεις αυτές και η μεταβολή τους επηρεάζουν την ταχύτητα του υγρού και κατ’ επέκταση την απόδοση της οπτικής παγίδας, εκτελέσαμε και κάποιες προσομοιώσεις κρατώντας σταθερή τη μία διάσταση του καναλιού (π.χ. πλάτος) αλλάζοντας το ύψος και το αντίστροφο. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν μαζί με τις οριακές τους συνθήκες, τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα επάνω σε αυτά παρατίθενται αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους.

3.2 Comsol και Συνθήκες προσομοιώσεων

3.2.1 Γεωμετρία:

Η ύπαρξη κατοπτρικής συμμετρίας ως προς άξονα που υπήρχε στα μικρορευστονικά κυκλώματα που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα, κατέστησε ευκολότερη και απλούστερη την κατασκευή του γεωμετρικού μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις κρατώντας μόνο το ένα από τα οκτώ ζεύγη μικρορευστονικών καναλιών σύμφωνα με το σχήμα 3.2. Βλέποντας τη φωτογραφία (3.1) που απεικονίζει την πραγματική διάταξη, υπάρχουν τέσσερα ζεύγη καναλιών στα οποία η νοητή ευθεία που διασχίζει κατά μήκος το μέσο του κυκλώματος αποτελεί τον άξονα συμμετρίας αυτού. Επίσης κάθε ένα από τα δύο ζεύγη παρουσιάζει κατοπτρική συμμετρία ως προς μία ευθεία η οποία περνάει από το μέσο της απόστασης των ζευγών κατά μήκος του κυκλώματος.



Σχήμα 3.1:
Μικρορευστονική συσκευή μετά τη χάραξη όπου διαφαίνονται τα μικρορευστονικά κανάλια [38]



Σχήμα 3.2:
Το γεωμετρικό μοντέλο των καναλιών που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις (χρήση του λειτουργικού Comsol Multiphysics))

Προκειμένου να τηρηθούν σωστά οι αναλογίες των αποστάσεων έγινε μέτρηση στο φυσικό μοντέλο και αντίστοιχα μετατροπή με κατάλληλη κλίμακα. Στην πρώτη ομάδα κυκλωμάτων οι διαστάσεις παρατίθενται επιγραμματικά στον πίνακα 3.1

Πίνακας 3.1

Ύψος καναλιών (μm)	Πλάτος καναλιών (μm)
18	12
34	16
37	17
18	17
54	15
23	14
36	11
80	19

Όπως μπορούμε εύκολα μπορεί να διαπιστωθεί δεν τηρείται κάποιο είδος αναλογίας στις διαστάσεις αυτές και στον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλονται. Για το λόγο αυτό στη δεύτερη φάση των προσομοιώσεων και με την προοπτική να μπορέσουμε να έχουμε μια πιο ξεκάθαρη εικόνα για το πώς η αλλαγή στις διαστάσεις επηρεάζει την ταχύτητα της ροής και την απόδοση της δέσμης κρατήθηκε α) σταθερό το πλάτος των καναλιών (συγκεκριμένα στα 10 μm) μεταβάλλοντας το ύψος από 2-36 μm με βήμα 2 μm και β) σταθερό το ύψος (10 μm), μεταβάλλοντας το πλάτος από 2-30 μm επίσης με βήμα 2 μm .

Τα κυρίως κανάλια είναι παράλληλα μεταξύ καταλήγοντας κι από τις δύο πλευρές σε δύο λίγο μεγαλύτερης διατομής κανάλια τα οποία και σχηματίζουν με αυτά (τα κυρίως κανάλια) γωνία 170°. Τα τελευταία ενώνονται σε γωνία $\sim 20^\circ$ όπου ξεκινάει ακόμα ένα κανάλι στην κάθε πλευρά μήκους $\sim 200 \mu\text{m}$, μήκος επαρκές ώστε η ροή να έχει αναπτυχθεί πλήρως φτάνοντας στη διασταύρωση, στην άκρη του οποίου έχει παρθεί η είσοδος (έξοδος) του κυκλώματος.

3.2.2 Υλικά:

Το κανάλι θεωρήθηκε ότι διαρρέεται από νερό χωρίς να λάβουμε υπόψη μας το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο το κύκλωμα. Ως εκ τούτου η αλληλεπίδραση μεταξύ του υλικού του κυκλώματος, το οποίο ήταν το γυαλί, και του ρευστού θεωρήθηκε ανύπαρκτη, καθώς μία από τις παραδοχές που γίνονται αρκετά συχνά στη μελέτη των μικρορευστονικών κυκλωμάτων είναι ότι τα φαινόμενα συναγωγής θερμότητας θεωρούνται αμελητέα και η μεταφορά της συμβαίνει κυρίως με το μηχανισμό της διάχυσης.

Φυσικά σαν οριακή συνθήκη στα τοιχώματα των καναλιών πάρθηκε η συνθήκη μη-ολίσθησης που εξασφαλίζει άκαμπτα τοιχώματα στη διαδικασία της προσομοίωσης.

Οι ιδιότητες του νερού και κάποιες από τις συνθήκες της προσομοίωσης επιλέχθηκαν από τις προκαθορισμένες ρυθμίσεις του προγράμματος. Πιο συγκεκριμένα είναι οι τιμές του πίνακα 3.2:

Πίνακας 3.2

Θερμοκρασία T [K]	293.15 (20 °C)
Πυκνότητα ρ [Kg/m^3]	1000 (20 °C)
(Δυναμικό) Ιξώδες μ [Pa·s]	0.001 (20 °C)

3.2.3 Μοντέλο ροής:

Στρωτή-Ασυμπίεστη-Σταθερή-Μονοφασική

Η ροή του ρευστού στο μοντέλο της προσομοίωσης επιλέχθηκε να είναι

Στρωτή (laminar):

- Το ρευστό αποτελείται από πολλά λεπτά στρώματα και ρέει σε παράλληλες προς τον άξονα του αγωγού γραμμές.
- Επικρατούν οι δυνάμεις ιξώδους
- Μηδενική τιμή της ταχύτητας στα τοιχώματα του καναλιού
- Όλα τα σωματίδια του ρευστού που διέρχονται από ένα σημείο έχουν την ίδια ταχύτητα

Μονοφασική (Single-Phase flow):

- Μια κατάσταση (υγρή ή αέρια) ενός ρευστού

Στο Comsol το συγκεκριμένο μοντέλο (στρωτή-ασυμπίεστη-σταθερή) χρησιμοποιείται για την εύρεση του προφίλ της ταχύτητας και τον υπολογισμό της πίεσης στη *μονοφασικήστρωτή* ροή. Ασφαλώς ο αριθμός Reynolds είναι η παράμετρος που παίζει τον καθοριστικό ρόλο στην επιλογή του μοντέλου και εξαρτάται άμεσα από το τελευταίο. Ωστόσο σαν σημείο αναφοράς για την κρίσιμη τιμή του αριθμού Reynolds στη στρωτή ροή πάρθηκε αυτή που αντιστοιχεί στην τιμή Reynolds της περίπτωσης του κυλινδρικού σωλήνα $R_c \sim 2000$

Ασυμπίεστη (Incompressible):

- Η πυκνότητα του ρευστού δε μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία και την πίεση

Σταθερή (Stationary):

- Όλες οι συνιστώσες της τοπικής επιτάχυνσης είναι μηδενικές, δηλαδή:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} = 0, \quad i=1,2,3$$

- Για το ίδιο σημείο του χώρου η ταχύτητα του ρευστού παραμένει σταθερή για κάθε χρονική στιγμή (αφού είναι ανεξάρτητη του χρόνου $\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = 0$)

3.2.4 Εξισώσεις-Συνθήκες

Οι εξισώσεις μαζί με κάποιες από τις συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση πάρθηκαν από τις προκαθορισμένες ρυθμίσεις του προγράμματος για τη συγκεκριμένη μορφή ροής. Συγκεκριμένα πρόκειται για τις εξισώσεις Navier-Stokes που εκφράζουν τη διατήρηση της ορμής ενός συστήματος, την εξίσωση αρχής διατήρησης της μάζας (η πυκνότητα θεωρείται σταθερή) και την αρχή διατήρησης της ενέργειας εκπεφρασμένης ως προς τη θερμότητα, γεγονός που διευκολύνει τον ορισμό των οριακών συνθηκών. Με την επιλογή του μοντέλου της στρωτής ροής, αυτομάτως το πρόγραμμα θέτει και κάποιες προεπιλεγμένες παραμέτρους όπως τις ιδιότητες του ρευστού, την επιλογή των τοιχωμάτων και τις αρχικές συνθήκες (με τη δυνατότητα αλλαγής από τον χρήστη εάν χρειάζεται). Υπάρχουν φυσικά και κάποιες επιπλέον συνθήκες που πρέπει να οριστούν για την κάθε περίπτωση, ενδεικτικά αναφέρουμε τις οριακές συνθήκες ή/και την παράλειψη ή όχιτης συνολικής δύναμης.

Στρωτή – μονοφασική ροή

Ξεκινώντας την αναφορά και επεξήγηση των χρησιμοποιούμενων εξισώσεων, θα μεταβαίνουμε από την γενικότερη μορφή στην ειδικότερη σύμφωνα με τους περιορισμούς που επιβάλλει η κάθε επιπλέον συνθήκη που έχει οριστεί. Η αρχική μορφή των εξισώσεων συνέχειας, Navier – Stokes και αρχής διατήρησης της ενέργειας για στρωτή και μονοφασική ροή είναι η εξής:

$$\bullet \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (\text{I})$$

$$\bullet \quad \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) \vec{u} = \vec{\nabla} \cdot [-P\mathbf{I} + \boldsymbol{\tau}] + \vec{F}(\text{II})$$

$$\bullet \quad \rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) T \right) = -(\vec{\nabla} \cdot \mathbf{q}) + \boldsymbol{\tau} : \mathbf{S} - \frac{T}{\rho} \left. \frac{\partial \rho}{\partial T} \right|_p \left(\frac{\partial P}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) P \right) + Q \quad (\text{III})$$

όπου:

- ρ : η πυκνότητα [kg/m^3]
- \vec{u} : το διάνυσμα της ταχύτητας [m/s]*
- P : η πίεση [Pa]
- $\boldsymbol{\tau}$: η διατμητική τάση με $\boldsymbol{\tau} = 2\mu \mathbf{S} - \frac{2}{3}\mu(\vec{\nabla} \cdot \vec{u})\mathbf{I}$ για Νευτώνεια ρευστά στα οποία η διατμητική τάση είναι ανάλογη της ταχύτητας της μεταβολής της γωνιακής παραμόρφωσης και το ιξώδες δεν αποτελεί συνάρτηση του ρυθμού

διάτμησης S παρά μόνο της πίεσης (σε μικρότερο βαθμό) και κυρίως της θερμοκρασίας.

- F : η συνολική δύναμη [N/m^3]
- C_p : η ειδική θερμοχωρητικότητα του υγρού, δηλαδή η θερμοχωρητικότητα του υγρού ανά μονάδα μάζας για καθορισμένη πίεση. Θυμίζουμε ότι με τον όρο θερμοχωρητικότητα εννοούμε τη φυσική ποσότητα που ορίζεται από το λόγο της θερμότητας που προστίθεται (ή αφαιρείται) από ένα υλικό προς τη επιφερόμενη μεταβολή της θερμοκρασίας [$J/Kg \cdot K$]
- T : η απόλυτη θερμοκρασία [K]
- q : ορυθμός θερμικής ροής ανά μονάδα επιφάνειας [W/m^2]
- Q : οι πηγές θερμότητας
- S : ποσοστό παραμόρφωσης:

$$\mathbf{S} = \frac{1}{2} [(\vec{\nabla} \vec{u} + (\vec{\nabla} \vec{u})^T)]$$

- “ $\tau:S$ ” Διπλό γινόμενο της διατμητικής τάσης τα με το ποσοστό παραμόρφωσης S . Το διπλό γινόμενο ορίζεται ως:

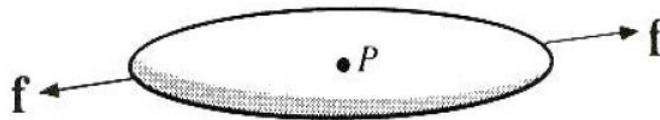
$$A:B = \sum_j \sum_i (a_i \cdot d_j)(b_i \cdot c_j) \text{ ή } \sum_j \sum_i (a_i \cdot c_j)(b_i \cdot d_j) \text{ με } A = \sum_i a_i b_i, \quad B = \sum_j c_j d_j$$

και a, b, c, d διανύσματα.

* Στις προσομοιώσεις το μέτρο της ταχύτητας ορίστηκε σε [$\mu m/s$]

Θεωρητικά οι παραπάνω εξισώσεις χρησιμοποιούνται για την περιγραφή του μοντέλου τόσο της στρωτής όσο και της τυρβώδους ροής. Ωστόσο στην πράξη η ανάλυση του πλέγματος που θα πρέπει χρησιμοποιηθεί στην προσομοίωση κατά τη μετάβαση από τη στρωτή στην τυρβώδη ροή είναι τόσο μεγάλη που καθιστά αυτή την προσέγγιση πρακτικά αδύνατη.

Σχετικά με ορισμένους από τους όρους των παραπάνω εξισώσεων και ειδικά των σχετικών με το ποσοστό παραμόρφωσης θα ήταν χρήσιμο για την καλύτερη κατανόηση να γίνει μια όσο το δυνατόν σύντομη αναφορά για την προέλευση και για τη σημασία τους στην προσέγγιση του μοντέλου της πραγματικής ροής ενός ρευστού. Έστω ένας στοιχειώδης όγκος ρευστού όπως απεικονίζεται στο σχήμα 3.3 στον οποίο ασκείται μια δύναμη \vec{f}



Σχήμα 3.3:
Εφαρμοζόμενη δύναμη f σε ένα σωματίδιο ρευστού [61]

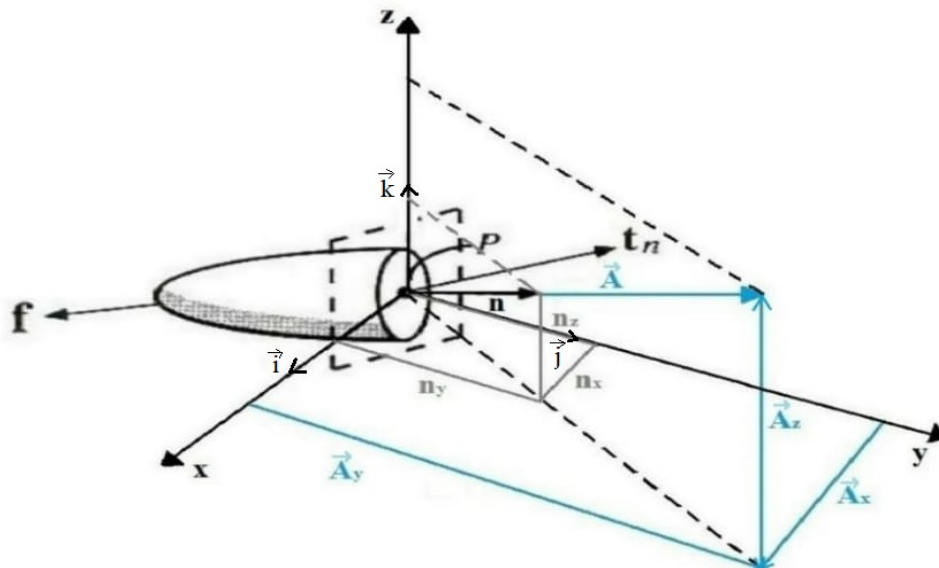
Θεωρούμε μία τομή δια μέσου του σημείου P , σχεδόν κάθετα στην κατεύθυνση της δύναμης, που παράγει την επιφάνεια A της οποίας ο προσανατολισμός ορίζεται από το κάθετο σε αυτή διάνυσμα \vec{n} [61]. Επίσης θεωρούμε τρία κάθετα μεταξύ τους επίπεδα που τέμνονται στο σημείο P και τα σχετιζόμενα διανύσματα τους $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ που καθορίζουν τις διευθύνσεις τους κατά τους άξονες x, y, z αντίστοιχα όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4. Το άνυσμα της δύναμης στο καρτεσιανό σύστημα αναλύεται σε [49]:

$$\vec{f} = \vec{i}f_x + \vec{j}f_y + \vec{k}f_z$$

Αντίστοιχα το άνυσμα της επιφάνειας στο καρτεσιανό σύστημα αναλύεται σε:

$$\vec{A} = \vec{i}A_x + \vec{j}A_y + \vec{k}A_z$$

Η τάση (ένταση) επάνω στην επιφάνεια είναι $\vec{t}_n = \frac{\vec{f}}{A}$ και πρόκειται για πηλίκο δύο διανυσμάτων και όχι για απλό διάνυσμα. Ουσιαστικά είναι ένας τανυστής β' τάξης.



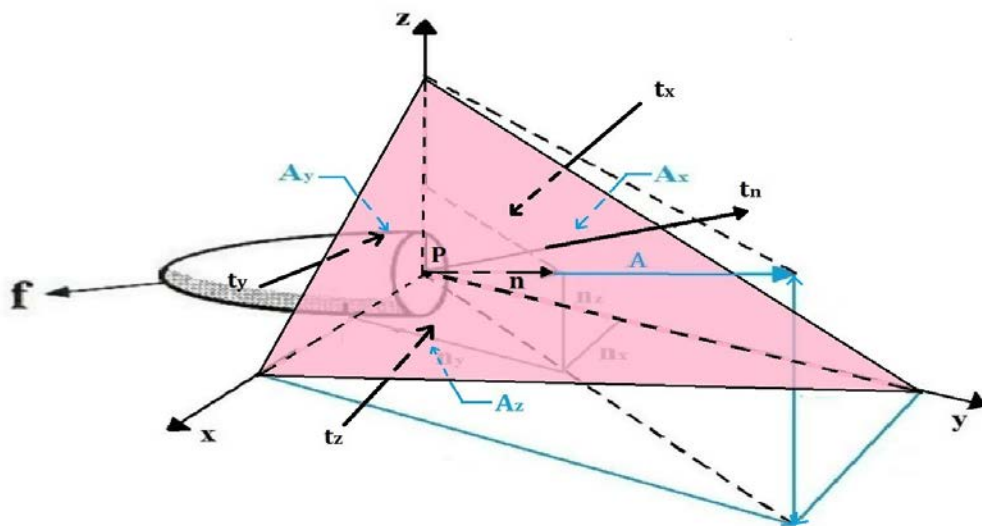
Σχήμα 3.4:
Κάθετη στη διεύθυνση της δύναμης τομή του σωματιδίου στο σημείο P και καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων x, y, z (προσαρμογή από:[49,61])

Μετά την ανάλυση των ανυσμάτων δύναμης και επιφάνειας θεωρούμε ότι κάθε συνιστώσα της δύναμης επιδρά επάνω σε κάθε συνιστώσα της επιφάνειας, καταλήγοντας έτσι σε εννέα πιθανούς συνδυασμούς δύναμης-επιφάνειας που αποτελούν τον τανυστή τάσεων \mathbf{T}_{ij} , [49].

$$\begin{array}{ccc} \frac{\vec{f}_x}{\vec{A}_x}, & \frac{\vec{f}_x}{\vec{A}_y}, & \frac{\vec{f}_x}{\vec{A}_z} \\ \frac{\vec{f}_y}{\vec{A}_x}, & \frac{\vec{f}_y}{\vec{A}_y}, & \frac{\vec{f}_y}{\vec{A}_z} \\ \frac{\vec{f}_z}{\vec{A}_x}, & \frac{\vec{f}_z}{\vec{A}_y}, & \frac{\vec{f}_z}{\vec{A}_z} \end{array}$$

όπου i : το επίπεδο επάνω στο οποίο ασκείται η συνιστώσα της δύναμης και j : η διεύθυνση της συνιστώσας στο επίπεδο αυτό. (Για το καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων $i = x, y, z$ και $j = x, y, z$).

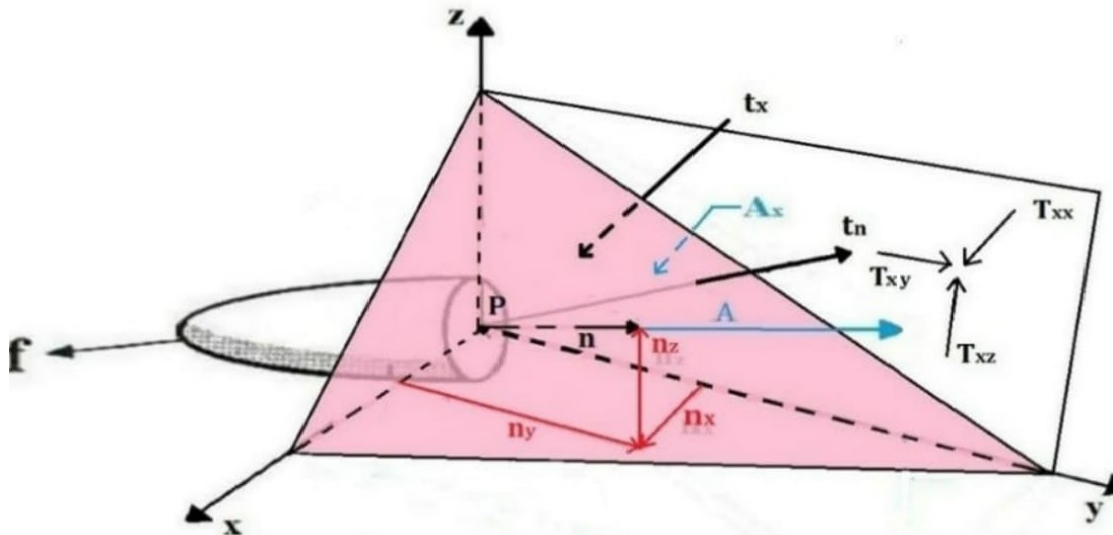
Σχηματίζοντας το τετράεδρο γύρω από το σημείο P, το διάνυσμα της επιφάνειας A, η οποία προσδιορίζεται από το κάθετο μοναδιαίο διάνυσμα \vec{n} , καθώς και τις τάσεις που ασκούνται στις “συνιστώσες” αυτής, τμήματα A_x, A_y, A_z του τετραέδρου προκύπτει το σχήμα (3.5):



Σχήμα 3.5:

Οι επιμέρους τάσεις t_x, t_y, t_z σε κάθε πλευρά του τετραέδρου (προσαρμογή από: [49, 61])

Παίρνοντας την μία πλευρά του τετραέδρου, έστω την A_x , η αντίστοιχη τάση \mathbf{t}_x που ασκείται σε αυτή υπολογίζεται (βάσει των συνιστωσών του \mathbf{T}_{xx} , \mathbf{T}_{xy} , \mathbf{T}_{xz} , οι οποίες απεικονίζονται και στο σχήμα 3.6) ως εξής:



Σχήμα 3.6:

Η τάση \mathbf{t}_x , η επιφάνεια A_x και οι “συνιστώσες” \mathbf{T}_{ij} του γενικευμένου διανύσματος \mathbf{t}_x (προσαρμογή από: [49, 61])

Σύμφωνα με τον ορισμό της τάσης που ήδη αναφέρθηκε, για την επιφάνεια A_x θα είναι: $\mathbf{t}_x = \left(\frac{f_x}{A_x} \vec{n}_x, \frac{f_y}{A_x} \vec{n}_y, \frac{f_z}{A_x} \vec{n}_z \right)$, όπου $\frac{f_x}{A_x} = \mathbf{T}_{xx}, \frac{f_y}{A_x} = \mathbf{T}_{xy}, \frac{f_z}{A_x} = \mathbf{T}_{xz}$. Αντίστοιχα θα ορίζονται τα \mathbf{t}_y και \mathbf{t}_z . Συνεπώς για τον τανυστή \mathbf{T} (συνολική τάση που εφαρμόζεται στην επιφάνεια) θα είναι (κατά Gibbs) [61]:

$$\mathbf{T} \cdot \mathbf{n} = \vec{i} \mathbf{T}_{xx} \vec{n}_x + \vec{j} \mathbf{T}_{yx} \vec{n}_x + \vec{k} \mathbf{T}_{zx} \vec{n}_x + \vec{i} \mathbf{T}_{xy} \vec{n}_y + \vec{j} \mathbf{T}_{yy} \vec{n}_y + \vec{k} \mathbf{T}_{zy} \vec{n}_y + \vec{i} \mathbf{T}_{xz} \vec{n}_z + \vec{j} \mathbf{T}_{yz} \vec{n}_z + \vec{k} \mathbf{T}_{zz} \vec{n}_z$$

δηλαδή για κάθε επιφάνεια η ασκούμενη τάση (άνυσμα) δίνεται από τη σχέση

$$\mathbf{t}_n = \vec{n} \cdot \mathbf{T}$$

Επειδή ο τανυστής τάσης είναι συμμετρικός ($\mathbf{T}_{ij} = \mathbf{T}_{ji}$), αρκούν έξι μόνο (από τις εννέα) συνιστώσες προκειμένου να περιγράψει η τάση σε κάθε επίπεδο.

Αυτές είναι οι: \mathbf{T}_{xx} , \mathbf{T}_{yy} , \mathbf{T}_{zz} , (σχετιζόμενες με την υδροστατική πίεση) και οι $\mathbf{T}_{xy}(=\mathbf{T}_{yx})$, $\mathbf{T}_{xz}(=\mathbf{T}_{zx})$, $\mathbf{T}_{yz}(=\mathbf{T}_{zy})$, (σχετιζόμενες με τις διατμητικές τάσεις).

Συνεπώς η τάση σε οποιοδήποτε επίπεδο που περνάει από ένα συγκεκριμένο σημείο εκφράζεται από μία ποσότητα που λέγεται τανυστής τάσης (stress tensor) [61]. Η ποσότητα αυτή είναι στην πραγματικότητα το άθροισμα του υδροστατικού (hydrostatic) τανυστή τάσης και του εκτρέποντος (deviatoric) ή ιξώδους. Καθώς μια

δύναμη-τάση ασκείται επάνω σε ένα στοιχείο ύλης, αυτό τείνει να *παραμορφωθεί* είτε μεταβάλλοντας τον όγκο του, ή/και μεταβάλλοντας το σχήμα του. (Υπάρχει και η περίπτωση της παραμόρφωσης εκ περιστροφής, η οποία όμως δεν εξετάζεται στην παρούσα εργασία καθώς το συγκεκριμένο μοντέλο δεν υφίσταται τέτοιου είδους παραμόρφωση). Ο υδροστατικός τανυστής τάσης σχετίζεται με την κάθετη στην επιφάνεια τάση (πίεση, $i=j$) και το φαινόμενο της μεταβολής του όγκου, ενώ ο εκτρέπων με τις διατμητικές τάσεις ($i \neq j$) και τα φαινόμενα της θλίψης και του εφελκυσμού. Είναι δηλαδή:

$$\mathbf{T}_{ij} = \tau_{ij} + P\delta_{ij} ,$$

όπου τ_{ij} ο εκτρέπων τανυστής (ιξώδους) τάσης, $P\delta_{ij}$ ο υδροστατικός τανυστής τάσης και δ_{ij} το δέλτα του Kronecker ($\delta_{ij}=1$, αν $i=j$ και $\delta_{ij}=0$, αν $i \neq j$). Το P για την περίπτωση των ρευστών αντιστοιχεί στην υδροστατική πίεση και ισούται με:

$$P = \frac{1}{3} \mathbf{T}_{ij} = \frac{1}{3} (\mathbf{T}_{xx} + \mathbf{T}_{yy} + \mathbf{T}_{zz}) = \frac{1}{3} \mathbf{I}_1 , \quad i=j$$

όπου \mathbf{I}_1 η πρώτη αναλλοίωτη του τανυστή τάσης [62], ή στην αναλυτική του μορφή:

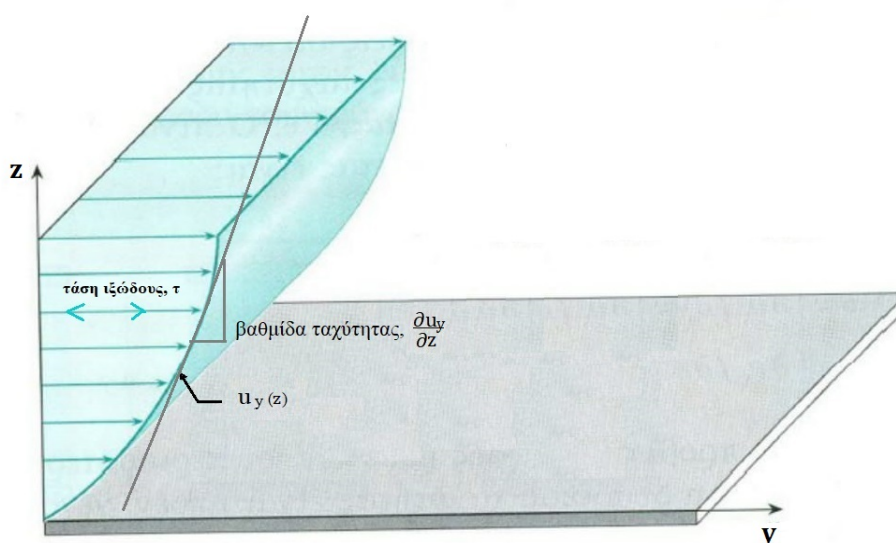
$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \mathbf{T}_{xx} & \mathbf{T}_{xy} & \mathbf{T}_{xz} \\ \mathbf{T}_{yx} & \mathbf{T}_{yy} & \mathbf{T}_{yz} \\ \mathbf{T}_{zx} & \mathbf{T}_{zy} & \mathbf{T}_{zz} \end{pmatrix} = -P \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{pmatrix}$$

Η φυσική σημασία του αρνητικού προσήμου είναι ότι μια συμπιεστική τάση θεωρείται ως αρνητική (χωρίς απαραίτητα να δείχνει προς την αρνητική κατεύθυνση [61]).

Όταν ένα ρευστό βρίσκεται σε ηρεμία οι δυνάμεις που ασκούνται σε αυτό είναι μόνο οι κάθετες στις επιφάνειες που ενεργούν. Μόνο από τη στιγμή που θα εφαρμοστούν επάνω τους τάσεις ιξώδους θα υπάρξει ροή αυτού. Προϋπόθεση για την ανάπτυξη ιξωδών τάσεων είναι η βαθμίδα ταχύτητας:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \vec{u}_x}{\partial x} & \frac{\partial \vec{u}_y}{\partial x} & \frac{\partial \vec{u}_z}{\partial x} \\ \frac{\partial \vec{u}_x}{\partial y} & \frac{\partial \vec{u}_y}{\partial y} & \frac{\partial \vec{u}_z}{\partial y} \\ \frac{\partial \vec{u}_x}{\partial z} & \frac{\partial \vec{u}_y}{\partial z} & \frac{\partial \vec{u}_z}{\partial z} \end{pmatrix}$$

Πρόκειται για τον *δυναμικό τανυστή της ταχύτητας* του ρευστού που δίνει τη μεταβολή των τριών συνιστωσών της κατά τις τρεις κατευθύνσεις στο χώρο [49]. Είναι προφανές ότι οι διατμητικές τάσεις που ενεργούν σε ένα ρευστό που ρέει, δεν εξαρτώνται άμεσα από την ταχύτητα ροής αλλά από τις χωρικές παραγώγους αυτής. Η μεταβλητή δηλαδή της τάσης - αιτίου είναι ο τανυστής βαθμίδας ταχύτητας - αποτελέσματος $\vec{\nabla} \cdot \vec{u}$ που αναφέρθηκε παραπάνω και $(\vec{\nabla} \cdot \vec{u})^T$ ο ανάστροφος πίνακας αυτού.



Σχήμα 3.7:

Το προφίλ της ταχύτητας στη στρωτή ροή και η μεταβολή της u_y συνιστώσας ως προς την z - διεύθυνση. (προσαρμογή από:[49])

Όπως ήδη αναφέρθηκε υπάρχουν δύο είδη παραμόρφωσης ενός ρευστού σωματιδίου.

- Γραμμική - Εκφράζεται με το στιγμιαίο ρυθμό παραμόρφωσης (εφελκυσμού) ενός μοναδιαίου ευθύγραμμου τμήματος το οποίο είναι παράλληλο προς κάποια διεύθυνση x, y, z και αντιστοιχεί στις T_{xx}, T_{yy}, T_{zz} που σχετίζονται με τις κάθετες τάσεις οι οποίες δρουν στο ρευστό.
- Γωνιακή - Εκφράζεται με το στιγμιαίο ρυθμό παραμόρφωσης – μεταβολής της γωνίας μεταξύ δύο ευθυγράμμων τμημάτων τα οποία αρχικά ήταν παράλληλα προς κάποιες συγκεκριμένες διευθύνσεις και συνδέεται με τις διατμητικές τάσεις.

Ο τανυστής τάσης που αποτελεί το αίτιο σχετίζεται άμεσα με τον τανυστή του ρυθμού παραμόρφωσης (ο οποίος είναι επίσης συμμετρικός) που είναι το αποτέλεσμα και ορίζεται ως εξής:

$$[\dot{\mathbf{Y}}_{ij}] = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{xx} & \dot{Y}_{xy} & \dot{Y}_{xz} \\ \dot{Y}_{yx} & \dot{Y}_{yy} & \dot{Y}_{yz} \\ \dot{Y}_{zx} & \dot{Y}_{zy} & \dot{Y}_{zz} \end{bmatrix}$$

με

$$\begin{aligned} \dot{Y}_{xx} &= \frac{2(\partial \bar{u}_x)}{\partial x} \dot{Y}_{xy} = \dot{Y}_{yx} = \frac{\partial \bar{u}_x}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}_y}{\partial x} \\ \dot{Y}_{yy} &= \frac{2(\partial \bar{u}_y)}{\partial y} \dot{Y}_{yz} = \dot{Y}_{zy} = \frac{\partial \bar{u}_y}{\partial z} + \frac{\partial \bar{u}_z}{\partial y} \\ \dot{Y}_{zz} &= 2 \frac{(\partial \bar{u}_z)}{\partial z} \dot{Y}_{zx} = \dot{Y}_{xz} = \frac{\partial \bar{u}_z}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}_x}{\partial z} \end{aligned}$$

Στην ουσία πρόκειται για το άθροισμα:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u} + (\vec{\nabla} \cdot \vec{u})^T = 2S$$

με διαστάσεις $[T^{-1}]$, [49].

Ασυμπίεστη ροή

Συνεχίζοντας και μετά την αναφορά στη στρωτή και μονοφασική ροή και τις αρχικές εξισώσεις που περιγράφουν το συγκεκριμένο μοντέλο ροής, σειρά έρχεται να πάρει μία επιπλέον συνθήκη, αυτή της ασυμπίεστης ροής.

Σύμφωνα με τη θεωρία της μηχανικής των ρευστών και την εφαρμογή της επάνω στα προκαθορισμένα μοντέλα ροής ενός ρευστού από το Comsol Multiphysics, όταν οι μεταβολές της θερμοκρασίας σε ένα ρευστό μονοφασικό σύστημα είναι μικρής κλίμακας, αυτό μπορεί να θεωρηθεί ασυμπίεστο που σημαίνει ότι η *πυκνότητα παραμένει σταθερή ή σχεδόν σταθερή* κατά τη διάρκεια της ροής. Αυτό συμβαίνει για όλα τα υγρά που βρίσκονται σε κανονικές συνθήκες, καθώς και για τα αέρια σε χαμηλές ταχύτητες (Incompressible flow, Comsol Multiphysics). Στην περίπτωση αυτή

- η εξίσωση (I) της προηγούμενης παραγράφου που εκφράζει την αρχή διατήρησης της μάζας απλοποιείται στην εξής μορφή:

$$\rho(\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) = 0$$

ή απλούστερα

$$(\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) = 0$$

Ο όρος: $\rho(\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) = 0$, σχέση που προκύπτει από την εφαρμογή της ιδιότητας

$$\vec{\nabla} \cdot (\lambda \vec{F}) = \lambda(\vec{\nabla} \cdot \vec{F}) + \vec{F} \cdot (\vec{\nabla} \lambda)$$

της διανυσματικής ανάλυσης, όπου λ είναι μία βαθμωτή και \vec{F} μία διανυσματική συνάρτηση.

Σημαντική παρατήρηση:

Στις παραδοχές και τις απλοποιήσεις που έγιναν για την ασυμπίεστη ροή ο όρος $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ παραλείφθηκε από την αρχική εξίσωση της συνέχειας (I), γεγονός που εσφαλμένα μπορεί να οδηγήσει σε μία έμμεση θεώρηση της ασυμπίεστης ροής κι ως σταθερής (κάτι που ασφαλώς δεν ισχύει). Ωστόσο επισημάνθηκε η προϋπόθεση της σταθερής (ή σχεδόν σταθερής) πυκνότητας (που οδηγεί στην εξάλειψη του συγκεκριμένου όρου). Ο λόγος που έγινε αυτό είναι γιατί η ασυμπίεστη ροή από μόνη της δεν καθιστά αυτομάτως τη ροή σταθερή, αφού μπορεί να υπάρξει ασυμπίεστη και μη σταθερή ροή. Αυτό γίνεται ακόμα πιο προφανές εξετάζοντας τις δύο άλλες εξισώσεις του συστήματος (Navier – Stokes (II) και αρχής διατήρησης της ενέργειας (III)) όπου οι όροι των χρονικών παραγώγων βρίσκονται στις θέσεις τους. Στην ουσία η ασυμπίεστη ροή οδηγεί στην αποσύζευξη της εξίσωσης (III) από τις άλλες δύο διευκολύνοντας την επίλυση του συστήματος [63].

Η εξίσωση (II) που περιγράφει την αρχή διατήρησης της ορμής ενός ρευστού συστήματος απλουστεύεται επίσης στη μορφή:

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho(\vec{u} \cdot \vec{\nabla})\vec{u} = \vec{\nabla} \cdot [-P\mathbf{I} + \mu(\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) + (\vec{\nabla} \cdot \vec{u})^T] + \vec{F}$$

έχοντας παραλειφθεί ο όρος: $\frac{2}{3}\mu(\vec{\nabla} \cdot \vec{u})\mathbf{I}$ από την εξίσωση με την οποία αρχικά ορίζεται η διαμητική τάση τ . Ο συγκεκριμένος όρος αφορά στο “φαινόμενο ιξώδες” το οποίο θεωρείται μεταβλητό και σχετίζεται με καταστάσεις δυναμικής ισορροπίας μεταξύ θερμότητας και πίεσης. Λαμβάνεται δε υπόψη μόνο για πολύ εξειδικευμένες περιπτώσεις συμπίεστης ροής. Από τη στιγμή που στην ασυμπίεστη ροή η απόκλιση του πεδίου ταχυτήτων είναι μηδενική αυτός ο όρος θα εξαφανιστεί (Incompressible flow, Comsol Multiphysics).

Σταθερή ροή

Πρόκειται για το μοντέλο ροής ενός ρευστού όπου η ταχύτητα είναι ανεξάρτητη του χρόνου, δηλαδή μπορεί να μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο μέσα στο πεδίο ροής, αλλά για το ίδιο σταθερό σημείο του χώρου παραμένει ίδια για κάθε χρονική στιγμή. Προφανώς η σχέση που χαρακτηρίζει αυτό το είδος ροής και προκύπτει από την εξίσωση της συνέχειας είναι η:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = 0$$

Με την τελευταία αυτή συνθήκη οι τελικές εξισώσεις που θα χρησιμοποιηθούν από το πρόγραμμα προσομοιώσεων για την επίλυση του μοντέλου της στρωτής – μονοφασικής – ασυμπίεστης – σταθερής ροής είναι οι:

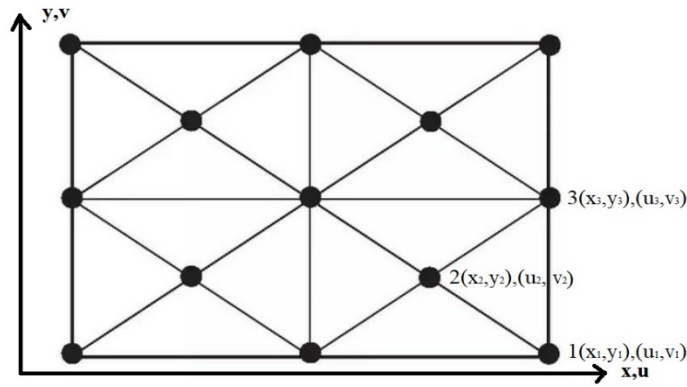
$$\rho(\vec{u} \cdot \vec{\nabla})\vec{u} = \vec{\nabla} \cdot \left[-p\mathbf{I} + \mu \left(\vec{\nabla} \cdot \vec{u} + (\vec{\nabla} \cdot \vec{u})^T \right) \right] + \vec{F}$$
$$\rho(\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) = 0$$

Οι κυριότερες ρυθμίσεις που επιλέχθηκαν αναγράφονται στον πίνακα 3.3 :

Πίνακας 3.3

Διακριτοποίηση των ρευστών ¹	P ₁ +P ₁
Παράλειψη όρου αδρανειακών δυνάμεων (έρπουσα ροή) ²	Απενεργοποιημένη
Πίεση αναφοράς (Reference pressure level) ³	1[atm]

¹Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος (δηλ. μέθοδος υπολογισμού με χρήση H/Y) για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων των μερικών διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν ένα πεδίο του οποίου τη συμπεριφορά επιθυμούμε να μελετήσουμε σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Αυτό επιτυγχάνεται με τον επιμερισμό - διακριτοποίηση της περιοχής σε στοιχειώδη τμήματα τα οποία ονομάζονται στοιχεία και ορίζονται από ένα σύνολο σημείων που καλούνται κόμβοι. Ας θεωρήσουμε ένα μοντέλο δύο διαστάσεων (2D model) στο επίπεδο x-y όπως φαίνεται στο σχήμα 3.8



Σχήμα 3.8:
 Διακριτοποιημένη περιοχή αποτελούμενη από τριγωνικά στοιχεία [64]

Μέσα σε κάθε στοιχείο μπορούν να οριστούν οι μεταβλητές του προβλήματος ως γραμμικός συνδυασμός των συναρτήσεων βάσης (κατά αντιστοιχία με τα διανύσματα βάσης της γραμμικής άλγεβρας) ως εξής:

$$u = u_1 * N_1 + u_2 * N_2 + u_3 * N_3 \text{ και } v = v_1 * N_1 + v_2 * N_2 + v_3 * N_3$$

όπου N_i οι συναρτήσεις βάσης και τα $u_1, u_2, u_3, v_1, v_2, v_3$ οι μεταβλητές του εξεταζόμενου πεδίου στα 3 σημεία – κόμβους του τριγωνικού στοιχείου του παραδείγματος. Εφαρμόζοντας έναν γραμμικό συνδυασμό των συναρτήσεων βάσης παίρνουμε την τιμή του πεδίου σε κάθε σημείο ενός στοιχείου. Οι μεταβλητές u, v είναι οι μετατοπίσεις των κόμβων και σε ορισμένες περιπτώσεις και οι παράγωγοί τους. Εάν περιλαμβάνονται και οι παράγωγοι γίνεται λόγος για βαθμούς ελευθερίας αντί για μετατοπίσεις κόμβων (Στο συγκεκριμένο παράδειγμα έχουμε 2 μεταβλητές που συνεπάγεται δύο μετατοπίσεις-βαθμοί ελευθερίας) [64]. Έτσι κάθε συνάρτηση βάσης σχετίζεται μέσω των μεταβλητών της με ορισμένους βαθμούς ελευθερίας. Το σύνολο αυτών των διακριτών βαθμών ελευθερίας μας δίνει το διάνυσμα λύσεων το οποίο με τη σειρά του και σε συνδυασμό με όλες τις συναρτήσεις βάσεων που χρησιμοποιήθηκαν δίνει τη εικόνα του πεδίου ταχυτήτων (ή οποιασδήποτε μεταβλητής) η οποία μελετάται. Η τάξη του στοιχείου αναφέρεται στον τύπο (γραμμική ή μη) των συναρτήσεων βάσης που χρησιμοποιήθηκαν.

P1+P1: Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την περιγραφή της πίεσης και του πεδίου ταχυτήτων είναι γραμμικά δηλαδή προέκυψαν από πρώτης τάξης συναρτήσεων βάσης. Αυτό συνεπάγεται λιγότερες υπολογιστικές απαιτήσεις του συστήματος. Πρόκειται για την προκαθορισμένη επιλογή του Comsolστο μοντέλο της στρωτής, μονοφασικής ροής.

² Ήδη έχει αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο ότι για να υπάρξει στρωτή ροή οι ιξώδεις δυνάμεις επικρατούν των αδρανειακών. Αυτό όμως δε συνεπάγεται και ολοκληρωτική παράβλεψη των δευτέρων. Οι αδρανειακές δυνάμεις που αντιστοιχούν στον όρο $\rho(\vec{\nabla} \cdot \vec{u})\vec{u}$ των εξισώσεων Navier – Stokes συνυπολογίζονται στην επίλυση του συστήματος. Η μετάβαση στην έρπουσα ροή (ή ροή Stokes) θα συμβεί για πολύ μικρές τιμές του αριθμού Reynolds ($Re \ll 1$) (Comsol Multiphysics).

³ Η πίεση αναφοράς καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο η πίεση ως μεταβλητή θα υπεισέλθει στους υπολογισμούς της ροής του ρευστού. Αυτό θα γίνει είτε μέσω της απόλυτης πίεσης: $p_a = p + p_{ref}$ (η πίεση αναφοράς θα είναι συνήθως το κενό ή η ατμοσφαιρική) είτε με τη χρήση μιας μανομετρικής πίεσης p [39]. Όταν $p_{ref} \neq 0$ το πρόγραμμα θα προχωρήσει στην επίλυση του προβλήματος παίρνοντας ως δεδομένη πίεση την μανομετρική, ωστόσο οι ιδιότητες του εκάστοτε υλικού θα παρθούν βάσει της πίεσης αναφοράς.

Αρχικές συνθήκες:

Προκειμένου να εντοπιστούν οι λύσεις σε ένα γραμμικό πρόβλημα, το πρόγραμμα χρησιμοποιεί την επαναληπτική μέθοδο Newton-Raphson. Συνοπτικά, η μέθοδος ξεκινάει με μία αρχική “εικασία” έστω u_0 η οποία θεωρείται ότι αποτελεί τη λύση της εξίσωσης μίας μεταβλητής, $f(u)=0$ και υπολογίζει τα $f(u_0)$, $f'(u_0)$. Οι τιμές που προκύπτουν μας κατευθύνουν σε ένα άλλο σημείο, έστω u_1 (το οποίο δεν αποτελεί λύση αφού $f(u_1) \neq 0$) το οποίο μπορεί να εκφραστεί ως μία μετατόπιση Δu του u_0 ,

$$u_1 = u_0 + \Delta u \quad (3.1)$$

Ο προσδιορισμός της u_1 είναι ισοδύναμος με τον προσδιορισμό του Δu . Αναπτύσσοντας την f κατά Taylor κοντά στο u_0 προκύπτει η σχέση [48]:

$$f(u_0 + \Delta u) = f(u_0) + f'(u_0) \Delta u + \frac{1}{2} f''(\xi) \Delta u^2 \quad (3.2)$$

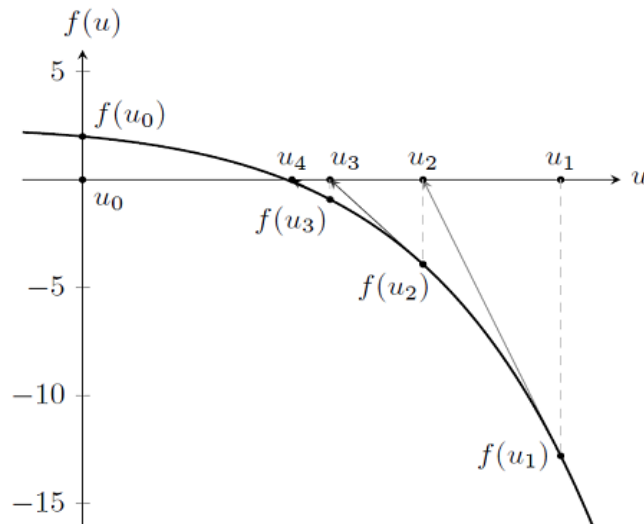
όπου $u_0 < \xi < u_1$. Για να συμβαίνει αυτό πρέπει να υπάρχει η f'' σε όλο το πεδίο ορισμού. Με την παραδοχή ότι υπάρχει και ότι ο τρίτος όρος της (3.2) είναι αρκετά μικρός ώστε να αγνοηθεί η σχέση (3.2) γίνεται:

$$f(u_0 + \Delta u) \approx f(u_0) + f'(u_0) \Delta u \Rightarrow f(u_1) \approx f(u_0) + f'(u_0) \Delta u \quad (3.3)$$

Συνεχίζοντας την ίδια διαδικασία είναι προφανές ότι σταδιακά προσεγγίζεται η λύση του μονοδιάστατου προβλήματος όπως αναπαριστάται στο σχήμα 3.9. Από τις σχέσεις

(3.1) και (3.3) και με δεδομένο ότι $f(u)=0$ καταλήγουμε στην κλασική σχέση της Newton – Raphson [48]:

$$u_{k+1} = u_0 - \frac{u_0}{f'(u_0)}$$



Σχήμα 3.9:
Προσέγγιση της λύσης με την επαναληπτική μέθοδο Newton-Raphson [65]

Στην ουσία η ίδια λογική ακολουθείται όταν το πρόβλημα είναι πολλών μεταβλητών. Αν και είναι δυσκολότερο να το “οπτικοποιήσουμε” όπως στο παράδειγμα με το πρόβλημα μιας μεταβλητής ο ίδιος αλγόριθμος χρησιμοποιείται για προβλήματα όπου το u είναι διάνυσμα, περίπτωση για τα τυπικά μη γραμμικά προβλήματα πεπερασμένων στοιχείων [65].

Αν θεωρήσουμε ένα σύστημα μη-γραμμικών εξισώσεων με n μεταβλητές και f_i , $i=1,2,\dots,n$ οι συναρτήσεις για τις οποίες ισχύει $f_i(u_1, u_2, \dots, u_n) = 0$ το οποίο γράφουμε στη συνοπτική μορφή $\vec{F}(u)=0$, όπου \vec{F} είναι διάνυσμα των f_i συναρτήσεων και u οι άγνωστοι.

Θα ισχύει ότι:

$$u_{k+1} = u_k - J_F^{-1}(u_k) \cdot F(u_k), \quad k = 1, 2, \dots$$

Όπου J_k ο Ιακωβιανός πίνακας μιας διανυσματικής συνάρτησης n μεταβλητών [53].

Στην πράξη, δεν αντιστρέφουμε άμεσα τον πίνακα J_k , αλλά αντίθετα επιλύουμε το γραμμικό σύστημα

$$J_k(u_k) \cdot \Delta u^{(k)} = -F(u_k)$$

$$\text{όπου } \Delta u = \begin{pmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta u_2 \\ \vdots \\ \Delta u_n \end{pmatrix}$$

Η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου τα Δu γίνουν πολύ μικρά (που σημαίνει ότι πλησιάζουμε στη λύση) ή έως ότου διαπιστωθεί πως δεν μπορούμε να “πετύχουμε” καμία λύση [48, 66].

Ωστόσο όταν έχουμε να αντιμετωπίσουμε εκατοντάδες, χιλιάδες ή και σε ορισμένες περιπτώσεις εκατομμύρια βαθμούς ελευθερίας το επιθυμητό θα ήταν να μειωθούν τα βήματα της μεθόδου στο ελάχιστο δυνατό. Το Comsol έχει τη δυνατότητα μέχρι ενός σημείου να ελαχιστοποιήσει τα βήματα της Newton – Raphson με μία ρύθμιση που το επιτρέπει και καλείται “συντελεστής απόσβεσης”.

Η αρχική προσέγγιση (guess value) που επιλέγεται στις προσομοιώσεις, όταν το πρόβλημα είναι χρονοανεξάρτητο, (όπως στη συγκεκριμένη περίπτωση που είναι η σταθερή ροή ενός ρευστού) αντιστοιχεί στο αρχικό σημείο που θεωρείται ότι αποτελεί τη λύση του προβλήματος. Είναι πολύ σημαντικό να επιλεγεί το κατάλληλο σημείο – αρχική συνθήκη ώστε η προσεγγιστική μέθοδος να μπορέσει να δώσει αποτέλεσμα. Συνοπτικά παρατίθενται οι αιτίες που η μέθοδος Newton-Raphson θα αποτύχει να δώσει αποτέλεσμα [65].

- Όταν το πρόβλημα δεν έχει λύση
- Όταν (ακόμα κι αν υπάρχει λύση) η αρχική συνθήκη απέχει πολύ από την πραγματική (εκτός ακτίνας σύγκλισης με αποτέλεσμα οι κατευθύνσεις των παραγώγων να μην πλησιάζουν τη λύση)
- Όταν η συνάρτηση της οποίας αναζητείται η λύση δεν είναι διαφορίσιμη

Ως προς την αναζήτηση λύσεων του πεδίου ταχυτήτων του προβλήματος της συγκεκριμένης εργασίας οι αρχικές προσεγγίσεις επιλέχθηκαν ως εξής:

➤ Πεδίο ταχυτήτων: $u(x,y,z) = (0,0,0)$ [m/s]

➤ Τιμή πίεσης: $P=0$ [Pa]

Τοιχώματα – οριακές συνθήκες:

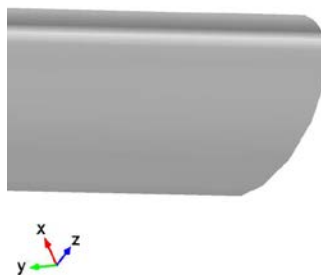
Η οριακή συνθήκη που επιβλήθηκε στα τοιχώματα των καναλιών ήταν αυτή της μη-ολίσθησης μέσω της εξίσωσης:

$$\vec{u}_{\text{wall}} = \mathbf{0}$$

Πριν αναφερθούν οι εξισώσεις – συνθήκες της εισόδου και εξόδου του συστήματος θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι: *Οπωσδήποτε, η πίεση δεν προϋποθέτει επιφάνεια για να είναι καλά ορισμένη, αλλά η διαδικασία μέτρησής της ανάγεται στην μέτρηση μιας δύναμης η οποία ασκείται κάθετα σε συγκεκριμένη επιφάνεια.*

Είσοδος κυκλώματος:

Η είσοδος του κυκλώματος επιλέχθηκε να είναι στην άκρη ενός από τα κανάλια μήκους 200 μm και διατομής $d \approx 18 \mu\text{m}$. Οι οριακές συνθήκες στην είσοδο του συστήματος δύναται να παρθούν ως προς την ταχύτητα, την πίεση, τη ροή μάζας και την στρωτή εισροή (laminar inflow) του ρευστού. Στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν και συμπεριλήφθηκαν στην παρούσα εργασία η συνθήκη εισόδου που επιλέχθηκε ήταν αυτή της στρωτής εισροής. Ένα τμήμα της εισόδου του καναλιού του κυκλώματος φαίνεται στο σχήμα 3.10



Σχήμα 3.10:
Η είσοδος του καναλιού που πάρθηκε στην προσομοίωση (50 μm)

➤ Οριακή συνθήκη στρωτής ροής:

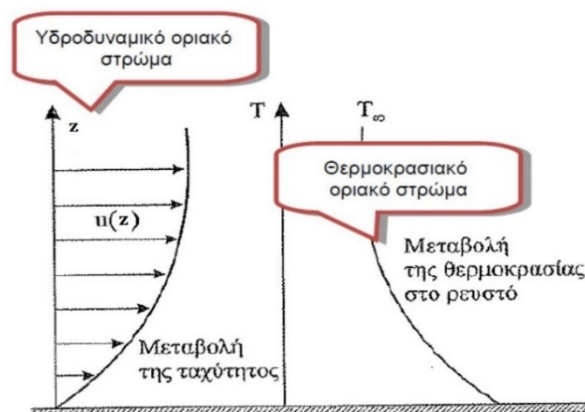
Η συγκεκριμένη οριακή συνθήκη εφαρμόζεται όταν το ρευστό εισάγεται στο κύκλωμα μέσω ενός καναλιού μεγάλου μήκους, έτσι ώστε το προφίλ της ταχύτητας και της πίεσης να έχει προλάβει να αναπτυχθεί πλήρως στο σημείο θέλουμε να εξετάσουμε. Η πίεση εισόδου καθορίζεται από την τιμή της παραμέτρου που έχει επιλεγεί για να περιγράψει τις συνθήκες κάτω από τις οποίες εισέρχεται το ρευστό στο κανάλι που είναι συνδεδεμένο με το σύνορο-είσοδο μήκους L_{entr} . Οι παράμετροι

αυτοί για τη στρωτή εισροή είναι η μέση ταχύτητα, η παροχή ή η πίεση εισόδου (στην περίπτωση που καθορίζεται από τον χρήστη).

➤ Εξίσωση εισόδου:

$$L_{entr} \vec{\nabla}_t \cdot \left[-PI + \mu \left(\vec{\nabla}_t \vec{u} + (\vec{\nabla}_t \vec{u})^T \right) \right] = -P_{entr} \vec{n}$$

$\vec{\nabla}_t$: Ο τελεστής ∇_t δηλώνει τον τελεστή ανάδελτα ο οποίος εφαρμόζεται επάνω στο επίπεδο που βρίσκεται το στρώμα που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα. Μέχρι το προφίλ της ταχύτητας να αποκτήσει την τελική του μορφή, το φαινόμενο της συναγωγής, της μετάδοσης δηλαδή θερμότητας μεταξύ ενός ρευστού και ενός στερεού σώματος διαφορετικής θερμοκρασίας, είναι εντονότερο. Η κατεύθυνση στην οποία οι παρατηρούνται οι μεγαλύτερες μεταβολές στη θερμοκρασία είναι η z-κατεύθυνση κατά μήκος της οποίας δημιουργείται το οριακό στρώμα της ταχύτητας [52]. Η απόσταση που θα διανύσει το ρευστό έως ότου το προφίλ της ταχύτητας να έχει αναπτυχθεί πλήρως είναι το καλούμενο “μήκος εισόδου”. Ουσιαστικά σύμφωνα με την εξίσωση εισόδου και για μήκος = L_{entr} , το πρόγραμμα θέτει όλες τις τάσεις που ασκούνται στο ρευστό ίσες με μία τιμή πίεσης η οποία ασκείται κάθετα σε αυτό. Το κάθετο διάνυσμα στο επίπεδο ροής yz είναι αυτό κατά μήκος της x-διεύθυνσης, όπου και δεν υπάρχουν διατμητικές τάσεις (όπως υποδηλώνει η εξίσωση).



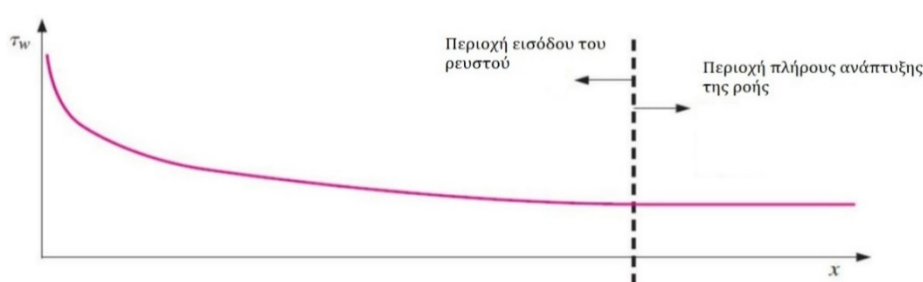
Σχήμα 3.11:

Η μεταβολή στη θερμοκρασία ενός ρευστού κατά την ανάπτυξη του οριακού στρώματος [52]

P_{entr} : Υπολογίζεται από το πρόγραμμα βάσει της δεδομένης παροχής

➤ Μήκος εισόδου:

Τομήκος για τη στρωτή ροή έχει υπολογιστεί ότι θα πρέπει να ξεπερνάει την τιμή $0.05 ReD$, όπου Re είναι ο αριθμός Reynolds και D η κλίμακα μήκους εισόδου (υδραυλική διάμετρος), ώστε η ροή (στρωτή για την παρούσα μελέτη) να μπορέσει να φτάσει σε ένα πλήρως ανεπτυγμένο προφίλ (σχήμα 3.12)



Σχήμα 3.12:

Μεταβολή της διατμητικής τάσης στα τοιχώματα ως προς την κατεύθυνση της ροής [40]

Στη στρωτή ροή σε ο αριθμός Reynolds (Re) είναι μικρότερος από κάποια ‘κρίσιμη’ τιμή (Re_c). Ο κρίσιμος αριθμός Reynolds εξαρτάται από τη γεωμετρία της διατομής του αγωγού. Είναι διαφορετικός σε έναν κυκλικό αγωγό απ’ ότι σ’ ένα τριγωνικό ή ορθογωνικό που έχουν το ίδιο εμβαδόν εγκάρσιας διατομής. Η τιμή του κρίσιμου αριθμού Reynolds σε σωλήνα (κλειστό αγωγό κυκλικής διατομής) είναι περίπου 2000-2300, [50]. Στον πίνακα 3.4 αναγράφονται οι τιμές του μήκους εισόδου και της ογκομετρικής παροχής που επιλέχθηκαν.

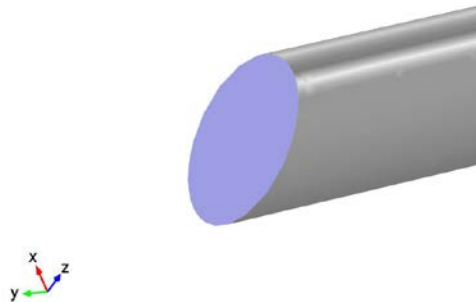
Πίνακας 3.4

Περιγραφή	Τιμή	Μονάδες
Μήκος εισόδου	50	μm
Ογκομετρική παροχή	10	$\mu\text{m}^3/\text{s}$

Έξοδος κυκλώματος:

Η έξοδος του κυκλώματος επιλέχθηκε να είναι στην άκρη του καναλιού μήκους 200 μm και διατομής $d \approx 18 \mu\text{m}$ που βρίσκεται απέναντι από το κανάλι εισόδου. Οι οριακές συνθήκες στην έξοδο του συστήματος δύναται να παρθούν ως προς την ταχύτητα, την

πίεση, και την στρωτή εκροή (laminar outflow) του ρευστού. Στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν και συμπεριλήφθηκαν στην παρούσα εργασία η συνθήκη εξόδου που επιλέχθηκε ήταν αυτή της πίεσης. Τμήμα του καναλιού εξόδου απεικονίζεται στο σχήμα 3.13.



Σχήμα 3.13:
Η έξοδος του καναλιού που πάρθηκε στην προσομοίωση (50 μm)

➤ Οριακή συνθήκη πίεσης:

Επιλέγοντας την συγκεκριμένη συνθήκη στην ουσία ορίζεται η κάθετη τάση (που στις περισσότερες περιπτώσεις ταυτίζεται με την πίεση) στην έξοδο ενώ η εφαπτομενική συνιστώσα της τάσης στην ίδια περιοχή θεωρείται ότι μηδενίζεται. Σύμφωνα με τη σχέση:

$$P_a = P + P_{ref}$$

όπου P_a είναι η απόλυτη πίεση (αναφορά το κενό), P_{ref} μία τιμή πίεσης που θεωρείται ότι αποτελεί το σημείο αναφοράς ($P_{ref}=0$ ή $P_{ref}=1$ [atm]) και το P (σχετική πίεση) εκφράζει την πίεση που έχει οριστεί κατόπιν μέτρησης ή ως μια θεωρητική τιμή προσέγγισης, η P_0 στην έξοδο του συστήματος είτε θα ταυτίζεται με την απόλυτη πίεση (εάν $P_{ref}=0$), είτε με τη σχετική πίεση (εάν $P_{ref}=1$ [atm]). Στις προσομοιώσεις που μελετήθηκαν οι πιέσεις πάρθηκαν ως εξής: $P_{ref} = 1$ atm και $P_0 = 0$ Pa

➤ Εξίσωση εξόδου:

$$\left(-P\mathbf{I} + \mu \left(\vec{\nabla}\vec{u} + (\vec{\nabla}\vec{u})^T \right) \right) \vec{n} = -f_0 \vec{n}$$

Σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση, οι συνολικές τάσεις (διαμητικές και κάθετες) στην έξοδο τίθενται ίσες με ένα διάνυσμα τάσης μέτρου f_0 ($f_0=P_0=0$), διεύθυνσης

αυτής των κάθετων τάσεων αλλά αντίθετης φοράς . Η ανωτέρω σχέση ουσιαστικά υποδηλώνει ότι η εφαπτομενική συνιστώσα των συνολικών τάσεων ισούται με μηδέν (για κάθε τιμή του f_0) συνεπώς δεν υπάρχει πλέον ροή.

3.2.5 Πλέγμα:

Στις υπολογιστικές μεθόδους λύσεων των μερικών διαφορικών εξισώσεων η λεγόμενη διακριτοποίηση του χωρίου είναι διακριτοποιημένη αναπαράσταση της γεωμετρίας του προβλήματος. Ουσιαστικά ο χώρος που μελετάται χωρίζεται σε στοιχεία (ή κελιά ή ζώνες) μέσα στα οποία όπως ήδη αναφέρθηκε ορίζεται ένα σύστημα εξισώσεων με τις μεταβλητές τους και λαμβάνει χώρα η προσεγγιστική διαδικασία εύρεσης των λύσεων. Η ακρίβεια αυτών είναι άμεσα συνδεδεμένη με τον αριθμό των στοιχείων του πλέγματος. Όσο τα στοιχεία μικραίνουν σε διαστάσεις (μεγαλώνουν σε πλήθος), το πλέγμα βελτιώνεται και γίνεται πιο λεπτομερές τόσο η προσεγγιστική λύση πλησιάζει την πραγματική. Ωστόσο ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη είναι η γεωμετρία του μοντέλου. Αυτοί οι δύο παράγοντες σε συνδυασμό με τη φύση του προβλήματος είναι τα στοιχεία που καθορίζουν την επιλογή του πλέγματος που θα χρησιμοποιηθεί.

Φυσικό μοντέλο – Είδος και μέγεθος πλέγματος:

- Η επιλογή της ρύθμισης αναφορικά με το φυσικό μοντέλο είναι αυτή της ρευστοδυναμικής (fluid dynamics).
- Το μέγεθος των στοιχείων του πλέγματος τέθηκε να είναι το κανονικό (normal), το αραιό (coarse) και το αραιότερο (coarser) αντίστοιχα σε τρεις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για τις ίδιες διαστάσεις. Οι παράμετροι-τιμές του μεγέθους του πλέγματος, όταν πρόκειται για προκαθορισμένη επιλογή, είναι επίσης προκαθορισμένες. Στο σχήμα 3.14 και 3.15 φαίνονται οι τρεις τύποι πλέγματος που προαναφέρθηκαν.



Σχήμα 3.14:
(α): Κανονικό πλέγμα και (β): αραιό πλέγμα



Σχήμα 3.15:
Αραιότερο πλέγμα

- Τύπος των στοιχείων του πλέγματος: Τα τετράεδρα είναι ο πιο κοινός τύπος στοιχείων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τα περισσότερα 3-D φυσικά μοντέλα του Comsol. Οποιοσδήποτε γεωμετρικός όγκος ανεξαρτήτως, σχήματος ή τοπολογικών ιδιοτήτων μπορεί να διαιρεθεί σε στοιχειώδη τετράεδρα. Επίσης τα τετράεδρα είναι τα μόνα στοιχεία που δίνουν τη δυνατότητα προσαρμοζόμενων ρυθμίσεων σχετικά με τη βελτίωση του πλέγματος. Για τους παραπάνω λόγους συνήθως αυτός ο τύπος στοιχείων αποτελεί την πρώτη επιλογή για τον σχηματισμό του πλέγματος [69].

3.2.6 Μελέτη – Υπολογισμός λύσεων:

Όλες οι προαναφερόμενες συνθήκες αφορούν στις προσομοιώσεις των μοντέλων όλων των διαστάσεων. Οι εικόνες του πλέγματος και της γεωμετρίας των καναλιών πάρθηκαν απευθείας από το Comsol και συγκεκριμένα για τις διαστάσεις 11-36 [μm] (πλάτος x ύψος).

Τα χαρακτηριστικά στοιχεία της προσομοίωσης για τον κάθε τύπο πλέγματος φαίνονται στον πίνακα 3.5:

Πίνακας 3.5

Πλέγμα	Υπολογιστικός χρόνος	Είδος ροής
Κανονικό	3 min 19 s	Σταθερή - Στρωτή
Αραιό	1 min 58 s	Σταθερή - Στρωτή
Αραιότερο	0 min 33 s	Σταθερή - Στρωτή

Ρυθμίσεις παράγοντα επίλυσης

Ήδη αναφέρθηκαν οι εργασίες που εκτελούνται από τον παράγοντα επίλυσης στη διαδικασία προσέγγισης της λύσης ενός συστήματος. Πρόκειται για μία σειρά βημάτων που ακολουθείται λαμβάνοντας υπόψη συγκεκριμένες ρυθμίσεις και δεδομένα ώστε να καταστεί δυνατός ο υπολογισμός των λύσεων. Ακολουθεί η έκθεση-αναφορά του παράγοντα επίλυσης για το μη γραμμικό πρόβλημα της ροής στο μικρορευστονικό κανάλι διαστάσεων 11-16 [μm] με την επιλογή του πλέγματος κανονικών στοιχείων (normal element size), όπως ακριβώς άρθηκε από το πρόγραμμα [65]

Stationary Solver 1 in Study 1/Solution 1 (sol1) started at 29-Αυγ-2017 14:39:29.

- 1) Nonlinear solver
- 2) Number of degrees of freedom solved for: 549081.
- 3) Nonsymmetric matrix found.
- 4) Scales for dependent variables:
- 5) Pressure (comp1.p): 0.31
- 6) Velocity field (comp1.u): 0.0047
- 7) IterSolEstResEst Damping StepSize #Res #Jac #Sol

1	0.0086	9.2e+003	0.0100000	0.0087	2	1	2	2
2	0.0081	5.3e+003	0.1000000	0.009	3	2	5	4
3	8.6e-006	1.4e+003	1.0000000	0.8	4	3	8	6
	48.2e-011	0.002	1.0000000	8.7e-006	5	4	11	12
- 8) Stationary Solver 1 in Study 1/Solution 1 (sol1): Solution time: 185 s (3 minutes, 5 seconds)
- 9) Physical memory: 2.46 GB
- 10) Virtual memory: 2.59 GB

Διευκρινίσεις των ανωτέρω παραμέτρων:

- 1) Ο τύπος του παράγοντα επίλυσης που “κλήθηκε” από τον χρήστη σύμφωνα με το φυσικό μοντέλο για την επίλυση του συστήματος και ο χρόνος έναρξης της διαδικασίας επίλυσης.

Σχόλιο: Στην περίπτωση της σταθερής ροής εφαρμόζεται η μέθοδος Newton με χαμηλό συντελεστή απόσβεσης μια που ένα “πλήρες” βήμα μπορεί να καταλήξει επιζήμιο για τους υπολογισμούς όταν οι αρχικές συνθήκες απέχουν πολύ από την πραγματική λύση.

- 2) Η επιλογή του ίδιου του προγράμματος ως προς τον παράγοντα επίλυσης τον οποίο θα χρησιμοποιήσει για την αντιμετώπιση του προβλήματος. Συγκεκριμένα επιλέχθηκε ο μη γραμμικός παράγοντας επίλυσης.

Σχόλιο: Ο μη γραμμικός αλγόριθμος του παράγοντα επίλυσης προσαρμόζει αυτόματα τον παράγοντα απόσβεσης με στόχο την προσέγγιση μιας συγκλίνουσας λύσης. Οι εξισώσεις Navier – Stokes αποτελούν ένα μη γραμμικό σύστημα και ως εκ τούτου ένας μη γραμμικός επιλυτής θα χρησιμοποιηθεί για την επίλυση των εξισώσεων εφαρμόζοντας την επαναληπτική διαδικασία. Σε κάθε επανάληψη λύνεται μια γραμμικοποιημένη εκδοχή του μη γραμμικού συστήματος με τη χρήση ενός γραμμικού παράγοντα επίλυσης.

- 3) Το “μέγεθος” του προβλήματος αναφορικά με τους βαθμούς ελευθερίας.
- 4) Ο τύπος του ως προς επίλυση πίνακα πεπερασμένων στοιχείων.

5-7) Στάθμιση-“Διόρθωση” κλίμακας των μεταβλητών

Αφορά στην αναμενόμενη τάξη μεγέθους των λύσεων για την κάθε εξαρτημένη μεταβλητή και στις μεγάλες διαφορές που ενδεχομένως να υπάρχουν μεταξύ τους. Το αποτέλεσμα είναι η αυξημένη δυσκολία στη διαδικασία επίλυσης έως και μερικές φορές η εξαγωγή ψευδών αποτελεσμάτων. Για το λόγο αυτό, το ίδιο το πρόγραμμα κατασκευάζει μια καινούρια κλίμακα προκειμένου να ομαλοποιήσει αυτές τις διαφορές.

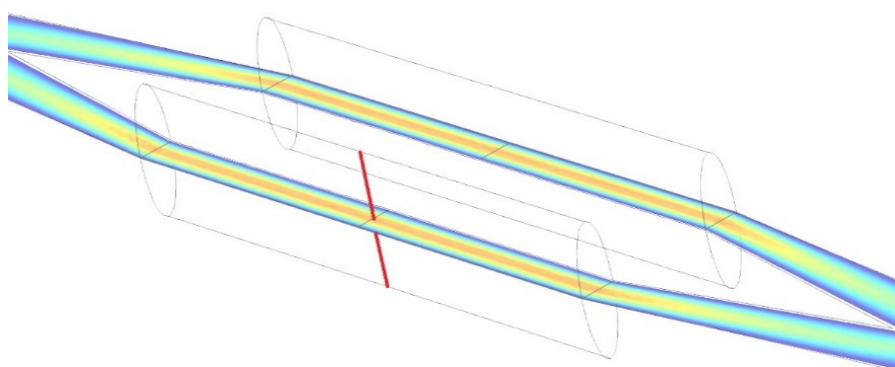
- 8) Οι επαναλήψεις που χρειάστηκαν (4 στη συγκεκριμένη προσομοίωση) ώστε να φτάσει το σύστημα στην προσεγγιστική λύση. Στην πρώτη στήλη αναφέρεται ο αριθμός των επαναλήψεων, στη δεύτερη και την τρίτη στήλη το εκτιμώμενο σχετικό σφάλμα της προσεγγιστικής μεθόδου ως προς τη λύση

και του εναπομένοντος σφάλματος αντίστοιχα. Η τέταρτη στήλη δηλώνει την απόσβεση στα βήματα της μεθόδου (απόσβεση έχουμε μόνο στις δύο πρώτες επαναλήψεις). Στην πέμπτη στήλη φαίνονται τα βήματα σε κάθε επανάληψη.

9-11) Χρόνος υπολογισμού των λύσεων και απαιτήσεις υπολογιστικής μνήμης.

3.2.7 Λύσεις – Αποτελέσματα:

Ξεκινώντας την ανάλυση των λύσεων των προσομοιώσεων αρχικά αναφέρονται τα αποτελέσματα για τις διαστάσεις 11×36 [μm] για διαφορετικά είδη πλέγματος. Συγκεκριμένα υπολογίστηκε η ταχύτητα κατά μήκος εγκάρσιας διατομής στο κέντρο των κυρίως καναλιών όπως φαίνεται στο σχήμα 3.16. Επίσης στοιχεία της προσομοίωσης για το κάθε είδος πλέγματος δίνονται στον πίνακα 3.6



Σχήμα 3.16:

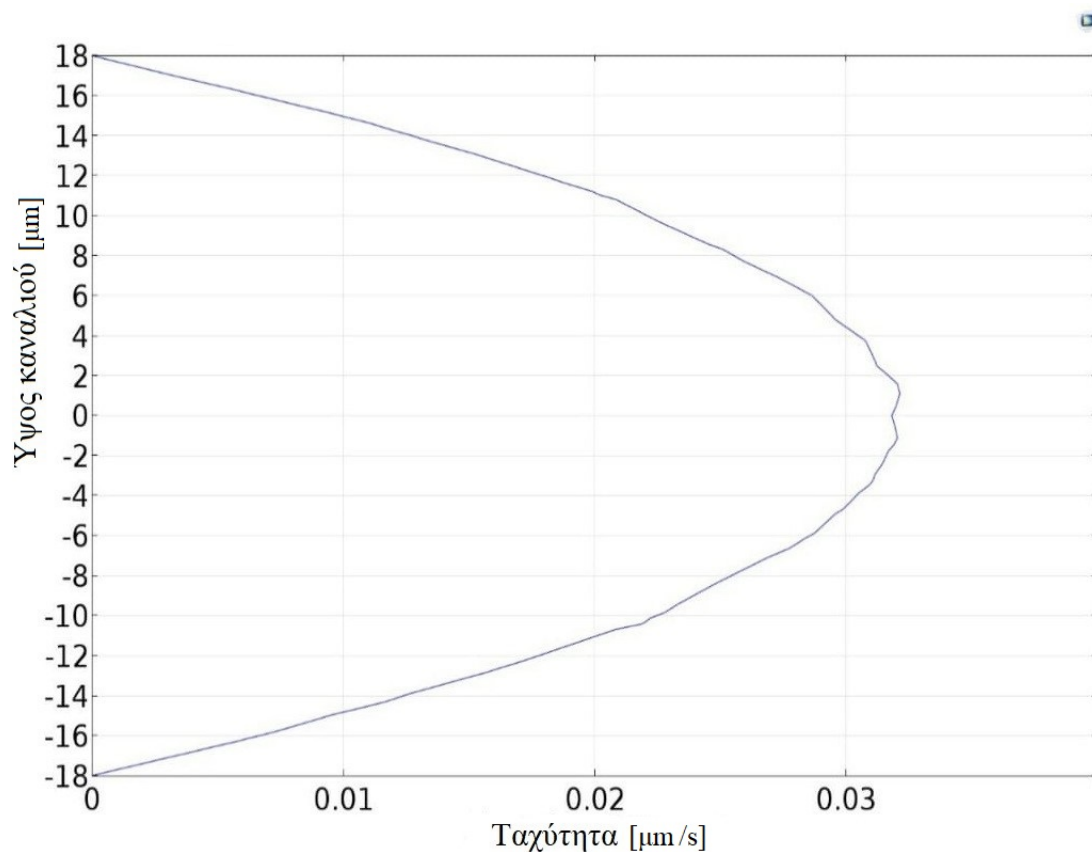
Η ευθεία στην εγκάρσια διατομή, κατά μήκος της οποίας μετρήθηκε η u_{\max} και u_{\min} .

Πίνακας 3.6

Πλέγμα	Παροχή [$\mu\text{m}^3/\text{s}$]	Μέγιστη ταχύτητα [$\mu\text{m}/\text{s}$]	Αριθμός στοιχείων	Ελάχιστο μέγεθος στοιχείου [μm]
Κανονικό	10	0.0321	549081	1.27
Αραιό	10	0.0322	89189	1.96
Αραιότερο	10	0.0324	19028	2.55

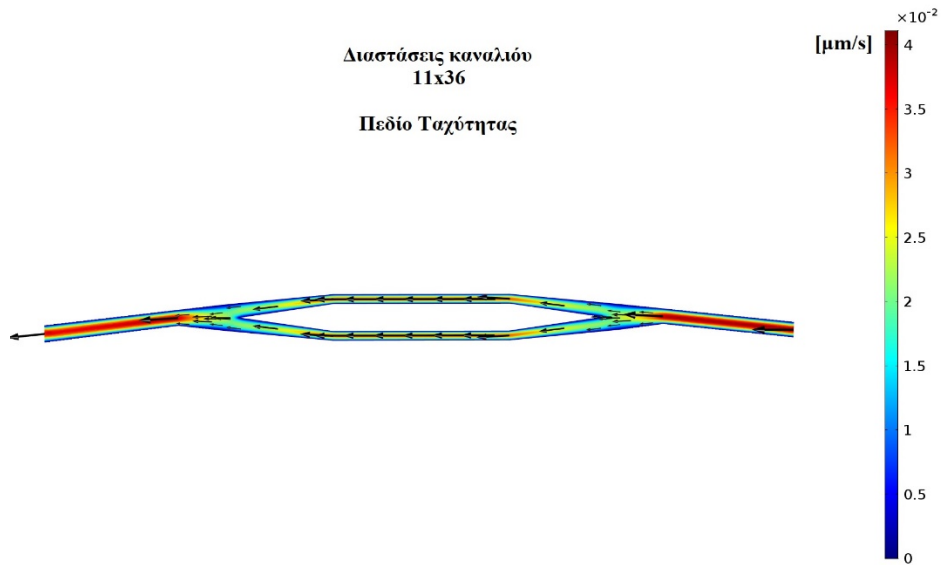
Από τον παραπάνω πίνακα γίνεται προφανές ότι ακόμα και όταν υπάρξουν αλλαγές στη διακριτοποίηση του μοντέλου, οι διαφορές στην μέγιστη τιμή της ταχύτητας ξεκινούν από το τέταρτο δεκαδικό ψηφίο, γεγονός που υποδηλώνει συνέπεια στον

υπολογισμό των λύσεων ακόμα κι αν αλλάξουν λίγο οι αρχικές παράμετροι. Το προφίλ της ταχύτητας συναρτήσει του ύψους του καναλιού όπως άλλωστε αναμενόταν είναι παραβολικό και κατά μήκος της εγκάρσιας διατομής που μετρήθηκαν οι u_{\max} και u_{\min} στο μοντέλο που μελετάται (για το κανονικό πλέγμα) φαίνεται στο σχήμα 3.17:



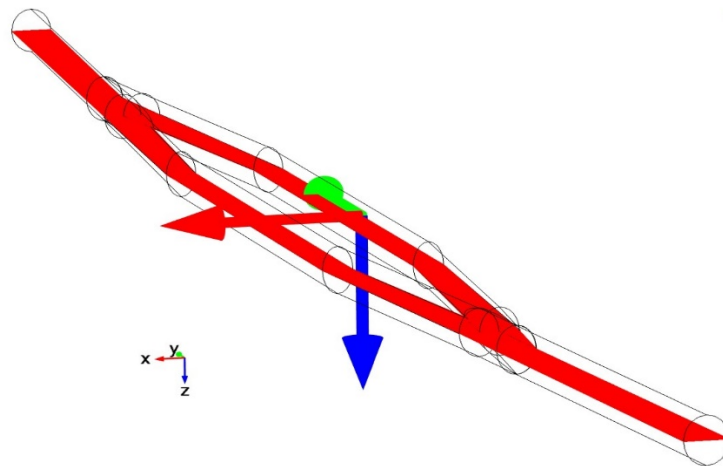
Σχήμα 3.17:
Το προφίλ της ταχύτητας συναρτήσει του ύψους του καναλιού

Στο σχήμα 3.18 που ακολουθεί απεικονίζεται το πεδίο ταχυτήτων κατά την προσομοίωση της ροής στο μικρορευστονικό κανάλι. Επίσης φαίνεται και η κλίμακα τιμών της ταχύτητας της ροής για όλο το κύκλωμα και πως αυτή διαμορφώνεται στα επιμέρους τμήματα του συστήματος.



Σχήμα 3.18:
Το πεδίο ταχυτήτων στο μικρορρευστονικό κύκλωμα.

Τέλος υπολογίστηκε η μέγιστη ταχύτητα επάνω στο επίπεδο xy ($z=0$), το οποίο αποτελεί μία οριζόντια διατομή στο μέσο κυκλώματος όπως απεικονίζεται στο σχήμα 3.19



Σχήμα 3.19:
Το επίπεδο xy του κυκλώματος επάνω στο οποίο μετρήθηκαν οι u_{\max} και u_{\min} του ρευστού

Η μέγιστη ταχύτητα εντοπίστηκε στην είσοδο του κυκλώματος και έχει μέτρο $|\vec{u}_{\max}|=0.041 \mu\text{m/s}$. Οι μέγιστες ταχύτητες των κυρίως καναλιών στο ίδιο επίπεδο (xy), επάνω στο ευθύγραμμο τμήμα που διασχίζονται κατά μήκος τα κανάλια περνώντας από το μέσο αυτών βρέθηκαν να είναι $|\vec{u}_{1\max}|=0.032 \mu\text{m/s}$ και $|\vec{u}_{2\max}|=0.032 \mu\text{m/s}$. Μπορούμε εύκολα να επισημάνουμε τη διαφορά ανάμεσα στη

μέγιστη ταχύτητα εισόδου $|\vec{u}_{\max}|$ και του αθροίσματος $|\vec{u}_{1\max}| + |\vec{u}_{2\max}|$ με $|\vec{u}_{\max}| < |\vec{u}_{1\max}| + |\vec{u}_{2\max}|$. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού λόγω της εξίσωσης $\Phi = A \cdot u$ που δίνει την ογκομετρική παροχή θα έχουμε:

$\Phi = A_1 \cdot u_{1\max} + A_2 \cdot u_{2\max}$ με A_1, A_2 τα εμβαδά των διατομών (κάθετων στη ροή) των καναλιών στα σημεία όπου μετρήθηκαν οι ταχύτητες και $A_1 = A_2 = A'$.

Επίσης ισχύει ότι: $\Phi = A \cdot u_{\max}$, όπου A το εμβαδό της διατομής της εισόδου του καναλιού με $A > A'$. Ωστόσο η ογκομετρική παροχή Φ παραμένει αμετάβλητη οπότε από την αρχή διατήρησης της μάζας θα έχουμε:

$A \cdot u_{\max} = A'(u_{1\max} + u_{2\max})$ και με δεδομένο ότι $A > A'$ για να ισχύει η ισότητα θα πρέπει $u_{1\max} + u_{2\max} > u_{\max}$

3.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων για κανάλια διαφορετικών διαστάσεων:

Συνολικά 40 ήταν οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν και συμπεριλήφθηκαν στην παρούσα εργασία. Στην πρώτη ομάδα τα κανάλια ήταν μεν διαφορετικών διαστάσεων, ωστόσο δεν τηρούταν κάποιου είδους αναλογία στις μεταβολές τους, γεγονός που ενδεχομένως να μην έδινε σαφή εικόνα του τρόπου με τον οποίο διαμορφώνεται το πεδίο ταχυτήτων της ροής σε κάθε μικρορευστονικό κανάλι (που ήταν και το ζητούμενο). Για το λόγο αυτό, προχωρήσαμε στην υλοποίηση προσομοιώσεων σε κανάλια σταθερού πλάτους 10 μm και μεταβαλλόμενου (με βήμα 2 μm) ύψους και αντιστρόφως. Οι οριακές συνθήκες και στις δύο περιπτώσεις για τη μεν είσοδο του κυκλώματος ήταν αυτή της στρωτής εισροής με σταθερή ογκομετρική παροχή: 10 $\mu\text{m}^3/\text{s}$ (και μήκος εισόδου 50 μm) της δε εξόδου πάρθηκε η τιμή της πίεσης να είναι ίση με 0 Pa. Οι τιμές της ταχύτητας που μετρήθηκαν κατά μήκος της ευθείας στην εγκάρσια διατομή που περνάει από το μέσο του κυρίως καναλιού παρατίθενται αναλυτικά στους πίνακες 3.7 και 3.8 που ακολουθούν:

Πίνακας 3.7
Σταθερό πλάτος 10 μm

Ύψος [μm]	Μέγιστη ταχύτητα [$\mu\text{m/s}$]
2	0.705
4	0.328
6	0.213
8	0.157
10	0.133
12	0.108
14	0.094
16	0.081
18	0.072
20	0.065
22	0.059
24	0.055
26	0.048
28	0.044
30	0.042
32	0.039
34	0.037
36	0.034

Πίνακας 3.8
Σταθερό ύψος 10 μm

Πλάτος [μm]	Μέγιστη ταχύτητα [$\mu\text{m/s}$]
2	0.693
4	0.285
6	0.257
8	0.163
10	0.121
12	0.104
14	0.095
16	0.080
18	0.073
22	0.060
24	0.055
26	0.050
28	0.046
30	0.043

Παρατηρήσεις

- Η μέγιστη ταχύτητα παρατηρείται κατά μήκος του ευθυγράμμου τμήματος που περνάει από το μέσο του καναλιού, φαινόμενο που συμβαδίζει απόλυτα με τις οριακές συνθήκες και το μοντέλο ροής (παραβολικό) μέσα σε κλειστό κανάλι
- Η τιμές της ταχύτητας, για την ίδια τιμή ογκομετρικής παροχής στην είσοδο, μειώνονται με την αύξηση των διαστάσεων του καναλιού κατά το αναμενόμενο λόγω αρχής διατήρησης της μάζας για ασυμπίεστη ροή : $A_1u_1=A_2u_2=σταθερό$, όπου A_1,A_2 οι διατομές δύο καναλιών ($A_1<A_2$) και u_1,u_2 οι ταχύτητα του ρευστού στην κάθε διατομή ($u_1>u_2$).
- Το αλγεβρικό άθροισμα των (μέγιστων) ταχυτήτων στα κυρίως κανάλια είναι μεγαλύτερο από την τιμή της μέγιστης ταχύτητας πριν την είσοδο (και διαχωρισμό) του ρευστού σε αυτά. Το φαινόμενο αυτό εξηγείται με την αρχή διατήρησης της μάζας (για σταθερή ογκομετρική παροχή)

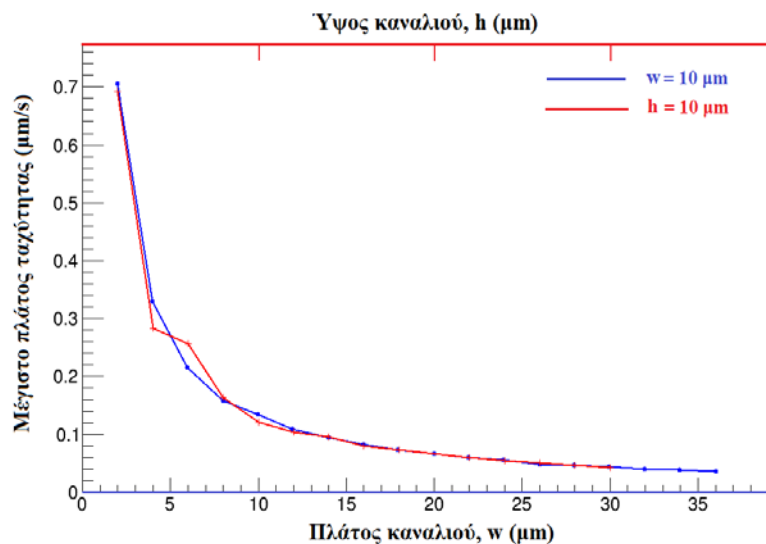
Για μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα της ταχύτητας του ρευστού μέσα στα μικροκανάλια και πως αυτή μεταβάλλεται με την αλλαγή των διαστάσεων τους, συγκεντρώσαμε τα αποτελέσματα των μέγιστων τιμών της ταχύτητας στα ισεμβαδικά κανάλια κρατώντας σταθερή κάθε φορά τη μία μόνο διάσταση όπως φαίνεται στον στον πίνακα 3.9.

Πίνακας 3.9
Μέγιστες ταχύτητές ισεμβαδικών καναλιών

Εμβαδόν διατομής (ελλειπτικού) καναλιού ($\mu\text{m})^2$	Σταθερό πλάτος $10\mu\text{m}_{\text{max}}$ ($\mu\text{m/s}$)	Σταθερό ύψος $10\mu\text{m}_{\text{max}}$ ($\mu\text{m/s}$)
15.70	0.705	0.693
31.40	0.328	0.285
47.10	0.213	0.257
62.80	0.157	0.163
78.50	0.133	0.121
94.20	0.108	0.104
109.90	0.094	0.095
125.60	0.081	0.080
141.30	0.072	0.073
172.70	0.060	0.060
188.40	0.055	0.055
204.10	0.048	0.050

219.80	0.044	0.046
235.50	0.042	0.043

Οι διαφορές στις τιμές των ταχυτήτων μεταξύ των ισεμβαδικών καναλιών δεν θείναι σημαντικές και είναι μέσα στα πλαίσια των σφαλμάτων της προσεγγιστικής μεθόδου που έγιναν κατά τη διαδικασία της επίλυσης. Οφείλονται κυρίως στη γεωμετρική κατασκευή του μοντέλου με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται κάποιο πρόβλημα στη διακριτοποίηση. Πιο συγκεκριμένα υπήρξαν κάποιες επιφάνειες ή σημεία επάνω στις ενώσεις των τμημάτων του κυκλώματος που ήταν μικρότερες από το ελάχιστο μέγεθος του ορισμένου (από το πρόγραμμα) στοιχείου διακριτοποίησης. Το γεγονός αυτό όμως δεν επηρέαζε σημαντικά τη λύση και τη γενικότερη εικόνα του πεδίου ταχυτήτων αφού οι μετρήσεις που επιθυμούσαμε να διεξάγουμε ήτανείτε σε σημεία αρκετά απομακρυσμένα από αυτά των ενώσεων, είτε τα οποιαδήποτε σφάλματα που θα μπορούσαν να προκύψουν ήταν αμελητέα σε σχέση με τα γενικότερα αποτελέσματα. Στο διάγραμμα του σχήματος 3.20 φαίνεται η μεταβολή της ταχύτητας συναρτήσει του πλάτους(κρατώντας σταθερό το ύψος στα 10 μm) και του ύψους (κρατώντας σταθερό το πλάτος στα 10 μm).



Σχήμα3.20:

Η μέγιστη τιμή της ταχύτητας συναρτήσει του πλάτους (μαύρη γραμμή) και του ύψους (κόκκινη γραμμή) του μικρορευστονικού καναλιού

Στο διάγραμμα γίνεται εμφανές ότι οι διαφορές στις τιμές είναι πολύ μικρές και οι δύο καμπύλες στα περισσότερα σημεία ταυτίζονται.

Στο κεφάλαιο αυτό δείξαμε μόνο μερικά αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα από το σύνολο που μελετήσαμε. Για μια πληρέστερη παρουσίαση των αποτελεσμάτων, στο παράρτημα παρατίθενται χωριστά περισσότερα αποτελέσματα από την προσομοίωση για τα μικρορευστονικά κανάλια όλων των διαστάσεων.

Γενικό Συμπέρασμα

Οι προσομοιώσεις έδωσαν αρκετά και χρήσιμα αποτελέσματα για το μοντέλο ροής που μελετήθηκε. Οι τιμές και το προφίλ της ταχύτητας στα μικρορευστονικά κανάλια ήταν σύμφωνα με τα αναμενόμενα βάσει της στρωτής-μονοφασικής-σταθερής ασυμπίεστης ροής και σε όλα τα αποτελέσματα διαφαίνεται η συνέπεια ως προς την αρχή διατήρησης της μάζας.

Κεφάλαιο 4

4 Πείραμα

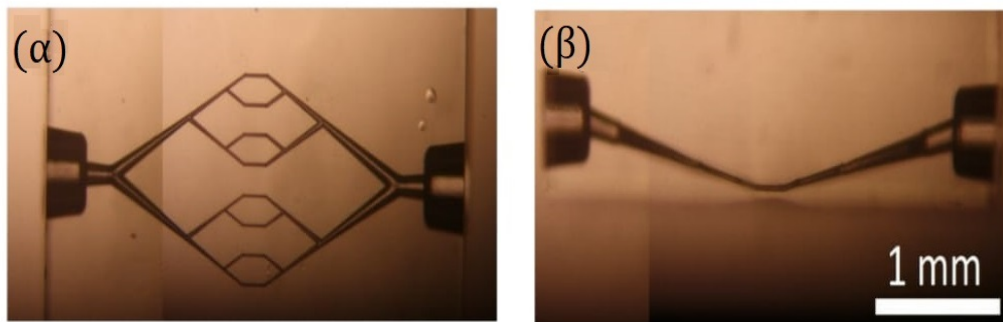
Με βάση τα συμπεράσματα της θεωρητικής προσομοίωσης της μικρο-ροής που περιγράφηκαν και στα πλαίσια της έρευνας που διεξάγεται την τελευταία δεκαετία στο εργαστήριο «Οπτοηλεκτρονική, Lasers και Εφαρμογές» του Τομέα Φυσικής στο ΕΜΠ, προχωρήσαμε στην πειραματική μελέτη της επίδρασης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των μικρορευστονικών καναλιών στην απόδοση της οπτικής παγίδευσης νανοσωματιδίων πολυστυρένιου σε κατάσταση ροής.

4.1 Εισαγωγή

Ο σκοπός του πειράματος ήταν να διαπιστωθεί η εξάρτηση της απόδοσης της οπτικής παγίδας από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των μικρορευστονικών καναλιών. Κίνητρο για την προσέγγιση αυτή, αποτέλεσε ο συσχετισμός μεταξύ της γεωμετρικής και υδροδυναμικής συμβατότητας ανάμεσα στην τεχνική της οπτικής παγίδας και τα μικρορευστονικά κυκλώματα.

Η ανάπτυξη των μικρορευστονικών κυκλωμάτων πραγματοποιήθηκε στο «Institute of Photonics and Quantum Sciences» (School of Engineering and Physical Sciences, Heriot Watt University, Edinburgh, U.K.), στα πλαίσια συνεργασίας του εργαστηρίου «Οπτοηλεκτρονική, Lasers και Εφαρμογές» του ΕΜΠ με τον καθηγητή Α.Κ. Kar και τον συνεργάτη του M.D. Mackenzie. Τα υπόλοιπα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο «Οπτοηλεκτρονική, Lasers και Εφαρμογές» του ΕΜΠ. Μέρος των αποτελεσμάτων που παρήχθησαν, καθώς και μια πληρέστερη παρουσίαση των μεθόδων, συμπεριλαμβάνονται στην εργασία: “Geometrical effect characterization of femtosecond-laser manufactured glass microfluidic chips based on optical manipulation of submicroparticles”, η οποία δημοσιεύτηκε στο επιστημονικό περιοδικό Optical Engineering ([38]).

Στις εικόνες του σχήματος 4.1 φαίνονται οι μικρορευστονικές συσκευές μετά το στάδιο της χάραξης. Τα κανάλια κατασκευάστηκαν από τετηγμένο διοξείδιο του πυριτίου μέσω απευθείας χάραξης με femtosecond και υγρή απόξεση του υλικού της μήτρας με HF.



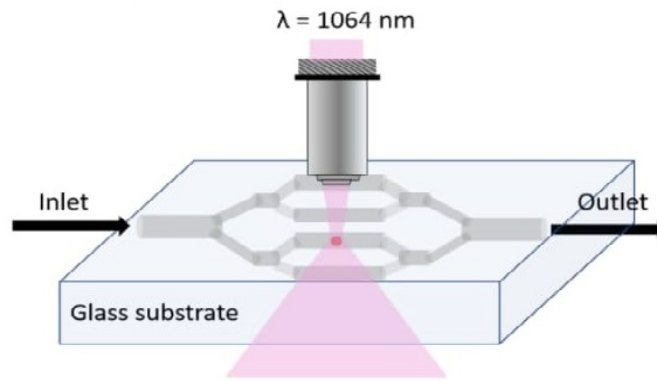
Σχήμα 4.1:
Τα μικρορευστονικά κυκλώματα ύστερα από τη χάραξη [38]

Το επόμενο στάδιο μετά την κατασκευή τους, ήταν η αξιολόγησή τους η οποία επιτεύχθηκε μετρώντας μέσα σε αυτά τις οπτικές δυνάμεις που ασκούνται σε νανοσωματίδια πολυστυρένιου σε κατάσταση ροής. Ειδικότερα μετρήθηκε η απόδοση της οπτικής παγίδας σε μικρορευστονικά κανάλια διαφορετικών διαστάσεων.

4.2 Διάταξη και διεξαγωγή του πειράματος

Για την καλύτερη κατανόηση των πειραματικών αποτελεσμάτων και τη συσχέτισή τους με αυτά των προσομοιώσεων, παρατίθεται η πειραματική διαδικασία, όπως περιγράφεται και στην δημοσίευση [38].

Μία συνεχής δέσμη laser τύπου Nd:YAG στα 1064 nm, με κάθετα πολωμένο φως και μέγιστη ισχύ εξόδου 500 mW χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία της οπτικής παγίδας στο σημείο εστίασης ενός οπτικού μικροσκοπίου. Το συγκεκριμένο μικροσκόπιο διαθέτει διχρωμικό καθρέφτη και οπτικό φίλτρο για το συγκεκριμένο μήκος κύματος. Ένας αντικειμενικός φακός μεγέθυνσης 100x και αριθμητικού ανοίγματος 1.25, χρησιμοποιήθηκε για την εστίαση της δέσμης laser στο πεδίο ορατότητας όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2:
Η διάταξη του πειράματος [38]

Για τη διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν σωματίδια πολυστυρενίου διαμέτρου 900 nm, τα οποία διασπάρθηκαν σε απιονισμένο νερό και συγκολλήθηκαν με υπερήχους πριν την έγχυση τους στο μικρορευστονικό κανάλι. Η συγκέντρωση των νανοσωματιδίων διατηρήθηκε σταθερή στα 5×10^7 σωματίδια/ml. Με την τεχνική της έγχυσης μέσω σύριγγας, το εναιώρημα εισήλθε στα μικρορευστονικά κανάλια. Η παρακολούθηση της διαδικασίας της παγίδευσης έγινε μέσω μιας CCD κάμερας, η οποία ήταν συνδεδεμένη στον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Οι οπτικές δυνάμεις που ασκήθηκαν στα παγιδευμένα νανοσωματίδια, υπολογίστηκαν έμμεσα μετρώντας την ταχύτητα διαφυγής τους από την οπτική παγίδα, γνωρίζοντας την οπισθέλκουσα δύναμη (drag force method). Οπισθέλκουσα δύναμη είναι η εξωτερική δύναμη που ασκείται σε ένα σώμα λόγω της σχετικής του κίνησης μέσα σε ένα ρευστό, πάνω στη διεύθυνση της κίνησης. Είναι μια δύναμη τριβής που αντιστέκεται στην κίνηση του σώματος [51]. Η μέτρηση της ταχύτητας διαφυγής επιτυγχάνεται μετατοπίζοντας με συνεχώς αυξανόμενη ταχύτητα (η οποία όμως παραμένει σταθερή κατά το χρονικό διάστημα της μετατόπισης) την επιφάνεια του μικροσκοπίου επάνω στην οποία βρίσκεται η μικρορευστονική συσκευή, που περιέχει τα προς παγίδευση σωματίδια. Για κάποια συγκεκριμένη τιμή της ταχύτητας η οπισθέλκουσα δύναμη υπερಿಸχύει της δύναμης παγίδευσης και τα σωματίδια δε δύναται πλέον να συγκρατηθούν από τη δέσμη laser της συγκεκριμένης ισχύος. Από την τιμή αυτή της ταχύτητας και μέσω του νόμου του Stokes υπολογίστηκε η οπτική δύναμη που ασκείται επάνω σε αυτά [41]. Πιο συγκεκριμένα ο υπολογισμός της οπισθέλκουσας δύναμης F_T προϋποθέτει τον υπολογισμό του ανύσματος της τάσης επάνω στην επιφάνεια των σωματιδίων. Η επιφάνεια δέχεται εφαπτομενικές ιξώδεις τάσεις και μοναδική κάθετη τάση, την

πίεση. Θεωρώντας την περίπτωση όπου οι ιξώδεις δυνάμεις υπερτερούν των δυνάμεων αδράνειας, η οπισθέλκουσα δύναμη αποτελείται από δύο “συνεισφορές” α) την οπισθέλκουσα μορφής που προέρχεται από την ολοκλήρωση της πίεσης πάνω στο σωματίδιο και β) την οπισθέλκουσα τριβής που προέρχεται από την ολοκλήρωση της διατμητικής ιξώδους τάσης πάνω στην επιφάνεια του σωματιδίου [51]. Για σχετικά μικρές ταχύτητες, η οπισθέλκουσα δύναμη \vec{F}_T που δυσχεραίνει την κίνηση ενός σώματος ακτίνας r το οποίο βρίσκεται μέσα σε ένα ιξώδες μέσο, είναι ανάλογη ενός συντελεστή μορφής του σώματος K , της ταχύτητας κίνησης \vec{u} αυτού και του συντελεστή εσωτερικής τριβής μ του υγρού και δίνεται από τη σχέση (Νόμος Stokes):

$$\vec{F}_T = K\pi r \vec{u} \mu \quad (4.1)$$

Ειδικότερα, στην περίπτωση σφαιρικών σωματιδίων, η σχέση που δίνει την οπισθέλκουσα δύναμη είναι η [51]:

$$\vec{F}_T = 2\pi r \mu \vec{u} + 4\pi r \mu \vec{u} = 6\pi r \mu \vec{u}$$

\downarrow
 Οπισθέλκουσα
μορφής

\downarrow
 Οπισθέλκουσα
τριβής

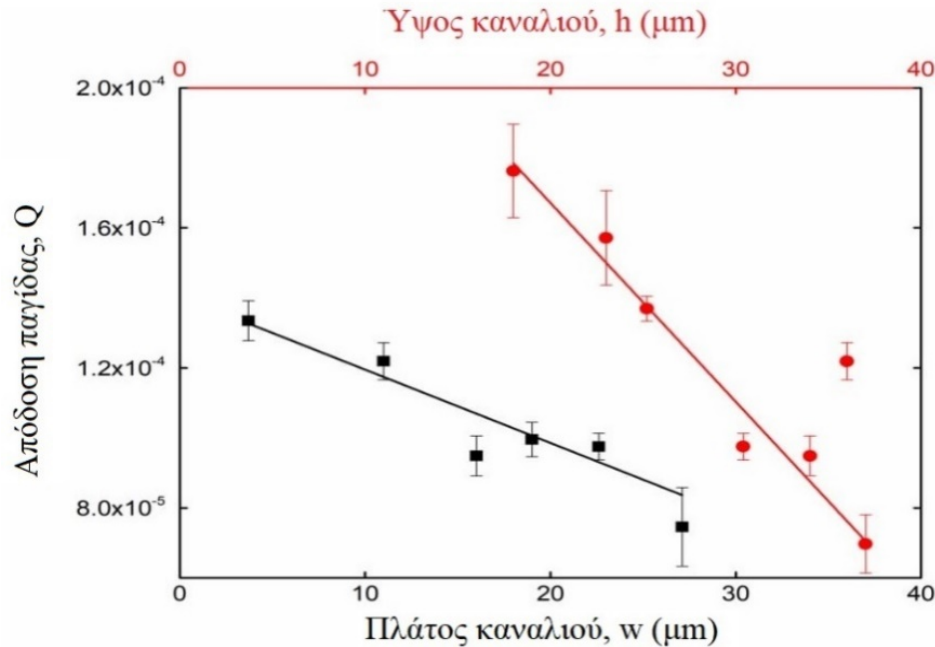
Θεωρώντας ως \vec{u} τη \vec{u}_{esc} για την οποία τα σωματίδια αποσπώνται από την παγίδα, η τιμή της οπισθέλκουσας δύναμης για την οριακή τιμή της ταχύτητας $\vec{u} = \vec{u}_{esc}$ ισούται με την οπτική δύναμη. Έχοντας την δύναμη \vec{F} που δρα στα νανοσωματίδια, είναι εφικτό να υπολογιστεί η απόδοση της παγίδας Q σύμφωνα με τον τύπο 1.3, ο οποίος αναφέρεται και εδώ για υπενθύμιση:

$$Q = \frac{F \cdot c}{n_{med} \cdot P} \quad (4.2)$$

Όπου P η ισχύς της δέσμης laser που δρα ως παγίδα, c η ταχύτητα του φωτός και n_{med} ο δείκτης διάθλασης του περιβάλλοντος μέσου ($n_{med}=1.33$). Η σχέση ανάμεσα στην οπισθέλκουσα δύναμη και την οπτική δύναμη παγίδευσης αποτελεί μία σημαντική παράμετρο για την αξιολόγηση της παγίδας μέσα στο μικρορευστονικό κύκλωμα. Καθορίζεται δε από τη γεωμετρία του καναλιού και κατ'επέκταση από την ταχύτητα ροής μέσα σε αυτό, η οποία αν είναι πολύ μεγάλη και για συγκεκριμένη τιμή της ισχύος της δέσμης laser (και τη χρήση συγκεκριμένου φακού) δεν καθιστά την οπτική δύναμη επαρκή ώστε να ακινητοποιήσει και να παγιδεύσει τα σωματίδια.

Στο σχήμα 4.3 που ακολουθεί, φαίνεται η απόδοση της παγίδας συναρτήσει του πλάτους w του καναλιού, όταν το ύψος h κατά τη z -διεύθυνση διατηρείται σταθερό

(μαύρο χρώμα) και αντιστρόφως συναρτήσει του ύψους h όταν το πλάτος w έχει μία συγκεκριμένη τιμή (κόκκινο χρώμα)



Σχήμα 4.3:

Η απόδοση της οπτικής παγίδας συναρτήσει του πλάτους του καναλιού υπό σταθερό ύψος και αντιστρόφως [38]

Τα αποτελέσματα δείχνουν ξεκάθαρα ότι η απόδοση της παγίδας εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τις διαστάσεις του καναλιού. Καθώς το πλάτος του καναλιού αυξάνεται η απόδοση της παγίδας μειώνεται. Οι συμπαγείς γραμμές του γραφήματος (σχήμα 4.3) αποτελούν τη γραμμική προσαρμογή των δεδομένων σύμφωνα με την εξίσωση:

$$Q = Q_0 + A_1 \cdot w \quad (4.3) \quad \text{και} \quad Q = Q_0 + A_2 \cdot h \quad (4.4)$$

όπου $Q_0 = (1.45 \pm 0.11) \times 10^{-4}$ είναι η απόδοση της παγίδας εκτός του μικρορευστονικού καναλιού και A_1, A_2 κατάλληλες παράμετροι.

Προκειμένου να γίνει κατανοητή σχέση μεταξύ της απόδοσης της παγίδας και του πλάτους του μικρορευστονικού καναλιού, ας αναλογιστούμε πως συνδέονται δύναμη που λειτουργεί ως παγίδα, ο νόμος του Stokes καθώς και η ογκομετρική παροχή. Από την εξίσωση (4.2) η απόδοση της παγίδας βασίζεται στο λόγο της οπτικής δύναμης προς την ισχύ της δέσμης laser. Η οπτική δύναμη μεταβάλλεται γραμμικά ως προς την ισχύ του laser για την οποία επιτυγχάνεται η παγίδευση. Η

οπισθέλκουσα δύναμη (που δίνεται από το νόμο του Stokes) επίσης μεταβάλλεται γραμμικά ως προς την ογκομετρική παροχή. Η παροχή για μόνιμη εξαναγκασμένη ροή σε μικρορευστονικό κανάλι αλλάζει όταν μεταβάλλεται το πλάτος σύμφωνα με τονόμο των Hagen-Poiseuille [68].

$$\Phi = \frac{\Delta P}{R_{\text{fluid}}} \quad (4.5)$$

όπου:

Φ : η ογκομετρική παροχή

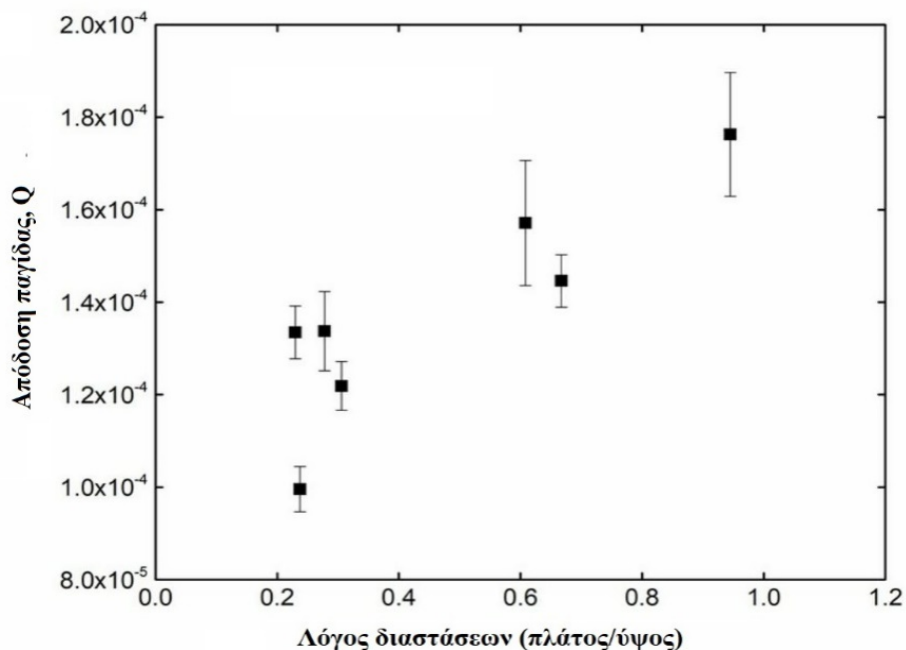
ΔP : η διαφορά πίεσης στα δύο άκρα του καναλιού

R_{fluid} : η υδραυλική αντίσταση για την οποία ισχύει $\frac{12\mu\text{L}}{wh^3} < R_{\text{fluid}} < \frac{32\mu\text{L}}{wh^3}$, αναλόγως με το σχήμα του αγωγού, με h το ύψος της διατομής του καναλιού και w το αντίστοιχο πλάτος.

Ως εκ τούτου είναι αναμενόμενο ότι η απόδοση της παγίδας θα εξαρτάται άμεσα από τις διαστάσεις του καναλιού, όπως αποδείχθηκε και πειραματικά. Η μέγιστη τιμή της απόδοσης που εντοπίστηκε στην πειραματική διαδικασία ήταν: $Q_{\text{max}} = (1.76 \pm 0.13) \times 10^{-4}$ και πάρθηκε για το κανάλι με πλάτος $w = 18 \mu\text{m}$. Επίσης παρατηρήθηκε σημαντική μείωση της απόδοσης της παγίδας με την αύξηση του ύψους του καναλιού.

Μια ακόμα σημαντική παρατήρηση αφορά στις διαστάσεις του μικρορευστονικού καναλιού για τις οποίες επιτεύχθηκε η μεγαλύτερη αποδοτικότητα της οπτικής παγίδας. Οι διαστάσεις αυτές ήταν οι $17 \mu\text{m} \times 18 \mu\text{m}$ (εμβαδό διατομής $240.21 \mu\text{m}^2$). Από τα παραπάνω αποτελέσματα, φαίνεται ότι τα κανάλια μικρότερων διατομών ευνοούν την συγκέντρωση των νανοσωματιδίων στην “περιοχή παγίδευσης” και συνεπώς οδηγούν σε αύξηση της αποδοτικότητας της οπτικής παγίδας. Ο λόγος διαστάσεων του καναλιού αποτελεί επίσης έναν πολύ σημαντικό παράγοντα για τον έλεγχο της ροής μέσα στο κανάλι σε κάθε μικρορευστονικό κύκλωμα.

Ύστερα από παρατηρήσεις που έγιναν, το συμπέρασμα ήταν πως για λόγους διαστάσεων μικρότερους της μονάδας η απόδοση της παγίδας αυξάνεται με την τελευταία να παίρνει τη μέγιστη τιμή της για λόγο διαστάσεων πολύ κοντά στη μονάδα. Τα πειραματικά αποτελέσματα της σχέσης του λόγου διαστάσεων του καναλιού (συγκεκριμένα, πλάτος/ύψος) φαίνονται στο σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4:

Η απόδοση της παγίδας συναρτῆσει του λόγου διαστάσεων (w/h) των καναλιών [38]

Μια πιθανή εξήγηση για το λόγο που συμβαίνει αυτό είναι ο χαμηλή τιμή του $C = f \cdot Re$, όπου f ο συντελεστής τριβής (Re , ο αριθμός Reynolds), στα κανάλια με μικρό λόγο διαστάσεων, με αποτέλεσμα την ταχύτερη ροή μέσα στο κανάλι και συνεπώς την αύξηση της απόδοσης της παγίδας.

Τα συμπεράσματα που αφορούν στην αποδοτικότητα της παγίδας δεν θα μπορούσαν να εξαχθούν εξ'ολοκλήρου από τις προσομοιώσεις, αφού σε αυτές μελετήθηκε μόνο η συμπεριφορά και το πεδίο ταχυτήτων του ρευστού που διαρρέει το κανάλι χωρίς να συμπεριληφθεί η ύπαρξη των μικροσωματιδίων μέσα σε αυτό και η αλληλεπίδραση των δυνάμεων που ασκούνται σε αυτά (και κατ'επέκταση της ταχύτητας τους) με την ταχύτητα ροής του υγρού.

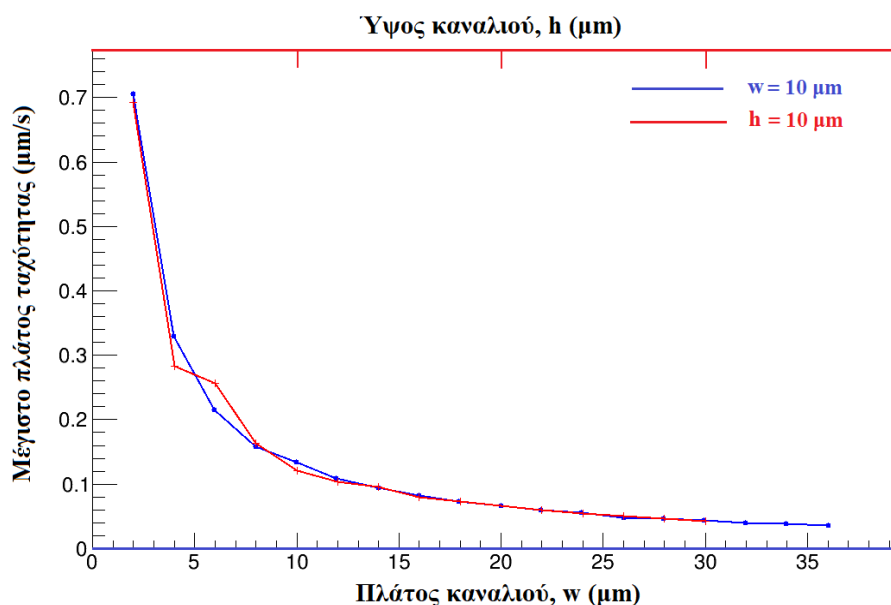
4.3 Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και προσομοιώσεων

Οι προσομοιώσεις που παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν στην προηγούμενη ενότητα έγιναν με σκοπό να κατανοηθεί ο τρόπος με τον οποίο οι διαστάσεις μιας μικρορευστονικής συσκευής επηρεάζουν την ταχύτητα της ροής ενός ρευστού και σε συνδυασμό και με τα πειραματικά δεδομένα την αποδοτικότητα της δέσμης.

Όπως ήδη έχει αναφερθεί το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις, επάνω σε τρισδιάστατα μοντέλα, ήταν το Comsol Multiphysics για στρωτή ροή σε μικρορευστονικό κανάλι.

Στα συμπεράσματα των προσομοιώσεων επισημάνθηκε εξάρτησης τιμής της ταχύτητας συναρτήσεως των διαστάσεων των καναλιών και συγκεκριμένα όσο μεγαλώνουν οι διαστάσεις (για σταθερή ογκομετρική παροχή) τόσο μειώνεται η τιμή της ταχύτητας στο κανάλι όπως άλλωστε ήταν το αναμενόμενο λόγω της αρχής διατήρησης της μάζας.

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων ήταν γενικά συνεπή με τα αντίστοιχα των προσομοιώσεων για διαστάσεις καναλιών (μήκος και πλάτος) μικρότερες των 15 μm . Για διαστάσεις μεγαλύτερες των 15 μm τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδωσαν σχεδόν σταθερές τιμές για τη μέγιστη ταχύτητα της ροής, γεγονός που δε συνάδει με τα πειραματικά εξαγόμενα. Αυτό φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα (4.5) το οποίο είδαμε και στην παράγραφο 3.3 του προηγούμενου κεφαλαίου.



Σχήμα 4.5:

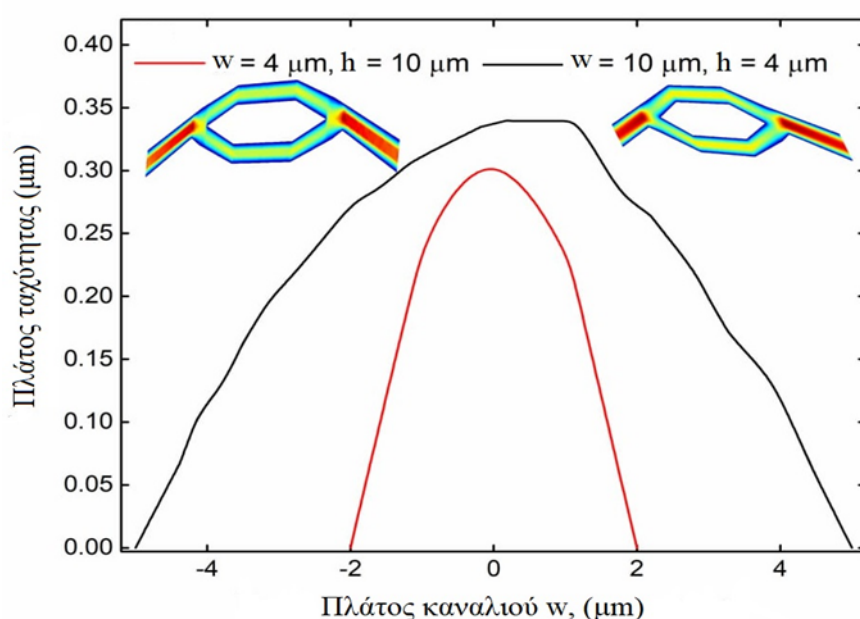
Αποτελέσματα προσομοίωσης. Η τιμή της ταχύτητας για διαστάσεις μεγαλύτερες των 15 μm (ύψος και πλάτος) είναι σχεδόν σταθερή

Αυτή η ασυνέπεια μεταξύ των δύο αποτελεσμάτων (πειραματικών και προσομοιώσεων) ενδεχομένως να οφείλεται στο γεγονός ότι η ταχύτητα εξαρτάται από ακόμα δύο παραμέτρους, αφενός το μήκος του κυρίως καναλιού και αφετέρου το μήκος του διακλαδιζόμενου καναλιού. Το μήκος του κάθε μικρορευστονικού καναλιού στο ίδιο κύκλωμα δεν μπορεί να έχει τις ίδιες διαστάσεις λόγω περιορισμών

που αφορούν στην κατασκευή του, οπότε οι προαναφερθείσες παράμετροι μπορεί να επηρεάζουν τα πειραματικά αποτελέσματα.

Επιπλέον παρατηρήθηκε μια μικρή μετατόπιση ($\sim 0.465 \mu\text{m}$), με την αύξηση του πλάτους και τη μείωση του ύψους του καναλιού (για ισεμβαδικά κανάλια), στο σημείο καταγραφής της μέγιστης ταχύτητας, γεγονός που δικαιολογεί τη μείωση της απόδοσης της παγίδας για μεγαλύτερα πλάτη κατά την πειραματική διαδικασία.

Για τα ισεμβαδικά κανάλια που αντιστοιχούν στην τιμή εμβαδού 31.40 του πίνακα 3.13, (για διαστάσεις πλάτους και ύψους 4 μm και 10 μm αντίστοιχα και αντιστρόφως) το προφίλ της ταχύτητας διαμορφώνεται όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6.



Σχήμα 3.21:

Το προφίλ της ταχύτητας κατά τη διεύθυνση του πλάτους του καναλιού είναι παραβολικό με την ταχύτητα να παίρνει τη μέγιστη τιμή στο κέντρο του. Στην ένθετη εικόνα φαίνεται το προφίλ του πλάτους της ταχύτητας συναρτήσει του πλάτους και του ύψους που αντιστοιχούν στη κάθε διατομή. [38]

Το παραβολικό προφίλ της ταχύτητας που πάρθηκε από τις προσομοιώσεις, με την τελευταία να παίρνει τη μέγιστη τιμή στο κέντρο του καναλιού ήταν και το επιθυμητό αφού ευνοεί τη συσσώρευση ομογενούς δείγματος μέσα στο κανάλι. Αναλυτικότερα, όταν τα σωματίδια εισάγονται στο κύκλωμα, η εφαρμοζόμενη δύναμη επηρεάζει την ταχύτητα ροής στο μικρορευστονικό κανάλι. Εάν η ταχύτητα ροής είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα που φέρουν τα σωματίδια κατά την είσοδό τους στο κανάλι, η συγκέντρωσή τους θα αλλάξει. Προκειμένου λοιπόν να βελτιστοποιηθεί η χωρητικότητα των ομοιόμορφα διεσπαρμένων σωματιδίων που μπορεί να δεχτεί το

κύκλωμα, είναι απαραίτητο να τροποποιηθούν οι διαστάσεις των καναλιών έτσι ώστε να εξομαλύνουν τις διαφορές στην ταχύτητα.

Συνοψίζοντας θα μπορούσε να ειπωθεί ότι:

- Οι οπτικές παγίδες δύναται να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με μικρορευστονικές συσκευές προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση των διαστάσεων των καναλιών στην αποδοτικότητα της οπτικής παγίδας,
- Το ύψος του καναλιού σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα αλλά και των προσομοιώσεων φαίνεται να παίζει πιο σημαντικό ρόλο στη διαδικασία της οπτικής παγίδευσης από αυτόν του πλάτους. Μειώνοντας το ύψος του καναλιού η επίδραση στην απόδοση της παγίδας μπορεί να είναι εντονότερη από ότι εάν μειώναμε το πλάτος αυτού.
- Μικρότεροι λόγοι διαστάσεων των καναλιών ευνοούν την απόδοση της οπτικής παγίδας
- Οι διαστάσεις των καναλιών επηρεάζουν την διεκπεραιωτική ικανότητα στον "οπτικό" χειρισμό
- Βάσει των αποτελεσμάτων του πειράματος και των προσομοιώσεων, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των μικρορευστονικών καναλιών επηρεάζουν τη συμπεριφορά τους σε σχέση με τη ροή του ρευστού και την οπτική παγίδευση. Η πληροφορία αυτή χρειάζεται να αξιοποιηθεί με τον καλύτερο δυνατό τρόπο για τον αποτελεσματικό χειρισμό σωματιδίων νανομετρικής κλίμακας ,κυρίως σε βιολογικές εφαρμογές.

Βιβλιογραφία-Αναφορές

Διεθνής βιβλιογραφία

- [1] Lebedev P., “Untersuchungen über die Druckkräfte des Lichtes”, Annalen der Physik, 1901
- [2] Nichols E.F. and Hull G. F., “A Preliminary Communication on the Pressure of Heat and Light Radiation”, E. F. Phys. Rev. (Series I) 13, 307 – Published 1 November 1901
- [3] Nichols E. F. and Hull G. F., “The Pressure Due to Radiation” (Second Paper.), Phys. Rev. (Series I) 17, 26 – Published 1 July 1903
- [4] Ashkin A., Dziedzic J.M., “Optical Levitation by Radiation Pressure”, Appl. Phys. Lett. 19, 283 (1971)
- [5] Chu S., Hollberg L., Bjorkholm J. E., Cable A., and Ashkin A., “Three-dimensional viscous confinement and cooling of atoms by resonance radiation pressure”, Phys. Rev. Lett. 55, 48, July 1985
- [6] Hänsch T. W. and Schawlow A.L., “L. Cooling of gases by laser radiation”, Opt. Commun. 13, 68-69, Article: January 1975
- [7] Ashkin A., Dziedzic J.M., Bjorkholm J.E., and Chu S., “Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles”, Optics Letters, Vol. 11, No 5, March 4, 1986
- [8] Moffitt J.R., Chemla R., Izhaky D., and Bustamante C., “Differential detection of dual traps improves the spatial resolution of optical tweezers”, Proc Natl Acad Sci U S A. 2006 Jun 13; 103(24): 9006–9011., Published online 2006
- [9] Sung J., Nag S., Mortensen K.I., Vestergaard C.L., Sutton S., Ruppel K., Flyvbjerg H., and Spudich J.A., “Harmonic force spectroscopy measures load-dependent kinetics of individual human β -cardiac myosin molecules”, Nature Communications 6, Article number: 7931 (2015)
- [10] Neuman K.C. and Block S.M., “Optical trapping”, Rev Sci Instrum. 2004 September; 75(9): 2787–2809, NIH Public Access
- [11] Raab E.L., Prentiss M., Cable A., Chu S., and Pritchard D.E., “Trapping of Neutral Sodium Atoms with Radiation Pressure”, Physical Review Letters, Vol. 59, No 23, December 1987
- [12] Constable A., Kim J., Mervis J., Zarinetchi F., and Prentiss M., “Demonstration of a fiber-optical light-force trap”, Vol. 18, Issue 21, pp. 1867-1869, 1993
- [13] Kreysing M.K., Kießling T., Fritsch A., Dietrich C., Guck J.R., and Käs J.A., “The Optical Cell Rotator”, OSA Publishing, Optics Express, Vol.16, Issue 21, Page 16984, 2008
- [14] Liu Y., Yu M., “Inclined dual-fiber optical tweezers: modeling and experiments”, Proceedings Volume 7400, Optical Trapping and Optical Micromanipulation VI; 740027 (2009), SPIE. Digital Library
- [15] Guck J., Ananthakrishnan R., Moon T. J., Cunningham C. C., and Käs J., “Optical Deformability of Soft Biological Dielectrics”, Physical Review Letters, Vol. 84, No. 23, June 2000
- [16] Ozkan M., Wang M., Ozkan C., Flynn R., Birkbeck A., Esener S., “Optical Manipulation of Objects and Biological Cells in Microfluidic Devices”, Journal: Biomedical Microdevices, Vol.5, Issue Number:1, 2003
- [17] Enger J., Goksör M., Ramser K., Hagberg P., Hanstorp D., “Optical tweezers

- applied to a microfluidic system”, *Lab Chip*. 2004 Jun;4(3):196-200. Epub 2004 Mar 19
- [18] Wang M.M., Tu E., Raymond D.E., Yang J.M., Zhang H., Hagen N., Dees B., Mercer E.M., Forster A.H., Kariv I., Marchand P.J., Butler W.F., “Microfluidic sorting of mammalian cells by optical force switching”, *Nat Biotechnol*. 2005 Jan;23(1):83-7. Epub 2004 Dec 19.
- [19] Harada Y., Asakura T., “Radiation forces on a dielectric sphere in the Rayleigh scattering regime”, *Optics Communications* 124 (1996) 529-541, March, 1996
- [20] Crawford F.S.Jr., “Waves”, *Berkley Physics Course-Vol.3*, June 1968
- [21] Kerker M., Loeb E.M., “The Scattering of Light and Other Electromagnetic Radiation, Volume 16 in *Physical Chemistry: A Series of Monographs*, 1969
- [22] Jackson J. D., “Classical electrodynamics”, 2nd Edition, Wiley, New York, 1975
- [23] Gordon J.P., “Radiation forces and momenta in dielectric media”, *Phys. Rev.A*.8:14-21., 1973
- [24] Käs J., Golde T., Lippoldt J., “Small Spheres in Gradient trap”(Optical tweezers calibration using backfocal-plane detection), *Biophysics Lab Course*, 2015
- [25] Jones P.H., Margo O.M., Volpe G., “Optical tweezers: Principles and Applications”, 2015
- [26] Guck J., Ananthakrishnan R., Mahmood H., Moon T.J., Cunningham C. C., and Käs J., “The Optical Stretcher: A Novel Laser Tool to Micromanipulate Cells”, *Biophysical Journal* Volume 81 August 2001 767–784
- [27] Serway R.A. and Jewett J.W., “Physics for Scientists and Engineers”, 6th Edition, Thomson Books, 2004
- [28] Mie G., “Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen”, *Annalen Der Physik*. Vierte Folge. Band 25, 1908
- [29] Chen X., “Laser Tweezers”, *Optics Rotation Project 1*, Fall 2002
- [30] Zhang H. and Liu K.K., “Optical tweezers for single cells”, *Institute for Science and Technology in Medicine, Keele University, Journal of The Royal Society Interface, J. R. Soc. Interface* (2008) 5, 671–690, doi:10.1098/rsif.2008.0052, Published online 1 April 2008
- [31] Ashkin A., “Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime”, *AT & T Bell Laboratories, Holmdel, New Jersey* 07733, , *Biophysical Journal*, Vol. 61, February 1992
- [32] Eriksson E., Scrimgeour J., Graneli A., Ramser K., Wellander R., Enger J., Hanstorp D., and Goksör M., “Optical manipulation and microfluidics for studies of single cell dynamics”, *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 9 (2007) S113–S121(online)
- [33] Kemp G., “Capillary electrophoresis: a versatile family of analytical techniques”, *Biotechnol Appl Biochem*. 1998 Feb; 27 (Pt 1):9-17.
- [34] Cremer E., Prior F., “Application of the Chromatographic Method to the Separation of Gases and to the Determination of Adsorption Energies”, *Z. Elektrochem.*55, 66–70 (1951)
- [35] Lee C.C., Snyder T.M., and Quake S.R., “A microfluidic oligonucleotide synthesizer”, 2514–2521 *Nucleic Acids Research*, 2010, Vol. 38, No. 8,

Feb 21, 2010

- [36] Tang S.K.Y. and Whitesides G.M., “Basic Microfluidic and Soft Lithographic Techniques”, Department of Chemistry and Chemical Biology, Harvard University, New Technical 6x9/ Technical/ Optofluidics: Fundamentals, Devices, and Applications/ Yeshaiahu Fainman/ 0-07-160156-2/Chapter 2. 2009
- [37] Oh K.W., Lee K., Ahn B. and Furlani E.P., “Design of pressure-driven microfluidic networks using electric circuit analogy”, *Lab Chip*, 2012, 12, 515
- [38] Kotsifaki D.G., Mackenzie M.D., Polydefki G., Kar A.K., Makropoulou M., Serafetinides A.A., “Geometrical effect characterization of femtosecond-laser manufactured glass microfluidic chips based on optical manipulation of submicroparticles”, *Optical Engineering*, 56(12), 124111 (2017). doi:10.1117/1.OE.56.12.124111, December 27, 2017
- [39] Munson b.R., Okiishi T.H., Huebsch W.W., Rothmayer A.P., “Fundamentals of Fluid Mechanics”, 7th Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2017
- [40] Acharya S., “Analysis and FEM Simulation of Flow of Fluids in Pipes”, Fluid Flow COMSOL Analysis, Bachelor Thesis, Plastics Technology, 2016
- [41] Foo J. J., Liu K. K., and Chan V., “Viscous Drag of Deformed Vesicles in Optical Trap: Experiments and Simulations”, Tissue Engineering Laboratory, School of Mechanical and Production Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798, *AIChE Journal*, Vol. 50, No. 1, January, 2004
- [42] Schembri J., “Three-dimensional laminar-turbulent transition simulations with the γ -($Re_{\theta t}$)⁻ transition model”, Department of Mechanical Engineering, McGill University Montreal, Quebec, 2015
- [43] Rockstuhl C., Herzig H.P., “Rigorous diffraction theory applied to the analysis of the optical force on elliptical nano- and micro-cylinders”, *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 6 (2004) 921–931

Ελληνική βιβλιογραφία

- [44] Σπυράτου Ε., “Φωτο-βιοφυσικές Εφαρμογές των Laser και Ανάπτυξη Μεθοδολογίας Μικροχειρισμού Νανοσωματιδίων με χρήση Οπτικής Παγίδας Laser”, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, Τομέας Φυσικής, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2010
- [45] Τσουγένη Α., “Μίκρο και Νάνο Σχηματοποίηση Πολυμερών για την Κατασκευή Μίκρο-Αναλυτικών Διατάξεων”, Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Αθηνών, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Χημείας, Αθήνα, 2010
- [46] Καρούσιας Ν.Γ., Καθηγητής Τμήματος Μαθηματικών Πανεπιστημίου Πατρών, “Ρευστομηχανική Ι”, Πάτρα 1999
- [47] Νικολός Ι.Κ., Δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός, “Σημειώσεις Μαθήματος Μετάδοση Θερμότητας”, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Χανιά 2007
- [48] Τζηκαλάγιας Α., “Προσομοιώσεις Κυκλωμάτων Μεγάλης Κλίμακας με Γραμμικά και Μη-Γραμμικά Μέρη”, Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Ιούνιος 2016
- [49] Παϊπέτης Α., “Δυνάμεις και Παραμόρφωση Ρευστών”, Ρευστομηχανική

- 2012-2013, 6ο Εξάμηνο Μηχανικών Επιστήμης Υλικών, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων
- [50] Παπανικολάου Ν.Π., Ph.D., “Στοιχεία Μόνιμης Ροής σε Αγωγούς υπό Πίεση και Αγωγούς με Ελεύθερη Επιφάνεια”, Διδακτικές Σημειώσεις, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π., Αύγουστος 2012
- [51] Χριστάκης Παρασκευά, Αναπληρωτής Καθηγητής, Δημήτρης Σπαρτινός, Λέκτορας Δ. Σωτηροπούλου, Εργαστηριακό Διδακτικό Προσωπικό, “Μέτρηση ιξώδους ρευστών και συντελεστή οπισθέλκουσας”, Τμήμα:Χημικών Μηχανικών, Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2007-2013
- [52] Στέγγου-Σαγιά Α., “Θερμικές διεργασίες”, 2015
- [53] Σοφιανός Γ., Τυχόπουλος Ε., “Αριθμητική Ανάλυση”, Εκδόσεις: Σταμούλη, 2005

Ιστοσελίδες

- [54] <http://homework.uoregon.edu/pub/class/archive/optics.html>
- [55] http://www.dcu.ie/~ducreeje/myfluidix/Materials/03_Physics_01.pdf
 Ducreé J., DCU website, Index of /~ducreeje, Fluids, 2015
- [56] https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/4185/1/Κεφάλαιο_3/.pdf
- [57] MichaelSmith-CFI, <http://www.pilotwings.org/laminar-flow.html>
- [58] <https://www.comsol.com/multiphysics/convection-diffusion-equation>
- [59] <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/T/Time+Average>
- [60] <https://www.elveflow.com/microfluidic-tutorials/microfluidic-reviews-and-tutorials/flow-control-in-microfluidic-device/>
- [61] Χατζηκυριάκος Σάββας, “Ρεολογία και Διεργασίες Επεξεργασίας Πολυμερών”, Κεφάλαιο 1, Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών, Πανεπιστήμιο Κρήτης,
https://www.materials.uoc.gr/el/undergrad/courses/ETY454/notes/CHAPTER-01-Elastic_GR.pdf
- [62] RockMechs, Rock Mechanics for Engineers, “Deviatoric Stress and Invariants”, <http://www.rockmechs.com/stress-strain/stress/deviatoric-stress-and-invariants/>
- [63] <http://physics.stackexchange.com/questions/205426/unsteady-and-incompressible-flow>
- [64] <http://what-when-how.com/the-finite-element-method/fem-for-two-dimensional-solids-finite-element-method-part-1/>
- [65] <https://www.comsol.com/blogs/solving-nonlinear-static-finite-element-problems/>
- [66] ΤΠΕ@Παιδεία, “Μη Γραμμικά Συστήματα-Μέθοδος Newton-Raphson”, <http://www.raptis-telis.com/numer/sites/default/files/pdf/NonlinearS.pdf>
- [67] <http://optomech.wpi.edu>
- [68] https://www.augusta.k12.va.us/cms/lib01/VA01000173/Centricity/Domain/396/Resistance_in_the_Fluid_System.pdf
- [69] <https://www.comsol.com/blogs/meshing-your-geometry-various-element-types>
- [70] [http://www.des.upatras.gr/physics/sfetsos/Special_Funct\[Sfetsos\].pdf](http://www.des.upatras.gr/physics/sfetsos/Special_Funct[Sfetsos].pdf)

Συμπληρωματική βιβλιογραφία

Διεθνής

1. COMSOL, “Introduction to Microfluidics Module”, Version 4.3b, May 2013
2. COMSOL Multiphysics, User’s Guide, VERSION 4.3, May 2012
3. Hesketh R.P. (modified by), Chemical Engineering, Rowan University, “Flow Between Parallel Plates”, Modified from the COMSOL ChE Library module, rev 10/13/08
4. Leester – Schädel M., Lorenz T., Jürgens F., and Richter C., “Fabrication of Microfluidic Devices”, Chapter 2
5. Mase G.E., “Theory and Problems of Continuum Mechanics”, Schaum’s Outline Series in Engineering, June 1970
6. Padgett M.J., Molloy J.E., McGloin D., “Optical Tweezers Methods and Applications”, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010
7. Sharma K.K., “OPTICS Principles and Applications”, Elsevier Inc., 2006
8. Smith F.G., King T.A., Wilkins D., “Optics and Photonics: An Introduction”, Second Edition, John Wiley & Sons, Ltd, 2007
9. Whitesides G.M., “The origins and the future of microfluidics”, NATURE, Vol., 442/27, July 2006
10. Jun 2. doi: 10.1073/pnas.0603342103 PMID: PMC1482556, Biophysics
11. Woerdemann M., “Structured Light Fields”, Applications in Optical Trapping, Manipulation, and Organisation, Springer, 2012

Ελληνική

1. Αγγελόπουλος Σ., “Ανάπτυξη Οπτικής Παγίδας Ινών σε Μικρορευστονική Διάταξη”, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2012
2. Εργαστηριακές Ασκήσεις Οπτικής ΣΕΜΦΕ, Ε.Μ.Π.
3. Εργαστηριακές Ασκήσεις Οπτοηλεκτρονικής ΣΕΜΦΕ, Ε.Μ.Π
4. Κοτσιφάκη Δ., “Οπτική Παγίδα και Μικροχειρισμός Δηλεκτρικών Σωματιδίων και Βιολογικών Δειγμάτων Χρησιμοποιώντας Δέσμες Laser”, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, Τομέας Φυσικής, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2012
5. Μακροπούλου Μ. Καθηγήτρια Τομέα Φυσικής, ΣΕΜΦΕ, Ε.Μ.Π., “ Εφαρμογές των Laser στη Βιοϊατρική και το Περιβάλλον: Εφαρμογές των Laser στη Βιοϊατρική Έρευνα”, Αθήνα 2008-2009

Ιστοσελίδες

1. [http://courseware.mech.ntua.gr/ml22034/Presentation_heat_transfer1%20\(1\).pdf](http://courseware.mech.ntua.gr/ml22034/Presentation_heat_transfer1%20(1).pdf), Κακάτσιος Ξ., Καθηγητής, Σαγιά Α., Καθηγήτρια, Μεταφορά

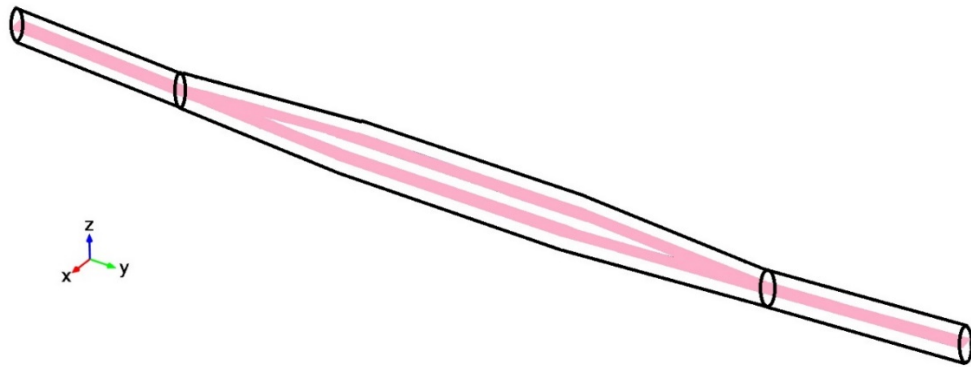
Θερμότητας I, Περιληπτικές Σημειώσεις, “Μετάδοση Θερμότητας
Συστήματα Μονάδων Μέτρησης”, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Ε.Μ.Π.,

2. <https://en.wikipedia.org/wiki/Polydimethylsiloxane#Structure> , Wikipedia
3. <http://users.uoi.gr/csmlab/%d1%e5%f5%f3%f4%ef%ec%e7%f7%e1%ed%e9%ea%de%202012-2013/3.%20%c4%f5%ed%e1%ec%e9%ea%de.pdf>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Στο παράρτημα παρατίθενται ενδεικτικά κάποια από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τα μικρορρευστονικά κανάλια όλων των διαστάσεων. Συγκεκριμένα δίνονται:

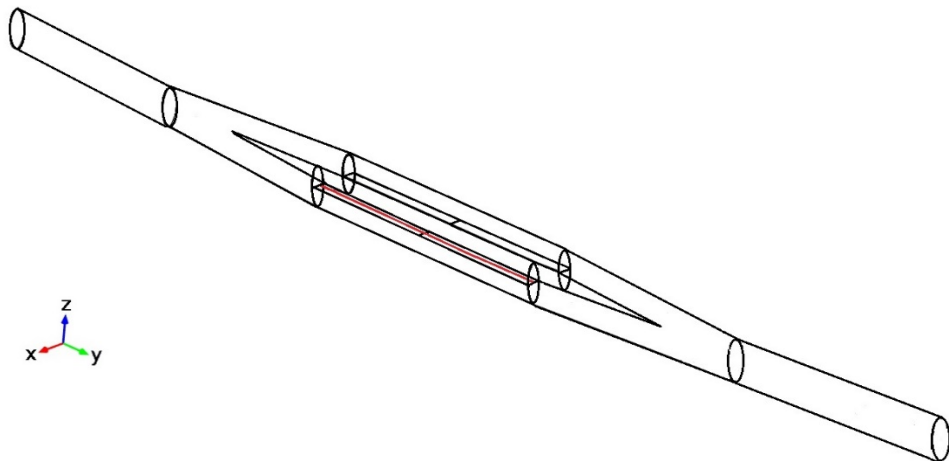
1. Το προφίλ της ταχύτητας του υγρού που διαρρέει το κανάλι συναρτήσει του ύψους του καναλιού.
2. Το πεδίο των ταχυτήτων του υγρού στο επίπεδο xy το οποίο διέρχεται από το μέσο του καναλιού.



Σχήμα Π.1:

Το τμήμα του επιπέδου (ροζ χρώμα) xy στο οποίο απεικονίστηκε το πεδίο ταχυτήτων

3. Η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της ταχύτητας [$\mu\text{m/s}$] του υγρού κατά μήκος του ευθυγράμμου τμήματος (του επιπέδου xy) που διέρχεται από το μέσο του καναλιού.



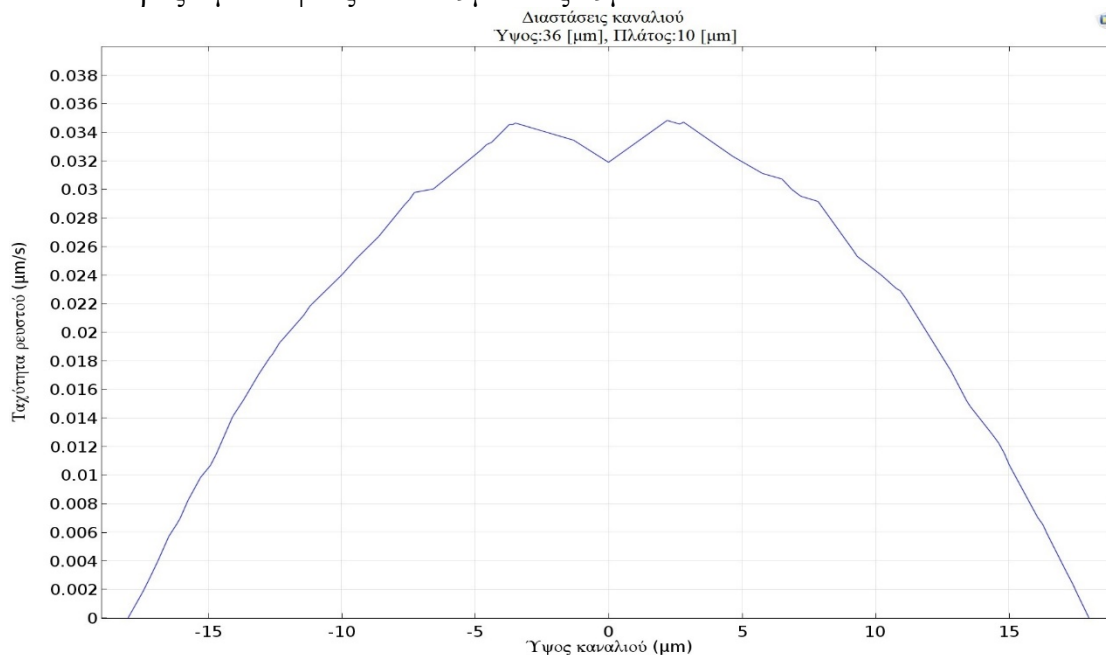
Σχήμα Π.2:

Το ευθύγραμμο τμήμα κατά μήκος του οποίου υπολογίστηκαν οι u_{\min} και u_{\max}

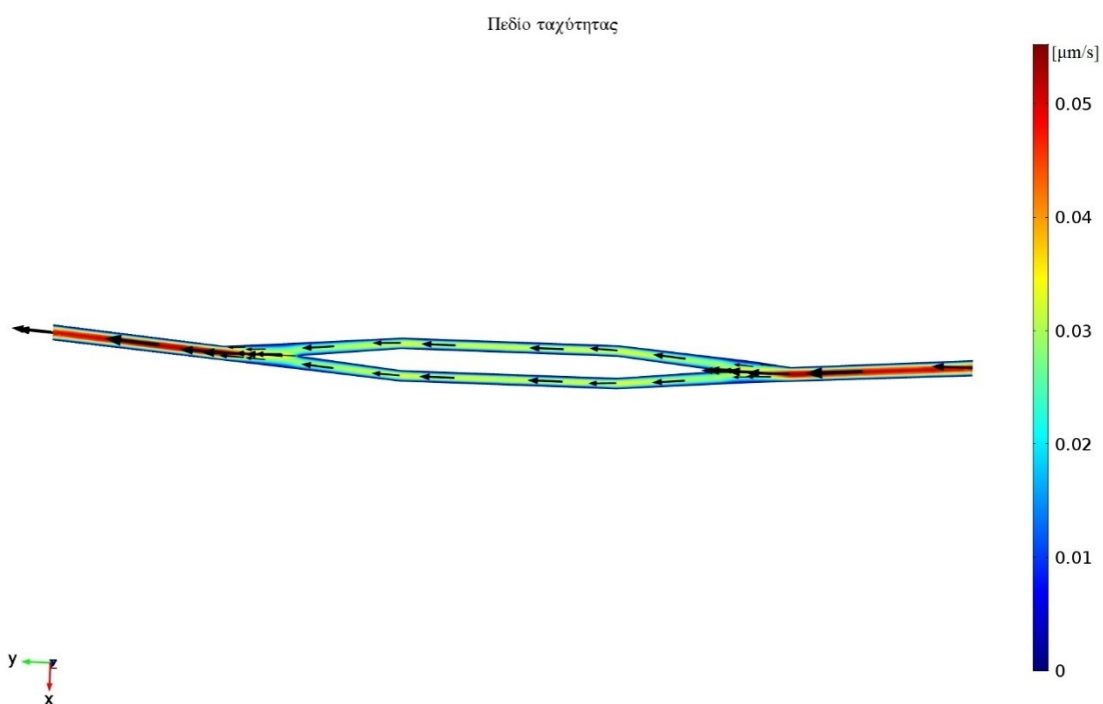
Π.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΟ ΠΛΑΤΟΣ 10 [μm]

10-36 [μm]

- Εύρος τιμών ύψους: από $-19\mu\text{m}$ έως $19\mu\text{m}$



- Συντεταγμένες επιπέδου [μm]: $(x, y, z) = (5, 0, 0)$



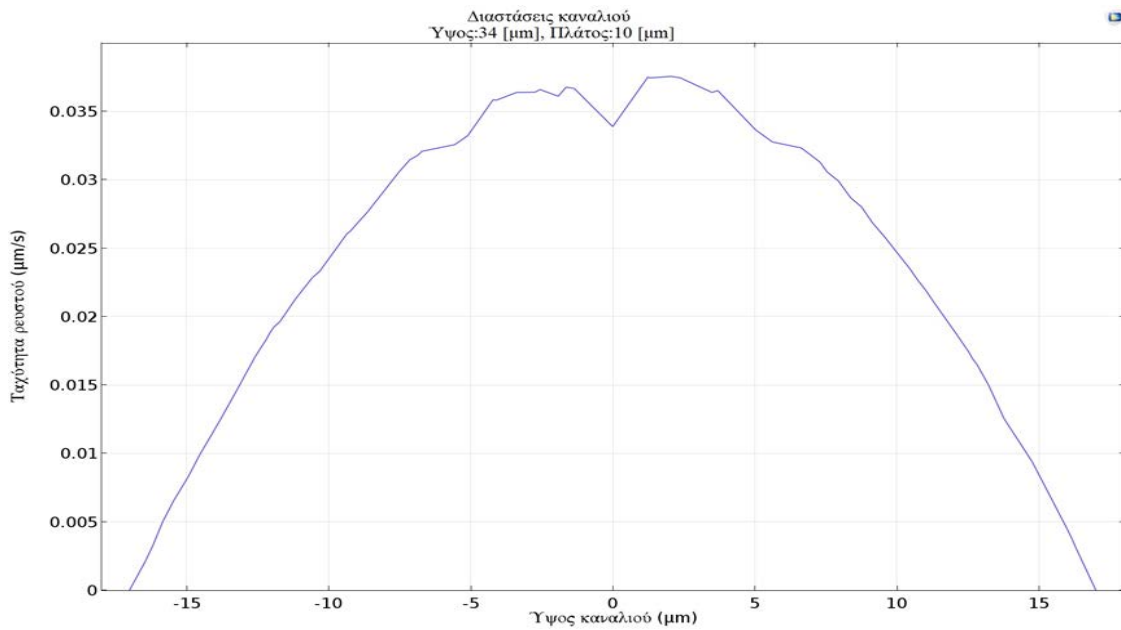
- Συντεταγμένες ευθυγράμμου τμήματος [μm]: $(x_1, y_1, z_1) = (35, -100, 0)$ και $(x_2, y_2, z_2) = (35, 100, 0)$

Για $(x, y, z) = (35, 5.16, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\min} = 0.030$ [$\mu\text{m/s}$]

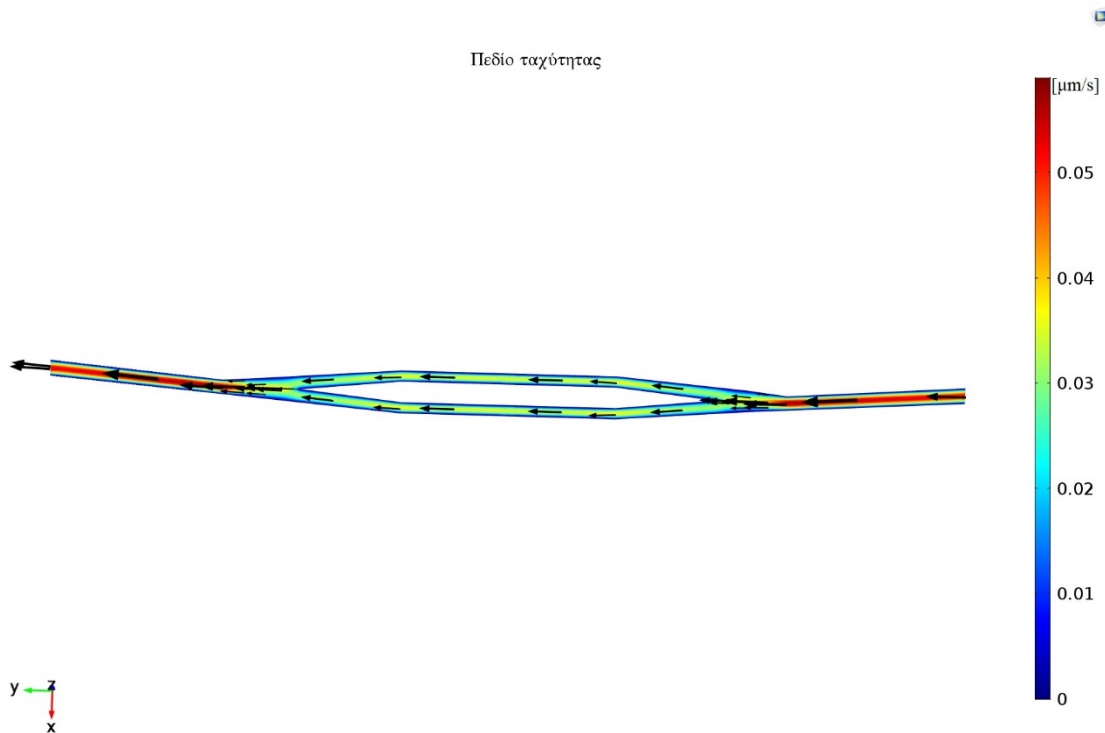
Για $(x, y, z) = (35, -89.75, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\max} = 0.037$ [$\mu\text{m/s}$]

10-34 [μm]

- Εύρος τιμών ύψους: από $-18\mu\text{m}$ έως $18\mu\text{m}$



- Συντεταγμένες επιπέδου [μm]: $(x, y, z) = (5, 0, 0)$



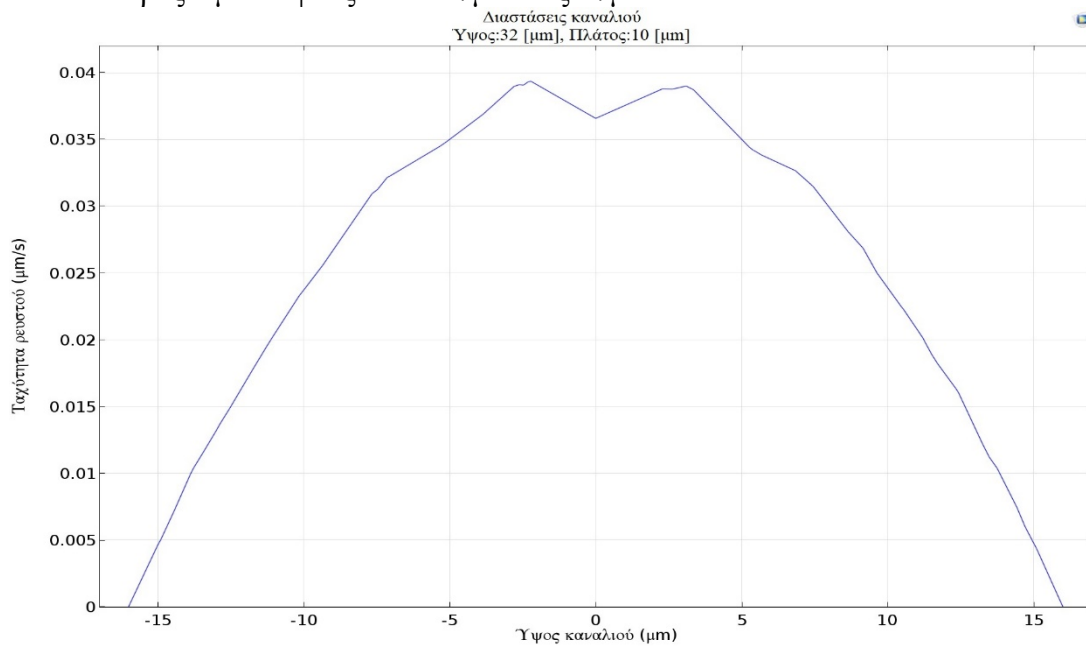
- Συντεταγμένες ευθυγράμμου τμήματος [μm]: $(x_1, y_1, z_1) = (35, -100, 0)$ και $(x_2, y_2, z_2) = (35, 100, 0)$

Για $(x, y, z) = (35, 4.97, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\min} = 0.033$ [$\mu\text{m/s}$]

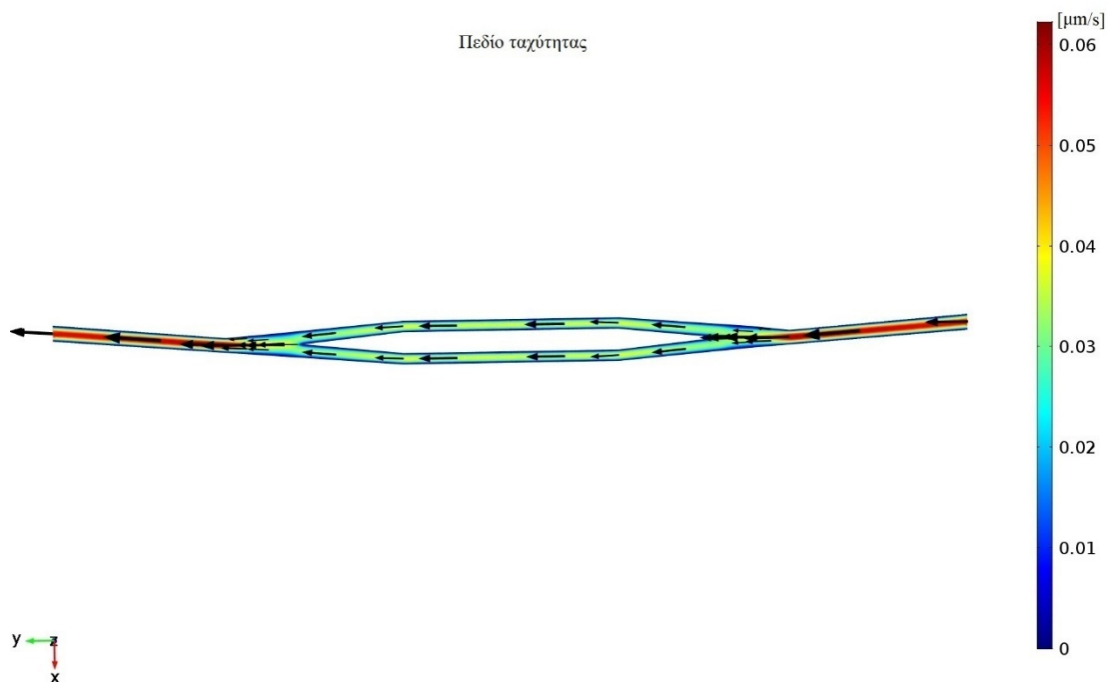
Για $(x, y, z) = (35, -88.9, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\max} = 0.038$ [$\mu\text{m/s}$]

10-32 [μm]

- Εύρος τιμών ύψους: από $-17\mu\text{m}$ έως $17\mu\text{m}$



- Συντεταγμένες επιπέδου [μm]: $(x, y, z) = (5, 0, 0)$



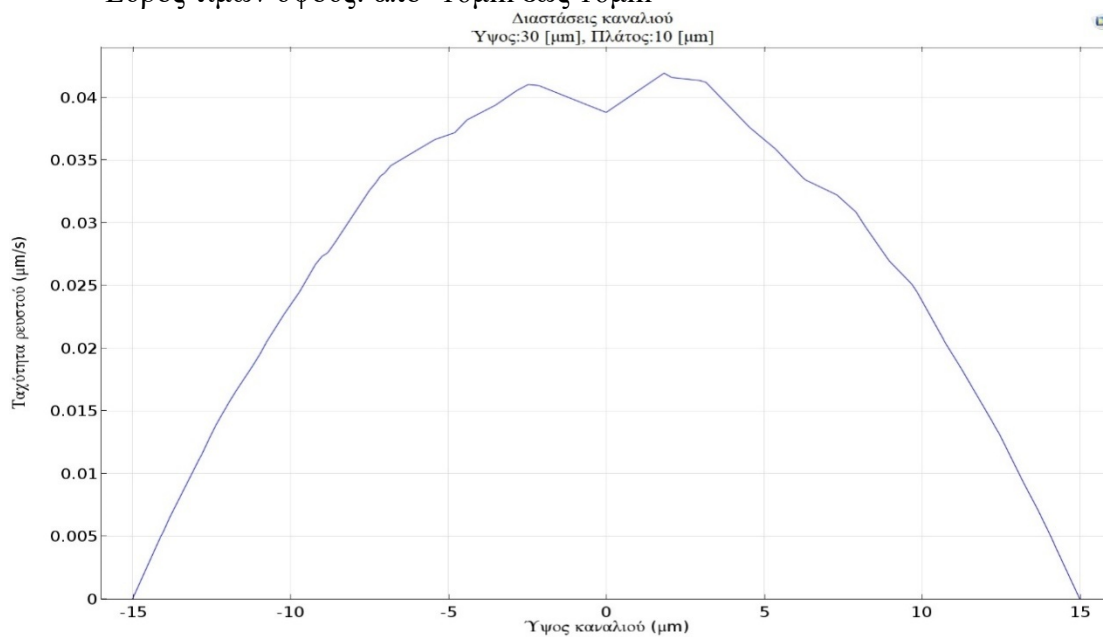
- Συντεταγμένες ευθυγράμμου τμήματος [μm]: $(x_1, y_1, z_1) = (35, -100, 0)$ και $(x_2, y_2, z_2) = (35, 100, 0)$

Για $(x, y, z) = (35, 12.40, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\min} = 0.035$ [$\mu\text{m/s}$]

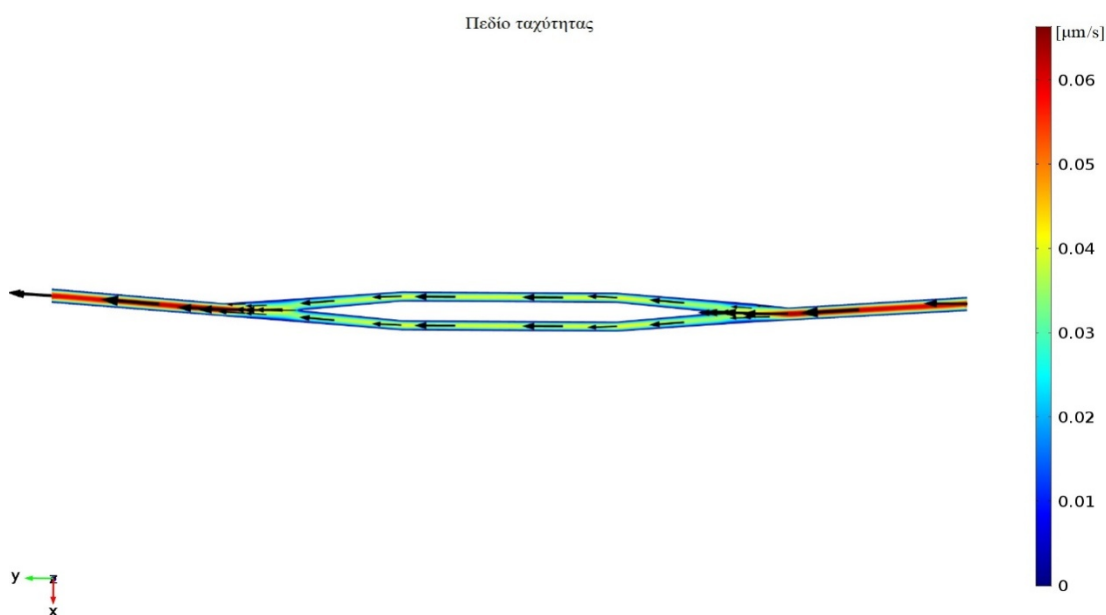
Για $(x, y, z) = (5, -8.67, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\max} = 0.041$ [$\mu\text{m/s}$]

10-30 [μm]

- Εύρος τιμών ύψους: από $-16\mu\text{m}$ έως $16\mu\text{m}$



- Συντεταγμένες επιπέδου [μm]: $(x, y, z) = (5, 0, 0)$



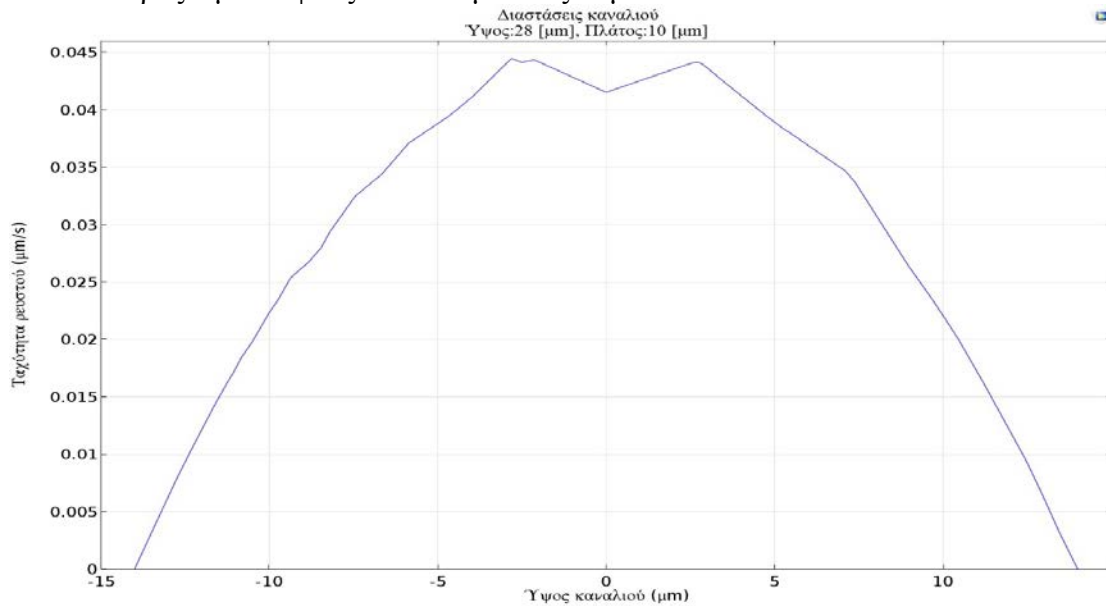
- Συντεταγμένες ευθυγράμμου τμήματος [μm]: $(x_1, y_1, z_1) = (35, -100, 0)$ και $(x_2, y_2, z_2) = (35, 100, 0)$

Για $(x, y, z) = (35, -5.10, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\min} = 0.037$ [$\mu\text{m/s}$]

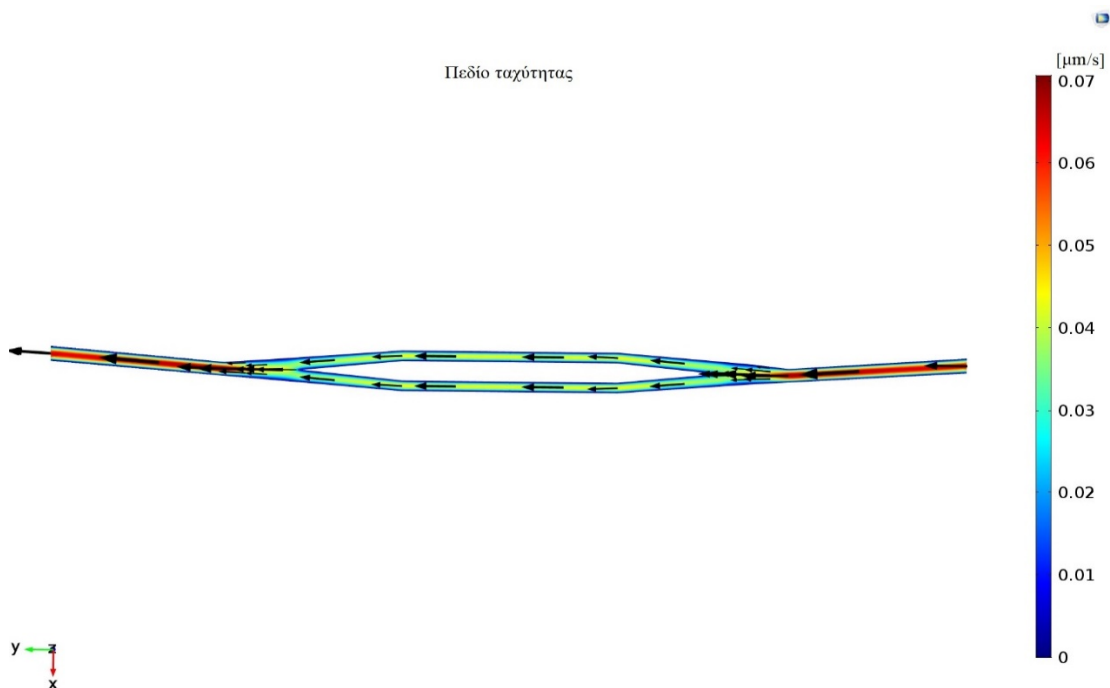
Για $(x, y, z) = (35, 67.10, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\max} = 0.044$ [$\mu\text{m/s}$]

10-28 [μm]

- Εύρος τιμών ύψους: από $-15\mu\text{m}$ έως $15\mu\text{m}$



- Συντεταγμένες επιπέδου [μm]: $(x, y, z) = (5, 0, 0)$



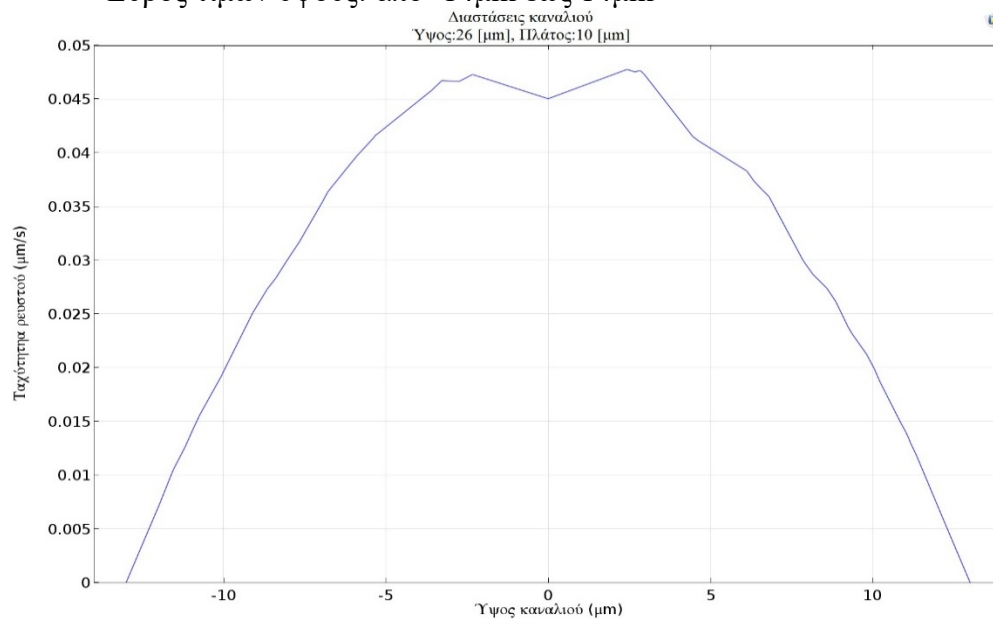
- Συντεταγμένες ευθυγράμμου τμήματος [μm]: $(x_1, y_1, z_1) = (35, -100, 0)$ και $(x_2, y_2, z_2) = (35, 100, 0)$

Για $(x, y, z) = (35, 0, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\min} = 0.041$ [$\mu\text{m/s}$]

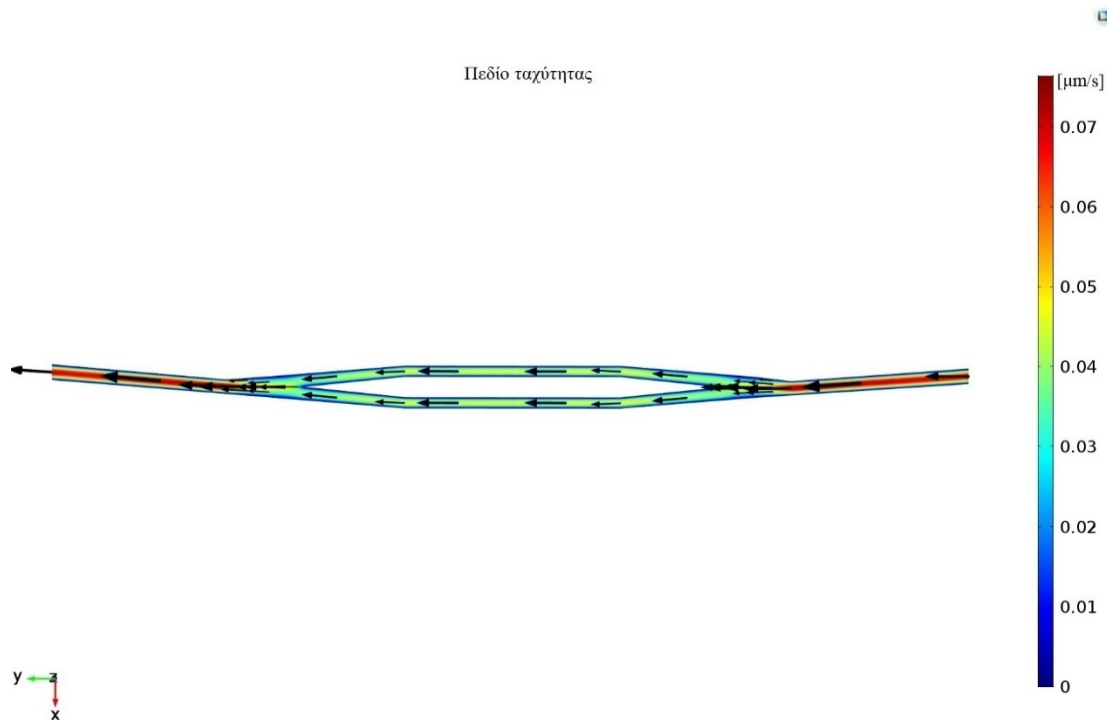
Για $(x, y, z) = (35, -14.60, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\max} = 0.047$ [$\mu\text{m/s}$]

10-26 [μm]

- Εύρος τιμών ύψους: από $-14\mu\text{m}$ έως $14\mu\text{m}$



- Συντεταγμένες επιπέδου [μm]: $(x, y, z) = (5, 0, 0)$



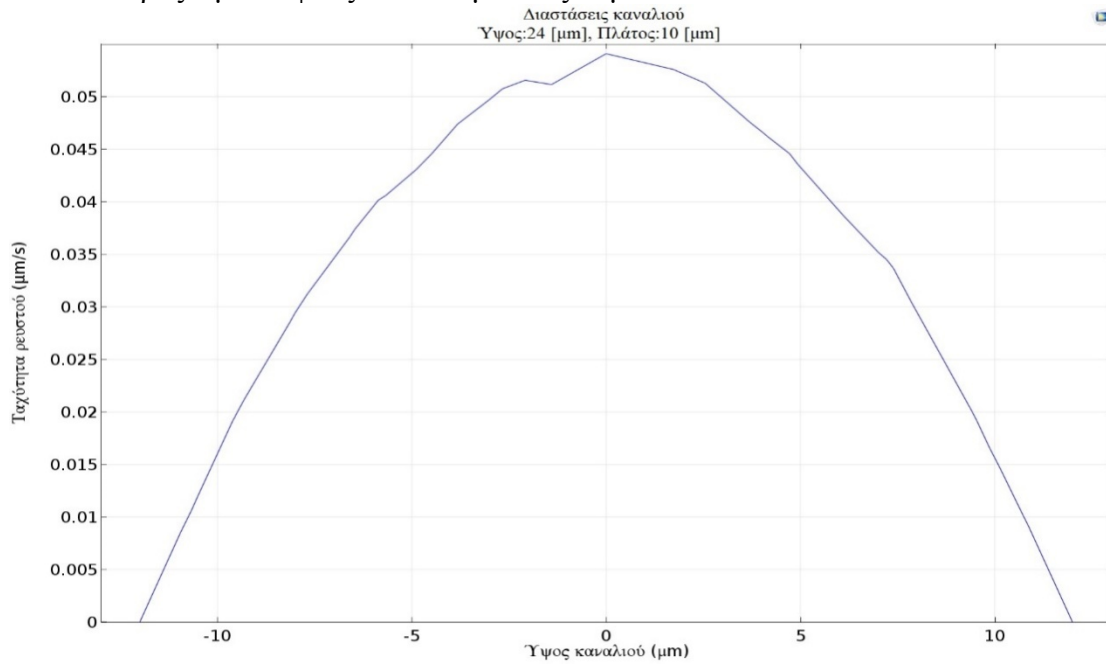
- Συντεταγμένες ευθυγράμμου τμήματος [μm]: $(x_1, y_1, z_1) = (35, -100, 0)$ και $(x_2, y_2, z_2) = (35, 100, 0)$

Για $(x, y, z) = (35, 0, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\min} = 0.045$ [$\mu\text{m/s}$]

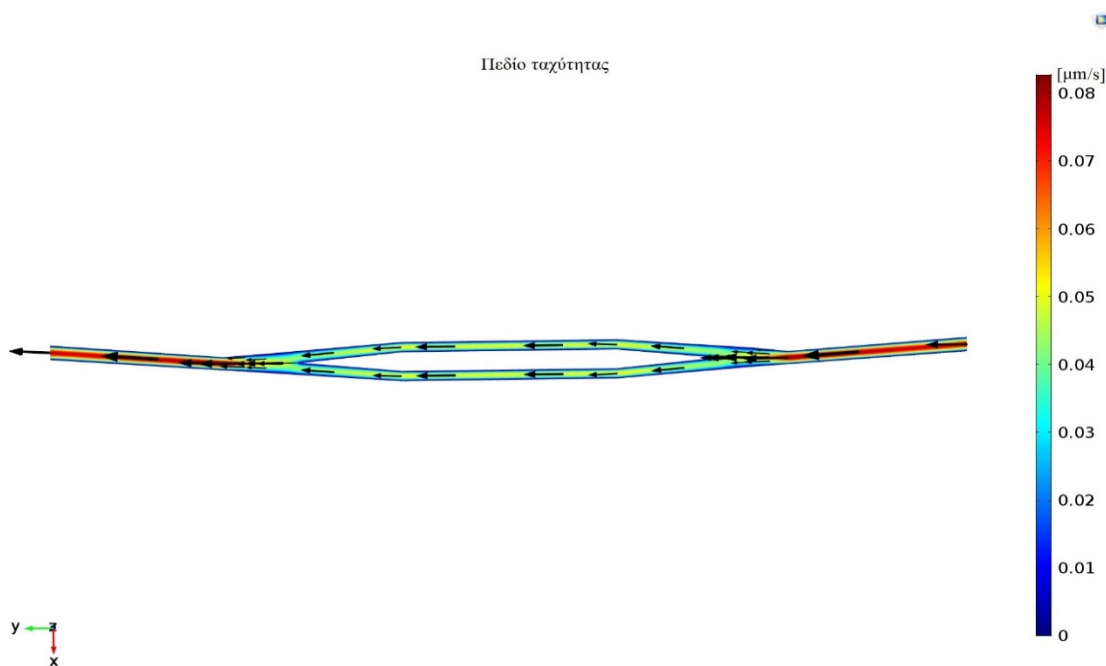
Για $(x, y, z) = (35, 19.15, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\max} = 0.05$ [$\mu\text{m/s}$]

10-24 [μm]

- Εύρος τιμών ύψους: από $-13\mu\text{m}$ έως $13\mu\text{m}$



- Συντεταγμένες επιπέδου [μm]: $(x, y, z) = (5, 0, 0)$



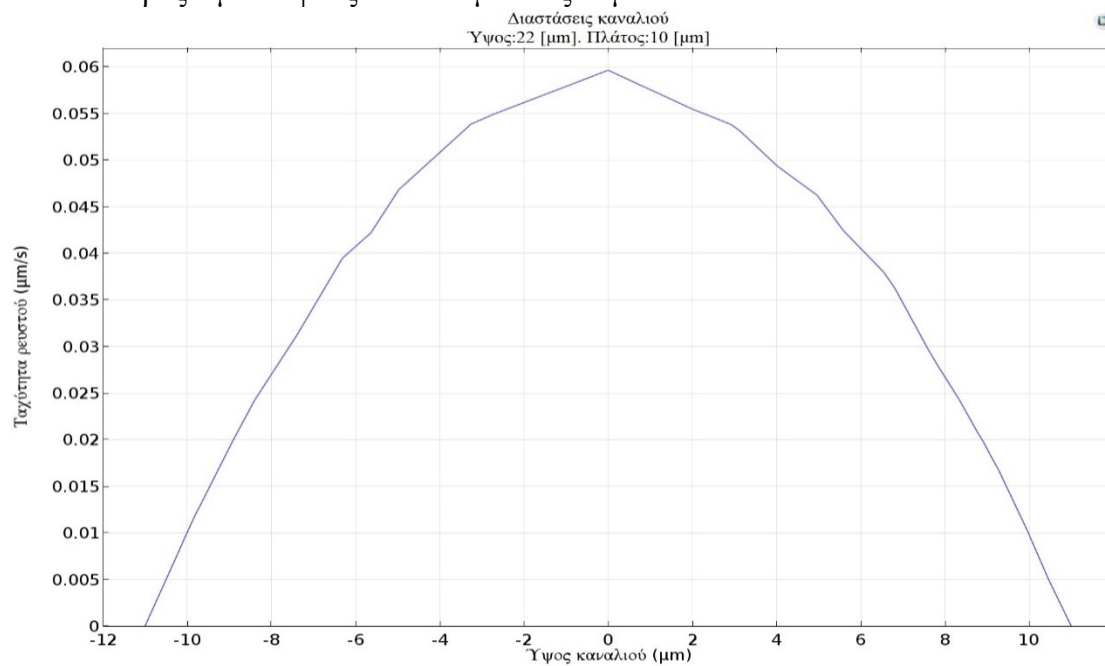
- Συντεταγμένες ευθυγράμμου τμήματος [μm]: $(x_1, y_1, z_1) = (35, -100, 0)$ και $(x_2, y_2, z_2) = (35, 100, 0)$

Για $(x, y, z) = (35, -91.59, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\min} = 0.050$ [$\mu\text{m/s}$]

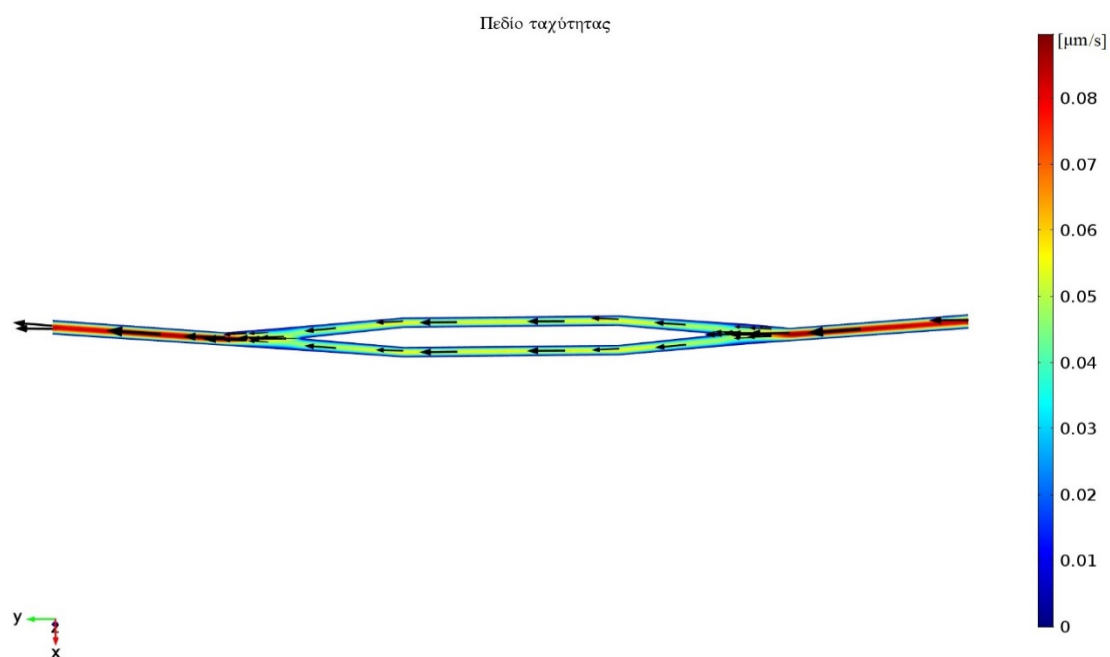
Για $(x, y, z) = (35, -83.55, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\max} = 0.054$ [$\mu\text{m/s}$]

10-22 [μm]

- Εύρος τιμών ύψους: από $-12\mu\text{m}$ έως $12\mu\text{m}$



- Συντεταγμένες επιπέδου [μm]: $(x, y, z) = (5, 0, 0)$



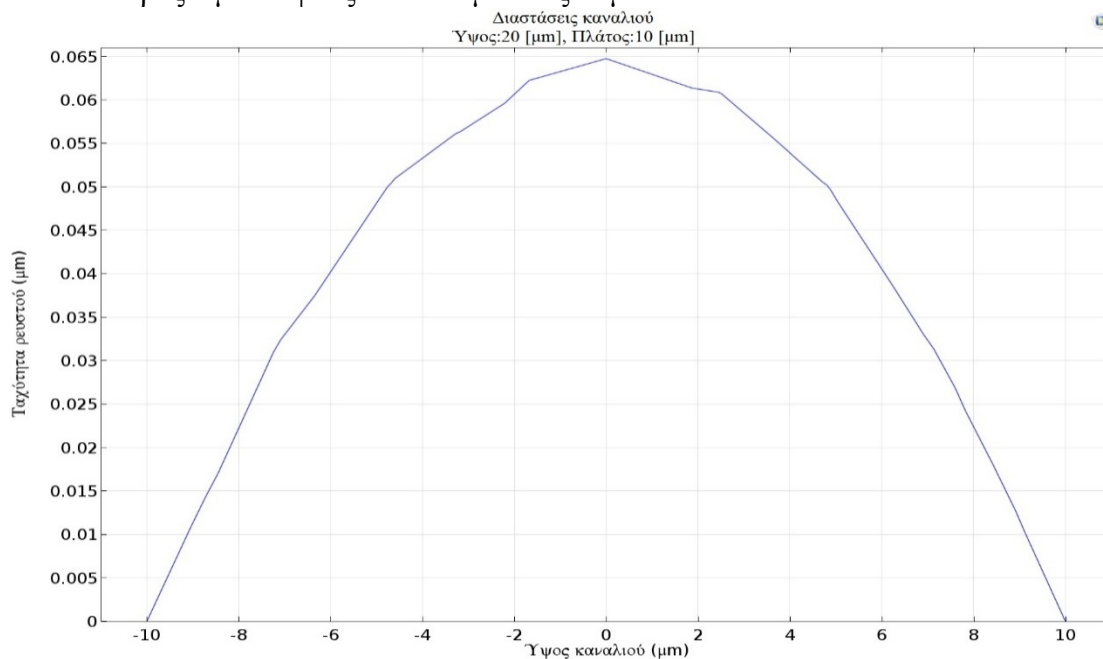
- Συντεταγμένες ευθυγράμμου τμήματος [μm]: $(x_1, y_1, z_1) = (35, -100, 0)$ και $(x_2, y_2, z_2) = (35, 100, 0)$

Για $(x, y, z) = (35, 90.12, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\min} = 0.055$ [$\mu\text{m/s}$]

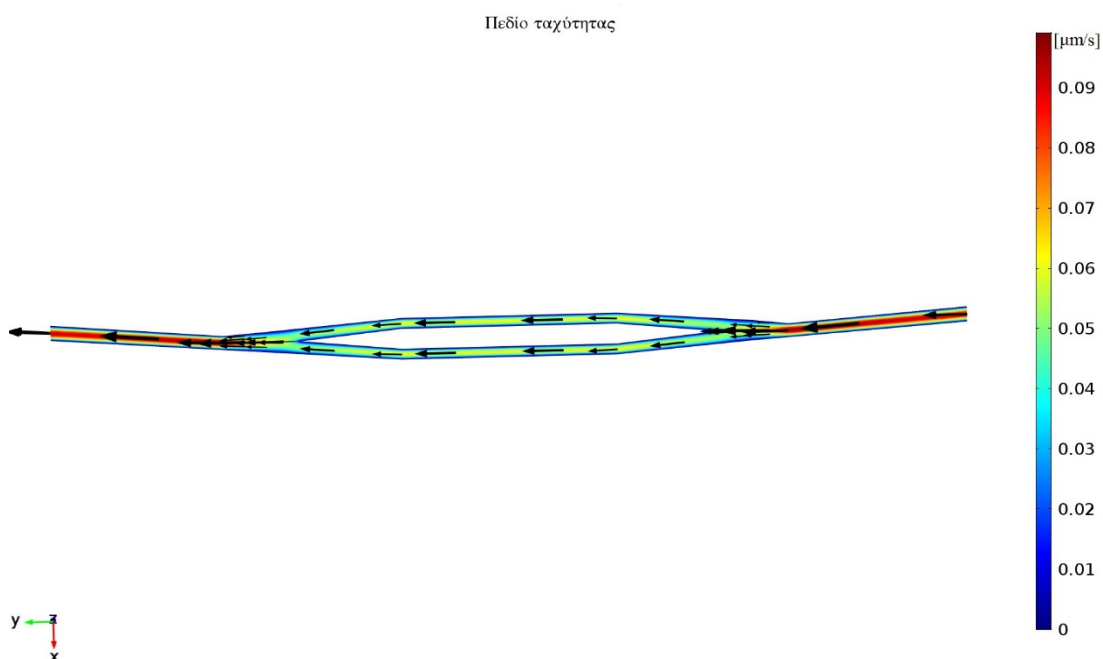
Για $(x, y, z) = (35, 6.17, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\max} = 0.060$ [$\mu\text{m/s}$]

10-20 [μm]

- Εύρος τιμών ύψους: από $-11\mu\text{m}$ έως $11\mu\text{m}$



- Συντεταγμένες επιπέδου [μm]: $(x, y, z) = (5, 0, 0)$



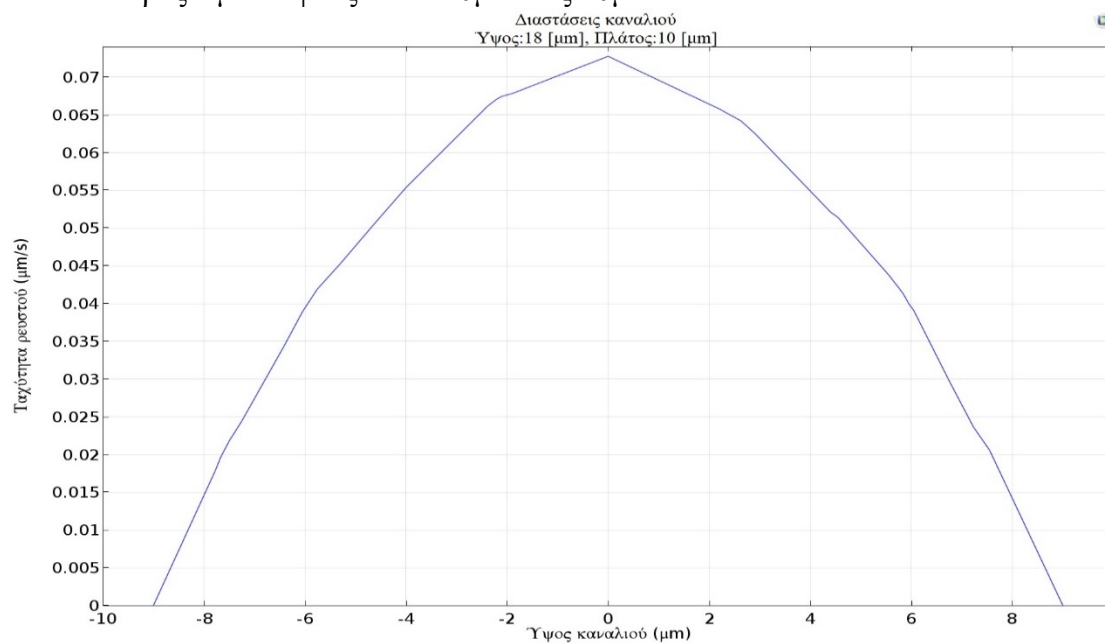
- Συντεταγμένες ευθυγράμμου τμήματος [μm]: $(x_1, y_1, z_1) = (35, -100, 0)$ και $(x_2, y_2, z_2) = (35, 100, 0)$

Για $(x, y, z) = (35, 1.83, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\min} = 0.060$ [$\mu\text{m/s}$]

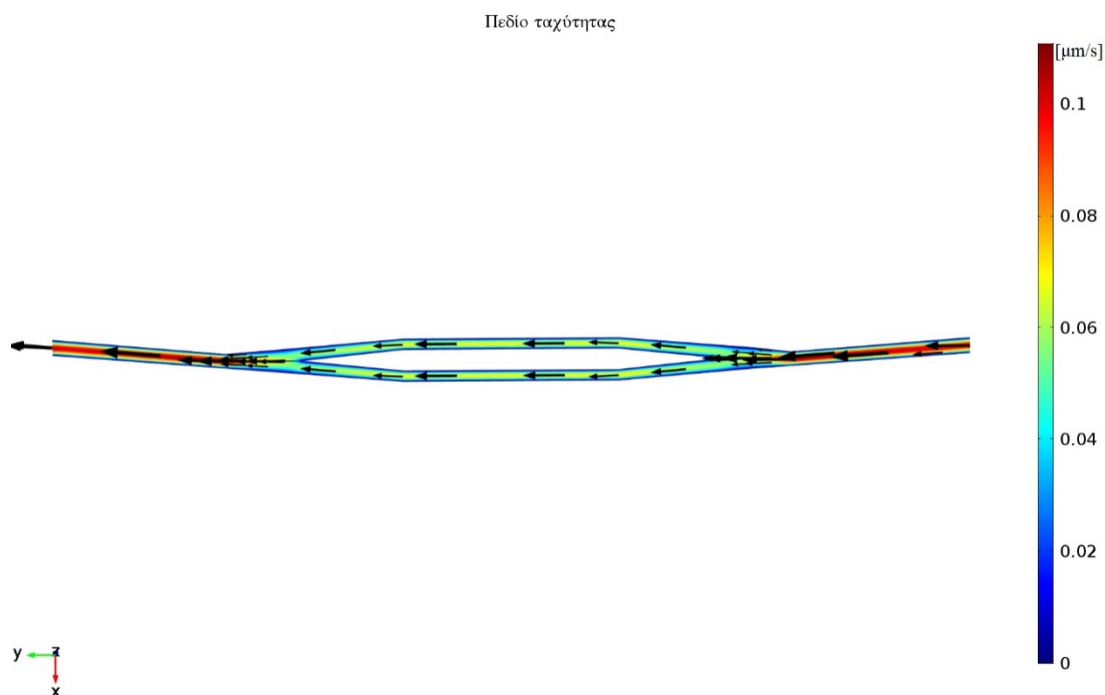
Για $(x, y, z) = (35, 8.82, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\max} = 0.066$ [$\mu\text{m/s}$]

10-18 [μm]

- Εύρος τιμών ύψους: από $-10\mu\text{m}$ έως $10\mu\text{m}$



- Συντεταγμένες επιπέδου [μm]: $(x, y, z) = (5, 0, 0)$



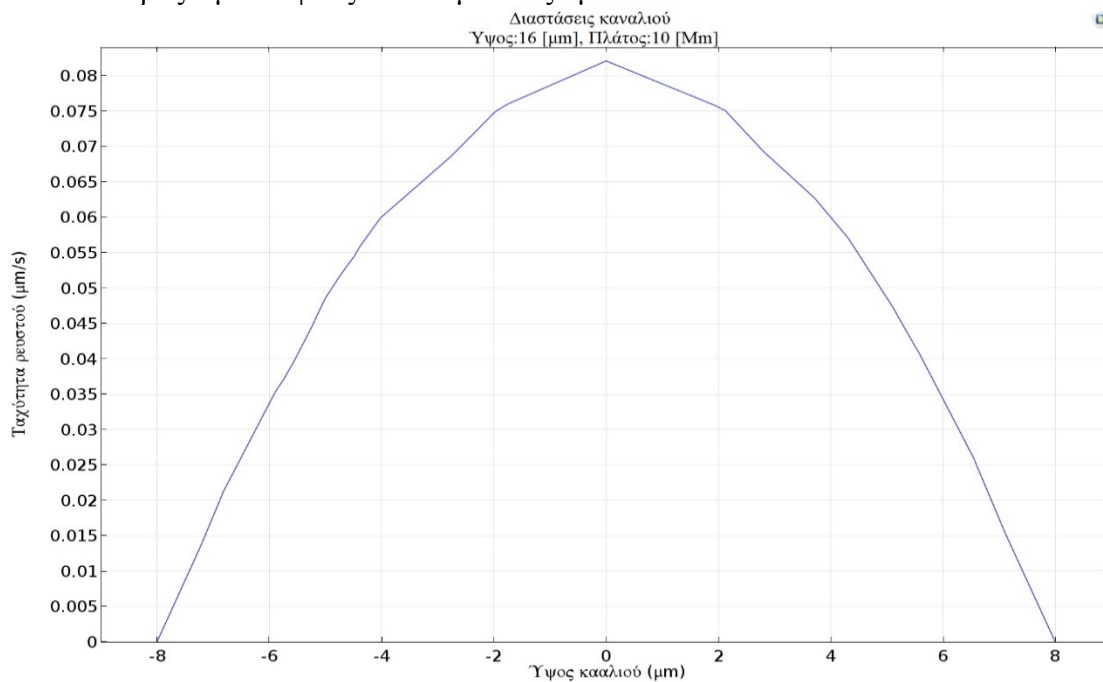
- Συντεταγμένες ευθυγράμμου τμήματος [μm]: $(x_1, y_1, z_1) = (35, -100, 0)$ και $(x_2, y_2, z_2) = (35, 100, 0)$

Για $(x, y, z) = (35, -1.79, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\min} = 0.068$ [$\mu\text{m/s}$]

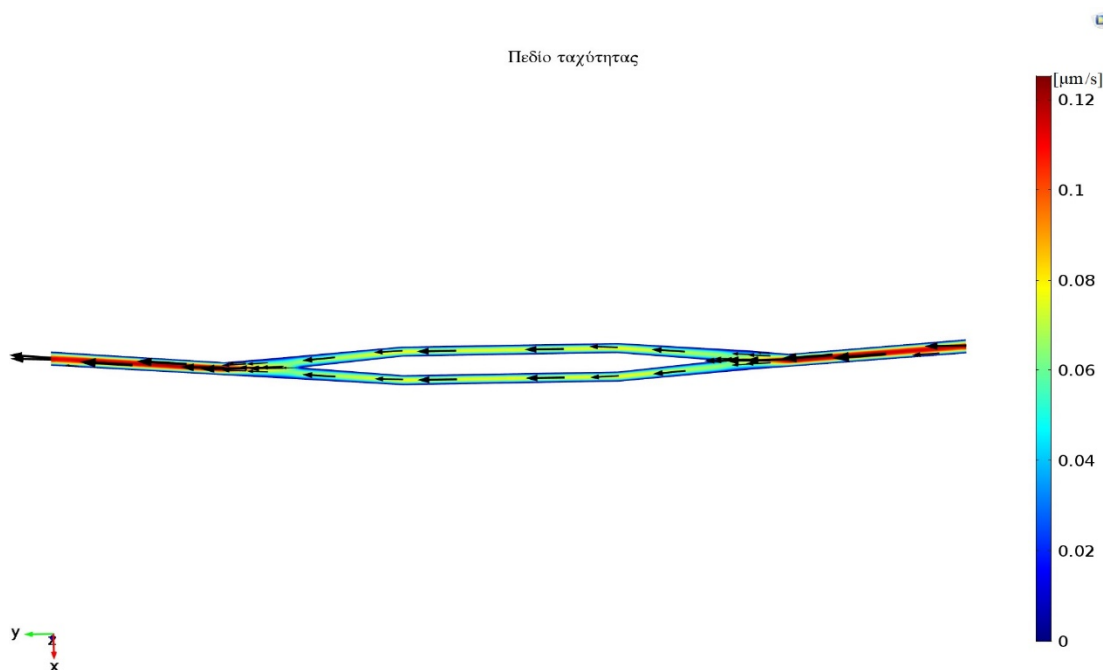
Για $(x, y, z) = (35, 20.13, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\max} = 0.073$ [$\mu\text{m/s}$]

10-16 [μm]

- Εύρος τιμών ύψους: από $-9\mu\text{m}$ έως $9\mu\text{m}$



- Συντεταγμένες επιπέδου [μm]: $(x, y, z) = (5, 0, 0)$



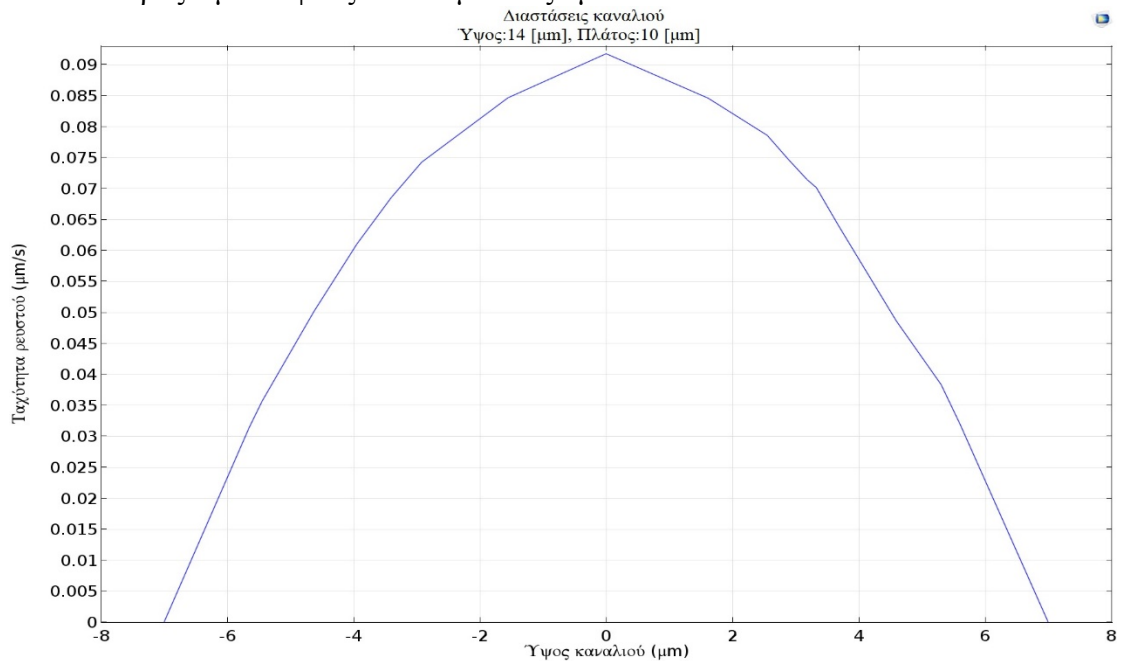
- Συντεταγμένες ευθυγράμμου τμήματος [μm]: $(x_1, y_1, z_1) = (35, -100, 0)$ και $(x_2, y_2, z_2) = (35, 100, 0)$

Για $(x, y, z) = (35, 1.98, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\min} = 0.076$ [$\mu\text{m/s}$]

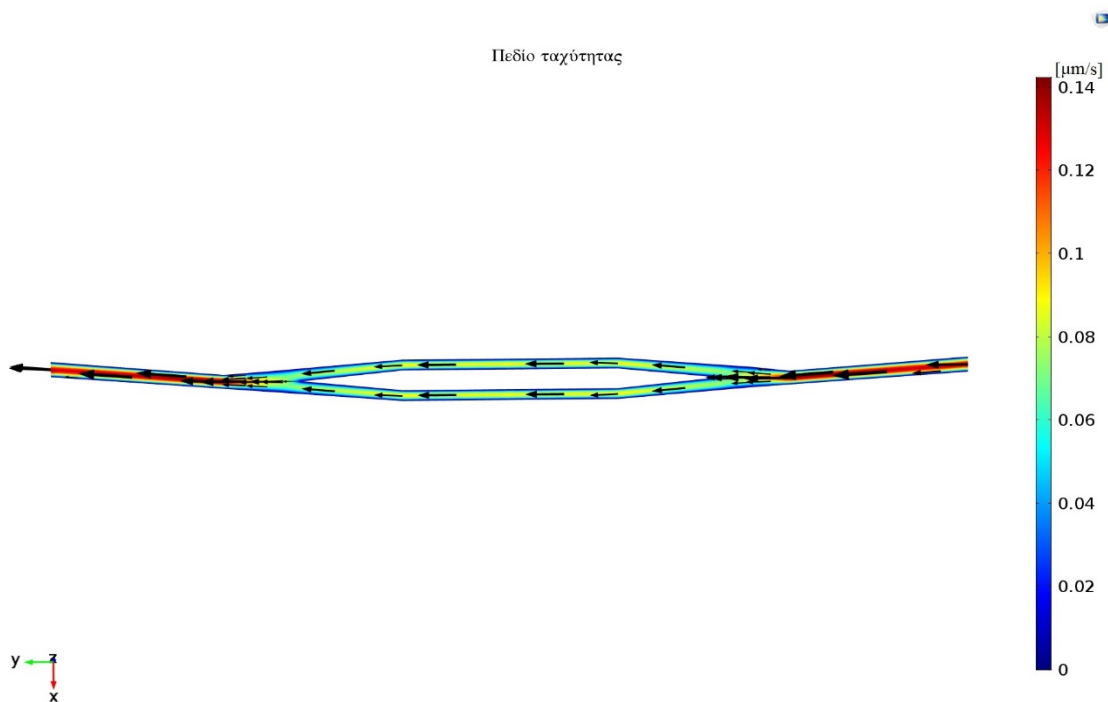
Για $(x, y, z) = (35, 72.62, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\max} = 0.082$ [$\mu\text{m/s}$]

10-14 [μm]

- Εύρος τιμών ύψους: από $-8\mu\text{m}$ έως $8\mu\text{m}$



- Συντεταγμένες επιπέδου [μm]: $(x, y, z) = (5, 0, 0)$



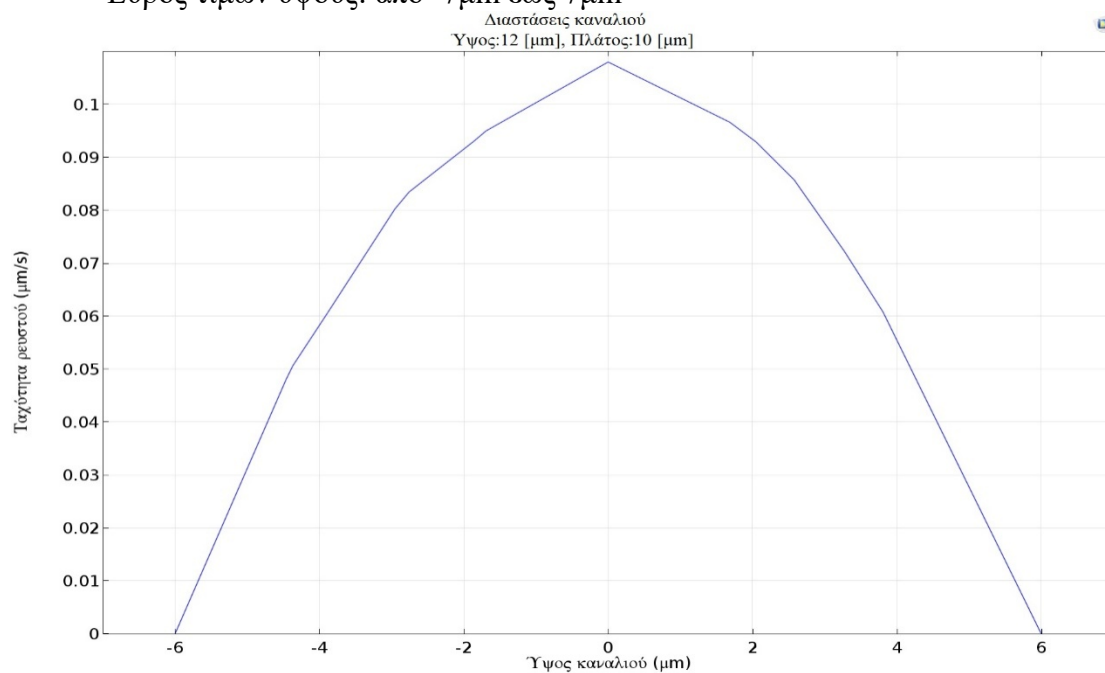
- Συντεταγμένες ευθυγράμμου τμήματος [μm]: $(x_1, y_1, z_1) = (35, -100, 0)$ και $(x_2, y_2, z_2) = (35, 100, 0)$

Για $(x, y, z) = (35, 2.13, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\min} = 0.086$ [$\mu\text{m/s}$]

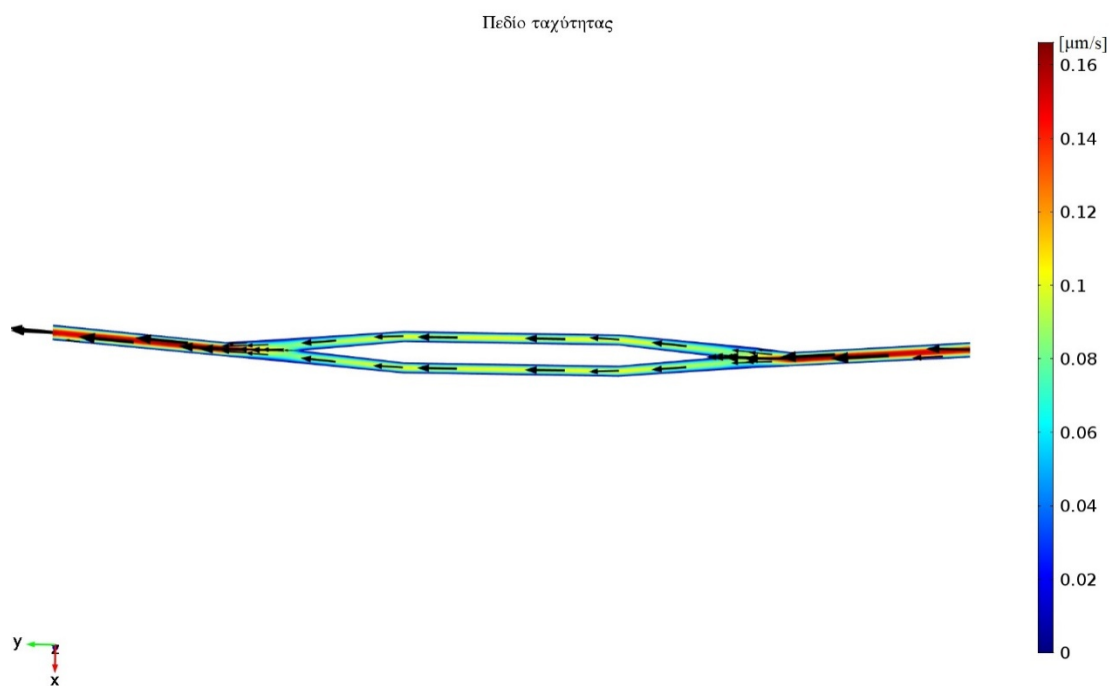
Για $(x, y, z) = (35, 83.25, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\max} = 0.094$ [$\mu\text{m/s}$]

10-12 [μm]

- Εύρος τιμών ύψους: από $-7\mu\text{m}$ έως $7\mu\text{m}$



- Συντεταγμένες επιπέδου [μm]: $(x, y, z) = (5, 0, 0)$



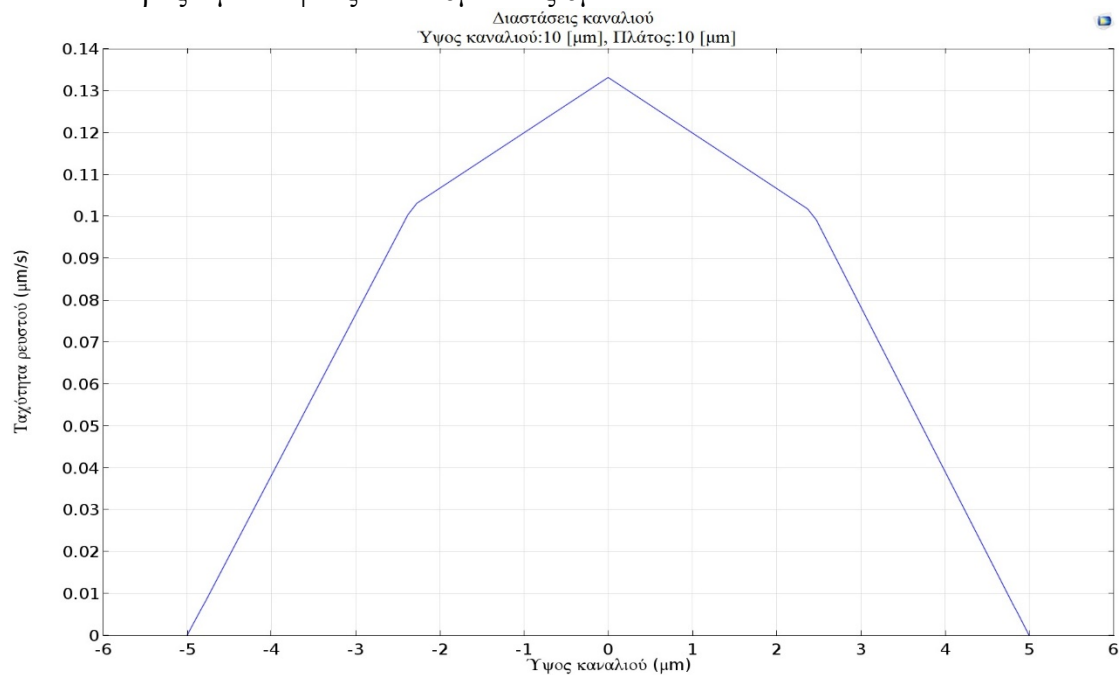
- Συντεταγμένες ευθυγράμμου τμήματος [μm]: $(x_1, y_1, z_1) = (35, -100, 0)$ και $(x_2, y_2, z_2) = (35, 100, 0)$

Για $(x, y, z) = (35, 2.10, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\min} = 0.101$ [$\mu\text{m/s}$]

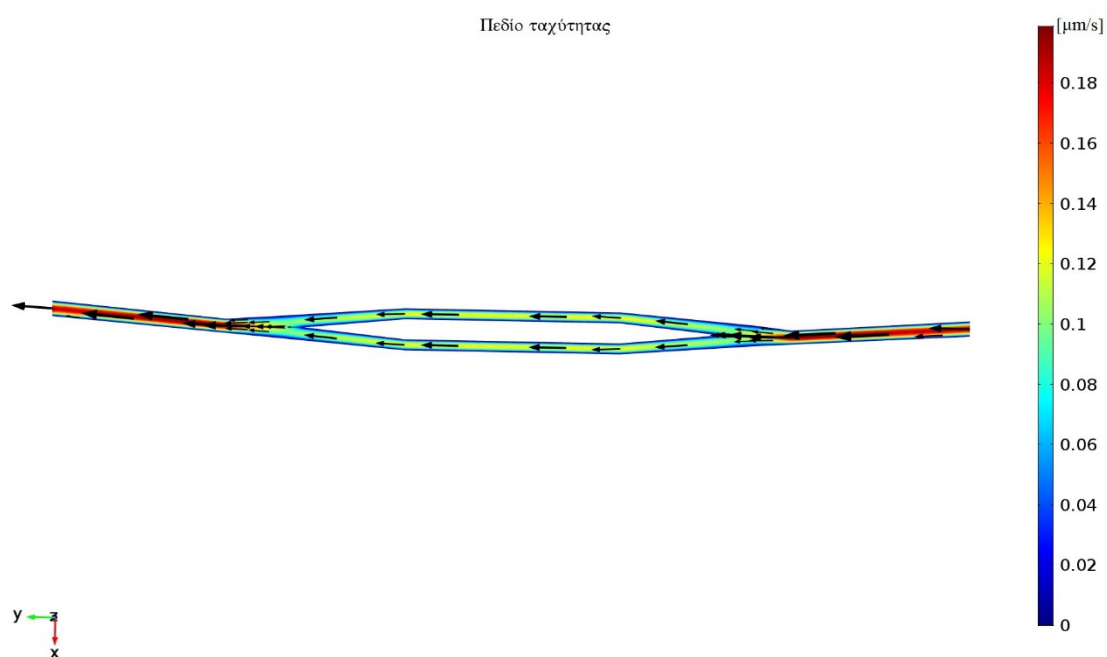
Για $(x, y, z) = (35, -92.84, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\max} = 0.110$ [$\mu\text{m/s}$]

10-10 [μm]

- Εύρος τιμών ύψους: από $-6\mu\text{m}$ έως $6\mu\text{m}$



- Συντεταγμένες επιπέδου [μm]: $(x, y, z) = (5, 0, 0)$



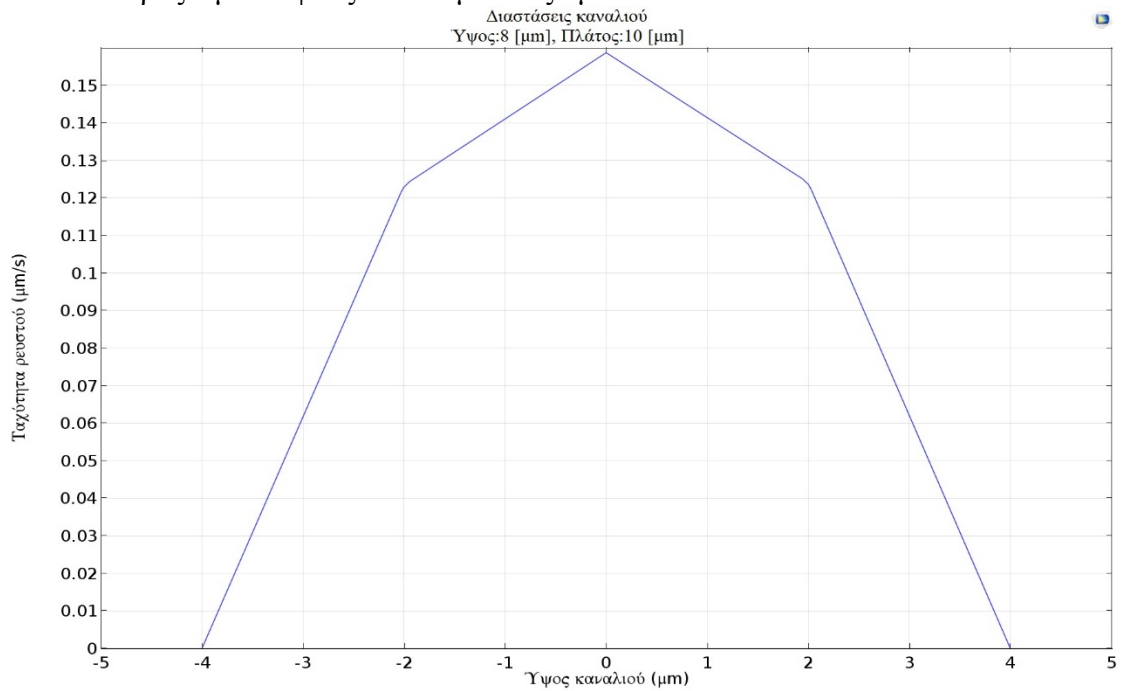
- Συντεταγμένες ευθυγράμμου τμήματος [μm]: $(x_1, y_1, z_1) = (35, -100, 0)$ και $(x_2, y_2, z_2) = (35, 100, 0)$

Για $(x, y, z) = (35, 2.10, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\min} = 0.101$ [$\mu\text{m/s}$]

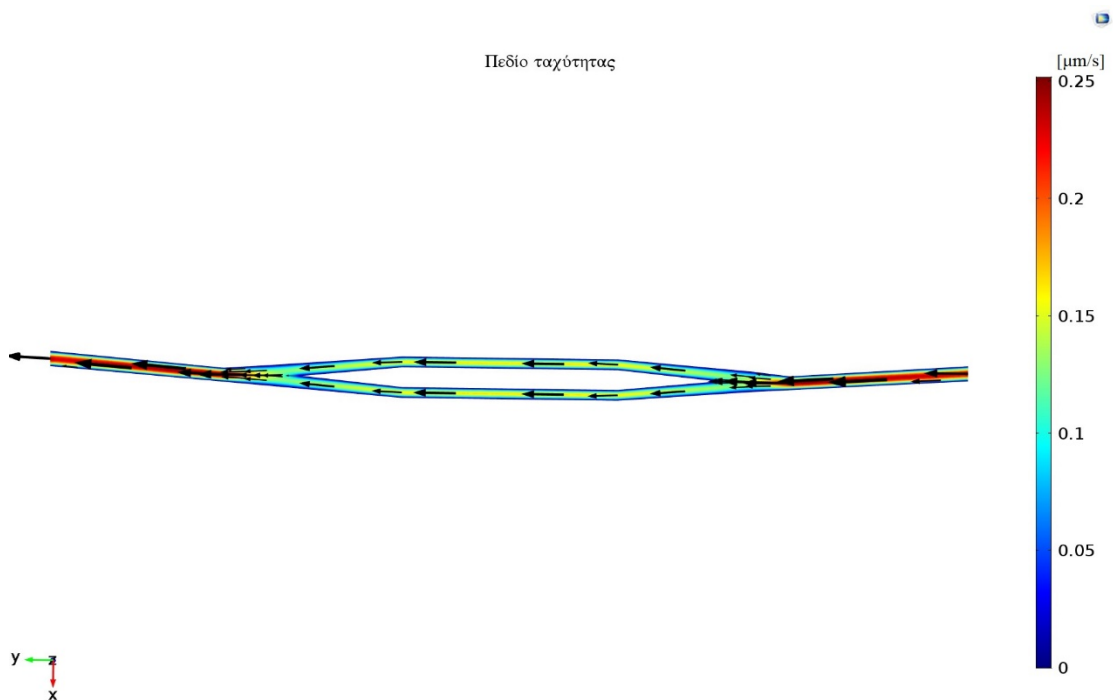
Για $(x, y, z) = (35, -92.84, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\max} = 0.110$ [$\mu\text{m/s}$]

10-8 [μm]

- Εύρος τιμών ύψους: από $-5\mu\text{m}$ έως $5\mu\text{m}$



- Συντεταγμένες επιπέδου [μm]: $(x, y, z) = (5, 0, 0)$



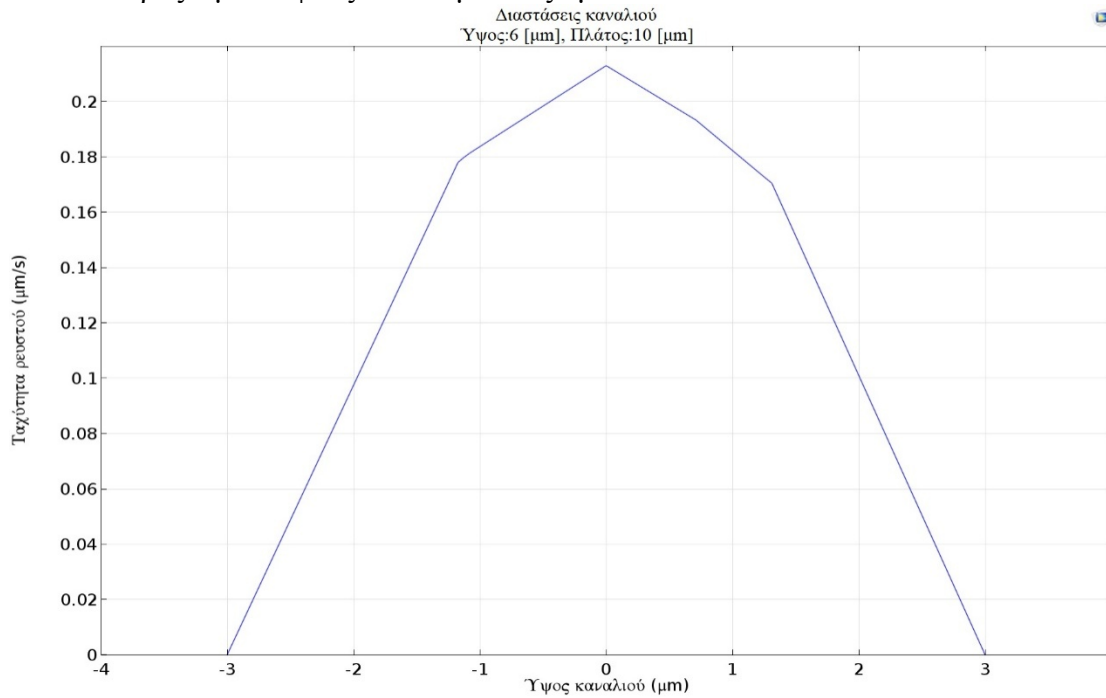
- Συντεταγμένες ευθυγράμμου τμήματος [μm]: $(x_1, y_1, z_1) = (35, -100, 0)$ και $(x_2, y_2, z_2) = (35, 100, 0)$

Για $(x, y, z) = (35, -96.22, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\min} = 0.158$ [$\mu\text{m/s}$]

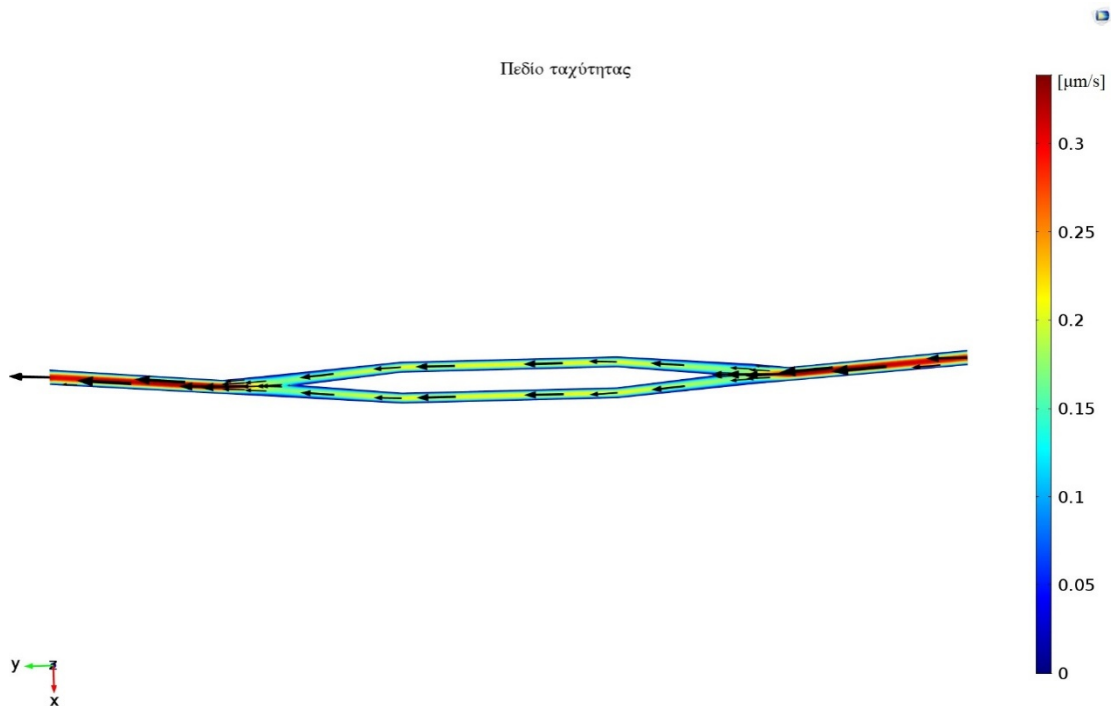
Για $(x, y, z) = (35, -12.34, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\max} = 0.169$ [$\mu\text{m/s}$]

10-6 [μm]

- Εύρος τιμών ύψους: από $-4\mu\text{m}$ έως $4\mu\text{m}$



- Συντεταγμένες επιπέδου [μm]: $(x, y, z) = (5, 0, 0)$



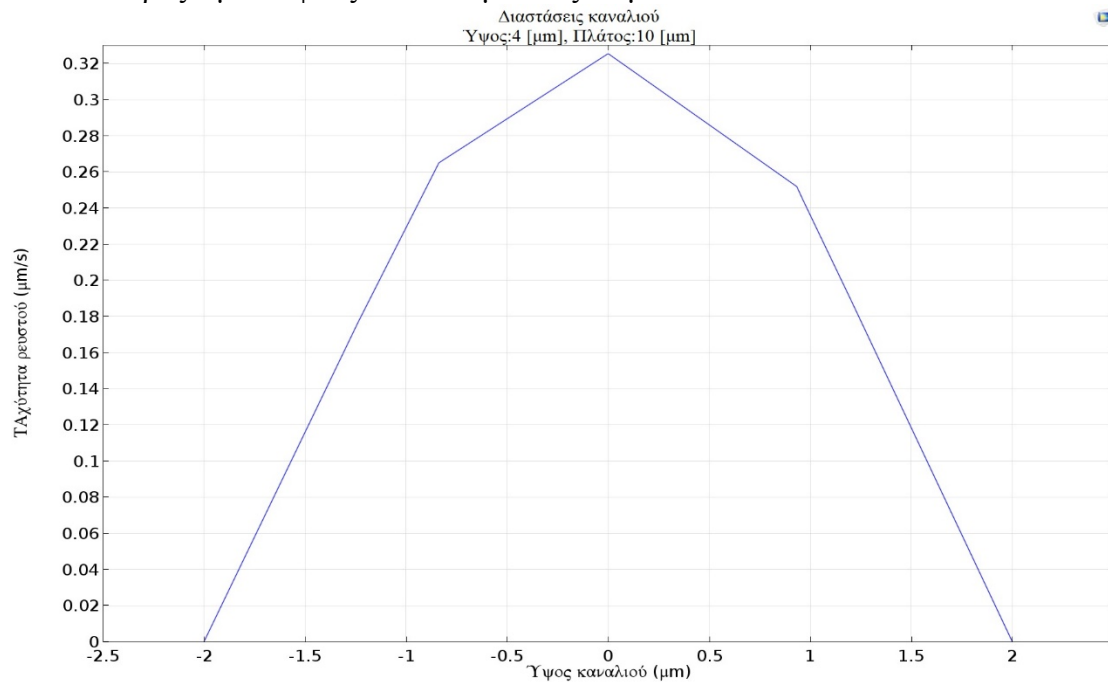
- Συντεταγμένες ευθυγράμμου τμήματος [μm]: $(x_1, y_1, z_1) = (35, -100, 0)$ και $(x_2, y_2, z_2) = (35, 100, 0)$

Για $(x, y, z) = (35, -32.62, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\min} = 0.212$ [$\mu\text{m/s}$]

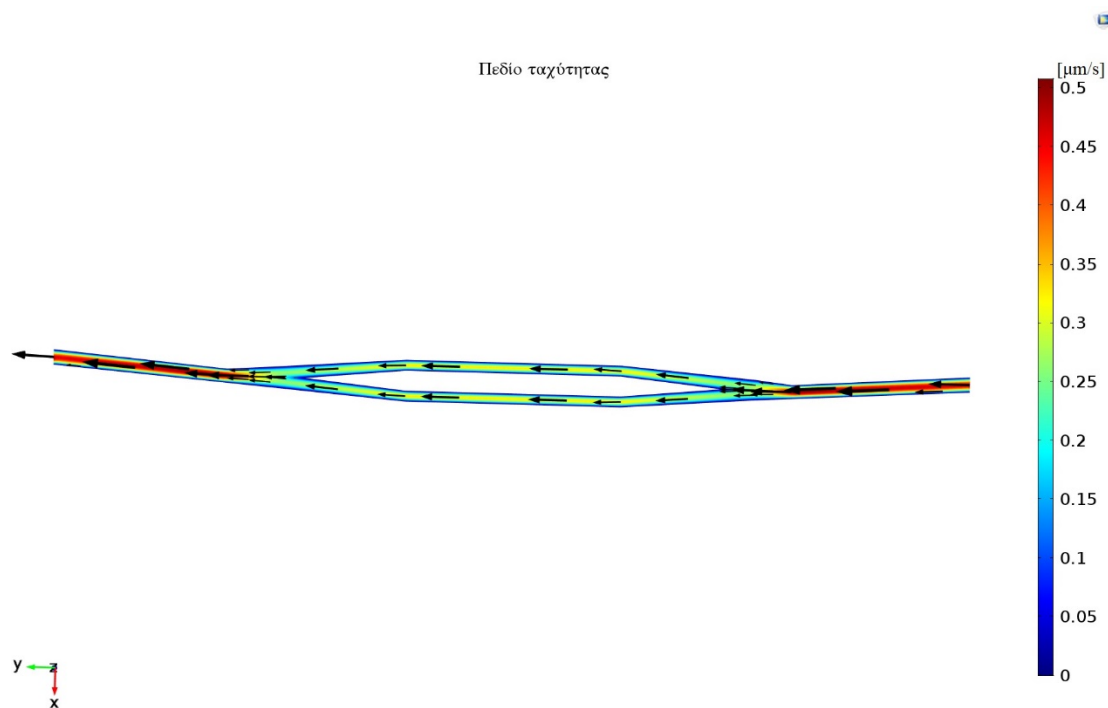
Για $(x, y, z) = (35, -1.38, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\max} = 0.223$ [$\mu\text{m/s}$]

10-4 [μm]

- Εύρος τιμών ύψους: από $-2.2\mu\text{m}$ έως $2.2\mu\text{m}$



- Συντεταγμένες επιπέδου [μm]: $(x, y, z) = (5, 0, 0)$



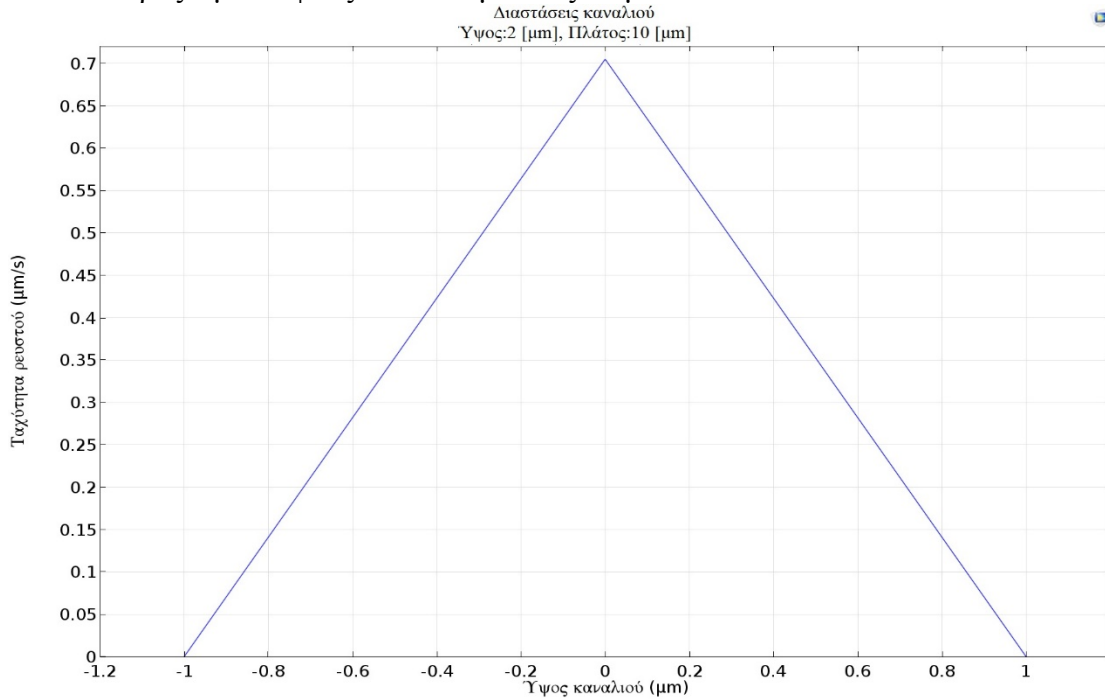
- Συντεταγμένες ευθυγράμμου τμήματος [μm]: $(x_1, y_1, z_1) = (35, -100, 0)$ και $(x_2, y_2, z_2) = (35, 100, 0)$

Για $(x, y, z) = (35, -96.88, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\min} = 0.320$ [$\mu\text{m/s}$]

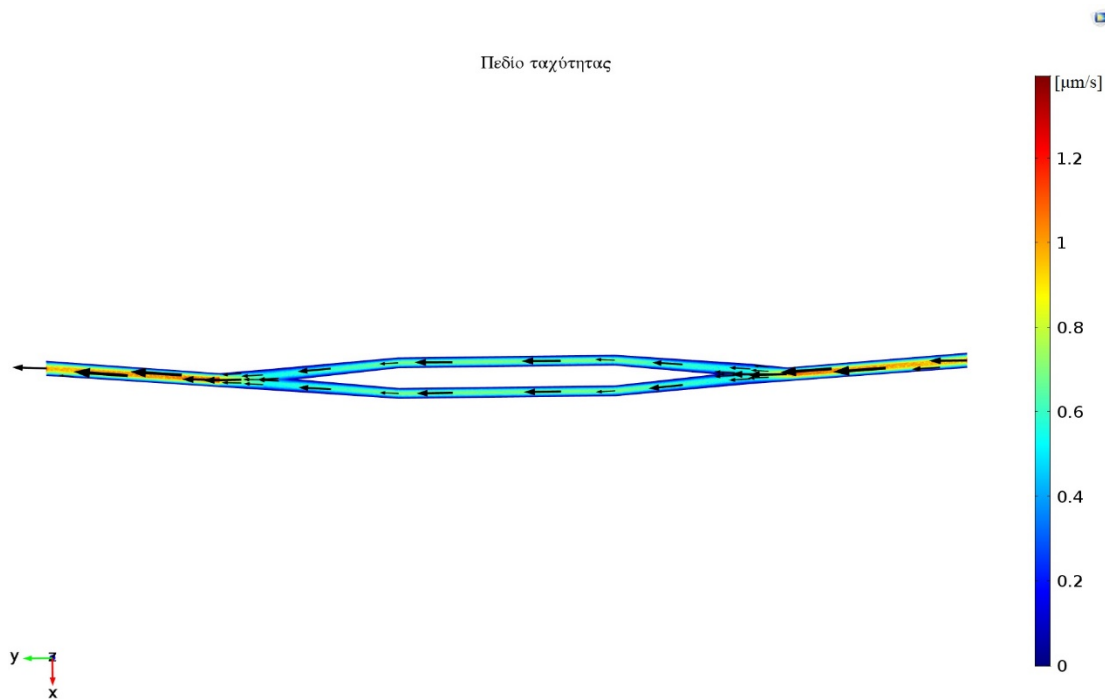
Για $(x, y, z) = (35, 26.36, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\max} = 0.332$ [$\mu\text{m/s}$]

10-2 [μm]

- Εύρος τιμών ύψους: από $-1.2\mu\text{m}$ έως $1.2\mu\text{m}$



- Συντεταγμένες επιπέδου [μm]: $(x, y, z) = (5, 0, 0)$



- Συντεταγμένες ευθυγράμμου τμήματος [μm]: $(x_1, y_1, z_1) = (35, -100, 0)$ και $(x_2, y_2, z_2) = (35, 100, 0)$

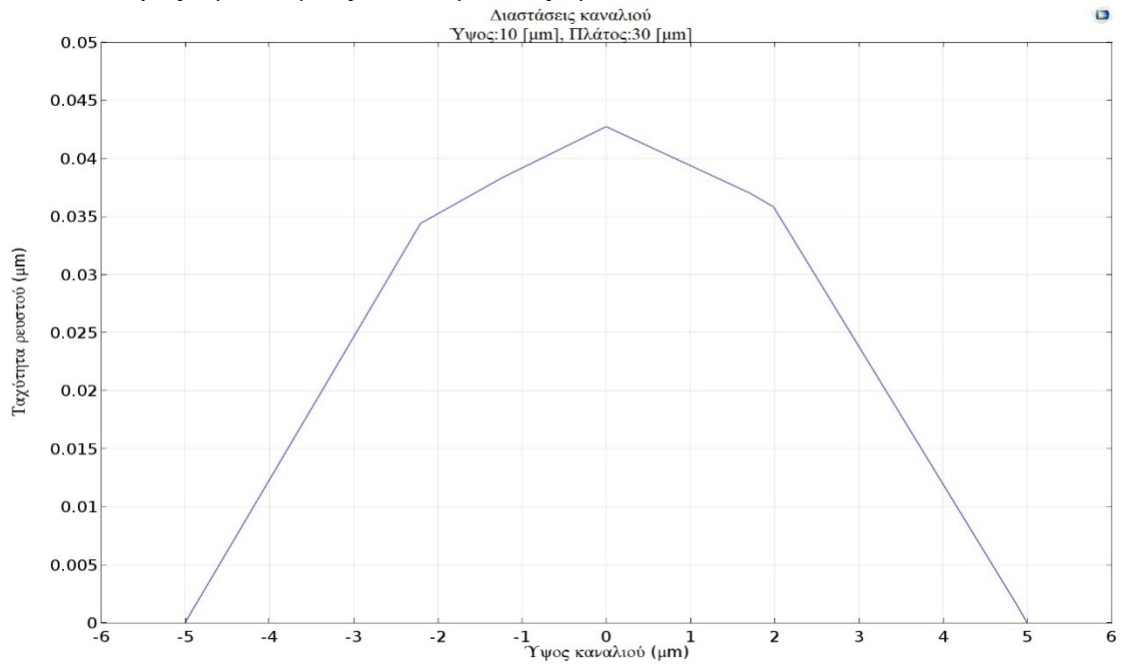
Για $(x, y, z) = (35, -51.88, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\min} = 0.586$ [$\mu\text{m/s}$]

Για $(x, y, z) = (35, 80.09, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\max} = 0.756$ [$\mu\text{m/s}$]

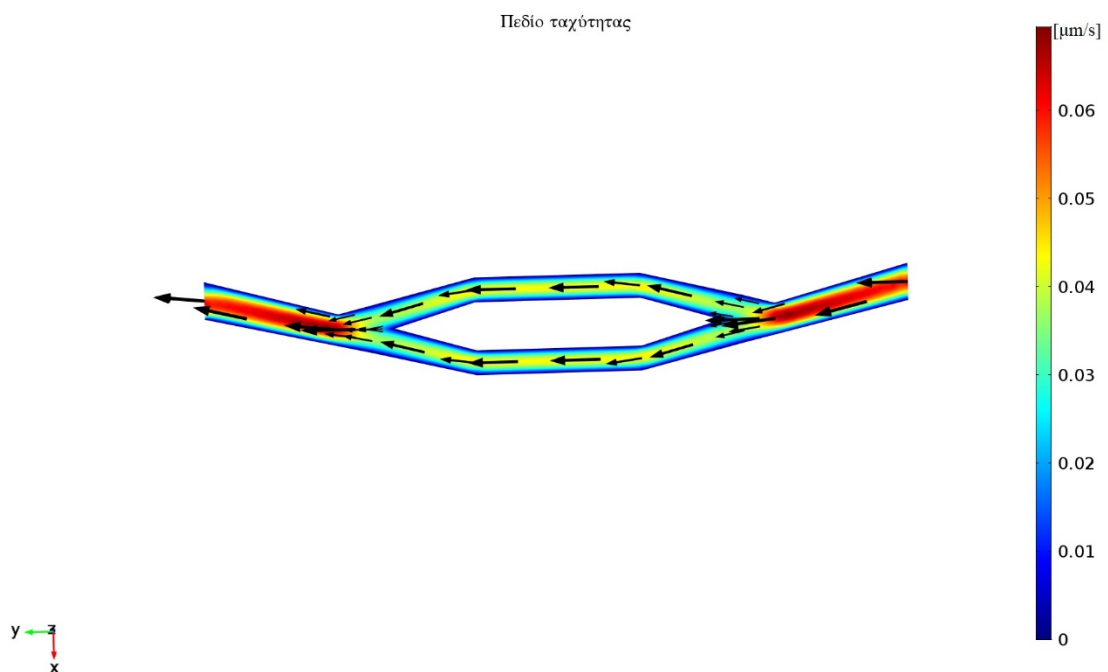
II.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΟ ΥΨΟΣ 10 [μm]

30-10 [μm]

- Εύρος τιμών ύψους: από $-6\mu\text{m}$ έως $6\mu\text{m}$



- Συντεταγμένες επιπέδου [μm]: $(x, y, z) = (30, 0, 0)$



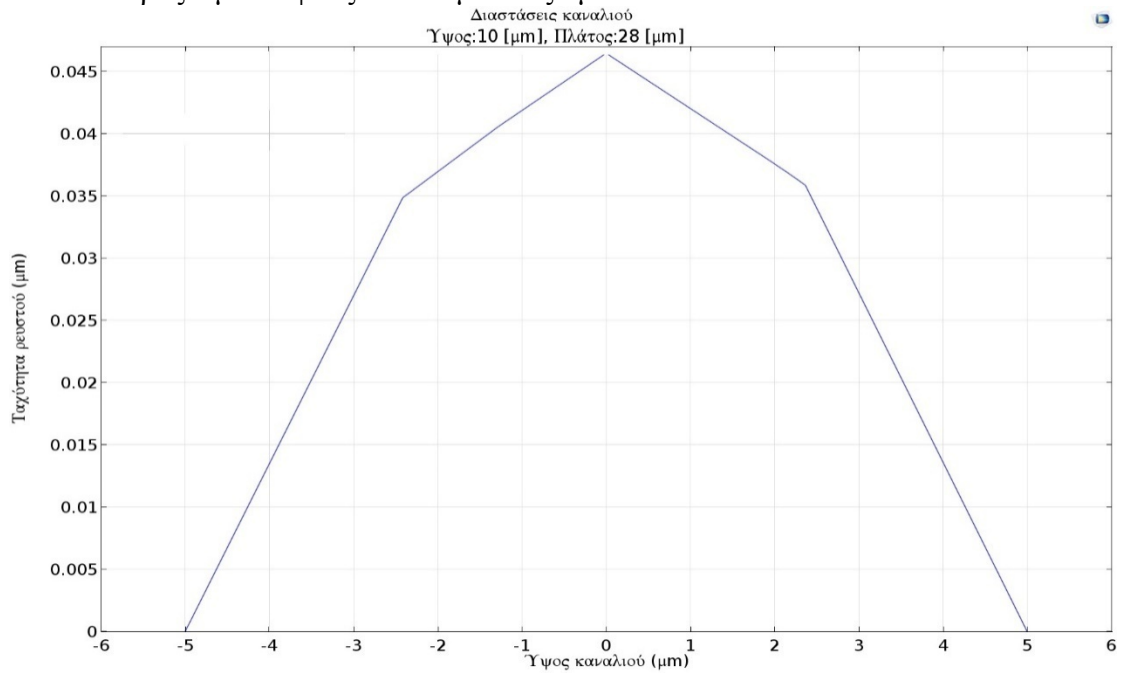
- Συντεταγμένες ευθυγράμμου τμήματος [μm]: $(x_1, y_1, z_1) = (105, -100, 0)$ και $(x_2, y_2, z_2) = (105, 100, 0)$

Για $(x, y, z) = (105, 7.19, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\min} = 0.042$ [$\mu\text{m/s}$]

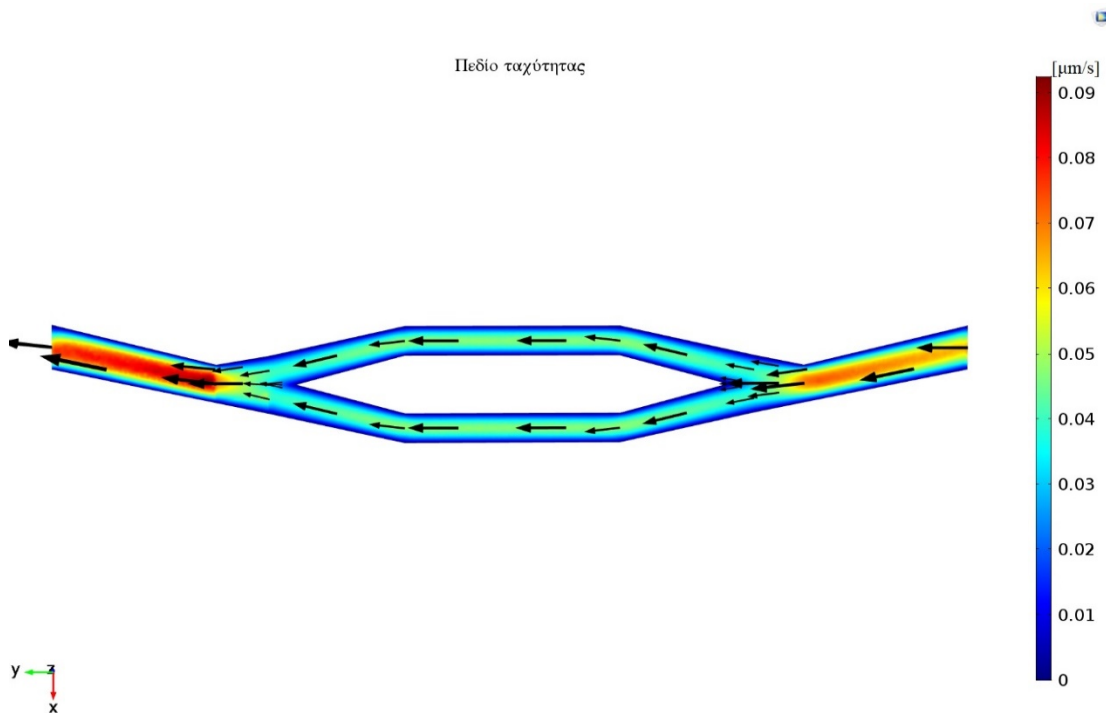
Για $(x, y, z) = (105, -95.33, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\max} = 0.044$ [$\mu\text{m/s}$]

28-10 [μm]

- Εύρος τιμών ύψους: από $-6\mu\text{m}$ έως $6\mu\text{m}$



- Συντεταγμένες επιπέδου [μm]: $(x, y, z) = (28, 0, 0)$



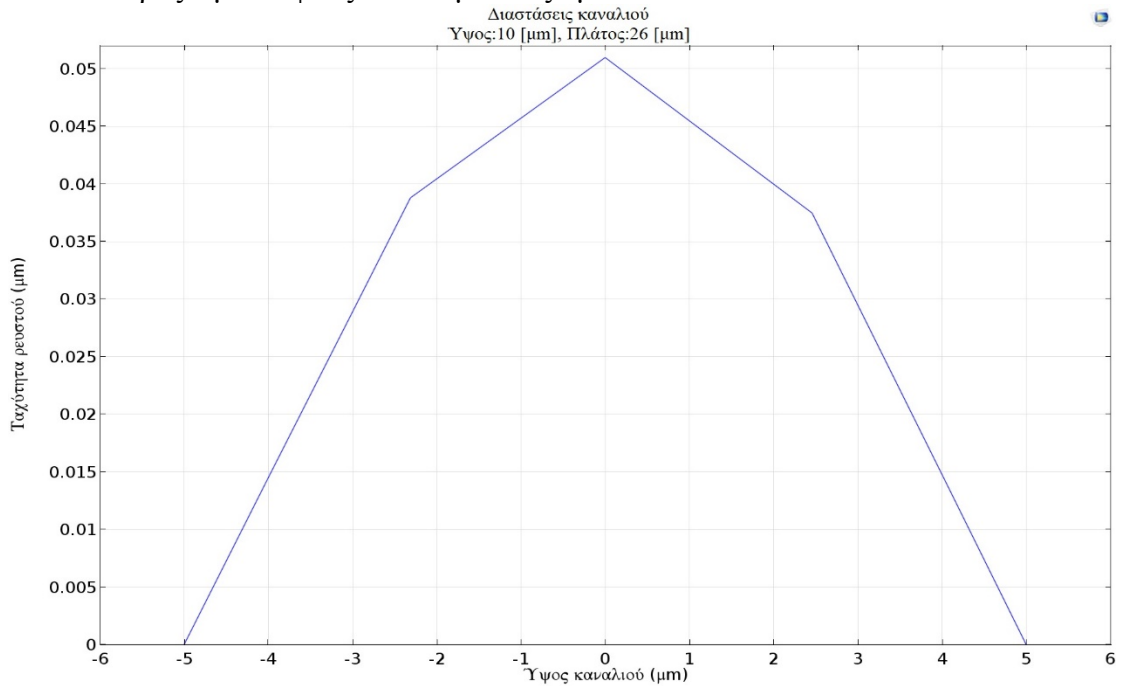
- Συντεταγμένες ευθυγράμμου τμήματος [μm]: $(x_1, y_1, z_1) = (98, -100, 0)$ και $(x_2, y_2, z_2) = (98, 100, 0)$

Για $(x, y, z) = (98, -8.53, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\min} = 0.046$ [$\mu\text{m/s}$]

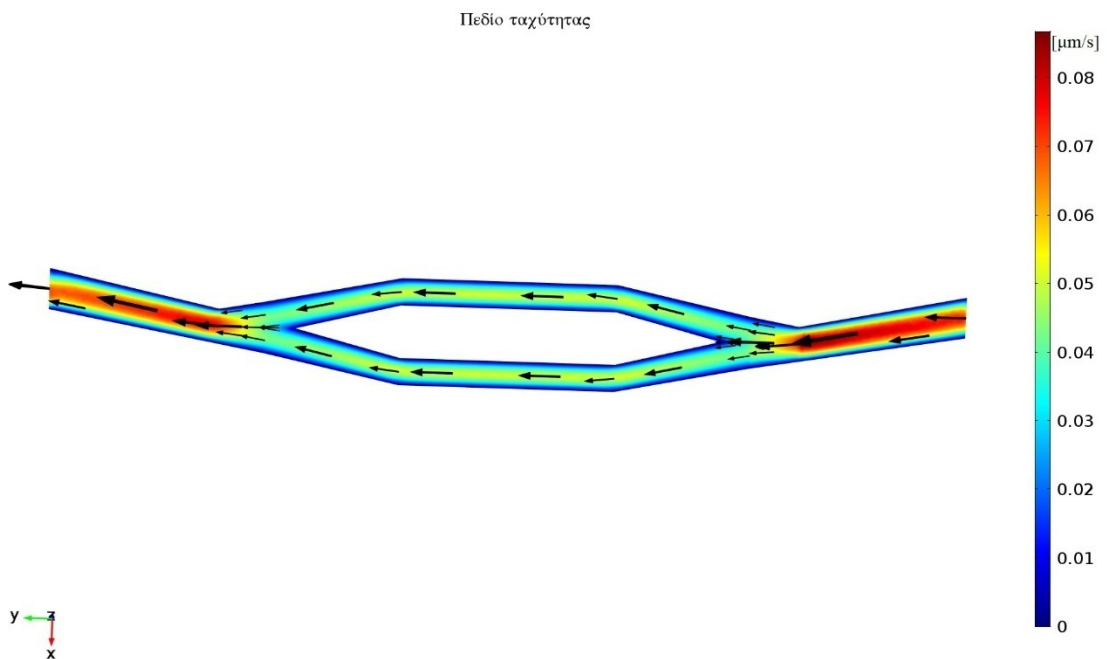
Για $(x, y, z) = (98, -50.64, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\max} = 0.047$ [$\mu\text{m/s}$]

26-10 [μm]

- Εύρος τιμών ύψους: από $-6\mu\text{m}$ έως $6\mu\text{m}$



- Συντεταγμένες επιπέδου [μm]: $(x, y, z) = (26, 0, 0)$



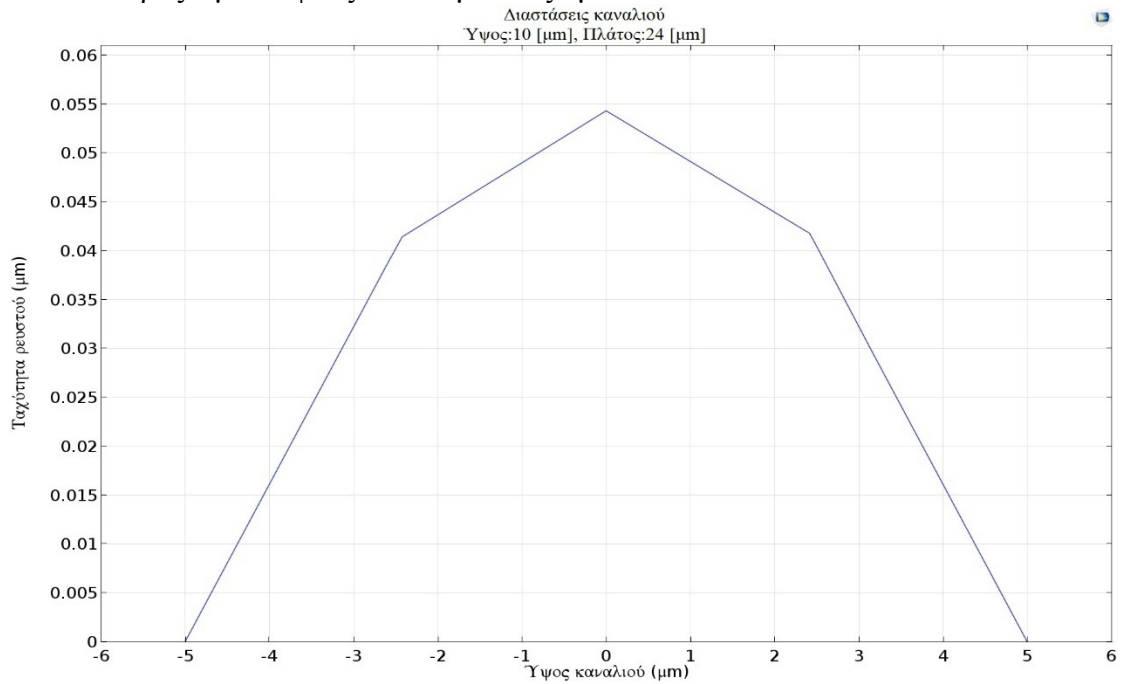
- Συντεταγμένες ευθυγράμμου τμήματος [μm]: $(x_1, y_1, z_1) = (91, -100, 0)$ και $(x_2, y_2, z_2) = (91, 100, 0)$

Για $(x, y, z) = (91, 63.07, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\min} = 0.049$ [$\mu\text{m/s}$]

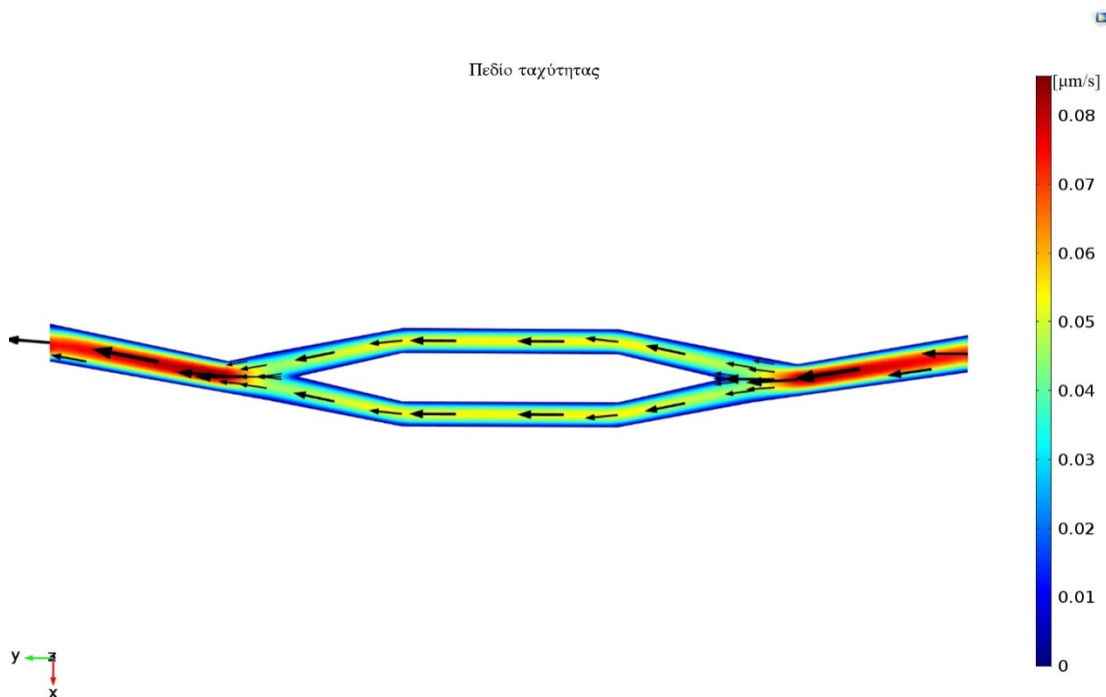
Για $(x, y, z) = (91, -4.28, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\max} = 0.051$ [$\mu\text{m/s}$]

24-10 [μm]

- Εύρος τιμών ύψους: από $-6\mu\text{m}$ έως $6\mu\text{m}$



- Συντεταγμένες επιπέδου [μm]: $(x, y, z) = (24, 0, 0)$



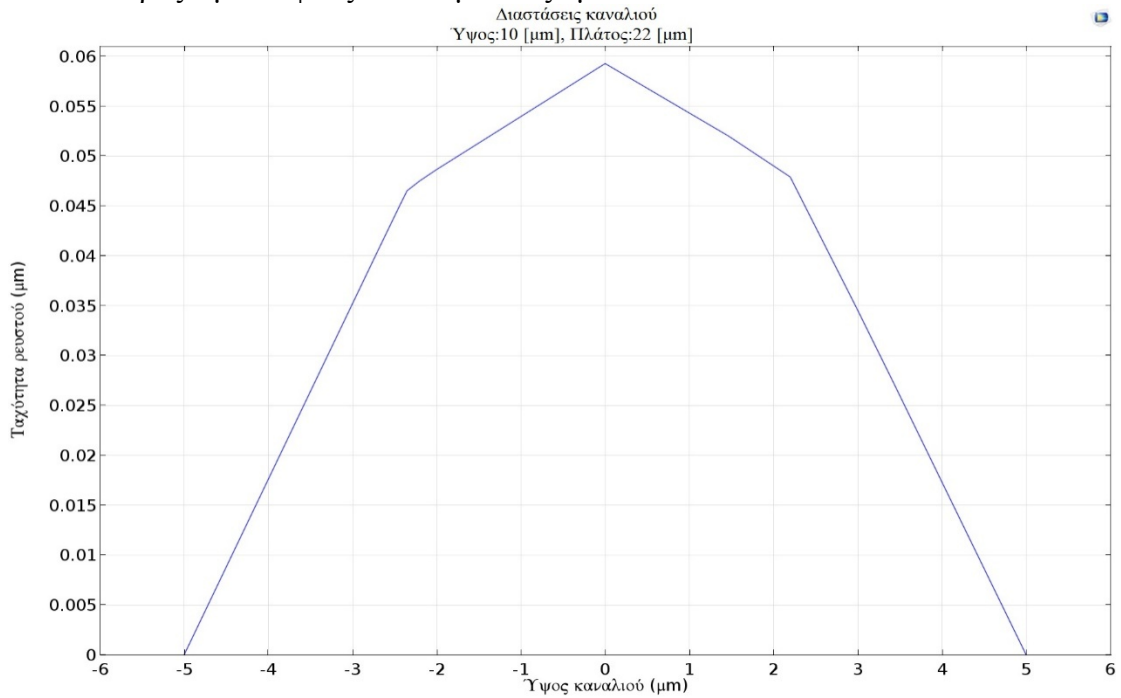
- Συντεταγμένες ευθυγράμμου τμήματος [μm]: $(x_1, y_1, z_1) = (84, -100, 0)$ και $(x_2, y_2, z_2) = (84, 100, 0)$

Για $(x, y, z) = (84, 17.19, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\min} = 0.053$ [$\mu\text{m/s}$]

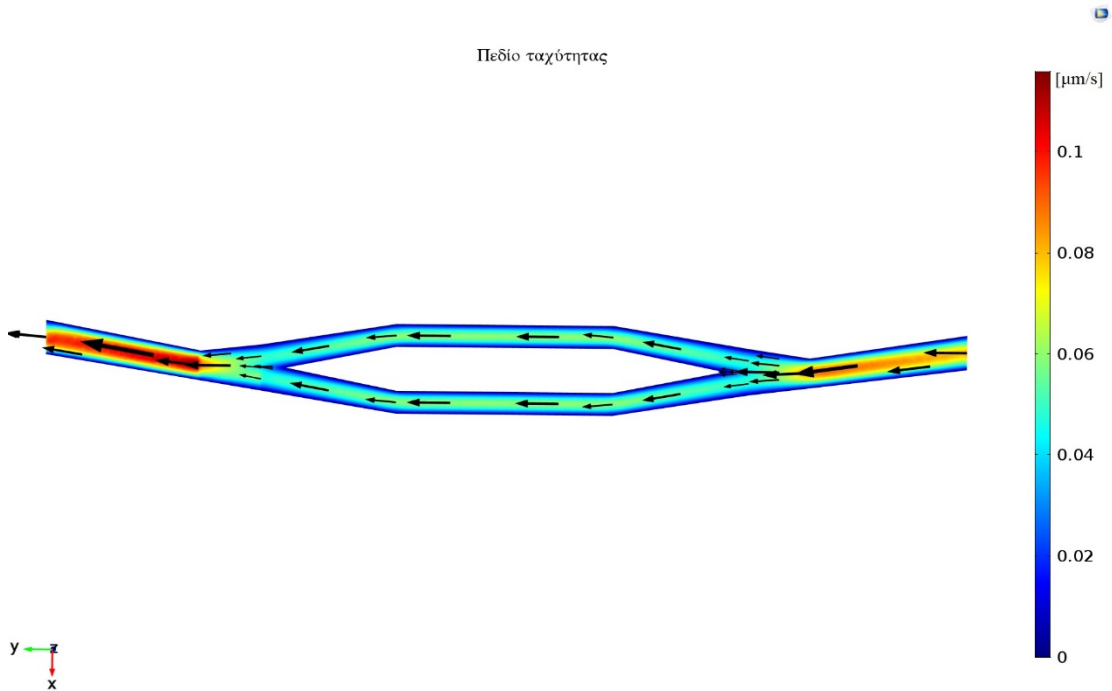
Για $(x, y, z) = (84, 25.11, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\max} = 0.055$ [$\mu\text{m/s}$]

22-10 [μm]

- Εύρος τιμών ύψους: από $-6\mu\text{m}$ έως $6\mu\text{m}$



- Συντεταγμένες επιπέδου [μm]: $(x, y, z) = (22, 0, 0)$



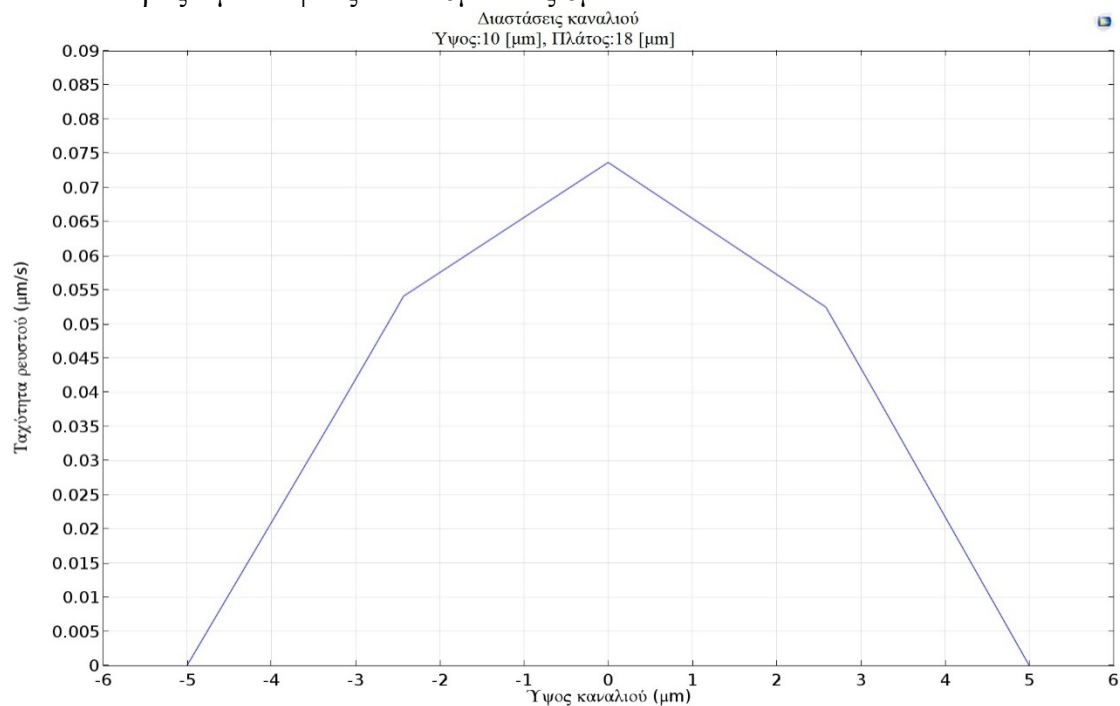
- Συντεταγμένες ευθυγράμμου τμήματος [μm]: $(x_1, y_1, z_1) = (77, -100, 0)$ και $(x_2, y_2, z_2) = (77, 100, 0)$

Για $(x, y, z) = (77, -94.27, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\min} = 0.057$ [$\mu\text{m/s}$]

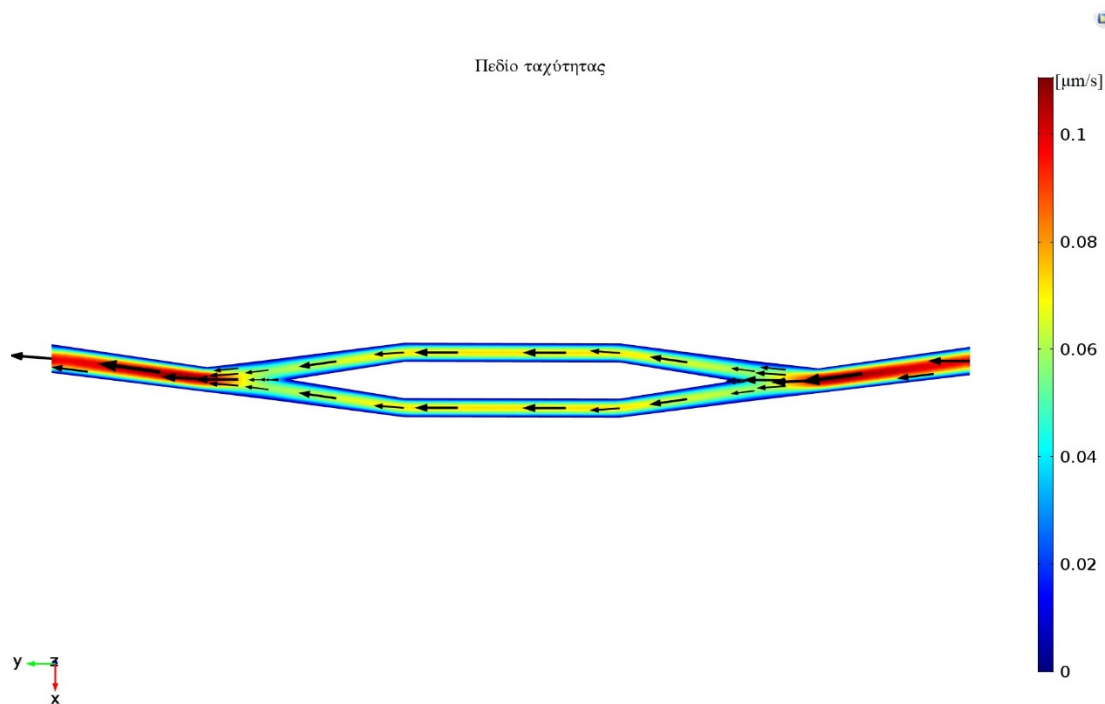
Για $(x, y, z) = (77, 67.46, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\max} = 0.060$ [$\mu\text{m/s}$]

18-10 [μm]

- Εύρος τιμών ύψους: από $-6\mu\text{m}$ έως $6\mu\text{m}$



- Συντεταγμένες επιπέδου [μm]: $(x, y, z) = (18, 0, 0)$



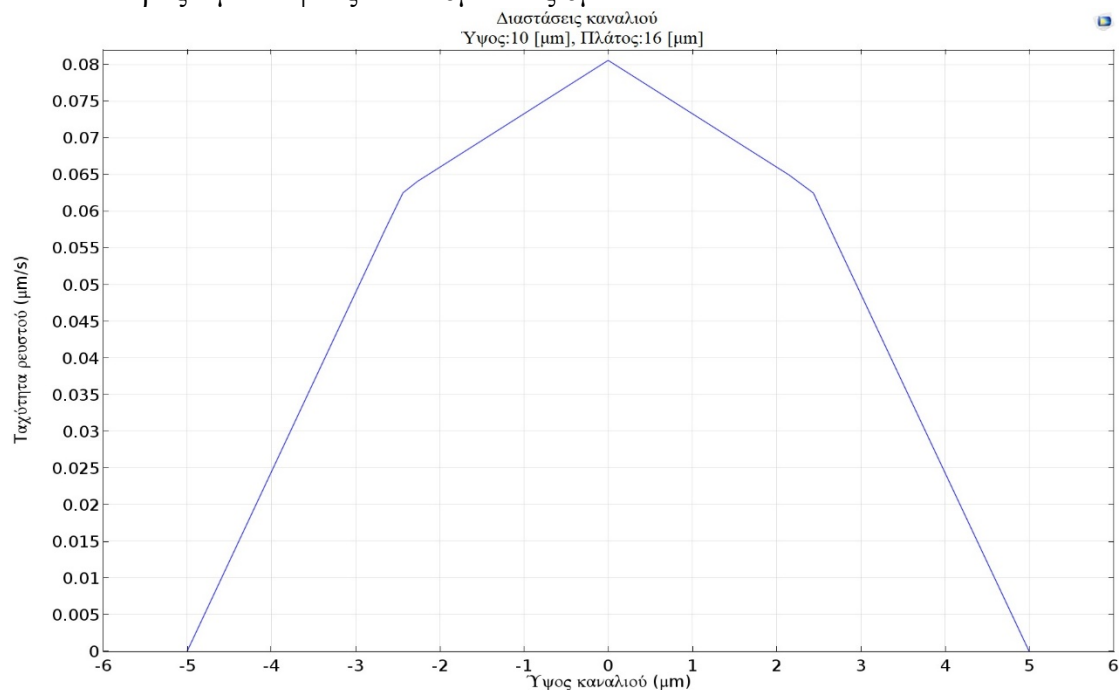
- Συντεταγμένες ευθυγράμμου τμήματος [μm]: $(x_1, y_1, z_1) = (63, -100, 0)$ και $(x_2, y_2, z_2) = (63, 100, 0)$

Για $(x, y, z) = (63, -91.54, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\min} = 0.070$ [$\mu\text{m/s}$]

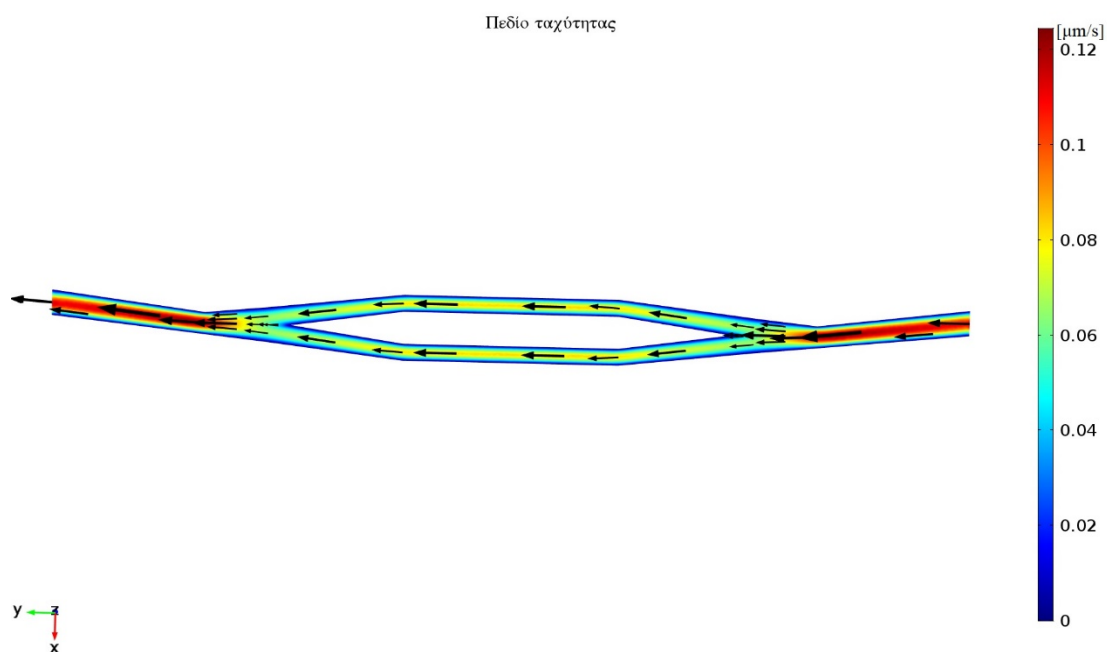
Για $(x, y, z) = (63, -28.37, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\max} = 0.074$ [$\mu\text{m/s}$]

16-10 [μm]

- Εύρος τιμών ύψους: από $-6\mu\text{m}$ έως $6\mu\text{m}$



- Συντεταγμένες επιπέδου [μm]: $(x, y, z) = (16, 0, 0)$



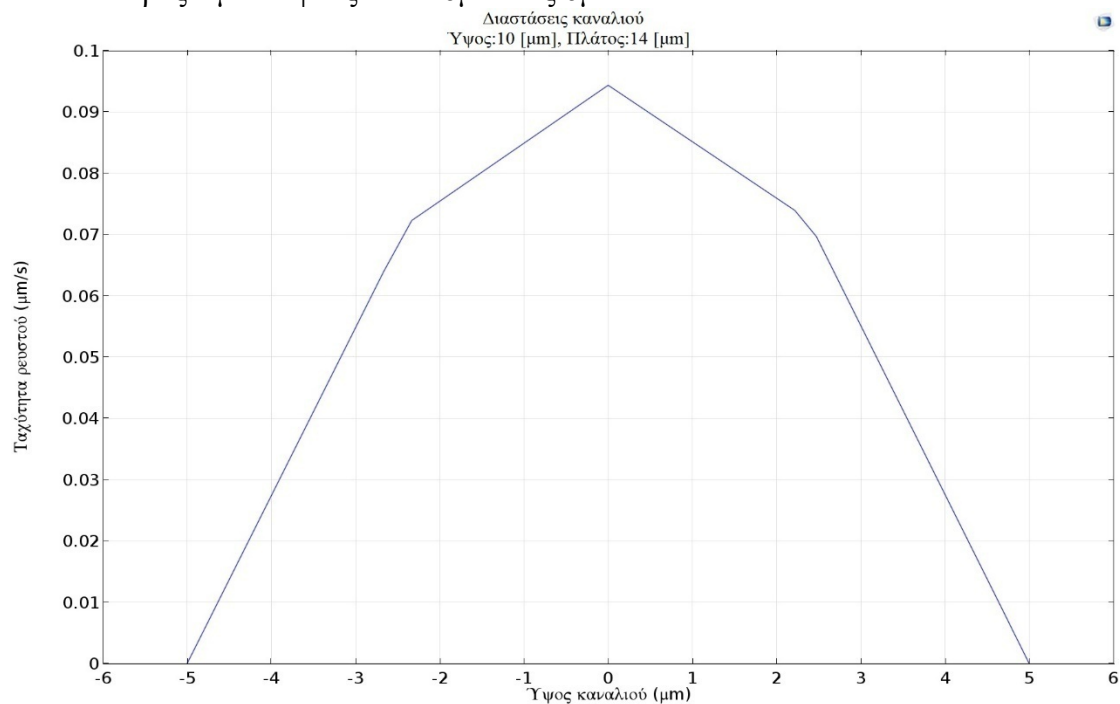
- Συντεταγμένες ευθυγράμμου τμήματος [μm]: $(x_1, y_1, z_1) = (56, -100, 0)$ και $(x_2, y_2, z_2) = (56, 100, 0)$

Για $(x, y, z) = (56, -92.53, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\min} = 0.079$ [$\mu\text{m/s}$]

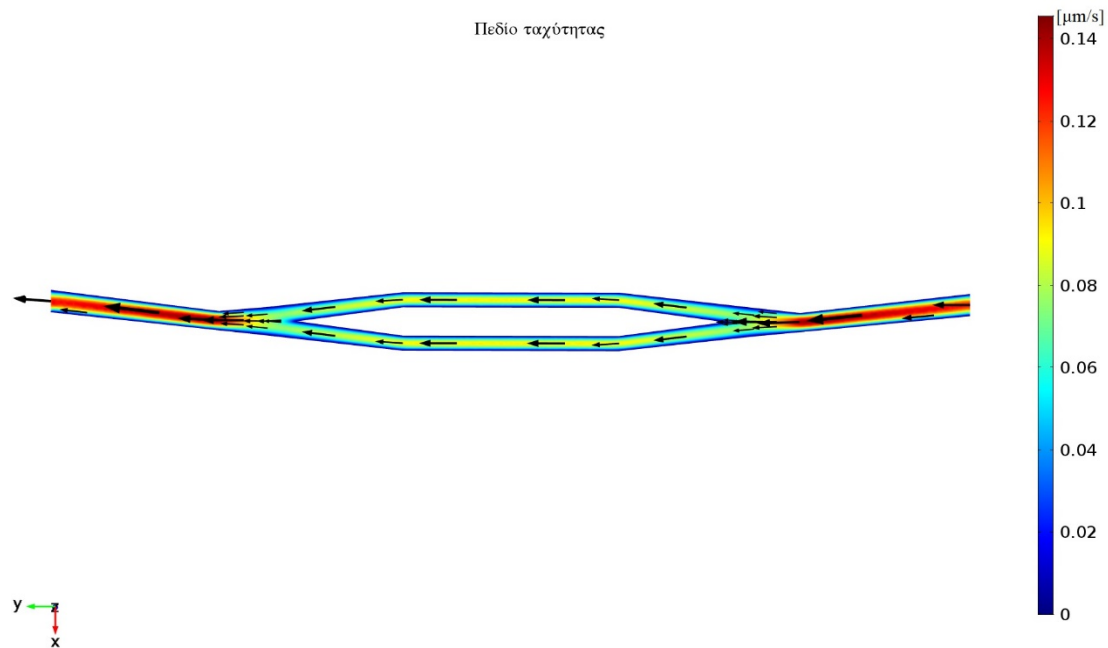
Για $(x, y, z) = (56, -2.09, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\max} = 0.084$ [$\mu\text{m/s}$]

14-10 [μm]

- Εύρος τιμών ύψους: από $-6\mu\text{m}$ έως $6\mu\text{m}$



- Συντεταγμένες επιπέδου [μm]: $(x, y, z) = (14, 0, 0)$



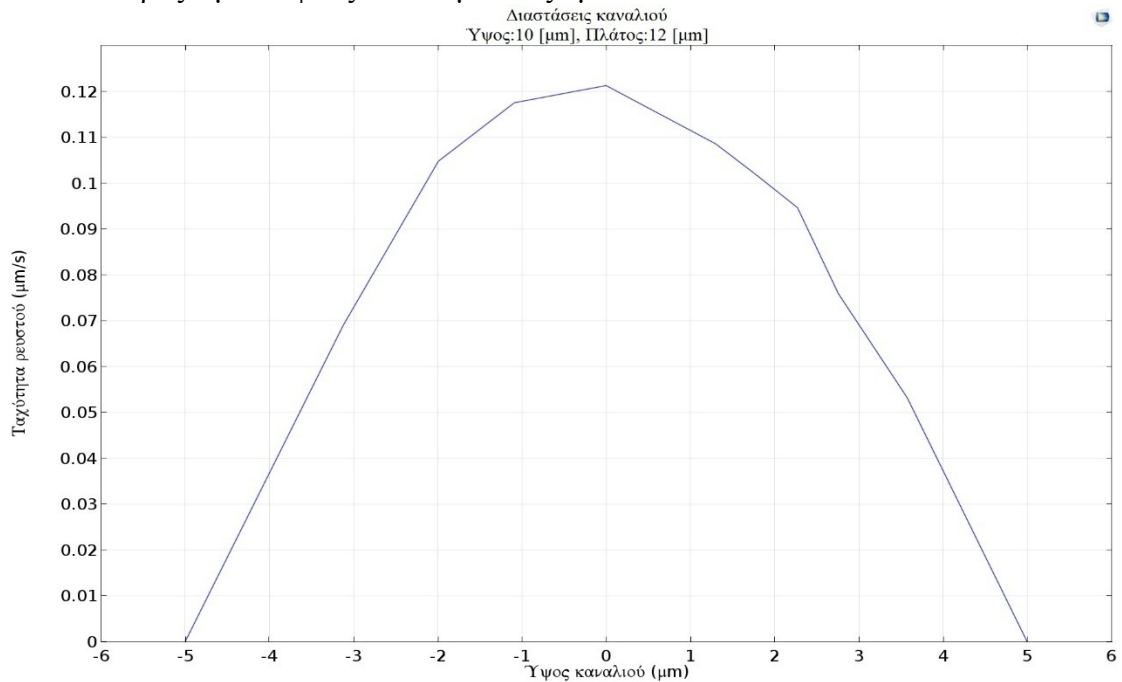
- Συντεταγμένες ευθυγράμμου τμήματος [μm]: $(x_1, y_1, z_1) = (49, -100, 0)$ και $(x_2, y_2, z_2) = (49, 100, 0)$

Για $(x, y, z) = (49, 90.13, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\min} = 0.090$ [$\mu\text{m}/\text{s}$]

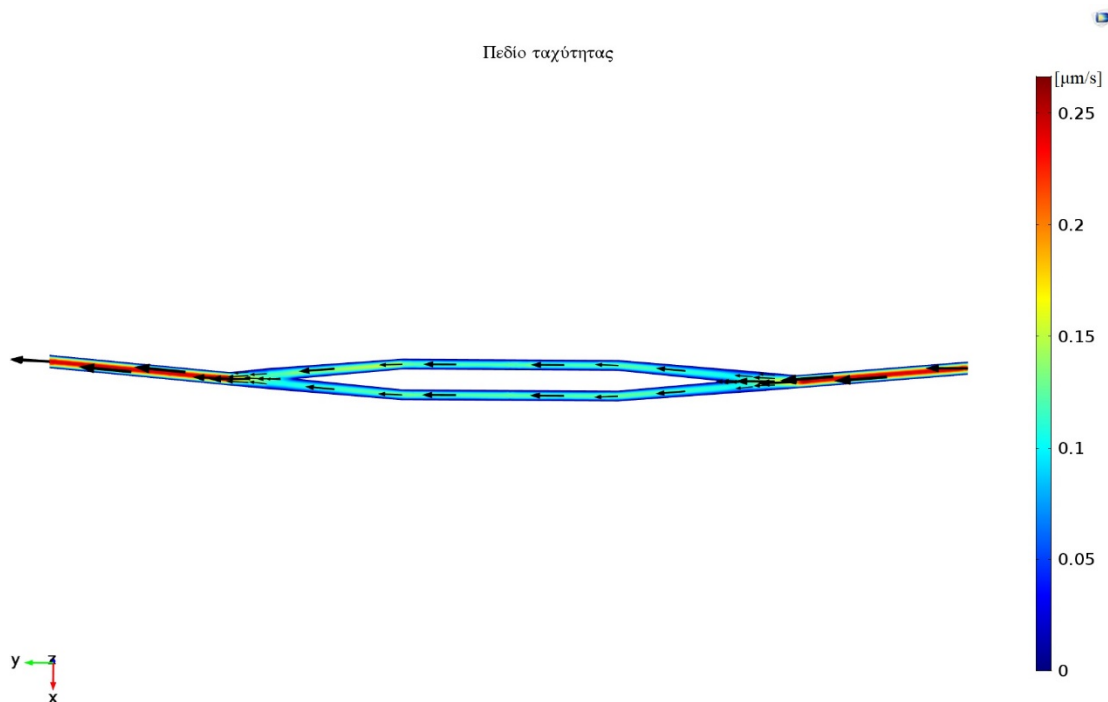
Για $(x, y, z) = (49, 0, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\max} = 0.094$ [$\mu\text{m}/\text{s}$]

12-10 [μm]

- Εύρος τιμών ύψους: από $-6\mu\text{m}$ έως $6\mu\text{m}$



- Συντεταγμένες επιπέδου [μm]: $(x, y, z) = (12, 0, 0)$



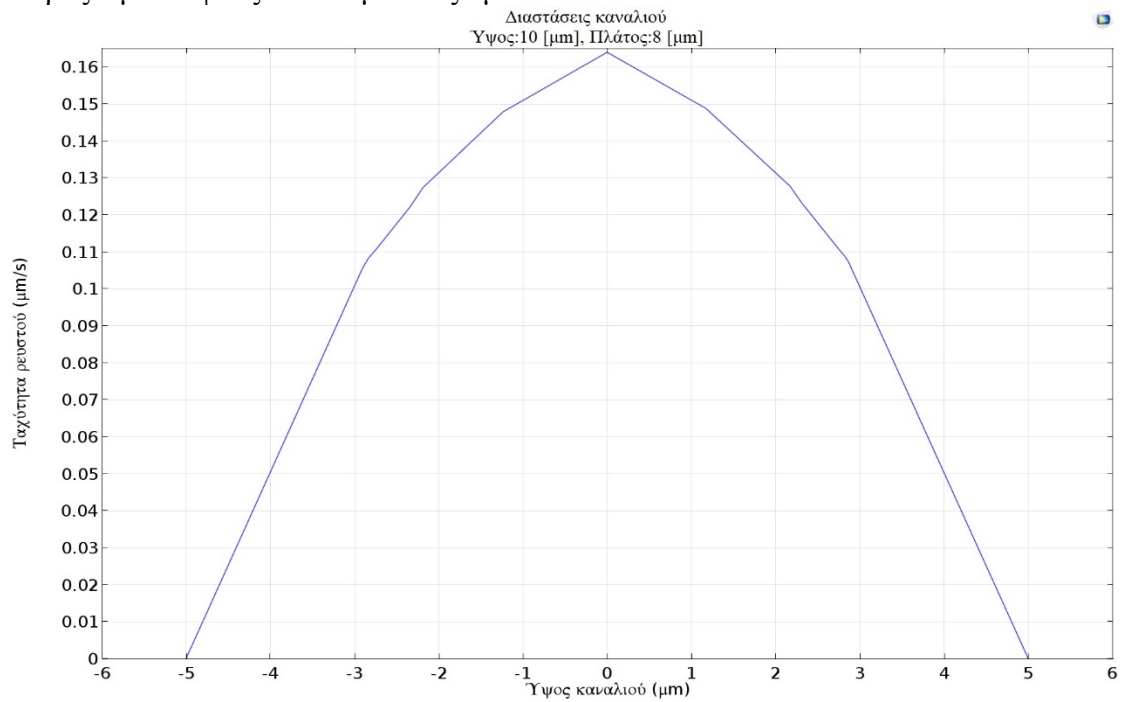
- Συντεταγμένες ευθυγράμμου τμήματος [μm]: $(x_1, y_1, z_1) = (35, -100, 0)$ και $(x_2, y_2, z_2) = (35, 100, 0)$

Για $(x, y, z) = (35, 0, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\min} = 0.121$ [$\mu\text{m/s}$]

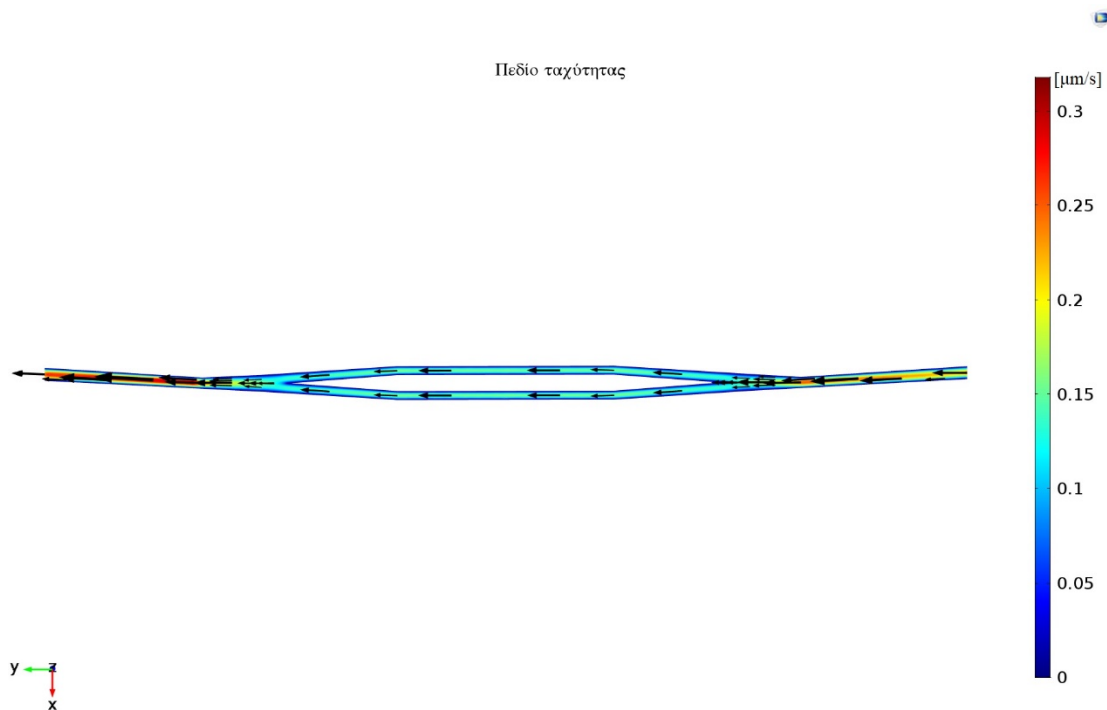
Για $(x, y, z) = (35, 89.75, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\max} = 0.137$ [$\mu\text{m/s}$]

8-10 [μm]

- Εύρος τιμών ύψους: από -6 μm έως 6 μm



- Συντεταγμένες επιπέδου [μm]: $(x, y, z) = (8, 0, 0)$



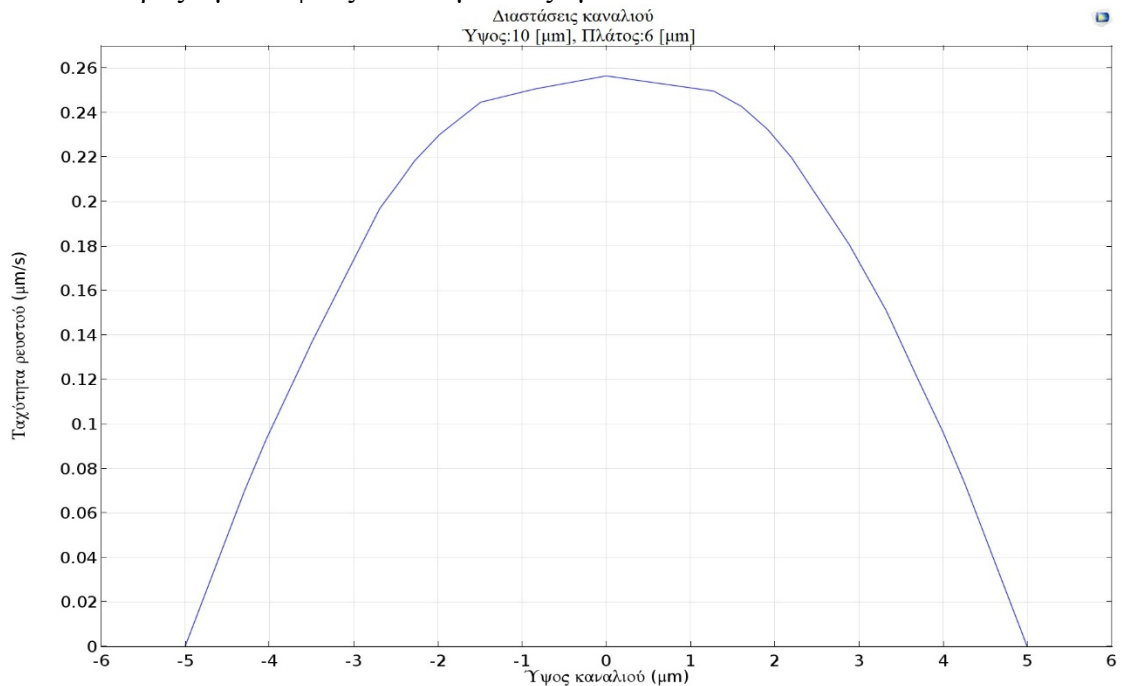
- Συντεταγμένες ευθυγράμμου τμήματος [μm]: $(x_1, y_1, z_1) = (28, -100, 0)$ και $(x_2, y_2, z_2) = (28, 100, 0)$

Για $(x, y, z) = (28, 1.58, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\min} = 0.152$ [$\mu\text{m/s}$]

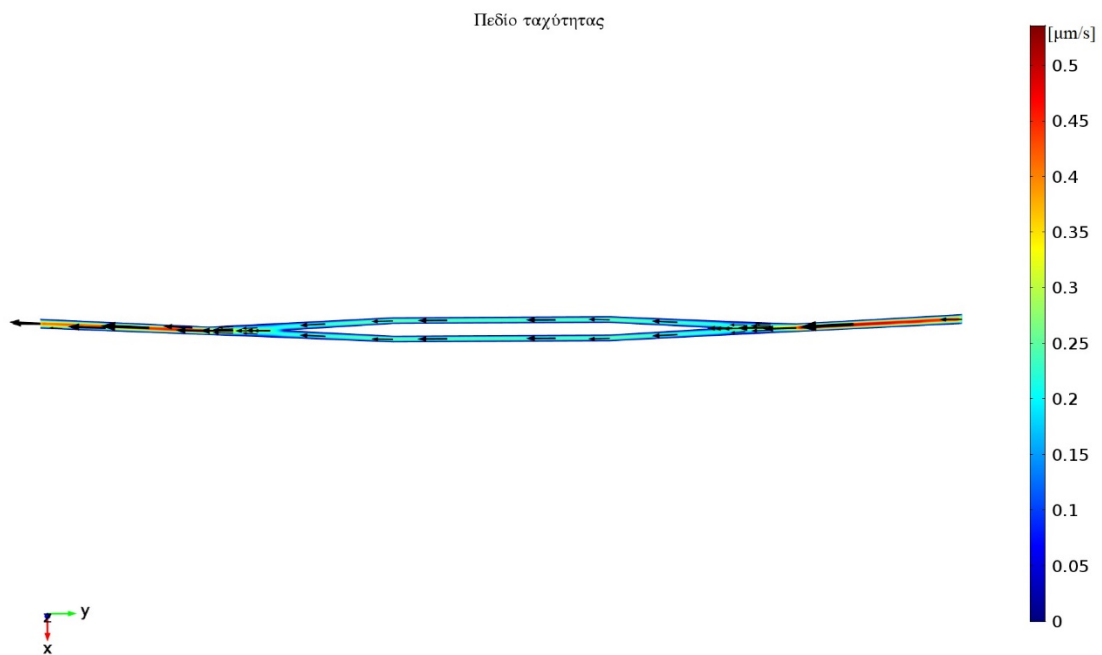
Για $(x, y, z) = (28, -6.56, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\max} = 0.169$ [$\mu\text{m/s}$]

6-10 [μm]

- Εύρος τιμών ύψους: από $-6\mu\text{m}$ έως $6\mu\text{m}$



- Συντεταγμένες επιπέδου [μm]: $(x, y, z) = (6, 0, 0)$

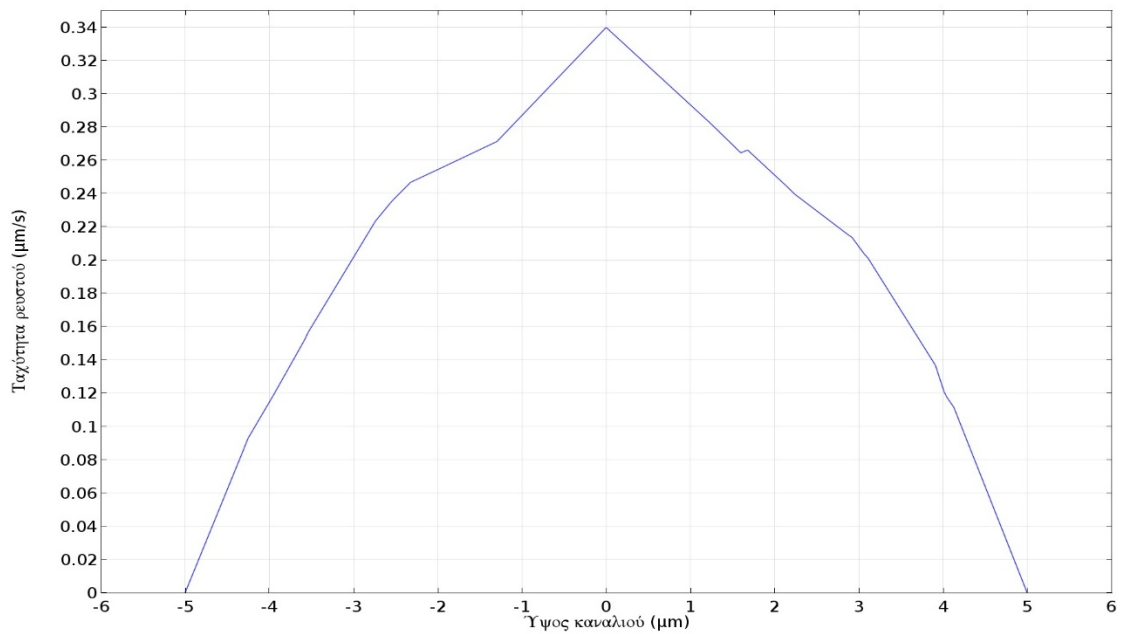


- Συντεταγμένες ευθυγράμμου τμήματος [μm]: $(x_1, y_1, z_1) = (21, -100, 0)$ και $(x_2, y_2, z_2) = (21, 100, 0)$

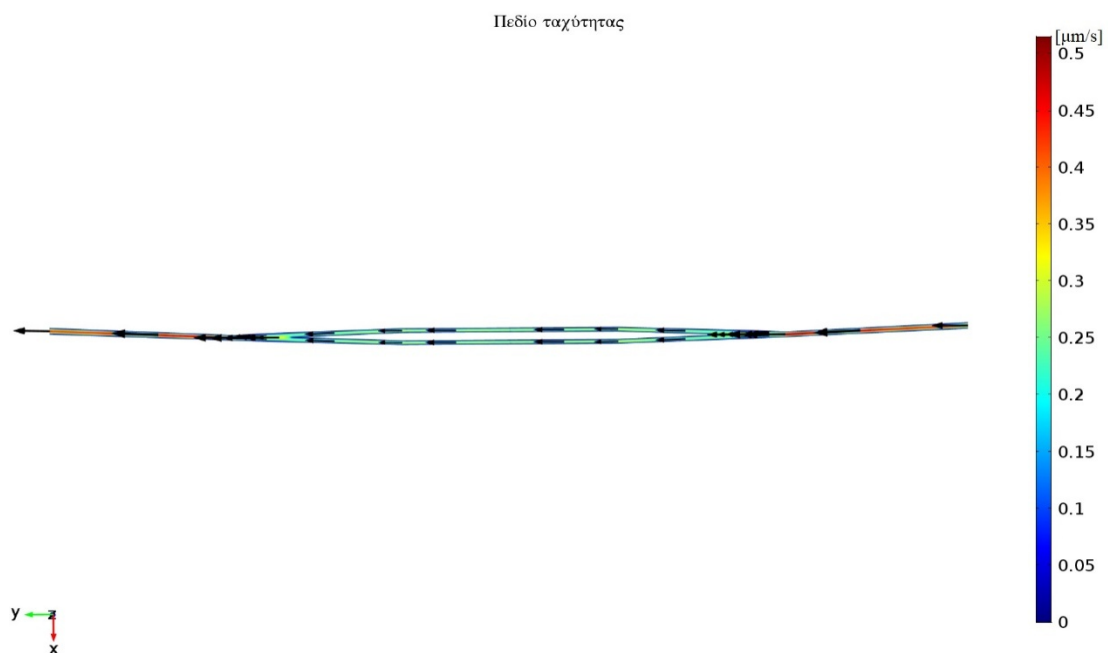
Για $(x, y, z) = (21, 0, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\min} = 0.256$ [$\mu\text{m/s}$]
Για $(x, y, z) = (21, 91.80, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\max} = 0.284$ [$\mu\text{m/s}$]

4-10 [μm]

- Εύρος τιμών ύψους: από $-6\mu\text{m}$ έως $6\mu\text{m}$



- Συντεταγμένες επιπέδου [μm]: $(x, y, z) = (4, 0, 0)$



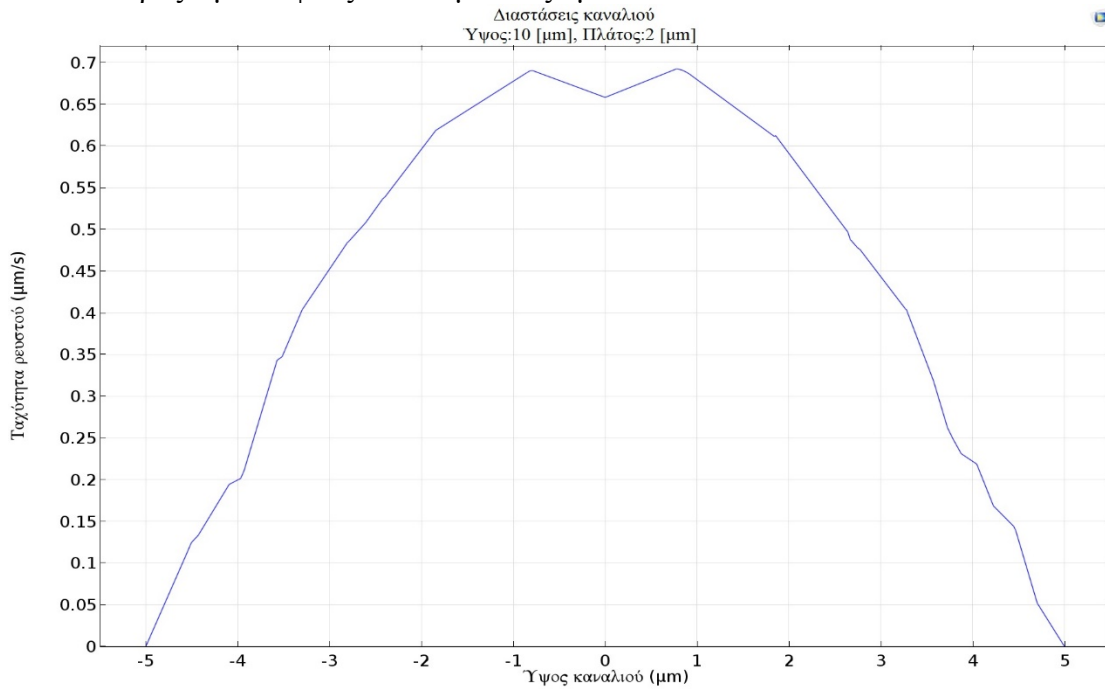
- Συντεταγμένες ευθυγράμμου τμήματος [μm]: $(x_1, y_1, z_1) = (14, -100, 0)$ και $(x_2, y_2, z_2) = (14, 100, 0)$

Για $(x, y, z) = (14, 97.29, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\min} = 0.276$ [$\mu\text{m/s}$]

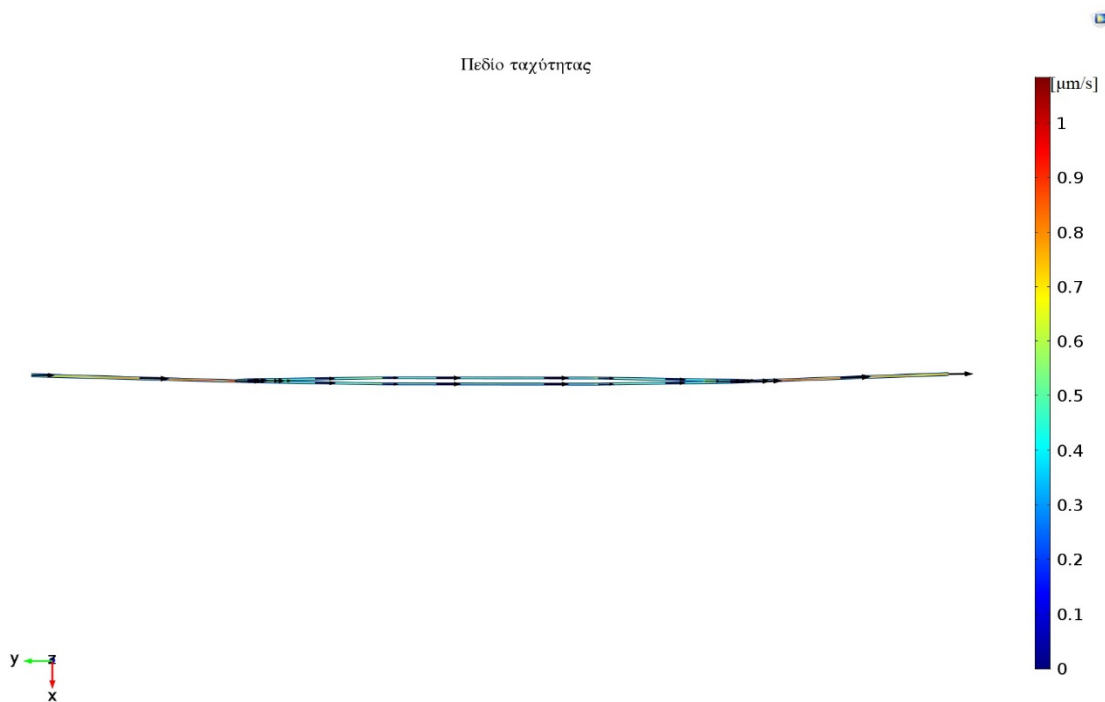
Για $(x, y, z) = (14, 0, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\max} = 0.340$ [$\mu\text{m/s}$]

2-10 [μm]

- Εύρος τιμών ύψους: από $-6\mu\text{m}$ έως $6\mu\text{m}$



- Συντεταγμένες επιπέδου [μm]: $(x, y, z) = (2, 0, 0)$



- Συντεταγμένες ευθυγράμμου τμήματος [μm]: $(x_1, y_1, z_1) = (7, -100, 0)$ και $(x_2, y_2, z_2) = (7, 100, 0)$

Για $(x, y, z) = (7, 0.62, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\min} = 0.528$ [$\mu\text{m/s}$]

Για $(x, y, z) = (7, 95.65, 0)$ [μm] $\rightarrow u_{\max} = 0.737$ [$\mu\text{m/s}$]