



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΔΠΜΣ ΜΙΚΡΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΝΑΝΟΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΡΟΗΣ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

Βάργκας-Κούσουλας Εμμανουήλ-Αρτούρο

Επιβλέπων: καθ. Δημήτριος Τσουκαλάς

Αθήνα, 2020

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Δημήτριος Τσουκαλάς

Καθηγητής ΣΕΜΦΕ ΕΜΠ

Δημήτριος Μαθιουλάκης

Καθηγητής Σχολής Μηχανολόγων

Μηχανικών ΕΜΠ

Γεώργιος Κόκκορης

Ερευνητής ΕΚΕΦΕ

«Δημόκριτος»

Υπογραφές μελών εξεταστικής επιτροπής

Δ. ΤΣΟΥΚΑΛΑΣ

Δ. ΜΑΘΙΟΥΛΑΚΗΣ

Γ. ΚΟΚΚΟΡΗΣ

Αθήνα, 2020

Στη μνήμη
του Εμμανουήλ και
της Αδαμαντίας

Στο πιο αγαπημένο ζευγάρι
Στους καλύτερους παππούδες

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής, καθηγητή στο ΕΜΠ, κύριο Δημήτριο Τσουκαλά για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα, την πολύτιμη βοήθεια και την καθοδήγησή του σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της εργασίας.

Θέλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον ερευνητή στο Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών Επιστημών «Δημόκριτος» Γεώργιο Κόκκορη, ο οποίος με τις εξειδικευμένες γνώσεις του και τον προσωπικό χρόνο που δαπάνησε, συνέβαλλε καθοριστικά στην επιτυχή πραγματοποίηση των προσομοιώσεων με τη χρήση του λογισμικού COMSOL.

Θέλω να ευχαριστήσω τον Ευάγγελο Ασλανίδη, τον Λάμπρο Πατσιούρα και τον Ευάγγελο Σκοτάδη για την υποστήριξή τους και την άψογη συνεργασία τους. Θέλω να ευχαριστήσω επίσης όλα τα μέλη του εργαστηρίου για το φιλικό και ζεστό περιβάλλον που δημιούργησαν.

Επιπλέον, θέλω να ευχαριστήσω τις ερευνήτριες στο Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών Επιστημών «Δημόκριτος» Γωγώ Κάπρου και Αγγελική Τσερέπη για τον εξοπλισμό που μου επέτρεψαν να χρησιμοποιήσω καθώς και για το ενδιαφέρον να με βοηθήσουν σε όποιο πρόβλημα αντιμετώπισα.

Οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στη μητέρα μου Κατερίνα, η οποία, παρά τις δυσκολίες, με στηρίζει και είναι δίπλα μου σε κάθε προσπάθεια. Τέλος, ευχαριστώ όλους τους φίλους μου για την υποστήριξή τους.

Περίληψη

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας αναπτύχθηκαν, επάνω σε ελαστικό υπόστρωμα πολυολεφίνης, αισθητήρες παραμόρφωσης, οι οποίοι βασίζονται στη μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης μέσω ενός δικτύου νανοσωματιδίων πλατίνας, χρησιμοποιώντας τεχνικές οπτικής λιθογραφίας και εναπόθεσης νανοσωματιδίων, μέσω της τεχνικής sputtering, για μικρορευστονικές εφαρμογές. Η παραμόρφωση του ελαστικού υποστρώματος πολυολεφίνης μεταβάλλει τις αποστάσεις ανάμεσα στα νανοσωματίδια. Με αυτό τον τρόπο είμαστε σε θέση να αναπτύξουμε ένα μικροηλεκτρομηχανικό σύστημα που βασίζεται στη μεταβολή της αγωγιμότητας του αισθητήρα λόγω της παραμόρφωσης του ελαστικού υποστρώματος. Οι αισθητήρες αυτοί χρησιμοποιήθηκαν για να καλύψουν μικρορευστονικά κανάλια και να ανιχνεύσουν διάφορες τιμές ροής υγρού που περνά μέσα από αυτά.

Πραγματοποιήθηκαν πολλές προσομοιώσεις του μικροηλεκτρομηχανικού συστήματος με την χρήση του λογισμικού COMSOL. Με αυτόν τον τρόπο μπορέσαμε να γνωρίζουμε σημαντικά μεγέθη για την εφαρμογή μας όπως η πίεση που ασκείται στη μεμβράνη, η μετατόπιση που υφίσταται και η παραμόρφωσή της.

Επίσης, πραγματοποιήθηκαν πολλές πειραματικές μετρήσεις σε πολλούς τύπους μικρορευστονικών καναλιών, που διέφεραν μεταξύ τους τόσο ως προς το υλικό κατασκευής, όσο και ως προς τις διαστάσεις. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, υπήρξαν πολλά προβλήματα προς επίλυση. Ωστόσο, μελετήθηκαν αισθητήρες που μπόρεσαν να ανιχνεύσουν και να διακρίνουν ροές που κυμαίνονται από 10 $\mu\text{l}/\text{min}$ έως 1000 $\mu\text{l}/\text{min}$.

Λέξεις Κλειδιά: αισθητήρας ροής, μικρορευστονική, ελαστικό υπόστρωμα, νανοσωματίδια, Μικρο-ήλεκτρο-μηχανικό σύστημα, παραμόρφωση, μικροκανάλι, προσομοίωση, μετρήσεις

Abstract

During this thesis, strain sensors based on the electrical resistance change of a Platinum nanoparticle network were fabricated on flexible polyolefin substrate, using optical lithography techniques and nanoparticle deposition via sputtering, for microfluidic applications. The deformation of the flexible polyolefin substrate changes the distances between the deposited nanoparticles. Therefore, we are able to develop a Microelectromechanical system (MEMS) based on the sensor's conductivity change due to the substrate's deformation. These sensors were used to cover microfluidic channels and detect variable liquid's flow rates that pass through them.

There were made many simulations of that MEMS using COMSOL software. As a result, we were able to calculate important physical quantities such as the applied pressure on the membrane as well as the membrane's displacement and strain.

There were also conducted many experimental measurements on many types of microfluidic channels that differ both on fabrication materials and microchannels' dimensions. During these measurements, there were many problems to solve. However, we were able to test sensors that could detect flow rates 10 $\mu\text{l}/\text{min}$ to 1000 $\mu\text{l}/\text{min}$.

Keywords: flow sensor, microfluidics, flexible substrate, nanoparticles, MEMS, deformation, COMSOL, microchannel, simulation, measurements

1° Κεφάλαιο: Αισθητήρες

1.1	Εισαγωγή.....	1
1.2	Λειτουργία και ταξινόμηση αισθητήρων.....	1
1.3	Χαρακτηριστικά Αισθητήρων	3
	1.3.1 Στατικά Χαρακτηριστικά των αισθητήρων	3
	1.3.2 Δυναμικά Χαρακτηριστικά των αισθητήρων	13
	1.3.3 Χαρακτηριστικά Ιδανικού Αισθητήρα	13
1.4	Ταξινόμηση Αισθητήρων.....	14
	1.4.1 Μηχανικοί Αισθητήρες	15
	1.4.2 Μηχανικές ιδιότητες των μικροκατασκευών και κλιμάκωση μεγέθους	18
	1.4.3 Μικροαισθητήρες Παραμόρφωσης.....	18
	1.4.3.1 Αισθητήρες που βασίζονται στην ηλεκτρική αντίσταση.....	19
	1.4.3.2 Αισθητήρες οπτικών ινών	20
	1.4.3.3 Αισθητήρες παραμόρφωσης με νανοϋλικά	21
1.5	Κατασκευή αισθητήρα παραμόρφωσης με νανοσωματίδια	27
	1.5.1 Κατασκευή ηλεκτροδίων	27
	1.5.2 Εναπόθεση νανοσωματιδίων.....	29
1.6	Κυκλώματα Προσαρμογής.....	30
	1.6.1 Εισαγωγή	30
	1.6.2 Αισθητήρες μεταβολής αντίστασης.....	30
	1.6.3 Αισθητήρες μεταβολής χωρητικότητας	33
	1.6.4 Αισθητήρες μεταβολής επαγωγής	35
	1.6.5 Ηλεκτρονικά Κυκλώματα Προσαρμογής.....	37

2° Κεφάλαιο: Μικρορευστονικά Συστήματα

2.1	Εισαγωγή.....	39
2.2	Ανάπτυξη σύνθετων μικρορευστονικών συστημάτων	41
2.3	Διεργασίες κατασκευής μικρορευστονικών συσκευών	46
	2.3.1 Εισαγωγή	46
	2.3.2 Κατασκευή μικρορευστονικών συσκευών	46

2.3.2.1	Διαδικασία κατασκευής με πυρίτιο και γυαλί	48
2.3.2.2	Διεργασίες κατασκευής από πολυμερές.....	51
2.3.3	Επιφανειακή τροποποίηση κατά την κατασκευή	63
2.3.4	Προοπτικές για την κατασκευή στο μέλλον	64
2.4	Τεχνολογίες μικρορευστονικών συστημάτων	65
2.5	Ανάπτυξη μικρορευστονικών συστημάτων για ειδικές εφαρμογές.....	67
2.5.1	Βιοχημικές αναλύσεις DNA.....	67
2.5.2	Εφαρμογές διάγνωσης ασθενειών	71
2.5.3	Εφαρμογές σε κυτταρικές καλλιέργειες	74
2.6	Προοπτικές.....	77

3^ο Κεφάλαιο: Προσομοιώσεις

3.1	Εισαγωγή	79
3.2	Βασικές αρχές και εξισώσεις ρευστομηχανικής.....	80
3.2.1	Είδη Ροής.....	80
3.2.2	Είδη Ρευστών.....	81
3.2.3	Οριακές Συνθήκες.....	82
3.2.4	Διαφορική εξίσωση συνέχειας	83
3.2.5	Διαφορική εξίσωση ορμής	86
3.2.6	Εξισώσεις Navier - Stokes.....	90
3.3	Προσομοιώσεις ροής σε μικρορευστονικό κανάλι	92
3.3.1	Εισαγωγή	92
3.3.2	Μελέτη ανεξαρτησίας της λύσης από το πλέγμα υπολογισμού	93
3.3.3	Οριακές και αρχικές συνθήκες.....	97
3.3.4	Διαγράμματα προσομοιώσεων.....	98
3.3.5	Προσομοιώσεις για διαφορετικά ύψη καναλιών	100
3.4	Βασικές αρχές και εξισώσεις μηχανικής συνεχούς μέσου.....	101
3.4.1	Εξίσωση στατικής ισορροπίας.....	107
3.5	Προσομοιώσεις παραμόρφωσης ελαστικής μεμβράνης	108
3.5.1	Εισαγωγή	108
3.5.2	Μελέτη ανεξαρτησίας της λύσης από το πλέγμα υπολογισμού	109
3.5.3	Συνολικό πάχος μεμβράνης – κόλλας 60μm	111

3.5.4 Συγκριτικά διαγράμματα για πάχη 60μm και 70μm	114
3.5.4 Συγκριτικά διαγράμματα για διαφορετικά ύψη καναλιών.....	115
3.5.6 Υπολογισμός μεγεθών στη θέση του αισθητήρα.....	116

4° Κεφάλαιο: Πειραματικές Μετρήσεις

4.1 Εισαγωγή	119
4.2 Κανάλι τύπου 1	119
4.3 Κανάλι τύπου 2	122
4.4 Κανάλι τύπου 3	124
4.5 Κανάλι τύπου 4	125
4.6 Κανάλι τύπου 5	131
4.6.1 Τριπλέτα αισθητήρων	132

5° Κεφάλαιο: Συμπεράσματα και Προοπτικές

5.1 Συμπεράσματα.....	149
5.1.1 Προτάσεις για μελλοντική μελέτη.....	149
5.2 Προοπτικές.....	150

6. Βιβλιογραφία

6.1 Ελληνική.....	151
6.2 Ξένη.....	152

Παράρτημα Α	155
--------------------------	-----

Παράρτημα Β	169
--------------------------	-----

1ο Κεφάλαιο: Αισθητήρες

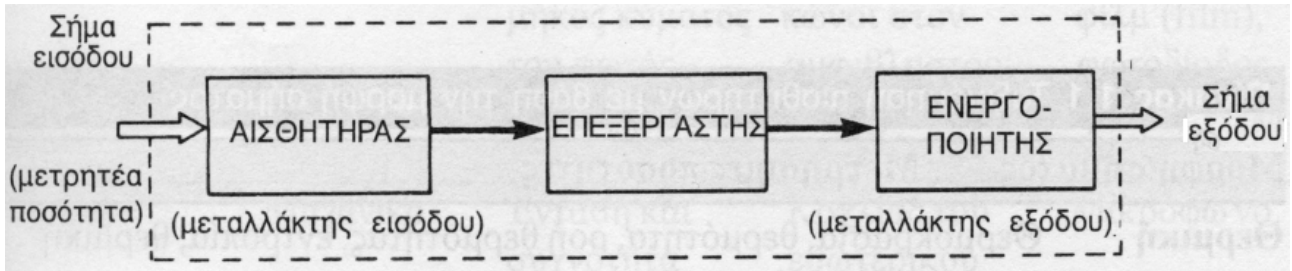
1.1 Εισαγωγή

Τα πρώτα συστήματα αισθητήριων στοιχείων μπορούν να ανιχνευθούν στη φύση, όπου όλοι οι ζωντανοί οργανισμοί, ανάμεσά τους και ο άνθρωπος, διαθέτουν τέτοια συστήματα που τους επιτρέπουν την εύρεση τροφής, την αποφυγή κινδύνων και τη γενικότερη επιβίωσή τους σε ένα ιδιαίτερα δυσχερές φυσικό περιβάλλον. Ο άνθρωπος, ήδη από τις απαρχές τις ιστορίας, προσπάθησε να κατασκευάσει συστήματα ανίχνευσης και μέτρησης, τα οποία θα μπορούσαν να του εξασφαλίσουν περισσότερη τροφή και να του διευκολύνουν τη ζωή. Το πρώτο σύστημα μέτρησης που χρησιμοποιήθηκε από τον άνθρωπο ήταν το νειλόμετρο (nilometer), πριν από 5000 περίπου χρόνια στην αρχαία Αίγυπτο. Όπως υποδηλώνει και το όνομά του, είχε να κάνει με τον ποταμό Νείλο, που διασχίζει την Αίγυπτο. Το νειλόμετρο, στην αρχική του μορφή, ήταν μια ιδιαίτερα απλή κατασκευή, μια προσημειωμένη ξύλινη ή πέτρινη στήλη που τοποθετούνταν κατακόρυφα και χρησιμοποιούνταν για τον έλεγχο της στάθμης των υδάτων του ποταμού. Χάρη στο νειλόμετρο, ο άνθρωπος κατάφερε να προσδιορίσει τις περιόδους πλημμύρας και ξηρασίας του ποταμού και κατ' επέκταση την βέλτιστη εποχή για σπορά, καλλιέργεια και συγκομιδή των παρακείμενων εκτάσεων. Το γεγονός αυτό συνέβαλλε αποφασιστικά στην εξάπλωση της γεωργικής επανάστασης και την εγκαθίδρυση ενός από τους σημαντικότερους πολιτισμούς της ανθρωπότητας. Πολλοί αποδίδουν, αρκετούς αιώνες αργότερα, στον Ήρωνα τον Αλεξανδρινό, την προσπάθεια κατασκευής του πρώτου θερμομέτρου το 40 μ.Χ., με έναν κλειστό σωλήνα γεμάτο με αέρα και ποσότητα νερού. Η συστολή και διαστολή του αέρα, προκαλούσε μετακίνηση στην θέση της διεπιφάνειας αέρα – νερού. Το πρώτο θερμομέτρο υπήρξε αποτέλεσμα των προσπαθειών των Galileo Galilei, Giuseppe Biancani, Santorio Santorio κατά την εποχή της Αναγέννησης το 16^ο και 17^ο αιώνα. Στους αιώνες που ακολούθησαν έγιναν πάρα πολλές έρευνες, αναπτύχθηκαν νέες τεχνικές και χρησιμοποιήθηκαν καινοτόμα υλικά με αποτέλεσμα να υπάρξουν σημαντικοί σταθμοί στην ανάπτυξη των αισθητήρων, οι οποίοι εξελίχθηκαν ραγδαία και μπορούσαν πλέον να ανιχνεύσουν και να μετρήσουν ολοένα και περισσότερα μεγέθη σε μεγαλύτερο εύρος και με υψηλότερη ακρίβεια. Σήμερα οι αισθητήρες παίζουν καταλυτικό ρόλο σε όλους τους τομείς της ζωής μας. Χρησιμοποιούνται εκτενώς στην επιστημονική έρευνα, στην υγεία, στη βιομηχανία αλλά και στην καθημερινότητά μας σε συστήματα κτιρίων, στις οικιακές ηλεκτρικές συσκευές, στα αυτοκίνητα, στα έξυπνα κινητά τηλέφωνα, στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές κ.α..

1.2 Λειτουργία και ταξινόμηση αισθητήρων

Σε ένα σύστημα μέτρησης, το σήμα εισόδου αποτελεί τη μετρήσιμη (measurand) φυσική ή χημική ποσότητα, η οποία καθίσταται ανιχνεύσιμη χάρη στον αισθητήρα ή μεταλλάκτη εισόδου. Ο αισθητήρας μετατρέπει αυτή την ποσότητα σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο ωστόσο χρειάζεται περεταίρω επεξεργασία από ένα προεπεξεργαστή ή μετατροπέα (όπως είναι ένας ενισχυτής, ένα φίλτρο ή ένας μετατροπέας αναλογικού σε ψηφιακό A/D) προκειμένου να αξιοποιηθεί.

Στη συνέχεια, το σήμα θα πρέπει είτε να απεικονιστεί, είτε να καταγραφεί. Κάτι τέτοιο επιτυγχάνεται από μια συσκευή που μετατρέπει το ηλεκτρικό σήμα σε φυσική ή χημική ποσότητα και ορίζεται ως ενεργοποιητής ή μεταλλακτής (μετατροπέας) εξόδου. Στην εικόνα 1.1 απεικονίζονται τα βασικά τμήματα ενός συστήματος μέτρησης, επεξεργασίας και απεικόνισης των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 1.1. [1] Λειτουργικό διάγραμμα συστήματος μέτρησης, επεξεργασίας και απεικόνισης των αποτελεσμάτων.

Η ταξινόμηση των αισθητήρων μπορεί να γίνει με βάση είτε τη λειτουργία που επιτελούν (μέτρηση δύναμης, θερμοκρασίας, ακτινοβολίας), είτε την αρχή λειτουργίας τους (ανίχνευση φωτός, μαγνητοαντίστασης), είτε τις κυριότερες μορφές του σήματός τους (ακτινοβολία, θερμότητα). Εναλλακτικά, θα μπορούσαμε να ταξινομήσουμε τους αισθητήρες σύμφωνα με τη λειτουργία που επιτελούν. Αντίστοιχα οι ενεργοποιητές μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τη μορφή των σημάτων και τη φύση της δημιουργίας τους.

Τύποι Αισθητήρων	Μετρήσιμες ποσότητες
Θερμικοί	Θερμοκρασία, θερμότητα, ροή θερμότητας, εντροπία, θερμική χωρητικότητα κλπ.
Ακτινοβολίας	Ακτίνες-γ, ακτίνες-X, υπεριώδεις, ορατό (φως), υπέρυθρο, μικροκύματα, ραδιοφωνικά κύματα κλπ
Μηχανικοί	Μετατόπιση, ταχύτητα, επιτάχυνση, δύναμη, ροπή στρέψης, πίεση, μάζα, ροή, ακουστικό μήκος κύματος και πλάτος κλπ.
Μαγνητικοί	Μαγνητικό πεδίο, μαγνητική ροή, μαγνητική ροπή, μαγνήτιση, μαγνητική διαπερατότητα κλπ.
Χημικοί	Υγρασία, pH, συγκέντρωση αερίων και ατμών, τοξικά και εύφλεκτα υλικά, ρυπαντές κλπ.
Βιολογικοί	Σάκχαρα, πρωτεΐνες, ορμόνες, αντιγόνα κλπ.
Ηλεκτρικοί	Φορτίο, ένταση, τάση, αντίσταση, αγωγιμότητα, χωρητικότητα, επαγωγή, διηλεκτρική σταθερά, πόλωση, συχνότητα κλπ.

Πίνακας 1.1[2]. Ταξινόμηση των αισθητήρων με βάση τη μορφή του μετρήσιμου μεγέθους.

Ένα άλλο κριτήριο διάκρισης των αισθητήρων αποτελεί η ύπαρξη ή όχι εξωτερικής τροφοδοσίας για τη λειτουργία τους, σε διαμορφωμένους (modulating) και αυτοδιεγερόμενους (self-generating ή self-exciting), αντίστοιχα. Οι αυτοδιεγερόμενοι αισθητήρες παράγουν γενικά πολύ χαμηλή τάση εξόδου, γεγονός που κάνει απαραίτητη την ύπαρξη προεπεξεργαστών για την ενίσχυση του σήματος εξόδου. Αντίθετα, οι διαμορφωμένοι αισθητήρες έχουν ήδη πολύ μεγαλύτερες ενέργειες εξόδου.

1.3 Χαρακτηριστικά Αισθητήρων

1.3.1 Στατικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων

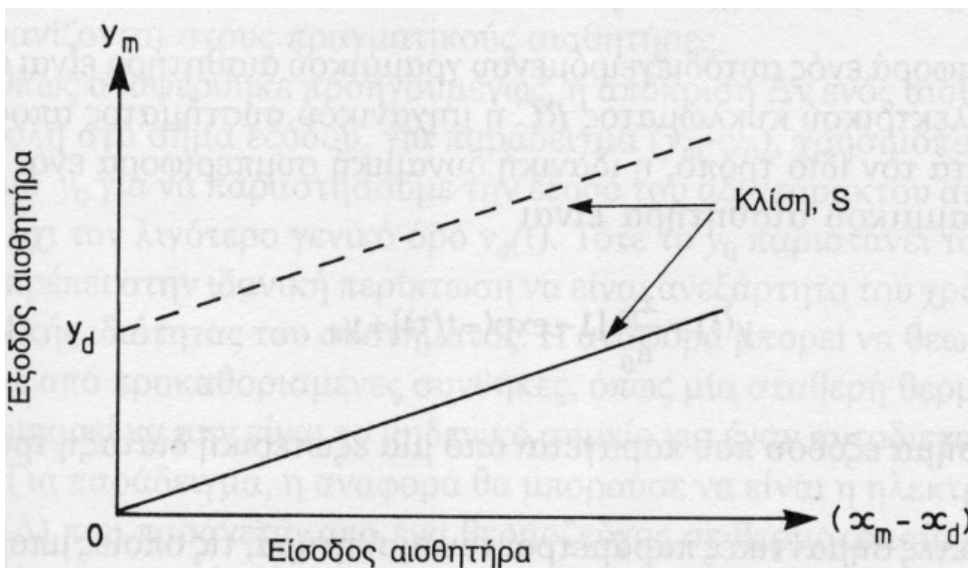
Η ικανότητα και η αποτελεσματικότητα των αισθητήρων αξιολογείται με ορισμένα κριτήρια, τα οποία ονομάζονται στατικά χαρακτηριστικά. Με βάση τα χαρακτηριστικά αυτά μπορούμε:

1. να αξιολογήσουμε την ποιότητα του αισθητήρα και
2. να επιλέξουμε τον κατάλληλο αισθητήρα για τη συγκεκριμένη εφαρμογή μέτρησης.

Τα χαρακτηριστικά αυτά μπορούν να επεκταθούν και στα ηλεκτρονικά κυκλώματα που συνδέονται στην έξοδο του αισθητήρα για να επεξεργαστούν το σήμα του αισθητήρα (πχ. ενίσχυση, φιλτράρισμα, περιορισμός θορύβου, κλπ.). Σε αυτήν την περίπτωση το σήμα εισόδου είναι το σήμα εξόδου του αισθητήρα[8].

Ευαισθησία

Σε έναν ιδανικό αισθητήρα, το σήμα εισόδου είναι ευθέως ανάλογο προς το σήμα εξόδου, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.2. Η κλίση S της καμπύλης στο σχήμα αποτελεί χαρακτηριστικό του αισθητήρα, ορίζεται ως ευαισθησία και δείχνει το χρόνο απόκρισης του αισθητήρα σε μια στιγμιαία μεταβολή του σήματος εισόδου. Το μέγεθος S έχει σταθερή τιμή, όταν μιλάμε για γραμμικό αισθητήρα.



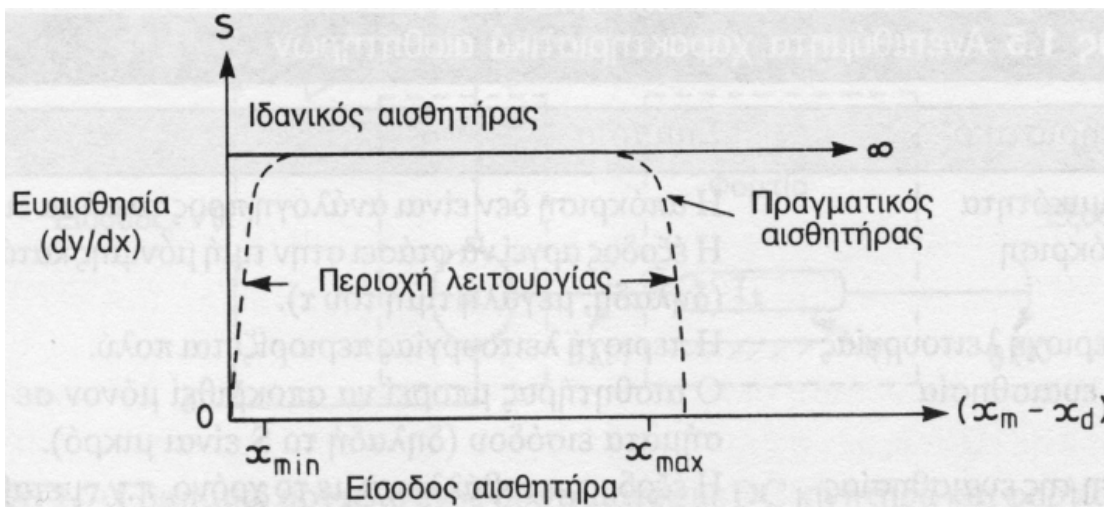
Εικόνα 1.2.[2] Διάγραμμα σήματος εισόδου και εξόδου ενός ιδανικού αυτοδιαγειρόμενου ($y_d=0$, συνεχής γραμμής) και ενός ιδανικού διαμορφωμένου ($y_d \neq 0$, διακεκομμένη γραμμή) αισθητήρα.

Οι μονάδες στις οποίες μετριέται η ευαισθησία διαφέρουν ανάλογα με τη φύση του αισθητήρα και τη μετρούμενη ποσότητα. Για παράδειγμα, υπάρχουν αισθητήρες που μετρούν μικρές αποστάσεις όπου κινείται κάποιο αντικείμενο και παρέχουν τάση. Στην περίπτωση αυτή η ευαισθησία θα εκφράζεται σε volt ανά mm. Εάν η σχέση ανάμεσα στη μετρούμενη ποσότητα και την έξοδο είναι γραμμική, η ευαισθησία μπορεί να εκφράζεται ως προς το όλο εύρος. Εάν δεν είναι γραμμική, τότε

η ευαισθησία της συσκευής θα διαφέρει από περιοχή και θα αναφέρεται ως προς συγκεκριμένες περιοχές τιμών εισόδου[3].

Περιοχή λειτουργίας

Στη πραγματικότητα το εύρος τιμών που μπορεί να ανιχνεύσει ένας αισθητήρας είναι συγκεκριμένο και ορίζεται ως περιοχή λειτουργίας. Πέρα από τα όρια αυτής της περιοχής η ευαισθησία ελαττώνεται (εικόνα 1.3). Κάτι τέτοιο μπορεί να οφείλεται σε διάφορους παράγοντες όπως τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων που απαρτίζουν τη διάταξη.

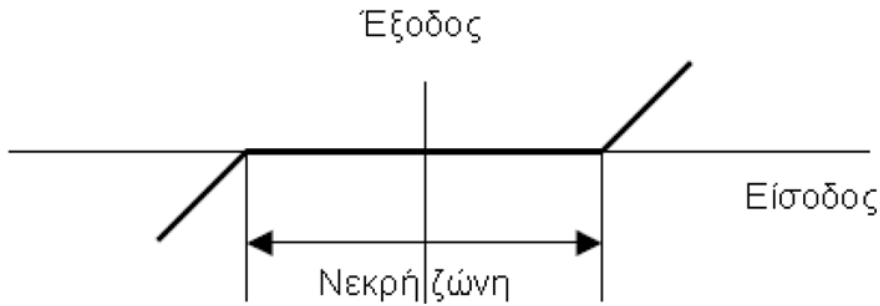


Εικόνα 1.3.[2] Διάγραμμα εισόδου – ευαισθησίας για ιδανικό και πραγματικό αισθητήρα.

Η περιοχή λειτουργίας ενός αισθητήρα εκφράζεται συνήθως με την ελάχιστη και μέγιστη τιμή που είναι ικανός να μετρά. Άλλες έννοιες του εύρους που αναγράφονται συχνά στις προδιαγραφές είναι το «θερμοκρασιακό εύρος», δηλαδή η περιοχή θερμοκρασιών στην οποία μπορεί να λειτουργεί ο αισθητήρας. Συχνά αναφέρονται επίσης το εύρος τιμών πίεσης και το εύρος τιμών υγρασίας.

Νεκρή ζώνη

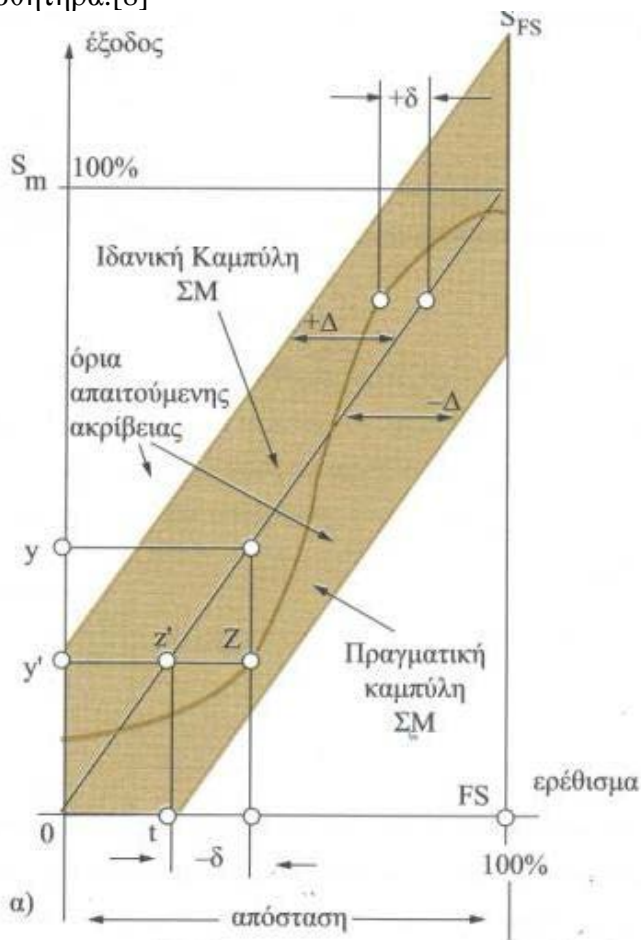
Νεκρή ζώνη (dead-zone, dead-band), αποκαλείται η περιοχή μετρήσεων (συνήθως γύρω από το μηδέν) για την οποία ο αισθητήρας δεν αποκρίνεται στις μεταβολές της μετρούμενης ποσότητας. Η εικόνα 1.4 δείχνει τα χαρακτηριστικά μίας νεκρής ζώνης. Δεν είναι απαραίτητο να υπάρχει νεκρή ζώνη καθ' όλο το εύρος ενός οργάνου και συχνά οι υπολογισίμες νεκρές ζώνες εμφανίζονται κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες[3].



Εικόνα 1.4. Νεκρή ζώνη ενός αισθητήρα [4]

Ακρίβεια

Η ακρίβεια (accuracy) ορίζεται ως η απόκλιση της μέτρησης του αισθητήρα από την πραγματική τιμή του εξωτερικού ερεθίσματος (στην πραγματικότητα ορίζουμε την ανακρίβεια)[8]. Αν πάρουμε μεγάλο αριθμό μετρήσεων από έναν ακριβή αισθητήρα, τότε η μεταξύ τους διασπορά θα είναι μικρή. Η ακρίβεια συγγέεται συχνά με την πιστότητα. Η μεγάλη ακρίβεια δεν σημαίνει κατ' ανάγκην και μεγάλη πιστότητα. Ένας ακριβής αισθητήρας μπορεί να έχει κακή πιστότητα. Κακής πιστότητας μετρήσεις από έναν ακριβή αισθητήρα, σημαίνει ότι η μετρήσεις έχουν συστηματικό σφάλμα, γεγονός το οποίο μπορεί να διορθωθεί με βαθμονόμηση (διακρίβωση) του αισθητήρα.[8]



Εικόνα 1.5. Η συνάρτηση μεταφοράς για την επεξήγηση της έννοιας της ακρίβειας[1]

Πιο συγκεκριμένα, στην εικόνα 1.5 φαίνεται η ιδεατή και η πραγματική συνάρτηση του αισθητήρα. Έστω μια διέγερση x που προκαλεί μια απόκριση y στην ιδεατή καμπύλη. Στην πραγματική καμπύλη προκαλεί μια απόκριση y' η οποία στην ιδεατή καμπύλη αντιστοιχεί στην διέγερση x' . Το διάστημα $x-x'$ ορίζεται ως ανακρίβεια. Στην πράξη η ιδεατή και η πραγματική καμπύλη μπορούν να αντιπροσωπεύουν δυο πραγματικές μετρήσεις του ίδιου αισθητήρα. Η ανακρίβεια είναι το αθροιστικό αποτέλεσμα άλλων παραγόντων όπως της υστέρησης, των σφαλμάτων βαθμονόμησης. Η ανακρίβεια μπορεί να εκφραστεί σε απόλυτη τιμή του σφάλματος μέτρησης, σε ποσοστό της κλίμακας εισόδου, σε ποσοστό του σήματος εξόδου[8].

Διακριτική ικανότητα

Η διακριτική ικανότητα (resolution) με την οποία μία συσκευή ή ένας αισθητήρας ανιχνεύει ή εμφανίζει μία τιμή αναφέρεται στην μικρότερη είσοδο ή αλλαγή εισόδου που μπορεί αυτός να ανιχνεύσει. Εκφράζεται συνήθως ως προς το μικρότερο διάστημα που μπορεί να ανιχνευθεί ή μετρηθεί. Όσο μεγαλύτερη είναι η διακριτική ικανότητα ενός ενδείκτη, τόσο μικρότερο είναι το βήμα που μπορεί ο αισθητήρας να μετρήσει[3].

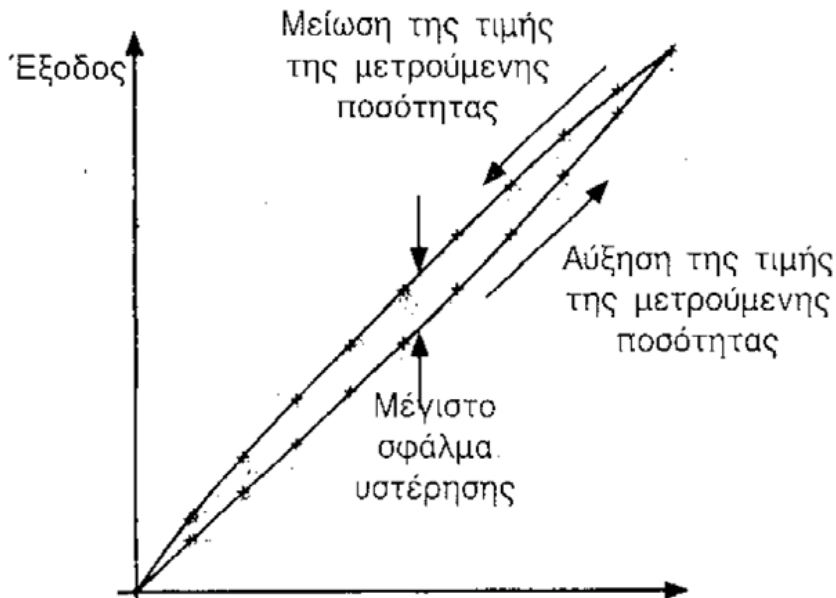
Πιστότητα

Η πιστότητα δε σχετίζεται με τον αριθμό των δεκαδικών ψηφίων με τον οποίο μπορεί να γίνει η μέτρηση, αλλά με το κατά πόσο το αποτέλεσμα που δίνει ο αισθητήρας πλησιάζει την φυσική πραγματικότητα, μέσα σε ένα λογικό εύρος τιμών. Η πιστότητα δίνεται συνήθως «ως ποσοστό επί του εύρους λειτουργίας του αισθητήρα». Για παράδειγμα εάν ένας αισθητήρας πίεσης, περιοχής λειτουργίας 0-10 bar έχει πιστότητα $\pm 1.0\%$ της πλήρους κλίμακας τότε η μέγιστη αβεβαιότητα του αισθητήρα θα είναι ίση με 0,1 bar. Αυτό σημαίνει ότι όταν ο αισθητήρας δίνει ως αποτέλεσμα 1 bar τότε η μέγιστη αναμενόμενη αβεβαιότητα θα είναι ίση με το 10% της τιμής αυτής. Για τον λόγο αυτό θα πρέπει το εύρος λειτουργίας των αισθητήρων να είναι όσο το δυνατόν εγγύτερα στο εύρος των μετρούμενων τιμών, ώστε να εξασφαλίζεται η μέγιστη δυνατή πιστότητα των μετρήσεων. Αν δηλαδή έχουμε μία εφαρμογή στην οποία οι πιέσεις μεταβάλλονται στο διάστημα 0-1 bar είναι λάθος να επιλέξουμε αισθητήρα περιοχής λειτουργίας 0-10 bar.

Υστέρηση

Η υστέρηση προκαλεί διαφορές στην έξοδο που δίνει ένας αισθητήρας, όταν η κατεύθυνση μεταβολής της εισόδου αντιστραφεί. Με τον τρόπο αυτό παράγεται σφάλμα και επηρεάζεται η ακρίβεια της συσκευής. Η εικόνα 1.6 που ακολουθεί παρουσιάζει την επίδραση της υστέρησης με την βοήθεια μίας γραφικής παράστασης. Η είσοδος του αισθητήρα, δηλαδή η μετρούμενη ποσότητα αυξάνεται με σταθερό βήμα. Όταν φτάσει τη μέγιστη δυνατή τιμή μειώνεται με το ίδιο σταθερό βήμα έως ότου λάβει ξανά την τιμή μηδέν. Η γραφική παράσταση δείχνει τη διαφορά που υπάρχει στην έξοδο του αισθητήρα, όταν η μετρούμενη ποσότητα αυξάνεται ή μειώνεται. Αυτό το γεγονός ονομάζεται υστέρηση του συστήματος. Δεν εμφανίζουν υστέρηση όλοι οι αισθητήρες και τα συστήματα μέτρησης. Η υστέρηση προκαλείται από διάφορους παράγοντες, ειδικότερα τη μηχανική τάση και την τριβή. Η χαλάρωση των συστημάτων γρναζιών και ο «τζόγος» σε

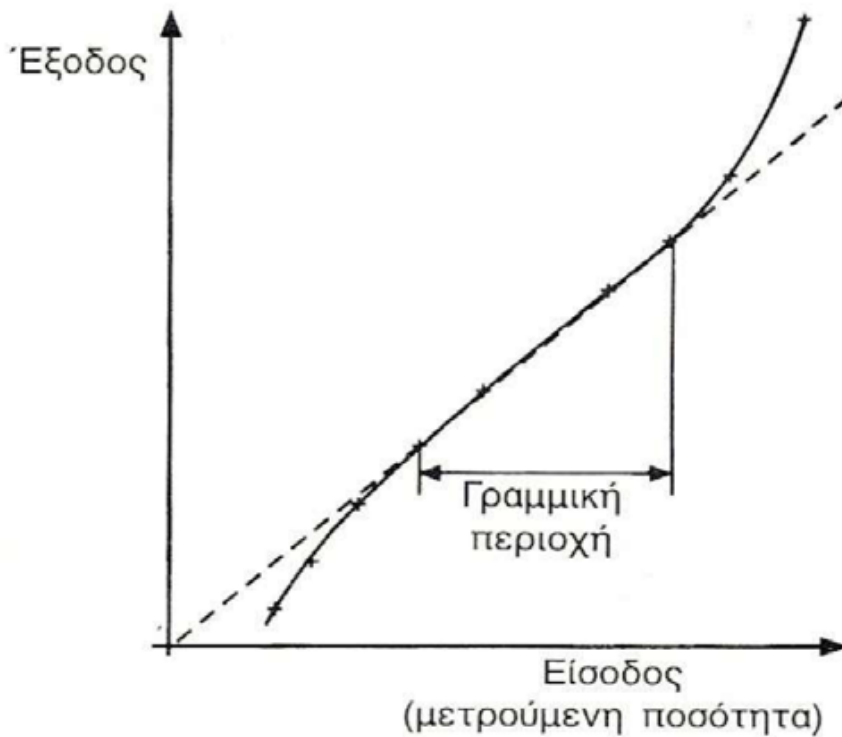
συστήματα κοχλιών αποτελούν επίσης σημαντικά αίτια. Τα συστήματα μέτρησης που είναι πιθανό να εμφανίσουν υστέρηση πρέπει να περιέχουν μηχανικά γρανάζια, ρουλεμάν και άλλα κινητά μέρη, τα οποία να τείνουν να είναι ελαστικά, όπως είναι το λάστιχο, τα πλαστικά και κάποια μέταλλα[3].



Εικόνα 1.6. Τυπικός βρόγχος υστέρησης ενός αισθητήρα [4]

Γραμμικότητα

Η γραμμικότητα (linearity) ενός αισθητήρα αποτελεί το βαθμό στον οποίο η γραφική παράσταση της εξόδου ως προς την είσοδο του αισθητήρα προσεγγίζει μία ευθεία γραμμή. Ένας αισθητήρας μπορεί να είναι γραμμικός σε μία περιοχή τιμών εισόδου όπως απεικονίζεται στην εικόνα 1.7. Επίσης, η γραμμικότητα μπορεί να εκφράζεται ως προς το μέγιστο βαθμό απόκλισης από την ευθεία γραμμή σε όλο το εύρος τιμών εισόδου και τότε αναφέρεται ως ποσοστό επί του εύρους λειτουργίας[3].

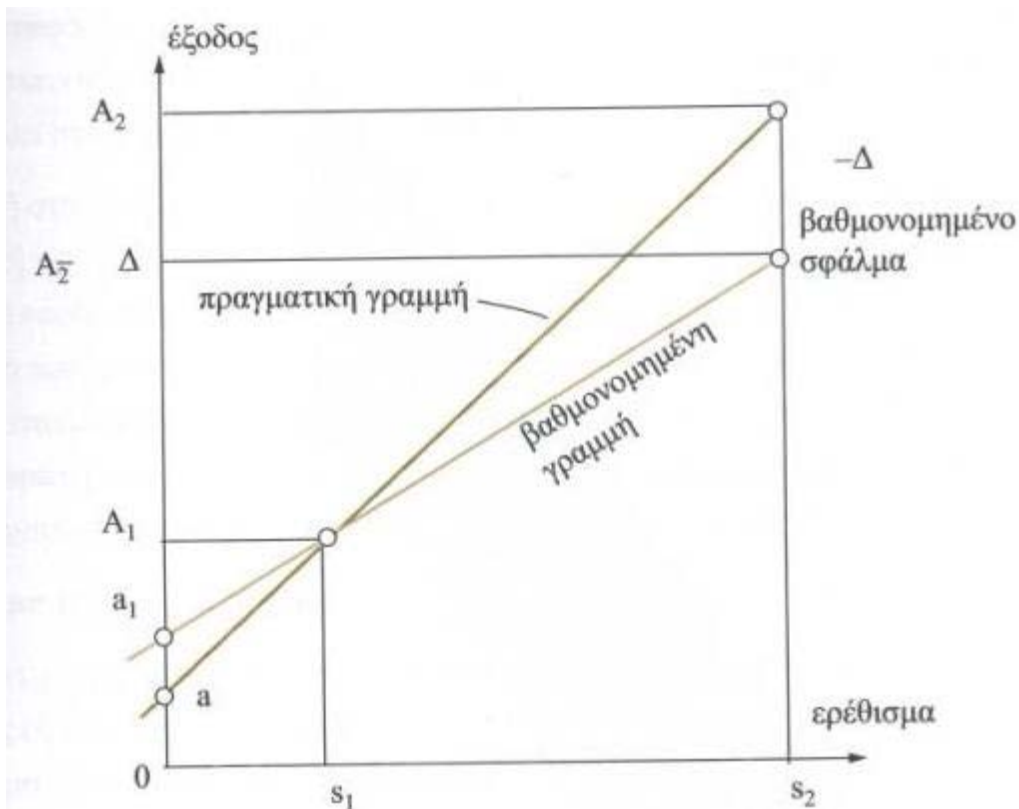


Εικόνα 1.7. Αναπαράσταση γραμμικότητας αισθητήρα [4].

Βαθμονόμηση

Η βαθμονόμηση (calibration) είναι η διαδικασία καθορισμού της συνάρτησης μεταφοράς ενός αισθητήρα ή γενικότερα ενός συστήματος μέτρησης. Η γνώση της συνάρτησης μεταφοράς του αισθητήρα είναι απαραίτητη κατά τη διαδικασία των μετρήσεων, έτσι ώστε μετρώντας την τιμή του ηλεκτρικού σήματος εξόδου που παράγει ο αισθητήρας να υπολογίζεται μέσω της συνάρτησης μεταφοράς και η αντίστοιχη τιμή του μετρούμενου μεγέθους [4]. Από το γεγονός αυτό, φαίνεται πόσο σημαντικό ρόλο παίζει η ακρίβεια με την οποία έχει καθοριστεί η συνάρτηση μεταφοράς του αισθητήρα για την ακρίβεια των μετρήσεων.

Εντούτοις, όταν η βαθμονόμηση δεν γίνεται αναλυτικά (για κάθε σημείο της συνάρτησης μεταφοράς) αλλά μόνον για λίγα αντιπροσωπευτικά σημεία, υπεισέρχονται σφάλματα. Είναι συστηματικό σφάλμα. Σαν παράδειγμα αναφέρουμε αυτό ενός γραμμικού αισθητήρα. Αν για οικονομία χρόνου κάνουμε μόνον δύο μετρήσεις ώστε να προσδιορίσουμε την απόκριση του αισθητήρα και συμβεί η μία εκ των δύο μετρήσεων να είναι λανθασμένη, τότε έχουμε την εικόνα που φαίνεται στην εικόνα 1.8[1].



Εικόνα 1.8. Επεξηγηματικό διάγραμμα του σφάλματος βαθμονόμησης ενός αισθητήρα [1].

Κρίνεται λοιπόν αναγκαίο, κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης να εφαρμόζονται αρκετές τιμές του μετρούμενου φυσικού μεγέθους στον αισθητήρα και να μετρώνται οι αντίστοιχες τιμές του ηλεκτρικού σήματος εξόδου του.

Απόκριση

Η συνάρτηση μεταφοράς $H(s)$ ενός συστήματος, γενικά, είναι:

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (1.1)$$

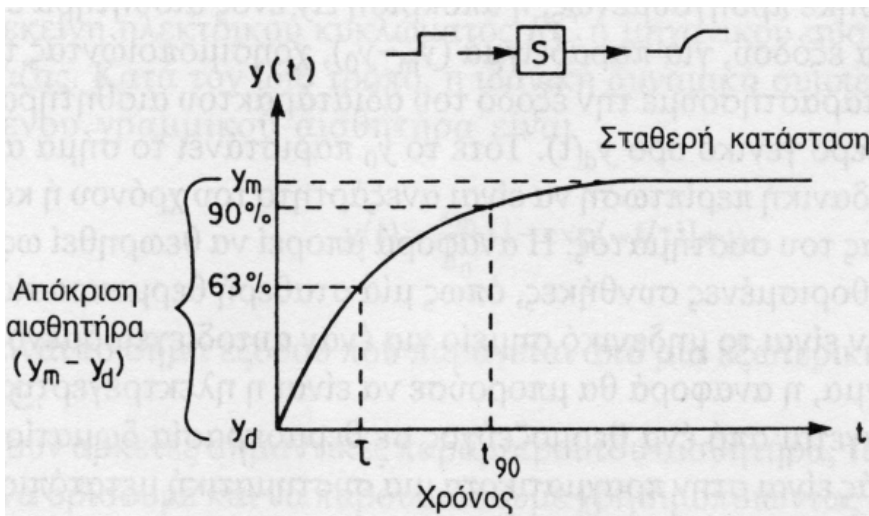
Θα θεωρήσουμε ένα γραμμικό αισθητήρα 1^{ης} τάξης. Η συνάρτηση μεταφοράς του θα είναι:

$$H(s) = \frac{1}{(a_0 + a_1s)} = \frac{1/a_0}{1 + (a_1/a_0)s} \quad (1.2)$$

Ουσιαστικά, πρόκειται για ένα χαμηλοπερατό φίλτρο RC πρώτης τάξης, το οποίο αποτελεί μια ιδιαίτερα καλή προσέγγιση για ένα πολύπλοκο σύστημα ελέγχου.

Συμπεραίνουμε ότι ο λόγος των συντελεστών (a_1/a_0) είναι ο χαρακτηριστικός χρόνος απόκρισης τ

του αισθητήρα και το κέρδος είναι $1/a_0$. Ο χρόνος τ είναι ιδανικά εκθετικός και έχει να κάνει με τις φυσικές ιδιότητες του συστήματος.



Εικόνα 1.9. Διάγραμμα απόκρισης εξόδου σε συνάρτηση με το χρόνο για έναν ιδανικό αισθητήρα [1].

Πρακτικά ως χρόνο απόκρισης θεωρούμε το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί για να φτάσει το σήμα του αισθητήρα στο 90% της τελικής του τιμής και συμβολίζεται με τ_{90} για μια δεδομένη είσοδο(εικόνα 1.9). Φυσικά θέλουμε να είναι όσο το δυνατόν μικρότερος.

Ευστάθεια

Η ευστάθεια (stability) αποτελεί το μέτρο της μεταβολής της εξόδου μίας συσκευής, όταν η είσοδος και οι συνθήκες παραμένουν σταθερά, κατά τη διάρκεια μίας μεγάλης χρονικής περιόδου[3].

Επαναληψιμότητα

Η επαναληψιμότητα μίας συσκευής είναι ο βαθμός στον οποίο αυτή παράγει το ίδιο αποτέλεσμα, όταν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές τροφοδοτείται με ακριβώς την ίδια είσοδο. Στα αγγλικά αποδίδεται με τη λέξη «precision», η οποία συχνά συγχέεται με την καθημερινή έννοια της ακρίβειας (accuracy). Εντούτοις, στην ορολογία των συστημάτων μέτρησης ένας αισθητήρας μπορεί να έχει υψηλή επαναληψιμότητα και να δίνει παρόμοια έξοδο όταν μετρά πολλές φορές μία συγκεκριμένη είσοδο, αλλά, εάν υπάρχει σημαντικό σφάλμα στην έξοδο τότε η έξοδος δεν είναι ακριβής[3].

Χρόνος λειτουργίας

Ο χρόνος λειτουργίας (operating life) ενός αισθητήρα αποτελεί ένδειξη του χρόνου κατά τον οποίο αυτός αναμένεται να λειτουργεί στα πλαίσια των προδιαγραφών του. Εκφράζεται σε μονάδες χρόνου ή με τον αριθμό των λειτουργιών ή των κύκλων λειτουργίας που μπορεί να διεκπεραιώσει με επιτυχία[3].

Ολίσθηση

Ολίσθηση (drift) είναι η αργή μεταβολή του σήματος εξόδου του αισθητήρα, ενώ το μετρούμενο φυσικό μέγεθος παραμένει σταθερό. Μπορεί να οφείλεται σε παράγοντες, όπως η θερμοκρασία λειτουργίας, υγρασία κλπ. Η μακροχρόνια ολίσθηση(long term drift) είναι η μεταβολή των χαρακτηριστικών του αισθητήρα με την πάροδο μεγάλου χρονικού διαστήματος και μπορεί να οφείλεται σε παράγοντες, όπως η διάβρωση τμημάτων του αισθητήρα, η ρύπανση του αισθητήρα, η γήρανση των υλικών κατασκευής κλπ[4].

Σφάλμα

Το σφάλμα ισούται με τη διαφορά ανάμεσα στη μετρούμενη τιμή και την πραγματική τιμή μίας ποσότητας. Τα σφάλματα μπορούν συχνά να εκφράζονται επί τοις εκατό (%), οπότε τότε αντιπροσωπεύουν την ακρίβεια του συστήματος[4].

Στατικό σφάλμα

Το στατικό σφάλμα (static error) είναι ένα σταθερό σφάλμα που υπεισέρχεται καθ' όλο το εύρος τιμών εισόδου μίας συσκευής. Εάν αυτό το σφάλμα είναι γνωστό, τότε μπορεί να αντισταθμιστεί χωρίς να υπάρξει υποβάθμιση της ακρίβειας του συστήματος[3].

Ανοχή

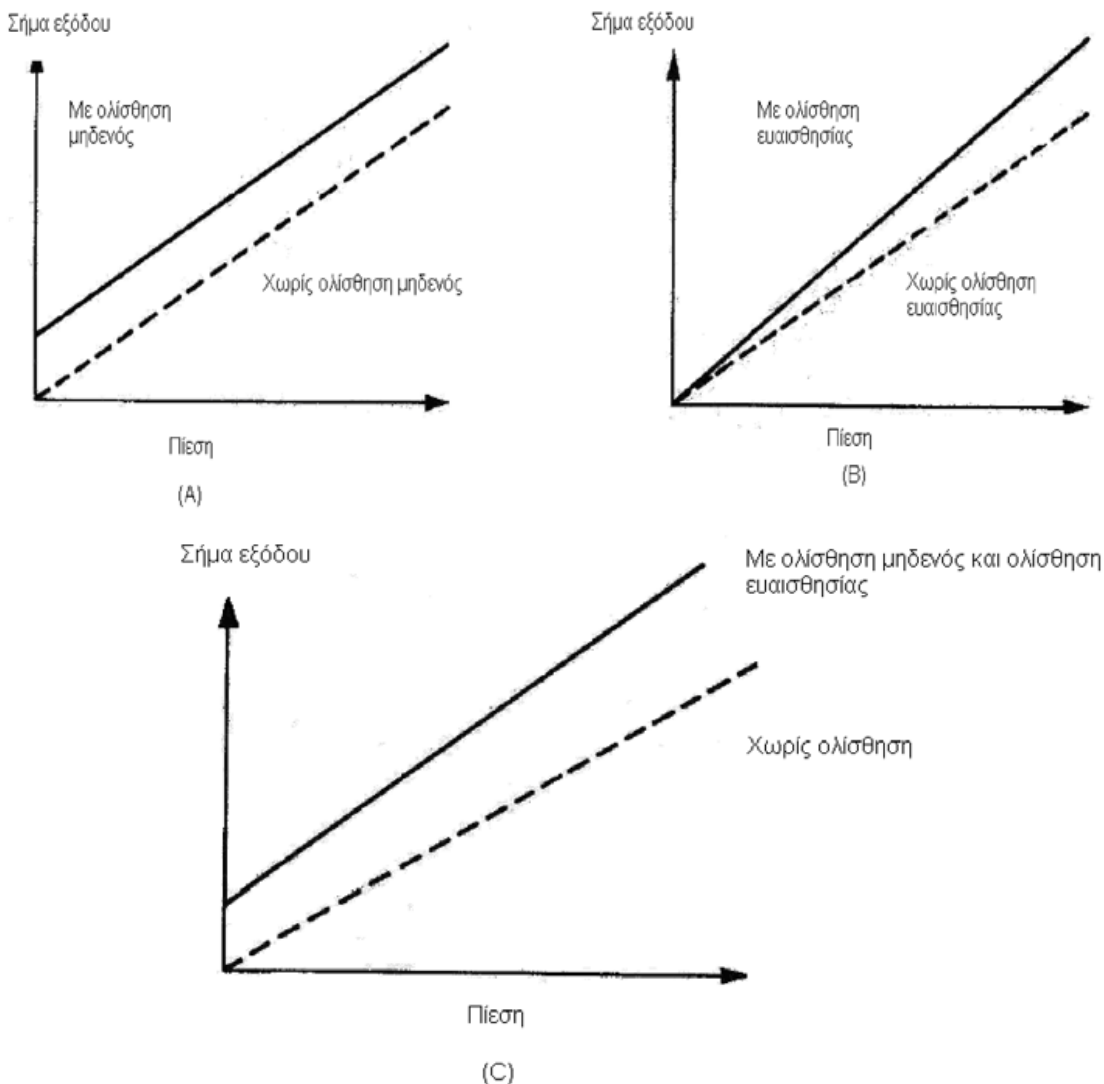
Η ανοχή (tolerance) μίας συσκευής είναι το μέγιστο ποσό σφάλματος που μπορεί να υπάρξει κατά τη διάρκεια λειτουργίας της. Ανάλογα με τη φύση της συσκευής μπορεί συχνά να αναφέρεται η ανοχή αντί της ακρίβειας στις προδιαγραφές[3].

Διαστάσεις

Οι διαστάσεις ενός αισθητήρα ή συστήματος μέτρησης είναι το μέτρο του φυσικού του μεγέθους και αναγράφονται σχεδόν πάντοτε στις προδιαγραφές του[3].

Ευαισθησία στη διαταραχή

Η βαθμονόμηση και τα χαρακτηριστικά ενός αισθητήρα ισχύουν, όταν αυτό λειτουργεί εντός συγκεκριμένου εύρους περιβαλλοντικών παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία, η πίεση, η σχετική υγρασία κ.λ.π. Το εύρος καθορίζεται από τον κατασκευαστή του αισθητήρα. Μεταβολή κάποιων από τις παραμέτρους αυτές ενδέχεται να μεταβάλλει κάποιο από τα στατικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα. Η μεταβολή αυτή ορίζεται ως η ευαισθησία στη διαταραχή. Για τον λόγο αυτό, ένας αισθητήρας πρέπει να ελέγχεται εργαστηριακά δημιουργώντας τεχνητές περιβαλλοντικές καταστάσεις παρόμοιες με αυτές που ο αισθητήρας καλείται να λειτουργήσει. Τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα που μεταβάλλονται είναι κυρίως δύο και είναι γνωστά ως ολίσθηση του μηδενός (zero drift) και ολίσθηση ευαισθησίας (sensitivity drift). Η ολίσθηση του μηδενός είναι το μη μηδενικό σήμα εξόδου του αισθητήρα, όταν το σήμα εισόδου είναι μηδέν, λόγω μεταβολής των περιβαλλοντικών συνθηκών. Μετριέται συνήθως σε $^{\circ}\text{C}^{-1}$ στην περίπτωση (π.χ. βολτόμετρου το οποίο έχει επηρεαστεί από τη μεταβολή της θερμοκρασίας). Αν ένας αισθητήρας επηρεάζεται από περισσότερες από μία περιβαλλοντικές παραμέτρους, τότε αυτός χαρακτηρίζεται από αντίστοιχες σε αριθμό ολισθήσεις του μηδενός[3]. Χαρακτηριστική ολίσθηση μηδενός αισθητήρα πίεσης, φαίνεται στην εικόνα 1.10.



Εικόνα 1.10. α) Ολίσθηση μηδενός, β) Ολίσθηση ευαισθησίας και γ) Συνδυασμένη επίδραση των δύο ολισθήσεων [4].

1.3.2 Δυναμικά χαρακτηριστικά αισθητήρων

Η απόκριση ενός αισθητήρα σε ένα μεταβαλλόμενο σήμα εισόδου είναι διαφορετική από την απόκριση του σε ένα σταθερό ή αργά μεταβαλλόμενο σήμα εισόδου. Η απόκριση χαρακτηρίζεται από μια δυναμική συμπεριφορά που δε μπορεί να περιγράψει ικανοποιητικά από τα στατικά χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν παραπάνω. Οι λόγοι αυτής της διαφοροποίησης είναι ότι οι αισθητήρες περιλαμβάνουν στοιχεία που συσσωρεύουν ενέργεια όπως μάζες, πυκνωτές, επαγωγικά ή θερμικά στοιχεία κ. α. Τα δυναμικά χαρακτηριστικά ενός αισθητήρα προσδιορίζονται εξετάζοντας την απόκριση του σε διάφορες κυματομορφές του σήματος εισόδου. Αυτές μπορεί να είναι κυματομορφές ώθησης, βήματος, γραμμικές, ημιτονοειδείς ή θορύβου. [4]

1.3.3 Χαρακτηριστικά Ιδανικού Αισθητήρα

Θα μπορούσαμε να καταλήξουμε στα χαρακτηριστικά που θα μπορούσε να έχει ένας ιδανικός αισθητήρας και προσπαθούμε να προσεγγίσουμε. Ο ιδανικός αισθητήρας παρουσιάζει απόλυτα γραμμική απόκριση απαλλαγμένη από οποιοδήποτε θόρυβο. Το σημείο αναφοράς της εξόδου y_0 είναι μηδέν. Ο χρόνος απόκρισης είναι μηδενικός, ενώ το εύρος συχνοτήτων είναι άπειρο για στιγμιαία απόκριση. Κατ' επέκταση ο χρόνος τ_{90} είναι και αυτός μηδέν. Επίσης θέλουμε η περιοχή λειτουργίας και η διακριτική ικανότητα να είναι άπειρες. Τέλος ένας ιδανικός αισθητήρας πρέπει να εμφανίζει υψηλή ευαισθησία, η οποία να είναι σταθερή σε ολόκληρη την περιοχή λειτουργίας.

Με στόχο την επίτευξη αυτών των ιδανικών χαρακτηριστικών καλούμαστε να αντιμετωπίσουμε προβλήματα, τα οποία είναι κοινά για όλους τους πραγματικούς αισθητήρες. Αυτά είναι:

- Η εμφάνιση μη γραμμικότητας όταν η απόκριση δεν είναι ανάλογη προς το σήμα εισόδου.
- Η καθυστέρηση απόκρισης, όταν ο αισθητήρας αργεί να φτάσει στη μόνιμη κατάσταση.
- Περιορισμένη περιοχή λειτουργίας.
- Χαμηλή ευαισθησία, δηλαδή απόκριση μόνο σε μεγάλα σήματα εισόδου.
- Ολίσθηση της ευαισθησίας και της αναφοράς, όταν μεταβάλλονται χωρίς να μεταβάλλεται το μετρούμενο μέγεθος.
- Η αντιστάθμιση (offset), το οποίο είναι ένα συστηματικό λάθος στην έξοδο του αισθητήρα.
- Η γήρανση, που εμφανίζεται ως μεταβολή στην έξοδο με την πάροδο του χρόνου.
- Η παρεμβολή, η οποία σχετίζεται με την ευαισθησία στις εξωτερικές συνθήκες.
- Η υστέρηση που είναι ένα τυχαίο σφάλμα στη καμπύλη εισόδου – εξόδου.
- Ο τυχαίος θόρυβος

Τα στοιχεία που υποδεικνύουν την ορθή εφαρμογή ενός αισθητήρα είναι:

1. Η απόδοση
2. Το κόστος
3. και η αξιοπιστία

1.4 Ταξινόμηση Αισθητήρων

Η ευρεία χρήση των αισθητήρων σε όλους τους τομείς της ζωής μας, μας επιτρέπει να κατανοήσουμε ότι η ταξινόμηση των αισθητήρων μπορεί να γίνει με πολλά διαφορετικά κριτήρια. Μια μέθοδος διαχωρισμού των αισθητήρων βασίζεται στο μέγεθος. Έτσι, έχουμε τους αισθητήρες με κανονικό μέγεθος και τους μικροαισθητήρες. Ο αισθητήρας που θα μελετηθεί στη συνέχεια, ανήκει στην ομάδα των μικροαισθητήρων. Ας δούμε όμως ορισμένα στοιχεία για τους μικροαισθητήρες.

Μια διάταξη με αισθητήριο στοιχείο με φυσική διάσταση της κλίμακας του χιλιοστού ($\leq 100\mu m$), μπορεί να θεωρηθεί μικροαισθητήρας. Η ελάττωση του μεγέθους ενός αισθητήρα έχει σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερο εύρος εφαρμογής. Επιπλέον μπορούμε να έχουμε χαμηλότερο βάρος, που προσφέρει μεγαλύτερη ευκολία κατά τη μεταφορά. Τέλος, μπορεί να περιορίσει το κόστος παραγωγής, λόγω της χρήσης λιγότερου υλικού. Όλοι αυτοί οι λόγοι μπορούν να αυξήσουν τις εφαρμογές ενός αισθητήρα.

Τις περισσότερες φορές το ουσιαστικότερο στοιχείο είναι το κόστος ενός αισθητήρα. Κατά τον περιορισμό του μεγέθους ενός αισθητήρα μειώνεται η χρήση των υλικών, αλλά αυξάνεται το κόστος επεξεργασίας τους. Η μικροηλεκτρονική τεχνολογία έδωσε τη δυνατότητα κατασκευής μικρών και αξιόπιστων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Πάνω σε αυτή τη τεχνολογία και τα επιτεύγματά της μπόρεσε να βασιστεί η παραγωγή αλλά και η ανάγκη για μικροαισθητήρες.

Τα βασικά μέρη που απαρτίζουν ένα σύστημα με σκοπό την επεξεργασία πληροφορίας είναι ένας αισθητήρας, ένας επεξεργαστής και ένας ενεργοποιητής, όπως φαίνεται στο σχήμα. Σήμερα πλέον γίνεται προσπάθεια ενοποίησης του αισθητήρα και του επεξεργαστή. Κάτι τέτοιο αποσκοπεί στη μείωση του θορύβου, τη γραμμικοποίηση της εξόδου και την αντιστάθμιση για θερμοκρασία ή υγρασία.

Έτσι όλες αυτές οι ενοποιημένες διατάξεις χαρακτηρίζονται ως ολοκληρωμένοι ή έξυπνοι αισθητήρες (integrated ή smart sensors).

Αντίστοιχα, τα μικρορομπότ ή μικρο-αυτόματα αποτελούν ολοκληρωμένα συστήματα μετρήσεων ή μικρο-όργανα, με στοιχεία εξελιγμένης αρχιτεκτονικής (π.χ. έλεγχος κλειστού βρόχου).

Βέβαια, ο πιο συνηθισμένος τρόπος κατηγοριοποίησής τους στηρίζεται στο είδος της μετρήσιμης ποσότητας που καλούνται να «μεταφράσουν» σε ηλεκτρικό σήμα. Στον επόμενο πίνακα παρατίθενται αυτές οι κατηγορίες αισθητήρων, με βάση τη μορφή σήματος που μετρούν καθώς και τις αντίστοιχες μετρήσιμες ποσότητες, όπου βρίσκουν εφαρμογή.

Τύπος Αισθητήρα	Μορφή σήματος	Μετρήσιμες Ποσότητες
Θερμικοί Αισθητήρες	Θερμική	Θερμοκρασία, θερμότητα, ροή θερμότητας, εντροπία, θερμική χωρητικότητα κλπ
Αισθητήρες Ακτινοβολίας	Ακτινοβολία	Ακτινες-γ, Ακτίνες-X, υπεριώδης ακτινοβολία, ορατό φως, υπέρυθρη ακτινοβολία, μικροκύματα, ραδιοφωνικά κύματα κλπ
Μηχανικοί Αισθητήρες	Μηχανική	Μετατόπιση, Ταχύτητα, επιτάχυνση, δύναμη, ροπή στρέψης, πίεση, μάζα, ροή, ακουστικό μήκος κύματος και πλάτος κλπ
Μαγνητικοί Αισθητήρες	Μαγνητική	Μαγνητικό πεδίο, μαγνητική ροή, μαγνητική ροπή,

		μαγνήτιση, μαγνητική διαπερατότητα κλπ
Χημικοί Αισθητήρες	Χημική	Υγρασία, pH, συγκέντρωση αερίων και ατμών, τοξικά και εύφλεκτα υλικά, ρυπαντές κλπ
Βιολογικοί Αισθητήρες	Βιολογική	Σάκχαρα, πρωτεΐνες, ορμόνες, αντιγόνα κλπ

Πίνακας 1.2. Ταξινόμηση των αισθητήρων με βάση την μορφή σήματος [2].

Ο αισθητήρας που καλούμαστε να μελετήσουμε και να προσομοιάσουμε στην παρούσα εργασία ανήκει στην κατηγορία των μηχανικών αισθητήρων. Συγκεκριμένα, ο αισθητήρας έχει τη δυνατότητα να ανιχνεύει την πίεση που οφείλεται στη ροή απιονισμένου νερού σε μικρορευστονικό κανάλι. Η πίεση που δέχεται ο αισθητήρας μετατοπίζει κάθετα κάποιες περιοχές του και προκαλεί μεταβολές στο ηλεκτρικό σήμα που λαμβάνουμε.

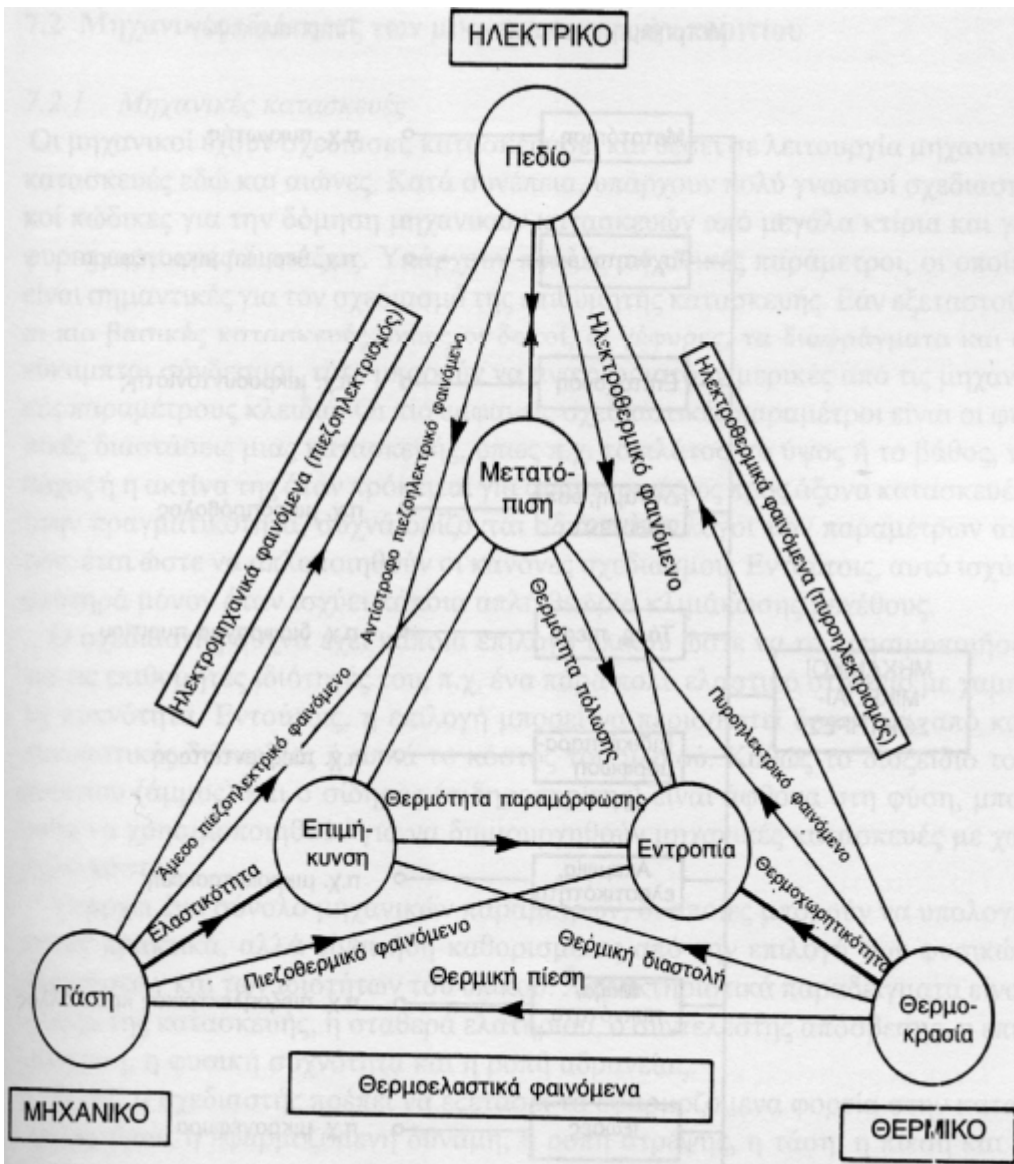
1.4.1 Μηχανικοί Αισθητήρες

Η κατηγορία των μηχανικών αισθητήρων περιλαμβάνει ένα τεράστιο εύρος εφαρμογών. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο κατέχουν τη μερίδα του λέοντος στην ανάπτυξη και την αγορά αισθητήρων. Στο πίνακα 1.3 έχουμε μια απεικόνιση των βασικότερων μετρήσιμων μηχανικών ποσοτήτων. Μέσα από αυτή τη λίστα μπορούμε να ορίσουμε και τους πιο συνηθισμένους τύπους μηχανικών αισθητήρων.

1. Θέση, μετατόπιση	7. Ακαμψία, ελαστικότητα
2. Ταχύτητα (διάνυσμα, απόλυτο μέγεθος)	8. Μάζα, πυκνότητα
3. Επιτάχυνση	9. Ρυθμός ροής
4. Δύναμη, ροπή στρέψης	10. Σχήμα, τραχύτητα
5. Τάση, Πίεση	11. Ιξώδες
6. Παραμόρφωση	12. Άλλες (Ακουστικές/Υπερηχητικές)

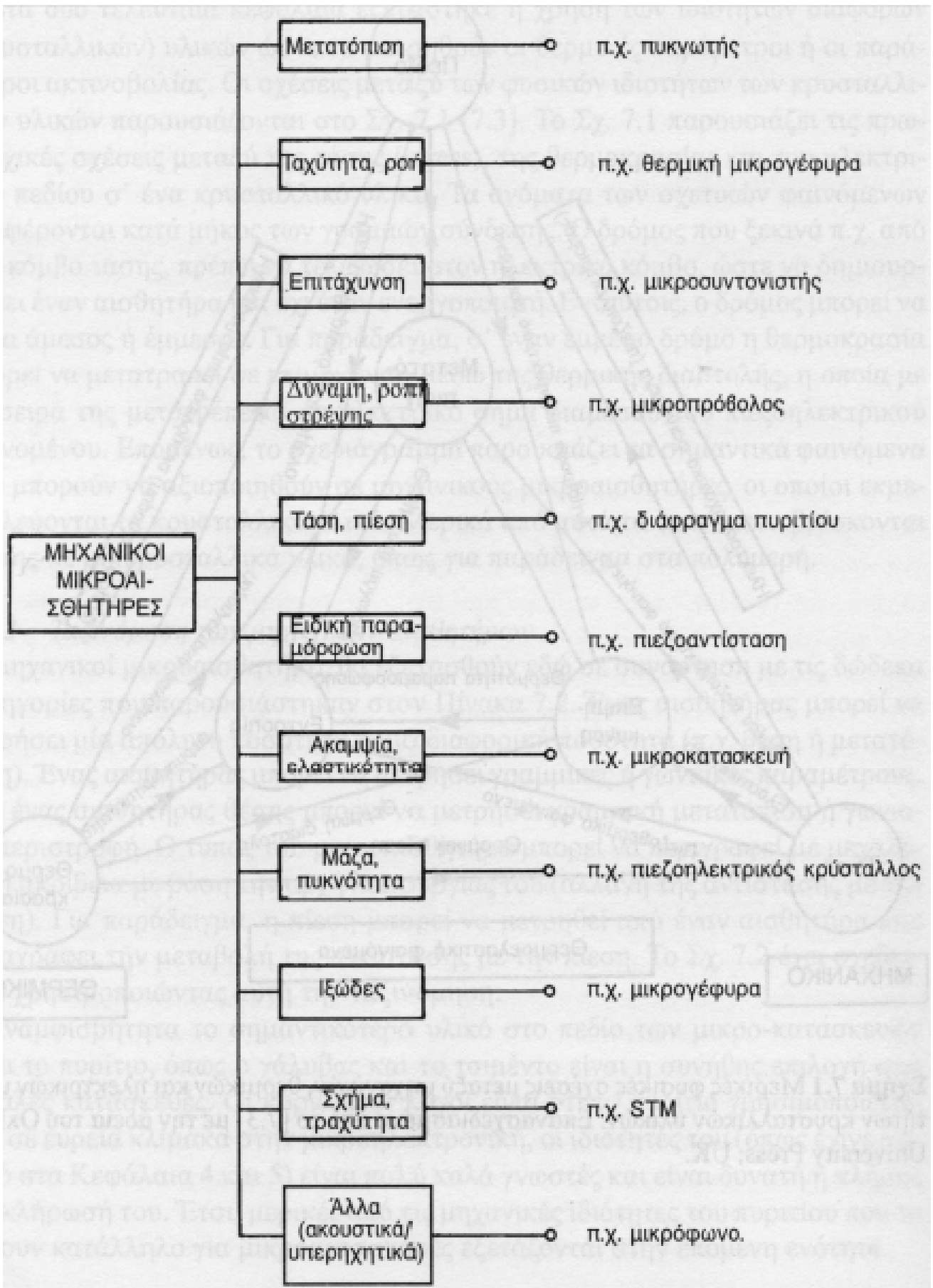
Πίνακας 1.3. Απεικόνιση των βασικότερων μετρήσιμων μηχανικών ποσοτήτων [2].

Η εικόνα 1.11 μας δείχνει με παραστατικό τρόπο τα σημαντικά φαινόμενα που μπορούμε να εκμεταλλευτούμε με μηχανικούς μικροαισθητήρες. Με αυτό τον τρόπο συνδέονται οι πρωταρχικές σχέσεις των φυσικών ιδιοτήτων ενός υλικού. Τα ονόματα των αντίστοιχων φαινομένων εμφανίζονται πάνω από κάθε γραμμή σύνδεσης. Όπως μπορούμε να καταλάβουμε η κάθε διαδρομή να καταλήγει στον ηλεκτρικό κόμβο, εφόσον μιλάμε για αισθητήρα. Έτσι μπορεί να είναι άμεση ή να παρεμβάλλονται ενδιάμεσα και άλλοι κόμβοι.



Εικόνα 1.11. Μερικές φυσικές σχέσεις μεταξύ μηχανικών, θερμικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων κρυσταλλικών υλικών [2].

Ο τύπος ενός μικροαισθητήρα μπορεί να προσδιοριστεί με αρκετή ακρίβεια σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας του (π.χ. αλλαγή της αντίστασης σε συνάρτηση με την πίεση). Στο γεγονός αυτό βασίζεται και η εικόνα 1.12, το οποίο προτείνει έναν αποδοτικό τρόπο ταξινόμησης των μηχανικών αισθητήρων. Ο αισθητήρας με τον οποίο πρόκειται να ασχοληθούμε στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή υπάγεται στους μηχανικούς μικροαισθητήρες ειδικής παραμόρφωσης ή απλά παραμόρφωσης.



Εικόνα 1.12. Διάγραμμα ταξινόμησης μηχανικών μικροαισθητήρων [2].

1.4.2 Μηχανικές ιδιότητες των μικροκατασκευών και κλιμάκωση μεγέθους

Ο σχεδιασμός μιας κατασκευής, γενικά, εξαρτάται από πολλές μηχανικές παραμέτρους με τις σημαντικότερες να είναι οι φυσικές διαστάσεις της όπως το πλάτος, το ύψος ή το βάθος, το πάχος ή η ακτίνα της, όταν πρόκειται για συμμετρικές ως προς τον άξονα κατασκευές. Μια άλλη παράμετρος είναι η επιλογή του κατάλληλου υλικού, ώστε να έχει επιθυμητές ιδιότητες. Αυτή η επιλογή καθίσταται, πολλές φορές, δύσκολη, λόγω κατασκευαστικών δυσχερειών ή εξαιτίας του κόστους του ίδιου του υλικού. Επίσης, οφείλουμε να λάβουμε σοβαρά υπόψη τα εφαρμοζόμενα φορτία στην κατασκευή, όπως η ασκούμενη δύναμη, η ροπή στρέψης, η τάση, η πίεση και η απόκριση της κατασκευής στα παραπάνω μεγέθη.

Όπως έχουμε ήδη προαναφέρει βασιζόμενοι σε τεχνικές που προέρχονται από τη μικροηλεκτρονική τεχνολογία, είμαστε σε θέση να κατασκευάσουμε μηχανικές διατάξεις με διαστάσεις της τάξης μm . Καλούμαστε όμως να απαντήσουμε ποιές είναι οι ομοιότητες και οι διαφορές των μηχανικών κατασκευών σε μικρόκοσμο και μακρόκοσμο. Η απάντηση είναι ότι η φυσική αρχή λειτουργίας μιας παραμέτρου καθορίζει την επίδραση της γεωμετρικής κλιμάκωσης μεγέθους. Υπάρχουν παράμετροι που είναι ανεξάρτητες από τη κλιμάκωση όπως για παράδειγμα ο ρυθμός ροής, η επιφανειακή τάση και η θερμοχωρητικότητα. Αντίθετα, υπάρχουν άλλες παράμετροι που εξαρτώνται από το μέγεθος και δεν κλιμακώνονται, όπως η πυκνότητα. Πρακτικά, οι μηχανικές κατασκευές δεν κλιμακώνονται πάντοτε ισοτροπικά, όπως θα επιθυμούσαμε. Στόχος μας είναι να σχεδιάσουμε μικροκατασκευές με τέτοιο τρόπο ώστε να συνεχίζουν να ισχύουν οι ισοτροπικές γραμμικές θεωρίες και σε μικροσκοπική κλίμακα.

Η ελάττωση του μεγέθους στα συστήματα μέτρησης οδήγησε στην εξέλιξη των μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων (MEMS), τα οποία συνοδεύονται από σημαντικά πλεονεκτήματα:

- A. Μεγαλύτερη φορητότητα και αύξηση του πλήθους εφαρμογών, λόγω του μικρότερου βάρους και μεγέθους.
- B. Ελάττωση του κόστους, λόγω της χρήσης λιγότερων υλικών.
- Γ. Βελτιστοποίηση χαρακτηριστικών όπως η ακρίβεια, η ευαισθησία, ο χρόνος απόκρισης κ.α.

Παρόλαυτά, η σμίκρυνση των δομών έχει φέρει και ορισμένα μειονεκτήματα:

- A. Δυσκολίες στην κατασκευή
- B. Ακριβότερες τεχνικές κατασκευής
- Γ. Μεγαλύτερη ευπάθεια.

Το σύστημα μέτρησης με τον αισθητήρα ροής που εξετάζουμε (μικροαισθητήρας παραμόρφωσης) ανήκει στην κατηγορία των μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων (MEMS) καθώς μετατρέπει τις μεταβολές στην παραμόρφωση της μεμβράνης σε μεταβολές της μετρούμενης αντίστασης.

1.4.3 Μικροαισθητήρες Παραμόρφωσης

Οι μικροαισθητήρες παραμόρφωσης, όπως ο προς μελέτη αισθητήρας, εμφανίζουν εκτεταμένη χρήση τόσο σε βιομηχανικές, όσο και σε εμπορικές εφαρμογές και μπορούν να χωριστούν σε δυο κατηγορίες:

- Σε αισθητήρες που βασίζονται στην ηλεκτρική αντίσταση
- Σε αισθητήρες οπτικών ινών
- Σε αισθητήρες παραμόρφωσης με νανοϋλικά

1.4.3.1 Αισθητήρες που βασίζονται στην ηλεκτρική αντίσταση

Ήδη από τη δεκαετία του 1930 μετρούν την παρουσία τους οι αισθητήρες που βασίζονται στην ηλεκτρική αντίσταση. Η αρχή λειτουργίας τους στηρίζεται στην παραμόρφωση που υφίσταται η επιφάνειά τους, η οποία μεταφράζεται σε μεταβολή της αντίστασης ενός μεταλλικού ελάσματος, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.13. Η αντίσταση του μεταλλικού ελάσματος προκύπτει από την εξίσωση:

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (1.3)$$

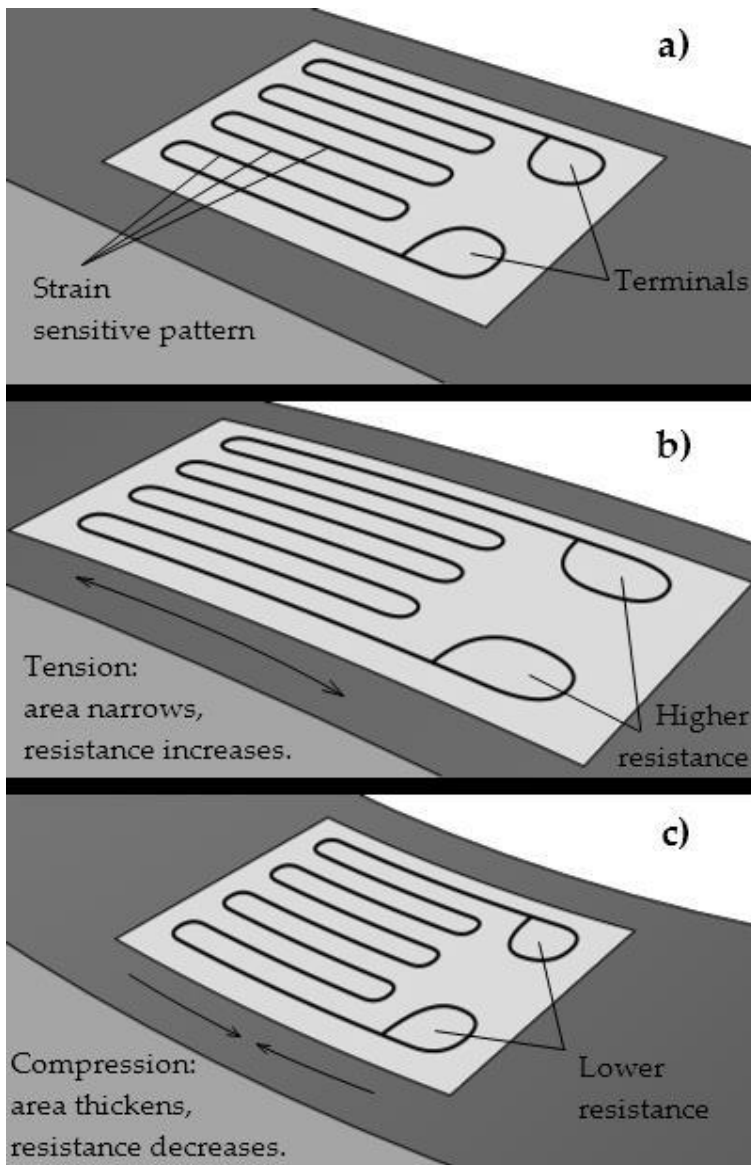
όπου

R: η αντίσταση του μεταλλικού ελάσματος

L: το μήκος του και

A: το εμβαδόν της επιφάνειας που καταλαμβάνει

Όπως μπορούμε να συμπεράνουμε από την παραπάνω σχέση, οποιαδήποτε μεταβολή στο μήκος ή στο εμβαδόν του μεταλλικού ελάσματος έχει σαν αποτέλεσμα μεταβολή της αντίστασής του όπως φαίνεται στην εικόνα 1.13.



Εικόνα 1.13. Σχηματική αναπαράσταση αισθητήρα παραμόρφωσης α) σε ηρεμία, b) σε εφελκυσμό και c) σε συμπίεση [4]

Συνήθως, αυτή η κατηγορία αισθητήρων έχουν αντίσταση αναφοράς R_{ref} της τάξης των 120 Ω και μεταβολές στην αντίσταση κυμαίνονται από 2 έως 5 Ω . Το γεγονός αυτό οδηγεί σε ένα μετρητικό παράγοντα (g-factor) της τάξης του 2. Σε περίπτωση που αντικαταστήσουμε το μεταλλικό έλασμα με ελάσματα από ντοπαρισμένο πυρίτιο ο μετρητικός παράγοντας (g-factor) αυξάνεται ραγδαία και αποκτά τιμές από 100 έως 175. Περιοριστικό γεγονός παραμένει το μεγάλο κόστος που παρουσιάζουν τέτοιοι αισθητήρες ημιαγωγών. Για την μέτρηση της αντίστασης σε τέτοιες διατάξεις, η χρήση ειδικών κυκλωμάτων προσαρμογής είναι μονόδρομος, ώστε να έχουμε μεγάλο σήμα για μικρές αλλαγές της αντίστασης. Η ιδιαίτερα σημαντική λειτουργία και επιλογή αυτών των ειδικών κυκλωμάτων προσαρμογής, θα αναλυθεί εκτενώς παρακάτω.

1.4.3.2 Αισθητήρες οπτικών ινών

Η αρχή λειτουργίας των αισθητήρων οπτικών ινών (Fibre Optic Sensors) βασίζεται στη μεταβολή του μήκους κύματος του διερχόμενου φωτός κατά την συστολή ή τη διαστολή τους. Ουσιαστικά λειτουργούν ως αισθητήρες ανίχνευσης παραμόρφωσης. Η συνηθέστερη χρήση τους αφορά τη μέτρηση και παρακολούθηση της ανάπτυξης των παραμενουσών τάσεων. Οι πιο γνωστοί εκπρόσωποι από τους αισθητήρες οπτικών ινών (Fibre Optic Sensors) είναι:

1. οι αισθητήρες οπτικής ίνας Bragg (Fibre Bragg Grating)

Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην παραμόρφωσή τους, η οποία με τη σειρά της προκαλεί μετατόπιση στο μήκος κύματος Bragg (σχήμα), το οποίο δίνεται από τη σχέση:

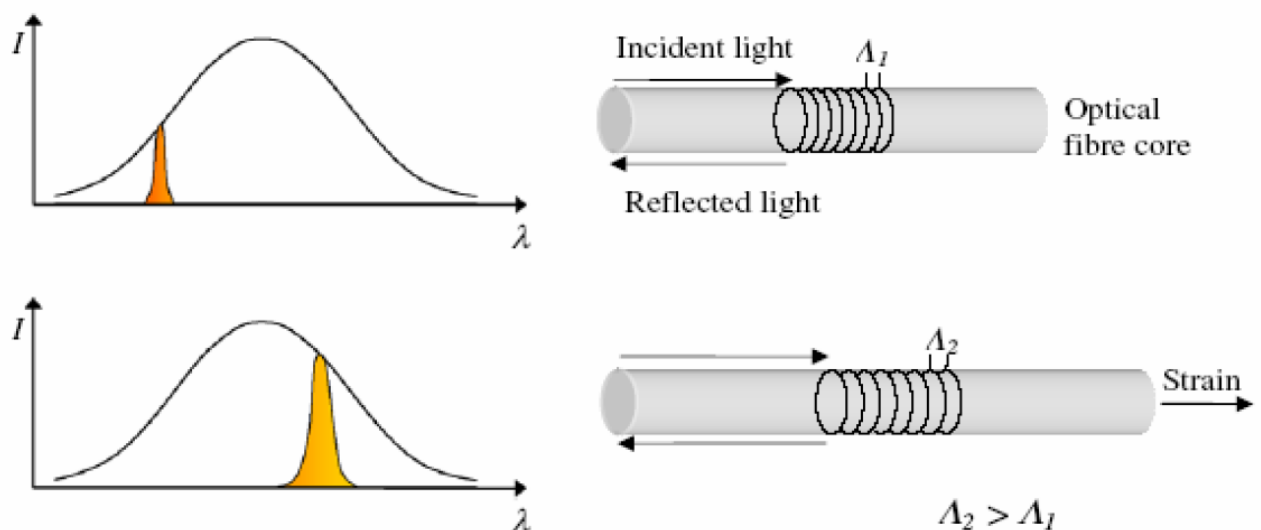
$$\lambda = 2n\Lambda \quad (1.4)$$

όπου

n: ο δείκτης διάθλασης

Λ : η περίοδος διάθλασης

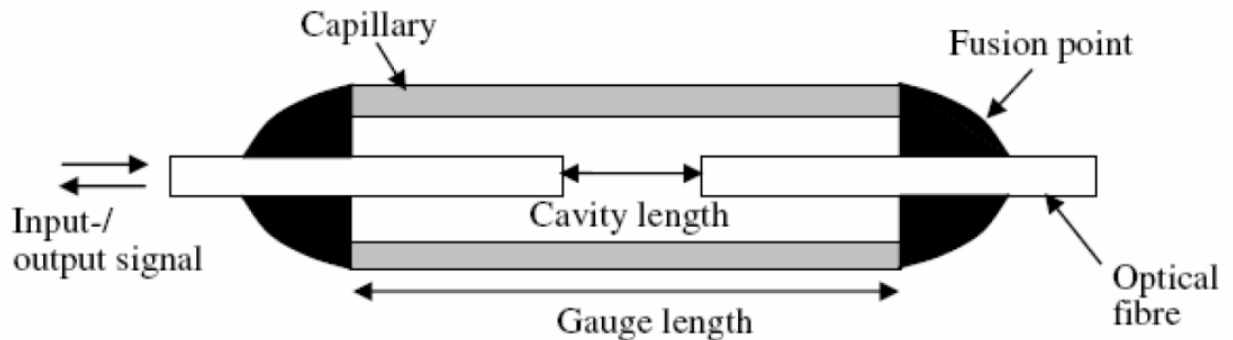
Πλεονεκτήματά τους είναι το μικρό μέγεθος και η υψηλή ακρίβεια με μετρητικό παράγοντα της τάξης 19-30. Αντίθετα, το υψηλό τους κόστος αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα χρήσης τους.



Εικόνα 1.14. Σχηματική αναπαράσταση αισθητήρα οπτικής ίνας Bragg[5]

2. οι εξωτερικοί αισθητήρες συμβολομετρίας Fabry-Perot (Extrinsic Fabry-Perot Interferometric Sensors)

Η αρχή λειτουργίας των αισθητήρων συμβολομετρίας Fabry-Perot (EFPI) στηρίζεται στην αλλαγή του μήκους κοιλότητας που βρίσκεται στο εσωτερικό τους, για να μετρήσουν τάσεις, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.15 . Η διαφορά αυτή έχει άμεση σχέση με την διαφορά φάσης μεταξύ εισερχόμενου και εξερχόμενου σήματος καθώς και την αντανάκλαση των οπτικών ινών.



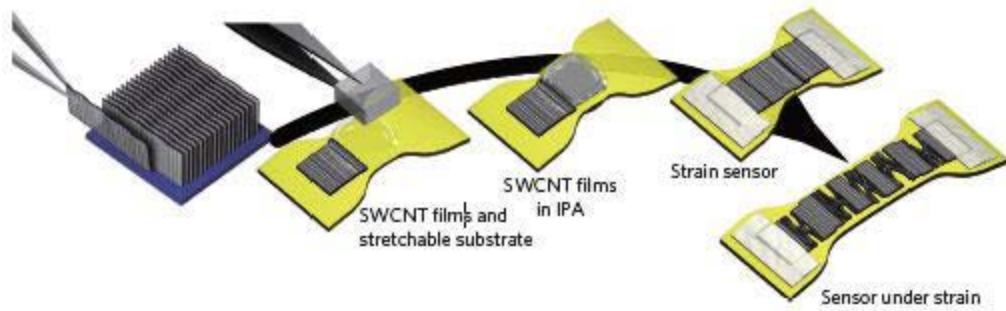
Εικόνα 1.15. Σχηματική αναπαράσταση αισθητήρα συμβολομετρίας Fabry-Perot[4]

1.4.3.3 Αισθητήρες παραμόρφωσης με νανοϋλικά

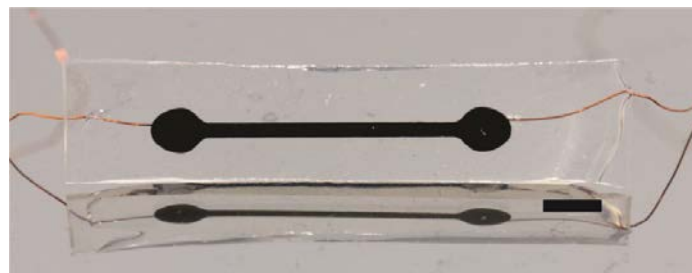
Αρχή λειτουργίας

Τα νανοϋλικά σήμερα χρησιμοποιούνται ευρέως σε όλο το φάσμα της τεχνολογίας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι εμφανίζουν φαινόμενα και ιδιότητες που μπορεί να διαφέρουν σημαντικά από την μακροσκοπική κλίμακα. Τα κυριότερα είδη των νανοϋλικών που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση της παραμόρφωσης είναι:

- Το γραφένιο, με τη δυνατότητα ανίχνευσης κίνησης και παραμορφώσεων σπάνω σε πολυμερικά υποστρώματα, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.17.
- Οι νανοσωλήνες άνθρακα (Carbon Nanotubes), όπου παρατηρείται μεταβολή της αντίστασης λόγω της παραμόρφωσης που υφίστανται, όπως φαίνεται στην εικόνα.
- Τα μεταλλικά νανοσωματίδια, τα οποία με εναπόθεσή τους σε κάποιο υπόστρωμα μπορούν να αποτελέσουν το μηχανισμό ανίχνευσης ενός αισθητήρα παραμόρφωσης. Ο αισθητήρας της παρούσας εργασίας βασίζεται στη συγκεκριμένη τεχνολογία των μεταλλικών νανοσωματιδίων.



Εικόνα 1.16. Αισθητήρας παραμόρφωσης με νανοσωλήνες άνθρακα.[5]



(α)



(β)

Εικόνα 1.17.(α), (β) Αισθητήρας γραφενίου μέσα σε πολυμερική μήτρα.[5]

Αρχή λειτουργίας αισθητήρων με νανοσωματίδια

Η εναπόθεση νανοσωματιδίων μετάλλου πάνω σε μια επιφάνεια οδηγεί στο σχηματισμό ενός δικτύου νησίδων από νανοσωματίδια πάνω σε αυτή την επιφάνεια. Αυτές οι νησίδες απομονώνονται μεταξύ τους από ένα φράγμα δυναμικού. Με αυτό τον τρόπο περιορίζεται η δυνατότητα διέλευσης ηλεκτρονίων σε σχέση με το αντίστοιχο συμπαγές υλικό.

Καταλήγοντας, μπορούμε να διακρίνουμε τρεις καταστάσεις όσον αφορά την αγωγιμότητα του δικτύου που σχηματίζουν, ανάλογα με τη συγκέντρωση των νανοσωματιδίων.

- 1) Υψηλή συγκέντρωση νανοσωματιδίων: Οι νησίδες αλληλεπικαλύπτονται μεταξύ τους. Η αγωγιμότητα είναι η ίδια με αυτή μιας αντίστοιχης συμπαγούς μεταλλικής επιφάνειας. Η κατάσταση αυτή χαρακτηρίζεται ως αγωγή.

- 2) Χαμηλή συγκέντρωση νανοσωματιδίων, οι νησίδες είναι αρκετά διακριτές και απομακρυσμένες δίχως δυνατότητα μεταφοράς φορτίου μεταξύ τους. Η κατάσταση αυτή είναι μονωτική.
- 3) Μια συγκέντρωση νανοσωματιδίων που οδηγεί σε μια ενδιάμεση κατάσταση, όπου οι νησίδες δεν είναι τόσο απομακρυσμένες και υπάρχει ηλεκτρική σύζευξη μεταξύ τους, ώστε να μπορεί να σχηματιστεί αγωγίμο μονοπάτι και δυνατότητα μετάβασης στην αγωγίμη κατάσταση.

Για το μηχανισμό της αγωγιμότητας μεταξύ των νανοσωματιδιακών δομών, έχουν προταθεί πολλοί μηχανισμοί όπως τα άλματα ηλεκτρικού φορτίου (thermally activated electron exchange), η σκέδαση ηλεκτρονίων, φαινόμενα διαφυγής (percolation), με επικρατέστερο όμως το φαινόμενο σήραγγας.

Σύμφωνα με το φαινόμενο σήραγγας, υπάρχει η δυνατότητα μεταφοράς φορτίου ανάμεσα σε νανοσωματίδια που έχουν μικρή επικάλυψη των κυματοσυναρτήσεών τους. Εάν θεωρήσουμε προσεγγιστικά τα νανοσωματίδια ως δυο μεταλλικά ηλεκτρόδια με απόσταση L και διαφορά δυναμικού V , συμπεραίνουμε ότι η μεταξύ τους αγωγιμότητα καθορίζεται από:

1. την απόσταση L , όντας αντιστρόφως ανάλογη. Πιο συγκεκριμένα η αγωγιμότητα σ φθίνει εκθετικά με την αύξηση της απόστασης L .
2. Την ενέργεια ενεργοποίησης για τη μεταφορά φορτίου ανάμεσα στα νανοσωματίδια. Έχει παρατηρηθεί συσχέτιση ανάμεσα στην ενέργεια ενεργοποίησης και το μέγεθος των νανοσωματιδίων.

Εάν θεωρήσουμε ένα σφαιρικό νανοσωματίδιο ακτίνας R (εικόνα 1.18), το οποίο περιβάλλεται από διηλεκτρικό σταθεράς ϵ_r , μέσα σε ένα αγωγίμο δίκτυο, τότε έχουμε:

$$\frac{\Delta E}{E} \approx -2 \frac{\Delta R}{R} \quad (1.5)$$

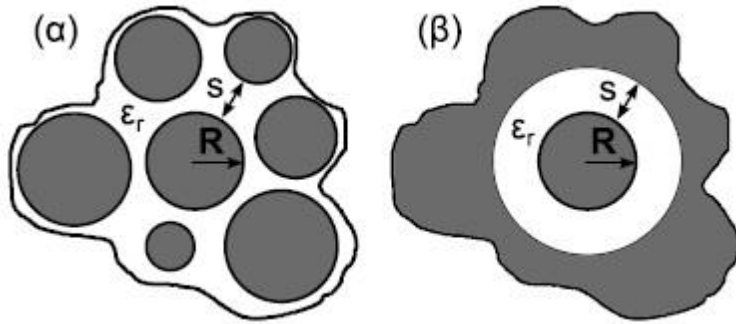
Η παραπάνω σχέση μας δείχνει τη συσχέτιση ανάμεσα στη μείωση της ενέργειας φόρτισης και τη μείωση της ακτίνας R του νανοσωματιδίου.

Συμπεραίνοντας, η ζητούμενη αγωγιμότητα μιας επιφάνειας με νανοσωματίδια δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma = e^{-2kL} e^{\frac{-E}{k_b T}} \quad (1.6)$$

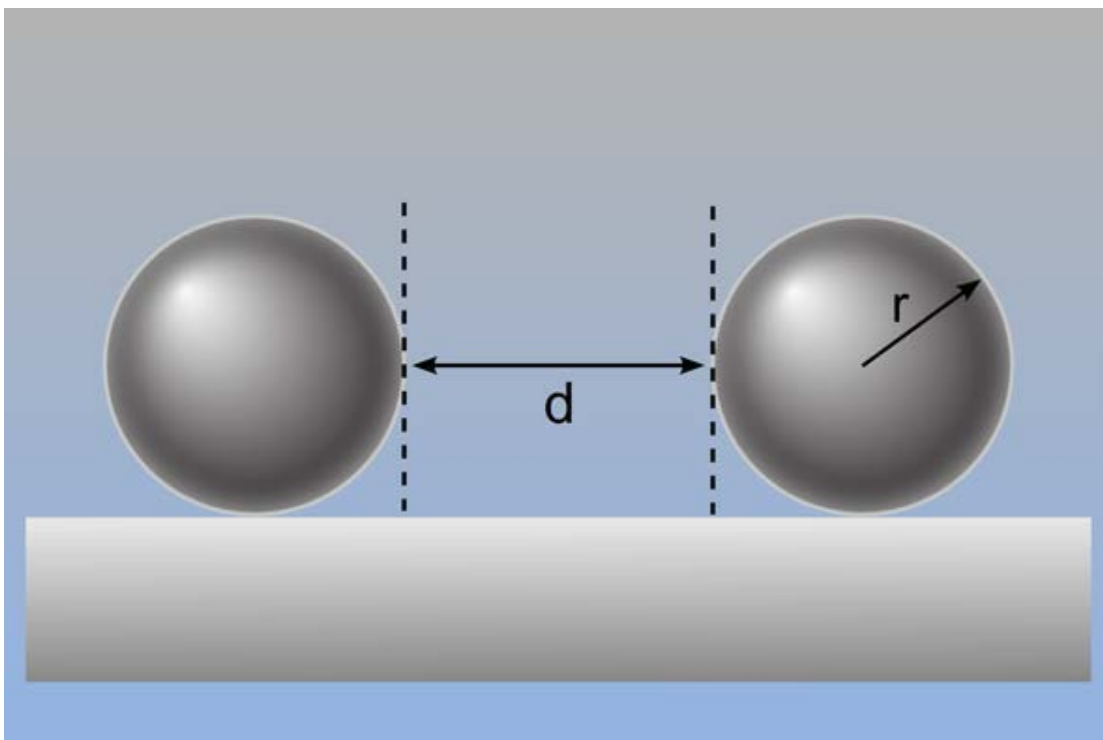
όπου k , η σταθερά απόσβεσης που εξαρτάται από το ύψος U του φράγματος δυναμικού, ανάμεσα στα δυο νανοσωματίδια.

Στη σχέση αυτή, ο πρώτος εκθετικός όρος αντιστοιχεί στο φαινόμενο σήραγγας, ενώ ο δεύτερος στη θερμική ενεργοποίηση. Αξίζει να αναφέρουμε την εξάρτηση της αγωγιμότητας και κατ' επέκταση, της αντίστασης από τη θερμοκρασία και την υγρασία. Το γεγονός αυτό είναι καίριας σημασίας, εάν αναλογιστεί κανείς ότι με τη συγκεκριμένη διάταξη καλούμαστε να μετρήσουμε τη ροή υγρού, το οποίο περνάει και έρχεται σε επαφή με την κάτω πλευρά από το υπόστρωμα του αισθητήρα μας.



Εικόνα 1.18. (α) Σχηματική αναπαράσταση της πραγματικής εικόνας των νανοσωματιδίων που περιβάλλουν ένα σφαιρικό νανοσωματίδιο ακτίνας R , μέσα σε διηλεκτρικό σταθεράς ϵ_r . (β) Θεωρητική προσέγγιση για το περιβάλλον του νανοσωματιδίου, όπως προκύπτει από τη σχέση (1.1).

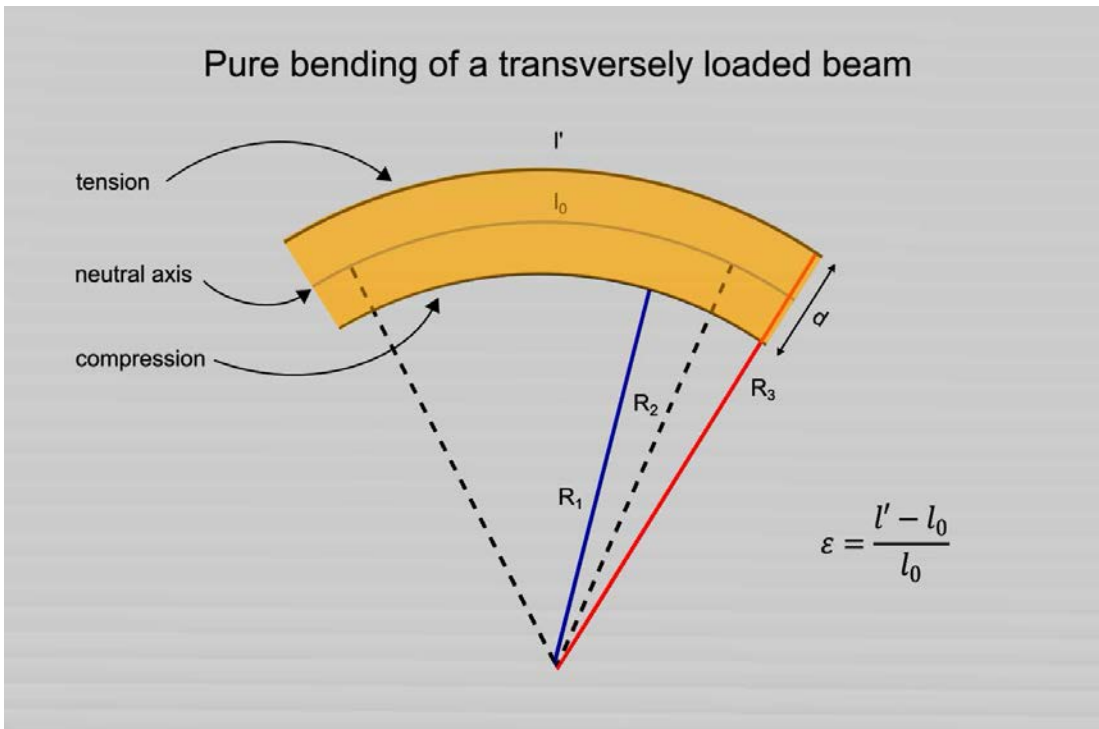
Δεν πρέπει όμως να παραλείψουμε το γεγονός ότι η σχέση (1.5) όμως αποτελεί μια προσέγγιση για την τοπική αγωγιμότητα μεταξύ δυο νανοσωματιδίων. Ένα δίκτυο νανοσωματιδίων παρουσιάζει μεγάλες ανομοιογένειες ως προς το μέγεθος και τις αποστάσεις μεταξύ των νανοσωματιδίων. Έτσι, η συνολική αγωγιμότητα θα είναι μια συμβολή των επιμέρους τοπικών αγωγιμοτήτων, στα πλαίσια ενός γενικευμένου θερμικά ενεργοποιούμενου φαινομένου σήραγγας τύπου Arrhenius.



Εικόνα 1.19. Σχηματική αναπαράσταση δυο γειτονικών νανοσωματιδίων πάνω σε αδιατάρακτο ελαστικό υπόστρωμα.

Βασιζόμενοι σε αυτό το θερμικά ενεργοποιούμενο φαινόμενο σήραγγας τύπου Arrhenius για την αγωγιμότητα, μπορούμε να εξηγήσουμε την αρχή λειτουργίας του αισθητήρα που βασίζεται στη μεταβολή της αντίστασης λόγω παραμόρφωσης του υποστρώματος (εικόνα 1.20). Η γραμμική παραμόρφωση μπορεί να οριστεί ως η μεταβολή του μήκους ΔL που εμφανίζει ένα αντικείμενο

όταν υφίσταται τάση προς το αρχικό του μήκος, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.20. Αξίζει να σημειωθεί ότι θεωρούμε πως το δείγμα παραμορφώνεται ομοιόμορφα σε όλο το πλάτος του σε μορφή τόξου κύκλου με ακτίνα καμπυλότητας r . Λόγω του γεγονότος αυτού είναι εύκολο να κατανοήσουμε, ότι όταν εφαρμόζουμε εφελκυστική τάση κάθετη προς τα ηλεκτρόδια, μεγαλώνουν οι αποστάσεις ανάμεσα στα νανοσωματίδια με την αντίστοιχη πιθανότητα διέλευσης ενός ηλεκτρονίου να μειώνεται, άρα και την αντίσταση του αισθητήρα να αυξάνεται.



Εικόνα 1.20. Υπολογισμός της παραμόρφωσης για ελαστική μεμβράνη πάχους d .

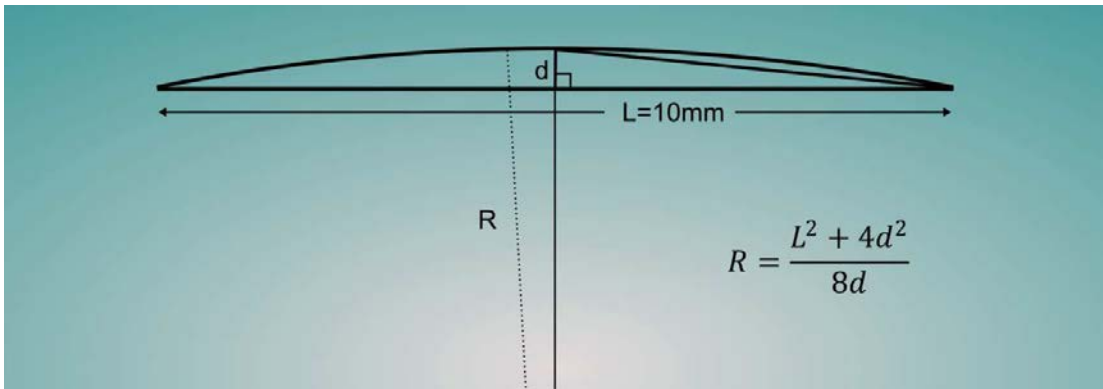
Σε αυτή την περίπτωση, η παραμόρφωση του αισθητήρα θα δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{p}{2r} \quad (1.7)$$

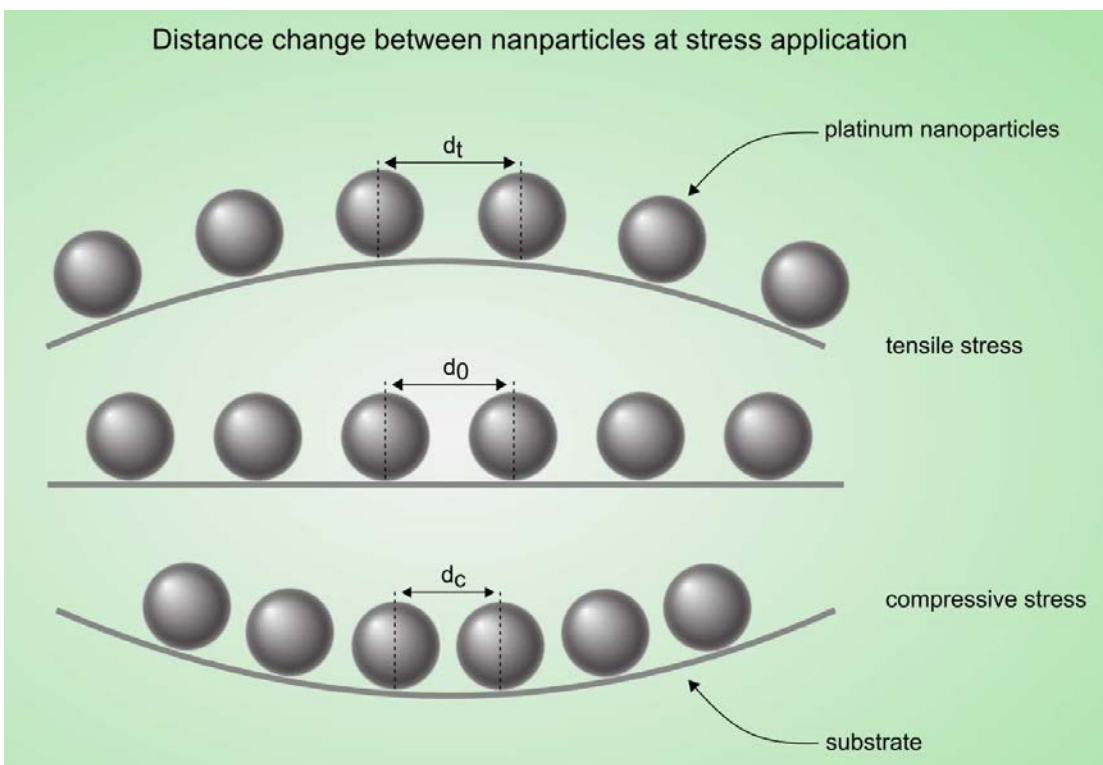
Όπου p το πάχος του υποστρώματος και r η ακτίνα καμπυλότητάς του (εικόνα 1.21), που δίνεται από τη σχέση:

$$r = \frac{L^2 + 4d^2}{8d} \quad (1.8)$$

Όπου d είναι η κάθετη μετατόπιση του υποστρώματος, όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.21.



Εικόνα 1.21. Γεωμετρική απεικόνιση των όρων που απαιτούνται για τον υπολογισμό της ακτίνας καμπυλότητας.



Εικόνα 1.22. Σχηματική απεικόνιση της κάμψης του υποστρώματος, που παρουσιάζει τη μεταβολή της απόστασης ανάμεσα στα νανοσωματίδια.

Στην περίπτωση που υποστεί μια παραμόρφωση ϵ το υπόστρωμα πάνω στο οποίο βρίσκονται τα νανοσωματίδια, αλλάζουν και οι μεταξύ τους αποστάσεις, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.22, με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται και η αγωγιμότητά του, η οποία θα είναι:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\beta x} e^{-\frac{E}{k_b T}} \quad (1.9)$$

όπου:

σ_0 μια σταθερά,

β η σταθερά απόσβεσης,

x η απόσταση μεταξύ των νανοσωματιδίων,

k_b η σταθερά του Boltzmann,

T η θερμοκρασία και

Ε η ενέργεια ενεργοποίησης που δίνεται από τον τύπο:

$$E = \frac{e^2}{2} \frac{r^{-1} - (r+x)^{-1}}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0} \quad (1.10)$$

όπου:

r η μέση ακτίνα των νανοσωματιδίων,
 ϵ_r η διηλεκτρική σταθερά του μέσου και
 ϵ_0 η διηλεκτρική σταθερά του κενού.

Από τους τύπους (1.9) και (1.10) προκύπτει η σχέση που συνδέει το λόγο $\Delta R/R$ με τη παραμόρφωση ϵ :

$$\frac{\Delta R}{R} = e^{(2r+x)\beta\epsilon} e^{\left[7,14 \cdot \left(\frac{1}{r+x} - \frac{1}{(r+x)+(2r+x)\cdot\epsilon}\right)\right]^{-1}} \quad (1.11)$$

Από τη σχέση αυτή προκύπτει και η εξάρτηση της αντίστασης από τη πυκνότητα των νανοσωματιδίων.

Με βάση όλα τα παραπάνω, μπορούμε να εισάγουμε ένα μετρητικό παράγοντα Gauge Factor (g) που χαρακτηρίζει την ευαισθησία ενός αισθητήρα παραμόρφωσης και ορίζεται ως ο λόγος της μεταβολής της αντίστασης προς την αρχική αντίσταση και την τιμή της μηχανικής παραμόρφωσης που προκάλεσε αυτή τη μεταβολή, όπως φαίνεται στη σχέση:

$$g = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} \quad (1.12)$$

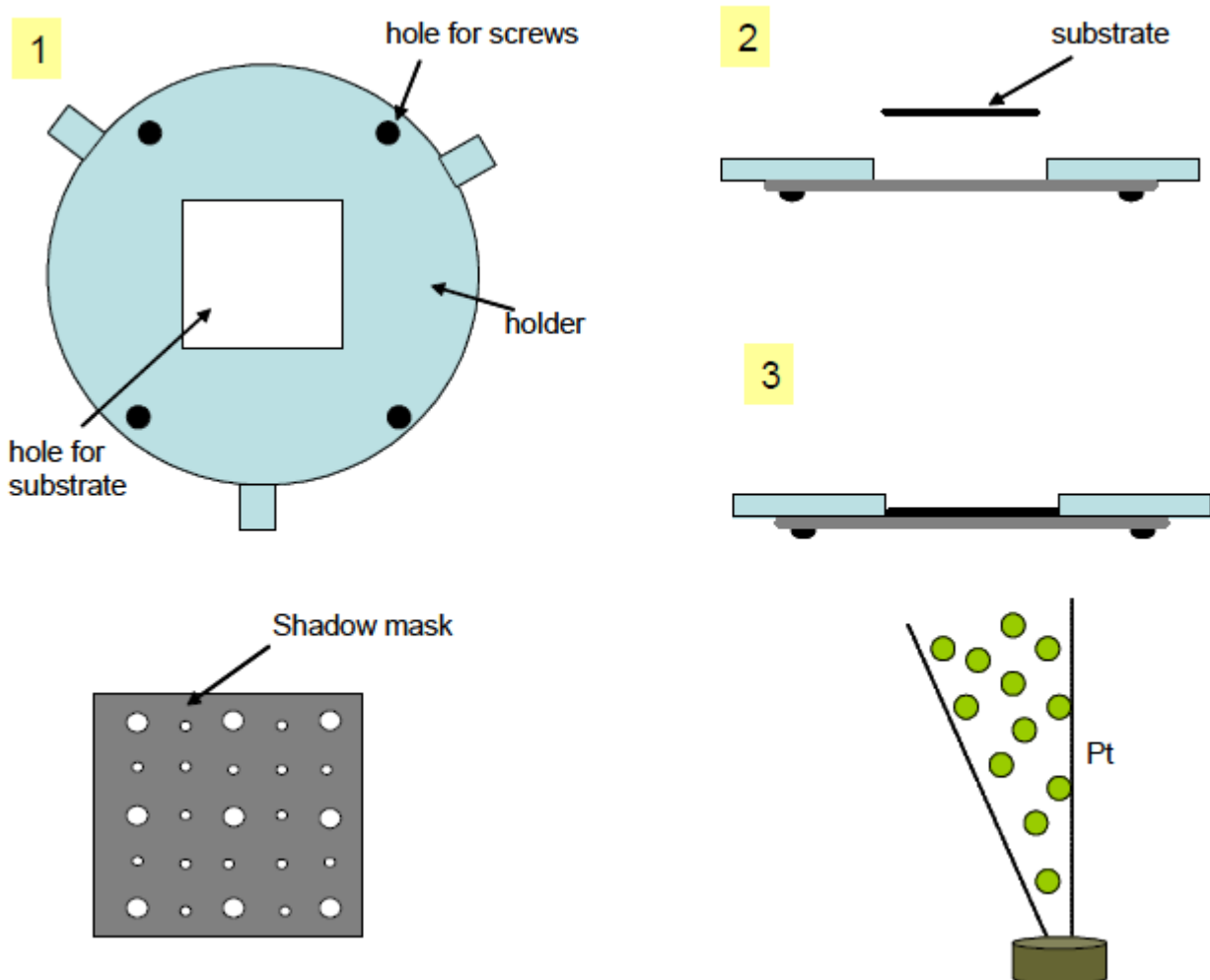
Αν και παρατηρούμε από τη σχέση μια γραμμική εξάρτηση της αντίστασης από τη παραμόρφωση, κάτι τέτοιο ισχύει για πολύ μικρό εύρος παραμορφώσεων. Όπως είδαμε και από τη σχέση, η αγωγιμότητα, συνεπώς και η αντίσταση, παρουσιάζει εκθετική εξάρτηση από την απόσταση και το μέγεθος των νανοσωματιδίων.

1.5 Κατασκευή αισθητήρα παραμόρφωσης με νανοσωματίδια

1.5.1 Κατασκευή Ηλεκτροδίων

Η κατασκευή των ηλεκτροδίων του αισθητήρα θα γίνει μέσω της διαδικασίας επιμετάλλωσης του οργανικού υποστρώματος, πιο συγκεκριμένα πολυολεφίνη, με την τεχνική shadow mask. Οι μάσκες σκιάς (shadow masks), γνωστές και ως μάσκες stencil είναι ουσιαστικά μηχανικές πλάκες διαφράγματος. Αρχικά, τοποθετούμε το υπόστρωμα στον ειδικό υποδοχέα-μάσκα (shadow mask) (Εικόνα 1.23(2)). Στη συνέχεια παίρνουμε αυτή τη δομή του υποστρώματος και της μάσκας και την εισάγουμε στο θάλαμο ανάπτυξης για να εναποθέσουμε, με τη μέθοδο της

εξάχνωσης, στην ακάλυπτη περιοχή από τη μάσκα - υποδοχέα 300 Å χρυσού με ρυθμό ανάπτυξης 0,4 Å/s, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.23(3). Η μέθοδος αυτή είναι αρκετά πιο απλή και πιο φθηνή σε σχέση με τη λιθογραφία που έχει περισσότερα στάδια παρασκευής και χρησιμοποιεί επιπλέον εξοπλισμό. Παρόλαυτά όμως, στην τεχνική αυτή, η ευθυγράμμιση μάσκας - υποστρώματος δεν μπορεί να γίνει με μεγάλη ακρίβεια και δεν ενδείκνυται για εφαρμογές που απαιτούν ακρίβεια στην ευθυγράμμιση, αφού μπορούν να εμφανιστούν αποκλίσεις της τάξης $\pm 10\mu\text{m}$. Στην περίπτωση του αισθητήρα σε αυτή την εργασία δεν έχουμε μεγάλες απαιτήσεις σε ακρίβεια, αφού τα ηλεκτρόδια του αισθητήρα καταλαμβάνουν αρκετά «μεγάλη» επιφάνεια. Έτσι, η τεχνική αυτή ενδείκνυται για τα ηλεκτρόδια του αισθητήρα μας και δεν δημιουργεί απολύτως κανένα πρόβλημα.

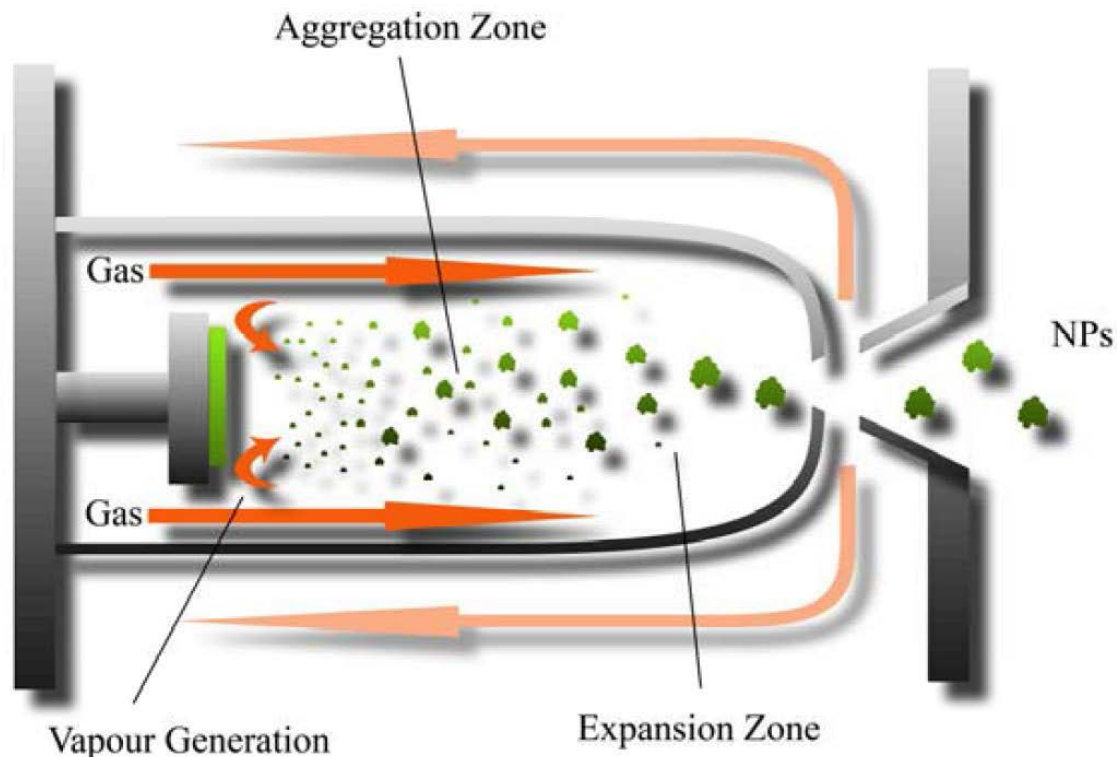


Σχήμα 1.23. 1) Κάτοψη μάσκας - υποδοχέα (shadow mask), 2) Τοποθέτηση του υποστρώματος πολυολεφίνης στη μάσκα - υποδοχέα και ευθυγράμμιση μεταξύ τους, 3) Εναπόθεση νανοσωματιδίων στη συγκεκριμένη περιοχή του υποστρώματος που μας επιτρέπει η μάσκα υποδοχέας (shadow mask).

1.5.2 Εναπόθεση νανοσωματιδίων [4]

Η εναπόθεση νανοσωματιδίων πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον κενού με στόχο από χρυσό (Au) υπό εφαρμοζόμενη ηλεκτρική τάση και βομβαρδιζόμενη από αέριο αργού. Η διαδικασία για την εναπόθεση των νανοσωματιδίων έγινε ως εξής:

1. Τοποθέτηση δειγμάτων μέσα στο σύστημα
2. Σφράγιση του θαλάμου και δημιουργία κενού (περίπου μια ώρα για να δημιουργηθεί κενό 10^{-6} mbar)
3. Εκκίνηση περιστροφής δειγμάτων με περίπου 30 στροφές ανά λεπτό (με το διάφραγμα κλειστό)
4. Άνοιγμα βαλβίδας για την ροή Αργού και ρύθμιση ροής από 30 έως 70cc/min
5. Ρύθμιση της τάσης στα 310V και όριο ρεύματος στα 0,1A
6. Μετά από αναμονή ενός λεπτού (ώστε να απομακρυνθεί το πρώτο λεπτό στρώμα επάνω από τον στόχο που μπορεί να έχει ακαθαρσίες) ανοίγουμε το κλείστρο και ξεκινά η εναπόθεση, όπως φαίνεται στο σχήμα. Κατά την εναπόθεση είχε μεγάλη σημασία να διατηρείται ο ρυθμός εναπόθεσης σταθερός.
7. Τα δείγματα βυθίζονται σε ακετόνη και με την βοήθεια των υπερήχων απομακρύνουμε το resist της προηγούμενης λιθογραφίας από της επιφάνεια του υποστρώματος. (Lift Off). Οι εναποθέσεις που πραγματοποιήθηκαν για την δημιουργία των αισθητήρων έγιναν με όλες τις παραμέτρους σταθερές εκτός αυτής του χρόνου και της την ροής Αργού (6 έως 32 λεπτά εναπόθεσης και με ρυθμό 0.20, 0.40, 0.60, και 0.80 Ang/s).[8]



Σχήμα 1.24. Σχηματικό διάγραμμα της παραγωγής νανοσωματιδίων και της πορείας τους προς τον θάλαμο εναπόθεσης[4].

1.6 Κυκλώματα Προσαρμογής

1.6.1 Εισαγωγή

Οι αυτοδιεγείρομενοι αισθητήρες είναι πιθανό να έχουν ως αρχή λειτουργίας την προσθήκη ή απομάκρυνση κάποιου φορτίου ή μια μεταβολή στο δυναμικό. Γενικά, χαρακτηρίζονται από την ιδιαίτερα μικρή ευαισθησία του αισθητήριου στοιχείου. Το γεγονός αυτό (έχει σαν αποτέλεσμα τον περιορισμό της ηλεκτρικής τους εξόδου σε χαμηλά επίπεδα) οφείλεται στη χαμηλή ενέργεια του φυσικού σήματος εισόδου που οδηγεί κατά συνέπεια χαμηλά επίπεδα της ηλεκτρικής εξόδου.

Ένας αισθητήρας αποτελείται από το αισθητήριο στοιχείο και έναν ηλεκτρικό μεταλλάκτη. Ο ηλεκτρικός μεταλλάκτης αναλαμβάνει να μετατρέψει σήματα ή ηλεκτρικές ιδιότητες στο αισθητήριο στοιχείο. Η επεξεργασία αυτή γίνεται συνήθως από ένα απλό αναλογικό ή ψηφιακό κύκλωμα που ρυθμίζει το σήμα για περαιτέρω επεξεργασία. Τα χαρακτηριστικά αυτού του κυκλώματος εξαρτώνται από τη φύση του αισθητήρα και το πεδίο εφαρμογών.

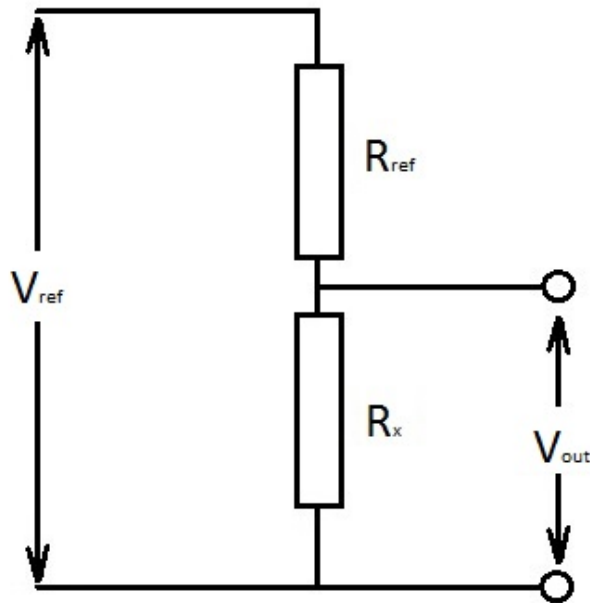
Οι ηλεκτρικοί μεταλλάκτες και τα κυκλώματα προσαρμογής παίζουν ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στο πεδίο των μικροαισθητήρων, καθώς έχουμε την επεξεργασία σημάτων μικρής ισχύος. Κατά τη μελέτη των αισθητήρων εξετάζονται οι ίδιες ηλεκτρικές παράμετροι (αντίσταση, χωρητικότητα, επαγωγή) και συνήθως έχουμε μετατροπή των σημάτων τους. Θα εξετάσουμε αμέσως παρακάτω βασικούς τύπους ηλεκτρικών αισθητήριων στοιχείων, τα οποία παράγουν ένα σήμα που καταλήγει σε διατάξεις επεξεργασίας.

1.6.2 Αισθητήρες μεταβολής αντίστασης

Σε αρκετές περιπτώσεις αισθητήρων, η μετρούμενη ποσότητα προκαλεί μεταβολή της αντίστασης του αισθητήριου στοιχείου, π.χ. μαγνητικοί ή χημικοί αντιστάτες. Η αντίσταση εξόδου R_x ενός γραμμικού αισθητήρα αντίστασης αποτελεί συνάρτηση της αντίστασης αναφοράς R_0 . Η αντίσταση αναφοράς του αισθητήρα ορίζεται ως η αρχική αντίσταση του αισθητήρα, όταν δεν υπάρχει μετρούμενη ποσότητα. Το μέγεθος που μας ενδιαφέρει και παίζει καίριο ρόλο στις μετρήσεις μας, τόσο κατά την κατασκευή, όσο και κατά τον χαρακτηρισμό ενός αισθητήρα είναι η ποσοστιαία μεταβολή x της αντίστασης αναφοράς όταν ανιχνευθεί κάποια ποσότητα. Μπορούμε επομένως να ορίσουμε την αντίσταση εξόδου ενός γραμμικού αισθητήρα αντίστασης από τη σχέση:

$$R_x = R_0(1 + x) \quad (1.13)$$

Η τιμή του x μπορεί να έχει θετικό ή αρνητικό πρόσημο και παίρνει συνήθως αρκετά χαμηλές τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 10^{-1} και 10^{-5} . Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το πρόσημο και η προσδοκώμενη περιοχή τιμών του x να καθορίζεται από την ακριβή σχεδίαση ενός κυκλώματος προσαρμογής. Για την επεξεργασία του σήματος που λαμβάνουμε από το αισθητήριο στοιχείο, ιδιαίτερα στην περίπτωση που η μεταβολή της αντίστασης είναι μεγάλη, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε έναν απλό διαίρετη τάσης ή μια γέφυρα αντιστάσεων.



Εικόνα 1.25. Κύκλωμα διαιρέτη τάσης.

Στην περίπτωση ενός απλού κυκλώματος διαιρέτη τάσης έχουμε:

- i) Μια γνωστή τάση εισόδου V_{ref}
- ii) Ένα ρεύμα που περνάει από δυο αντιστάσεις, μια γνωστή αντίσταση αναφοράς R_{ref} και την άγνωστη αντίσταση του αισθητήρα.
- iii) Η τάση που μετράμε στην έξοδο του κυκλώματος, θα δίνεται από:

$$V_{out} = V_{ref} \frac{R_x}{(R_x + R_{ref})} \quad (1.14)$$

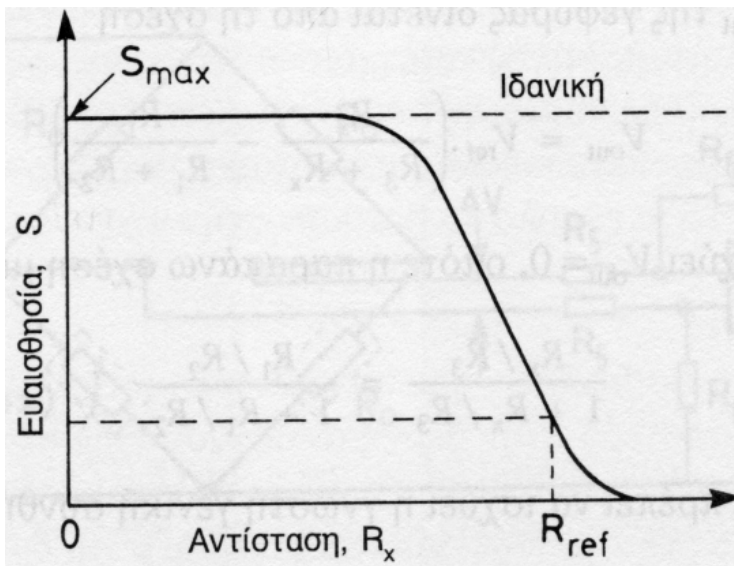
Το κέρδος A του συστήματος θα είναι:

$$A = \frac{V_{out}}{R_x} = \frac{V_{ref}}{(R_x + R_{ref})} = \frac{V_{ref}}{R_o(1 + x) + R_{ref}} \quad (1.15)$$

Ενώ αντίστοιχα η ευαισθησία S :

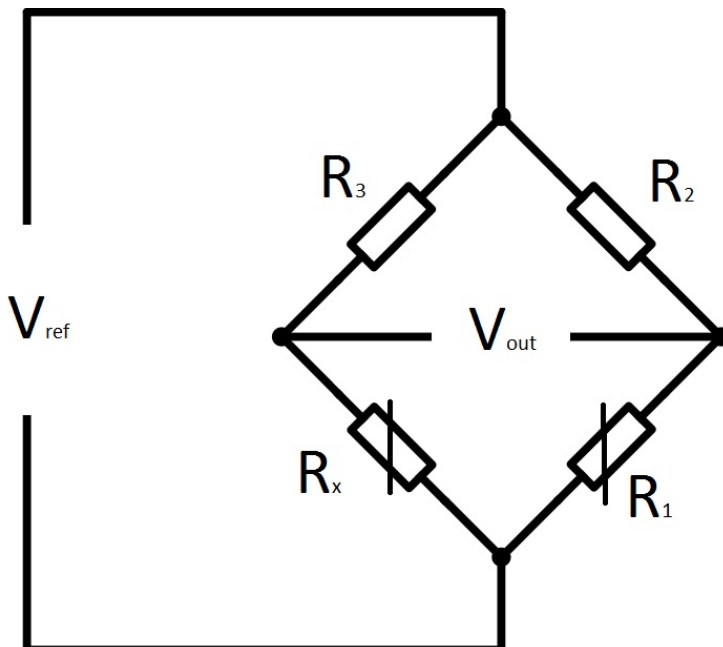
$$S = \frac{dV_{out}}{dR_x} = \frac{V_{ref}R_{ref}}{(R_x + R_{ref})^2} \quad (1.16)$$

Με βάση αυτή τη σχέση μπορούμε να κατασκευάσουμε και το διάγραμμα. Είναι όμως φανερό ότι το κύκλωμα του διαιρέτη τάσης παρά την απλότητά του εμφανίζει ελαττωμένη ευαισθησία για μικρές μεταβολές. Ταυτόχρονα η τάση εξόδου εξαρτάται και από τον τρόπο που επηρεάζεται ο ίδιος ο αισθητήρας από τη θερμοκρασία.



Εικόνα 1.26. Διάγραμμα ευαισθησίας ενός διαιρέτη τάσης.

Αντίθετα, το κύκλωμα μιας γέφυρας Wheatstone εμφανίζει μεγάλη ευαισθησία. Μια γέφυρα Wheatstone αποτελείται από ένα δίκτυο που απαρτίζεται από: μια μεταβλητή αντίσταση R_1 , δυο γνωστές αντιστάσεις R_2 , R_3 και τη ζητούμενη αντίσταση R_x . Εφαρμόζουμε μια γνωστή τάση εισόδου V_{ref} . Η γέφυρα λειτουργεί σε κατάσταση ισορροπίας με την τάση εξόδου V_{out} να εξισορροπείται από τη μεταβλητή αντίσταση R_1 . Το σημαντικό στοιχείο είναι ότι η συνθήκη ισορροπίας είναι ανεξάρτητη από οποιαδήποτε εσωτερική αντίσταση της τάσης της πηγής ή του φορτίου.



Εικόνα 1.27. Κύκλωμα γέφυρας Wheatstone.

Η τάση εξόδου της γέφυρας θα είναι:

$$V_{out} = V_{ref} \cdot \left(\frac{R_x}{R_3 + R_x} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \quad (1.17)$$

Στην ισορροπία έχουμε $V_{out}=0$.

Η ευαισθησία του κυκλώματος γέφυρας θα είναι:

$$S = \frac{x}{(2 + R_1/R_2 + R_2/R_1)} \quad (1.18)$$

Εν συνεχεία το σήμα που λαμβάνουμε από τον αισθητήρα μπορούμε να το ενισχύσουμε χρησιμοποιώντας έναν απλό διαφορικό τελεστικό ενισχυτή (op-amp).

Εάν χρησιμοποιήσουμε έναν ανενεργό αισθητήρα στη θέση του R_1 επιτυγχάνουμε ανεξαρτησία της τάσης εξόδου από δυσλειτουργία του αισθητήρα λόγω θερμοκρασίας, ιδιαίτερα σε αισθητήρες καταπόνησης και pellistors.

Σημαντικό ρόλο για την απόδοση όλου του συστήματος παίζει το κύκλωμα επεξεργασίας σήματος, που έχουμε λάβει από τον αισθητήρα. Πριν όμως από αυτό το στάδιο μπορεί να μεσολαβήσει ένα κύκλωμα απλού διαφορικού ενισχυτή (op-amp) που θα ενισχύσει το σήμα μας και θα καταστήσει έτσι πιο εύκολη την οποιαδήποτε επεξεργασία του. Σημαντικά χαρακτηριστικά ενός τέτοιου κυκλώματος είναι η υψηλή αντίσταση εισόδου, ο υψηλός Λόγος Απόρριψης Κοινού Σήματος (CMRR) και η χαμηλή ευαισθησία στη θερμοκρασία.

Σε άλλους αισθητήρες η μετρούμενη ποσότητα μπορεί να προκαλέσει μεταβολή της άεργης αντίστασης, είτε μιλάμε για χωρητική, είτε για επαγωγική. Έτσι προκύπτουν δυο κατηγορίες αισθητήρων, οι οποίοι βασίζονται στη μεταβολή:

A) της χωρητικότητας

B) της επαγωγής

για την ανίχνευση της μετρούμενης ποσότητας.

1.6.3 Αισθητήρες μεταβολής χωρητικότητας

Η χωρητικότητα C μιας συσκευής ορίζεται ως το μέτρο του αποθηκευμένου φορτίου προς τη διαφορά δυναμικού που εφαρμόζεται στα άκρα της.

$$C = \frac{Q}{V} \quad (1.19)$$

Όπως προκύπτει από τον παραπάνω ορισμό μονάδα μέτρησης της χωρητικότητας είναι το 1 Coulomb/Volt, που ισοδυναμεί με 1 Farad.

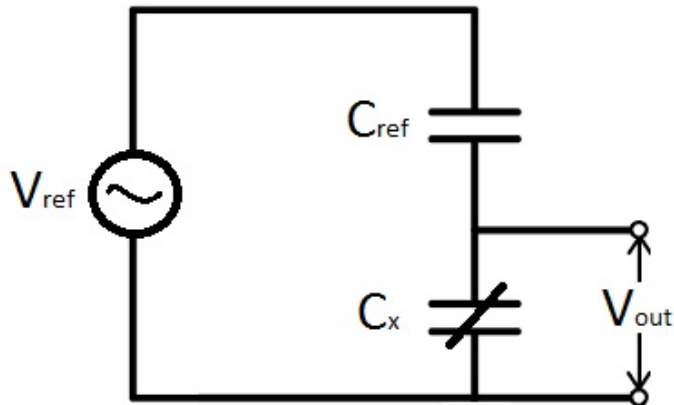
Η χωρητικότητα αποτελεί ένα μέγεθος που εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της συσκευής και το διηλεκτρικό υλικό που παρεμβάλλεται μεταξύ των δυο ηλεκτροδίων, τα οποία λειτουργούν ως οπλισμοί ενός πυκνωτή, όπως φαίνεται και από τη σχέση:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (1.20)$$

Όπου ϵ_0 η διηλεκτρικότητα στον ελεύθερο χώρο (8,85pF/m), ϵ_r η σχετική διηλεκτρικότητα του υλικού μεταξύ των οπλισμών (ο αέρας έχει τιμή περίπου 1 και το νερό 100), A το εμβαδόν των οπλισμών και d η μεταξύ τους απόσταση.

Όπως καταλαβαίνουμε οποιοσδήποτε παράγοντας που μπορεί να αλλάξει τη διηλεκτρική σταθερά, το εμβαδόν των οπλισμών ή τη μεταξύ τους απόσταση, μπορεί να προκαλέσει μεταβολή στη χωρητικότητα. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να προκύπτουν δυο επιμέρους υποκατηγορίες αισθητήρων που βασίζονται σε:

- i) Μηχανική μετατόπιση του ενός οπλισμού σε σχέση με τον άλλο, με αποτέλεσμα, είτε αλλαγή του εμβαδού, είτε της μεταξύ τους απόστασης.
- ii) Μεταβολή της διηλεκτρικής σταθεράς ενός υλικού, είτε με τη θερμοκρασία, είτε με χημικές ουσίες.



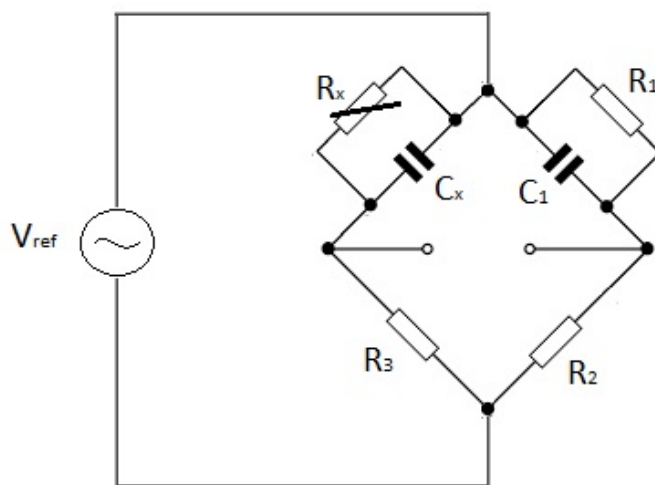
Εικόνα 1.28. Κύκλωμα διαιρέτη τάσης για χωρητικό αισθητήρα.

Κατ' απόλυτη αντιστοιχία με τους αισθητήρες ωμικής αντίστασης, ένας αισθητήρας με μεταβαλλόμενη χωρητικότητα μπορεί να μετρηθεί από ένα χωρητικό διαιρέτη τάσης, από τη σχέση:

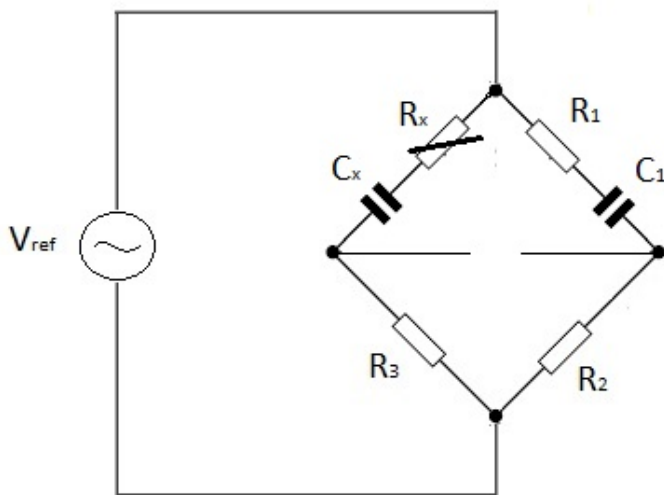
$$V_{out} = V_{ref} \frac{C_x}{(C_x + C_{ref})} \quad (1.21)$$

Εάν επιθυμούμε μεγαλύτερη ακρίβεια, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα κύκλωμα γέφυρας πυκνωτών. Υπάρχουν δυο τύποι τέτοιων κυκλωμάτων, ανάλογα με τον τρόπο διεξαγωγής της μέτρησης:

- 1) Μέτρηση της άγνωστης χωρητικότητας C_x παράλληλα με μια άγνωστη αντίσταση R_x .
- 2) Μέτρηση της άγνωστης χωρητικότητας C_x σε σειρά με μια άγνωστη αντίσταση R_x



(α)



(β)

Εικόνα 1.29 (α) Διάταξη γέφυρας για τη μέτρηση της άγνωστης χωρητικότητας παράλληλα με μια άγνωστη αντίσταση,

(β) Διάταξη γέφυρας για τη μέτρηση της άγνωστης χωρητικότητας παράλληλα με μια άγνωστη αντίσταση.

Ειδικά όταν αναφερόμαστε σε μηχανικούς μικροαισθητήρες, οι χωρητικότητες είναι αρκετά μικρές, της τάξης των fF, οπότε κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική η τεχνολογία του κυκλώματος. Για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος, μπορεί να ενσωματωθεί το κύκλωμα γέφυρας και το αισθητήριο στοιχείο πάνω σε ένα chip, καθώς και η χρήση τεχνολογίας CMOS, ώστε να έχουμε χαμηλές χωρητικότητες και μεγάλες αντιστάσεις στην είσοδο.

1.6.4 Αισθητήρες μεταβολής επαγωγής

Η αυτεπαγωγή L μιας συσκευής ορίζεται ως:

$$L = N \frac{d\Phi}{di} \quad (1.22)$$

όπου

N : ο αριθμός των περιελίξεων

Φ : η μαγνητική ροή

i : το ρεύμα που περνάει μέσα από το καλώδιο

Σε συνάρτηση με την μαγνητική αντίσταση R_L :

$$L = \frac{N^2}{R_L} \quad (1.23)$$

Η συνολική μαγνητική αντίσταση ενός πηνίου θα δίνεται από τη σχέση:

$$R_L = \frac{l}{\mu_o \mu_r A} + \frac{l_o}{\mu_o A_o} \quad (1.24)$$

όπου

μ_o : η σχετική διηλεκτρική διαπερατότητα του αέρα

μ_r : η σχετική διηλεκτρική διαπερατότητα του πυρήνα από σίδηρο

l : το μήκος του πηνίου

A: η διατομή των σπειρών του

l_0 : η πορεία των γραμμών του πεδίου διαμέσου του αέρα

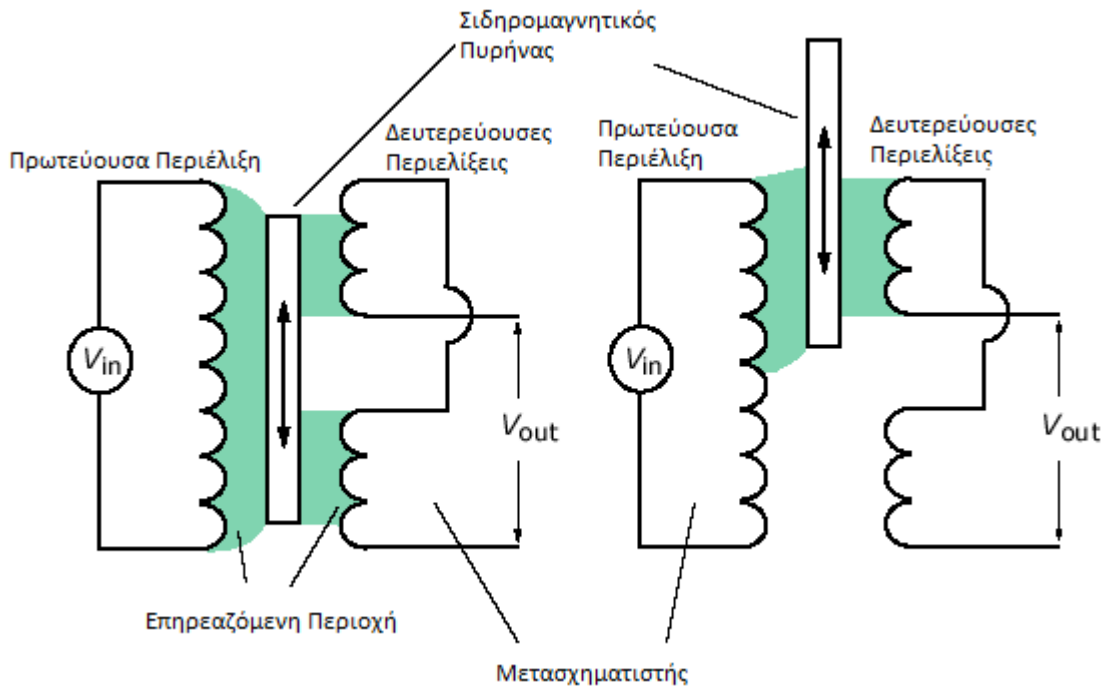
A_0 : η διατομή αυτών των γραμμών

Οι κυριότεροι επαγωγικοί αισθητήρες βασίζονται στη μεταβολή της μαγνητικής αντίστασης, είτε με τη μεταβολή στο μήκος χάσματος αέρα l_0 , είτε με τροποποίηση της μαγνητικής διαπερατότητας μ . Το γεγονός αυτό μας επιτρέπει να διακρίνουμε δυο κατηγορίες αισθητήρων μαγνητικής επαγωγής, αντίστοιχα:

A) τους αισθητήρες μεταβλητού χάσματος

B) τους αισθητήρες κινούμενου πυρήνα

Τόσο η μια, όσο και η άλλη κατηγορία αισθητήρων χρησιμοποιούνται συνήθως για τη μέτρηση της μετατόπισης και έχουν διαφορετική είσοδο για τη μείωση της επίδρασης από παρασιτικά μαγνητικά πεδία και τη θερμοκρασία. Επιπλέον, παρουσιάζουν μεγάλη γραμμικότητα. Δεν μπορούν, ωστόσο, να επιτύχουν μεγάλες επαγωγές παρά μόνο σε συσκευές μεγάλου μεγέθους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο Γραμμικός Μεταβλητός Διαφορικός Μετασχηματιστής (LVDT) που αποτελείται από τρεις περιελίξεις, μια πρωτεύουσα και δυο δευτερεύουσες. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στη κίνηση του σιδηρομαγνητικού πυρήνα μέσα στην πρωτεύουσα περιέλιξη και την αμοιβαία επαγωγή που αναπτύσσεται με καθεμία από τις δυο δευτερεύουσες περιελίξεις.



Εικόνα 1.30 Κύκλωμα Γραμμικού Μεταβλητού Διαφορικού Μετασχηματιστή (LVDT).

1.6.5 Ηλεκτρονικά Κυκλώματα Προσαρμογής

Το ηλεκτρικό σήμα που παίρνουμε από έναν αισθητήρα περνάει στη συνέχεια σε ένα κύκλωμα επεξεργασίας σήματος, που προηγείται ενός συστήματος δεδομένων. Τα κυκλώματα αυτά έχουν ως στόχο, να επεξεργαστούν και να προσαρμόσουν το σήμα, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από μια άλλη συσκευή. Τα κυκλώματα προσαρμογής μπορεί να έχουν πολλαπλές χρήσεις, οι οποίες είναι:

- 1) Ενίσχυση του φυσικού (μη επεξεργασμένου) σήματος (ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί) από τελεστικούς ενισχυτές
- 2) Μείωση του θορύβου με χρήση φίλτρων (είτε χαμηλοπερατών, είτε υψηλοπερατών, είτε ζωνοδιαβατών). Το γεγονός αυτό όμως έχει σαν συνέπεια τον περιορισμό της δυναμικής περιοχής στην έξοδο του αισθητήρα
- 3) Παροχή ισχύος ή/και φέροντος σήματος σε αισθητήρες διαμόρφωσης με μειονέκτημα όμως την εξάρτηση της απόδοσης του αισθητήρα από τη σταθερότητα των ηλεκτρονικών προσαρμογής.
- 4) Γραμμικοποίηση ή αντιστάθμιση της εξόδου ενός αισθητήρα, είτε με λογαριθμικό ενισχυτή στην πρώτη περίπτωση, είτε με αναλογικό δομικό σχεδιασμό στη δεύτερη. Τα κυκλώματα αυτά απαλλάσσουν το σήμα μας από ανεπιθύμητες μεταβολές.
- 5) Παραγωγή ενός σήματος ελέγχου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ανατροφοδότηση σε περίπτωση σφάλματος ή πτώσης της τάσης τροφοδοσίας.

Σε μια άλλη κατηγορία αισθητήρων είναι απαραίτητη η μετατροπή ενός σήματος ή μιας ηλεκτρικής ιδιότητας σε συχνότητα είτε πριν την εκπομπή, είτε κατά την ανάγνωση. Μεγάλο πλεονέκτημα των αισθητήρων που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία είναι η δυνατότητα να επιτύχουν μεγάλη ακρίβεια κατά τη μέτρηση χάρη στους εμπορικούς μετρητές συχνότητας.

Επιπρόσθετα αρκετοί αισθητήρες χρησιμοποιούν ένα σήμα συχνότητας για διαμόρφωση. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν αρκετοί πιεζοηλεκτρικοί και μηχανικοί αισθητήρες που είναι συντονισμένοι ακουστικά σε συγκεκριμένες συχνότητες γραμμής βάσης.

2ο Κεφάλαιο: Μικρορρευστονικά Συστήματα

2.1 Εισαγωγή

Ένα μικρορρευστονικό σύστημα ορίζεται ως ένα εξάρτημα που μπορεί να χειριστεί μια μικρή ποσότητα (μικρο- ή νανολίτρο) ρευστών (υγρό ή αέριο). Η μικρορρευτονική έχει αναπτυχθεί ως μικροσκοπική αναλυτική τεχνολογία με ιδιαίτερη έμφαση σε βιοϊατρικές και χημικές εφαρμογές, χάρη στη δυνατότητα χειρισμού υγρών. Ο συμβατικός μακροσκοπικός εξοπλισμός σε ένα εργαστήριο μπορεί να σμικρυνθεί σε μικροσκοπικές συσκευές. Ένας βασικός στόχος είναι η ανάπτυξη μικρορρευστονικών συστημάτων έχει ως βασικό στόχο την παροχή μια συνολική επεξεργασία που ξεκινά από την εφαρμογή δείγματος έως την εμφάνιση των αναλυτικών αποτελεσμάτων. Για αυτόν ακριβώς το λόγο, ένα μικρορρευστονικό σύστημα ονομάζεται επίσης εργαστήριο-σε-ψηφίδα (LOC), biochip ή σύστημα μικρο-ολικής ανάλυσης (μTAS). Η δραστική μείωση των διαστάσεων συνοδεύεται από ορισμένα πλεονεκτήματα όπως:

- 1) λιγότερη κατανάλωση δείγματος / αντιδραστηρίου,
- 2) μείωση του κινδύνου μόλυνσης,
- 3) μικρότερο κόστος ανά ανάλυση,
- 4) μείωση των χρονοβόρων διαδικασιών,
- 5) ενίσχυση της ευαισθησίας και της ακρίβειας και
- 6) γενικότερη αύξηση της αξιοπιστίας.

Αρχικά, η κατασκευή μικρορρευστονικών συσκευών βασίστηκε στην τεχνολογία μικροηλεκτρονικής κατασκευής και στην τεχνολογία μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων (MEMS). Η μικρορρευστονική εξελίχθηκε ως κλάδος της τεχνολογίας MEMS που ειδικεύεται στο χειρισμό υγρών. Το πυρίτιο αποτέλεσε το βασικό υλικό για το υπόστρωμα των πρώτων μικρορρευστονικών συσκευών. Οι τυπικές μικροηλεκτρονικές διαδικασίες κατασκευής περιλαμβάνουν φωτολιθογραφία, εναπόθεση (thin layer deposition) και εγχάραξη, οι οποίες μπορούν να επεξεργαστούν επιφάνεια πυριτίου με πάχος 1-2 μm το πολύ, αλλά απαιτούν ειδικό εξοπλισμό και εγκαταστάσεις. Χαρακτηριστικό παράδειγμα μικρορρευστονικής συσκευής κατασκευασμένης από πυρίτιο είναι η κεφαλή εκτυπωτή μελάνης. Συγκεκριμένα, διαθέτει μεγάλο αριθμό μικροσκοπικών ακροφυσίων υψηλής ακρίβειας που εκτοξεύουν μελάνι σε χαρτί. Αυτά τα ακροφύσια έχουν διάμετρο 10 μm και κατασκευάζονται από υλικό πυριτίου.

Παρόλαυτα, το πυρίτιο είναι σχετικά ακριβό υλικό και δεν είναι οπτικά διαφανές. Το γεγονός αυτό δυσχεραίνει τις εφαρμογές όπου απαιτείται οπτική ανίχνευση, όπως βιοϊατρικές και χημικές αναλύσεις. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την εισαγωγή γυαλιού

και πολυμερών υλικών, και η μικρορρευστονική τεχνολογία έγινε ξεχωριστός ερευνητικός κλάδος στη δεκαετία του 2000. Σε σύγκριση με το πυρίτιο, το γυαλί και πολυμερή υλικά όπως το πολυμεθυλμεθακρυλικό (PMMA), το πολυστυρόλιο (PS), το πολυανθρακικό (PC) και η πολυδιμεθυλοσιλοξάνη (PDMS) είναι λιγότερο ακριβά και οπτικά διαφανή. Ειδικότερα, το PDMS αποτελεί ένα από τα ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά για την κατασκευή μικρορρευστονικών συσκευών σε ερευνητικά εργαστήρια. Τα πλεονεκτήματα της χρήσης PDMS είναι:

- i) η εύκολη αναπαραγωγή,
- ii) η οπτική διαφάνεια,
- iii) η βιοσυμβατότητα και
- iv) το χαμηλό κόστος.

Η κατασκευή επιπέδων καναλιών και μικροδομών από PDMS βασίζεται σε μαλακή λιθογραφία, η οποία είναι μια μη φωτολιθογραφική μέθοδος.

Μικρορρευστονικές συσκευές με βάση γυαλί / PDMS χρησιμοποιήθηκαν ευρέως σε διάφορες βιοϊατρικές εφαρμογές όπως ανάλυση DNA, ανοσοδοκιμασίες κ.α. Πρόσφατα, το χαρτί έχει προταθεί ως ένα εναλλακτικό υλικό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή μικρορρευστονικών συσκευών και παρουσιάζει πλεονεκτήματα όπως η φθηνή, λεπτή, ελαφριά κατασκευής και η δυνατότητα μίας χρήσης. Επιπλέον, το υπόστρωμα από χαρτί είναι βιοσυμβατό με διάφορα βιολογικά δείγματα και μπορεί να τροποποιηθεί από ένα ευρύ φάσμα λειτουργικών ομάδων που μπορούν να συνδεθούν ομοιοπολικά με πρωτεΐνες, DNA ή μικρά μόρια. Τα μικρορρευστονικά συστήματα με βάση το χαρτί προορίζονταν αρχικά να αποτελέσουν διαγνωστικές συσκευές φροντίδας για αναπτυσσόμενες χώρες και απομακρυσμένα περιβάλλοντα.

Στη συνέχεια, καταδεικνύονται διάφορες διαγνωστικές εφαρμογές, για παράδειγμα, αποδείχθηκε ότι η ανοσοπροσοροφητική δοκιμασία που βασίζεται σε ένζυμο (ELISA) ολοκληρώθηκε εντός μίας ώρας, ενώ η συμβατική ELISA απαιτεί τουλάχιστον 6 ώρες. Επιπλέον, τα βιολογικά κύτταρα αναφέρθηκαν επίσης ότι καλλιεργήθηκαν σε χάρτινα υποστρώματα για πιο προηγμένες αναλύσεις.

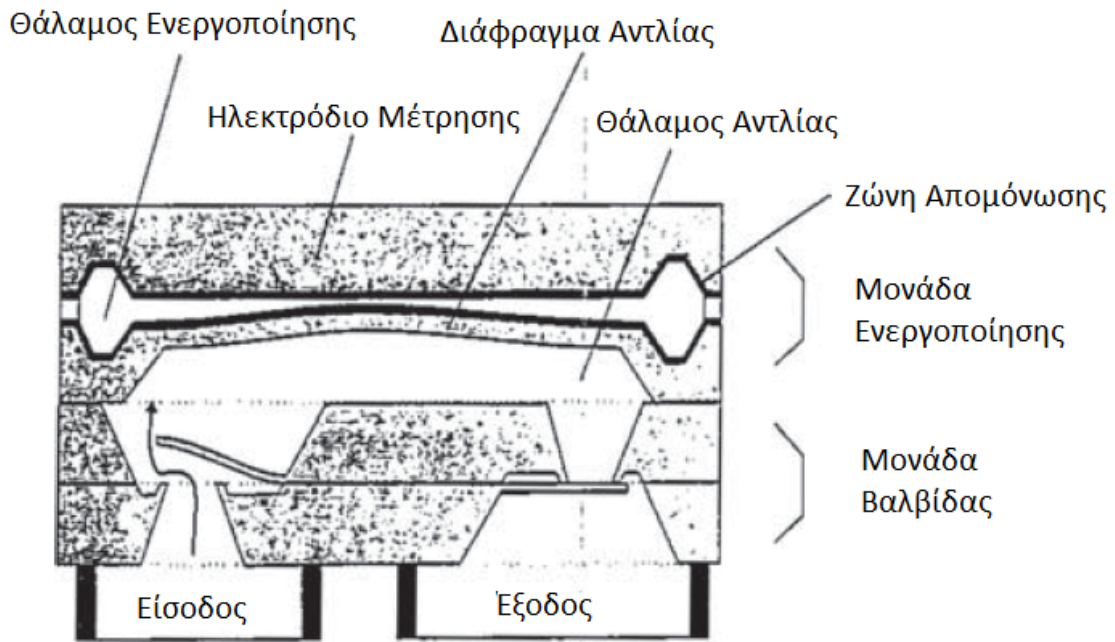
Οι παραπάνω συζητήσεις εισάγουν εν συντομία διαφορετικά υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μικρο-ρρευστών συσκευών όπως πυρίτιο, γυαλί / πολυμερές, ακόμη και υποστρώματα χαρτιού. Παρατηρείται ότι ο σχεδιασμός και το υλικό που χρησιμοποιούνται από τις μικρορρευστονικές συσκευές είναι εύκαμπτα και απεριόριστα.

2.2 Ανάπτυξη σύνθετων μικρορευστονικών συστημάτων

Η εξέλιξη της μικρορευστονικής βασίστηκε στην τεχνολογία των Μικρο-ηλεκτρο-μηχανικών συστημάτων (MEMS). Τα MEMS αποτελούν μικροσκοπικά συστήματα που απαρτίζονται από ηλεκτρονικά και μηχανικά εξαρτήματα. Αποτελούν ουσιαστικά μια μικρογραφία συμβατικών μακροσκοπικών συσκευών για τη μέτρηση φυσικών ποσοτήτων. Επιπρόσθετα, έχουν σημειώσει ραγδαία ανάπτυξη ήταν γρήγορη κάνοντας τα εξαρτήματα ανίχνευσης μικρά και φθηνά.

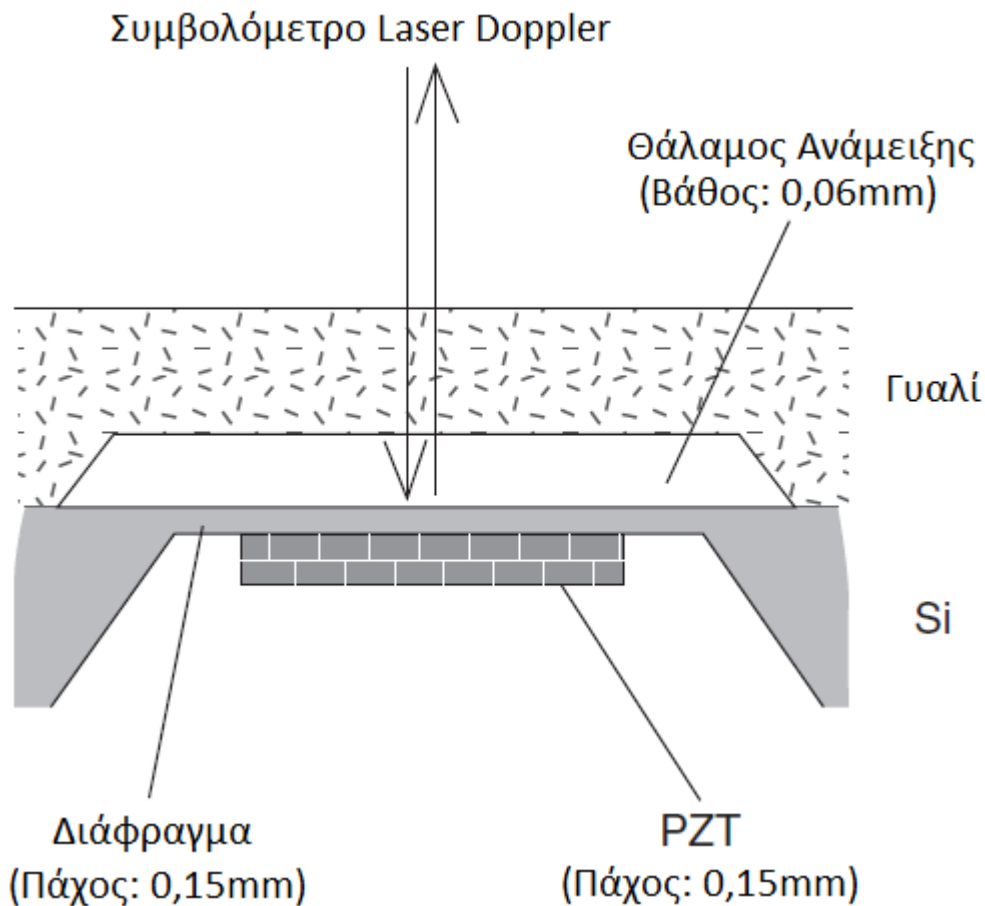
Χαρακτηριστικό παράδειγμα μικροηλεκτρομηχανικού συστήματος (MEMS) είναι το επιταχυνσιόμετρο, που βρίσκεται ενσωματωμένο σχεδόν σε κάθε κινητό τηλέφωνο ανιχνεύοντας τη βαρύτητα για τον προσδιορισμό του προσανατολισμού του κινητού τηλεφώνου. Βασιζόμενοι σε αυτό το σκεπτικό, οι επιστήμονες προσπάθησαν αντίστοιχα να κατασκευάσουν μικρορευστονικές συσκευές με βάση τις συμβατικές μακροσκοπικές ρευστονικές συσκευές που βρίσκονται σε ένα εργαστήριο. Αυτές οι μικροσκοπικές συσκευές σχεδιάστηκαν για να χειρίζονται υγρά υπο-χιλιοστόλιτρου, έτσι ονομάστηκαν μικρορευστικές συσκευές. Στην αρχή, οι περισσότερες εξελίξεις επικεντρώθηκαν στη σμίκρυνση εξαρτημάτων όπως αντλίες, αναμεικτές και βαλβίδες. Αυτά τα επιμέρους εξαρτήματα ήταν τα θεμελιώδη στοιχεία των μικρορευστονικών συστημάτων, με απώτερο σκοπό την ικανότητα χειρισμού μικροποσοτήτων ρευστών. Ο χειρισμός και η διαχείριση ρευστών στο μικροπεριβάλλον ήταν το βασικό ζήτημα που πρέπει να λυθεί και αποτέλεσε το επίκεντρο της πρώιμης ανάπτυξης της μικρορευστονικής τεχνολογίας στη δεκαετία του 1990. Το γεγονός αυτό, φαίνεται ξεκάθαρα στα δυο παραδείγματα που ακολουθούν.

Ένα πρώιμο εξάρτημα ήταν μια μικροαντλία από πυρίτιο, που ενεργοποιείται από ηλεκτροστατικό διάφραγμα και δύο παθητικές βαλβίδες ελέγχου και φαίνεται στην εικόνα 2.1.



Εικόνα 2.1. Μικροαντλία με ηλεκτροστατικό διάφραγμα από πυρίτιο [10].

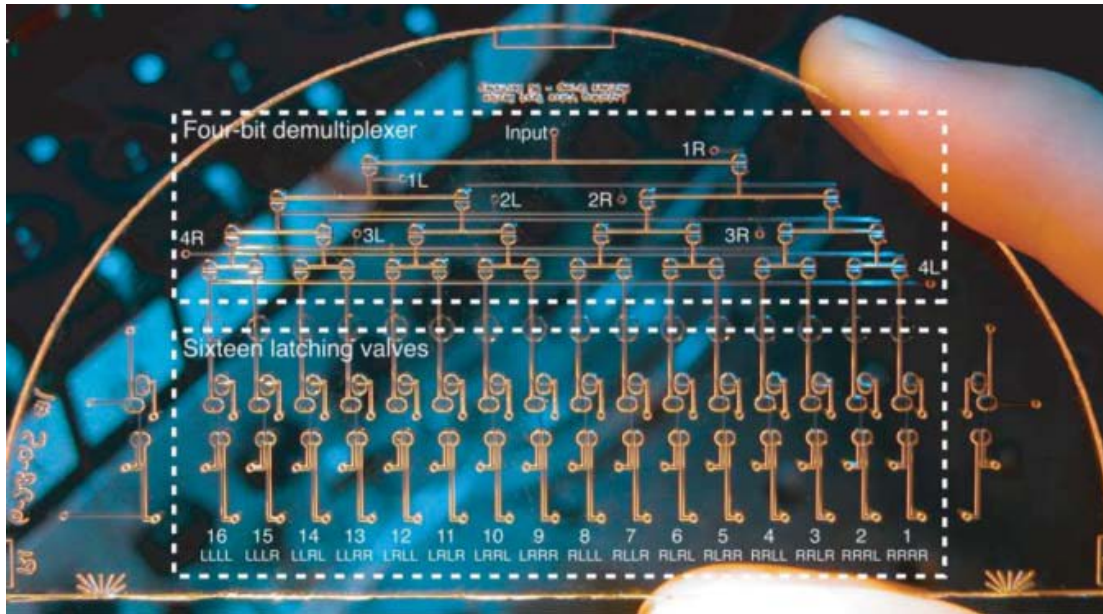
Μια άλλη πρόμη διάταξη μικροαναμίκτη φαίνεται στο σχήμα , στην οποία επιτυγχάνεται αποτελεσματική ανάμιξη με συνεχή ρυθμό, χάρη στη δόνηση υπερήχων. Ο συγκεκριμένος μικροαναμίκτης κατασκευάστηκε με χρήση γυάλινου υποστρώματος και υποστρώματος πυριτίου. Το γυάλινο υπόστρωμα χαραχθηκε και ενώθηκε με το υπόστρωμα πυριτίου για να σχηματίσει το κανάλι ροής. Το υπόστρωμα πυριτίου χαραχθηκε από την πίσω πλευρά για να σχηματίσει το ταλαντευόμενο διάφραγμα, όπου ενσωματώθηκε ένας πιεζοηλεκτρικός δίσκος. Κατά τη λειτουργία του, οι στρωτές ροές αναμιγνύονται με συνεχή ρυθμό χάρη στην υπερηχητική δόνηση από το διάφραγμα που ενεργοποιήθηκε από τον πιεζοηλεκτρικό δίσκο.



Εικόνα 2.2. Σχηματικό διάγραμμα της διατομής του μικρομείκτη [10].

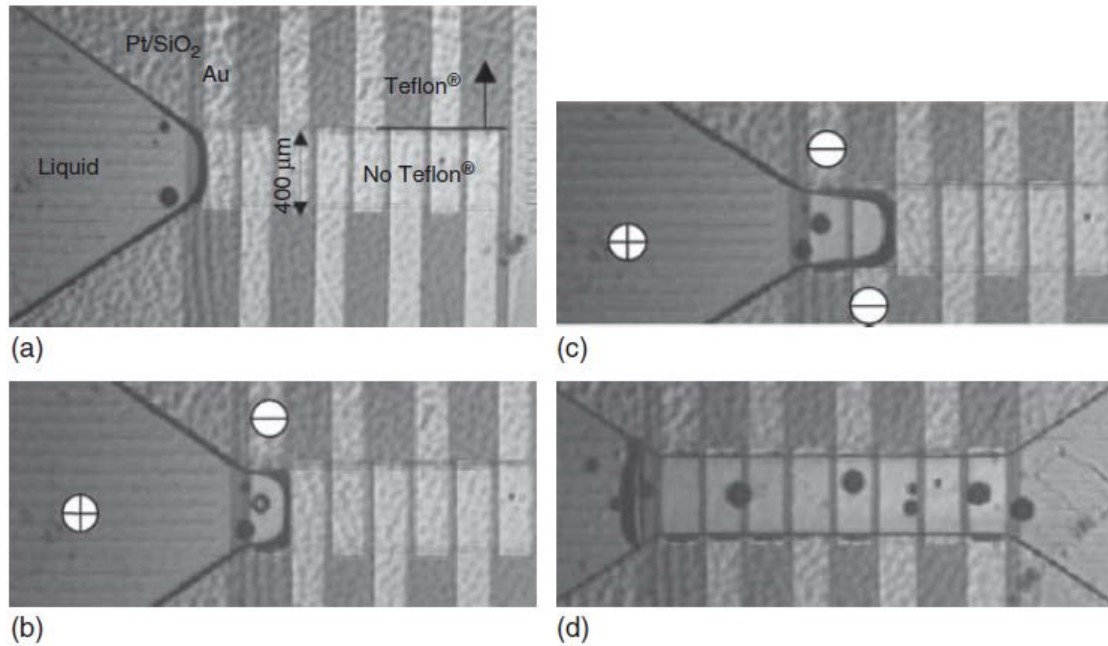
Ωστόσο, λόγω των περιορισμένων αριθμού υποστρωμάτων, μόνο πυρίτιο και γυαλί, τα μικρορευστονικά εξαρτήματα απαιτούσαν ακριβό εξοπλισμό και ειδικές εγκαταστάσεις για να κατασκευαστούν. Επιπλέον, το υπόστρωμα πυριτίου είναι σχετικά ακριβό και οπτικά αδιαφανές, γεγονός που δεν δίνει τη δυνατότητα οπτικής ανίχνευσης, ειδικά για βιοϊατρικές και χημικές αναλύσεις.

Αργότερα, στη δεκαετία του 2000, χρησιμοποιήθηκαν πολυμερή υλικά για την κατασκευή μικρορευστονικών συσκευών / συστημάτων. Μέχρι σήμερα, το PDMS αποτελεί ένα από τα ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά κατασκευής μικρορευστονικών συσκευών / συστημάτων σε εργαστήρια. Τώρα πια μπόρεσαν να κατασκευαστούν περίπλοκα μικρορευστονικά συστήματα ενσωματώνοντας πολλά εξαρτήματα, χάρη στο πλεονέκτημα της εύκολης κατασκευής.



Εικόνα 2.3. Φωτογραφία του συστήματος πολλαπλών βαλβίδων ασφάλισης με αποπολυπλέκτη 4-bit και 16 βαλβίδες ασφάλισης [10].

Μεγάλη καινοτομία αποτελεί η κατασκευή ενός ολοκληρωμένου μικρορευστονικού συστήματος με βαλβίδες λειτουργίας, βαλβίδες μεταγωγής και αντλίες. Το σύστημα κατασκευάστηκε εξ ολοκλήρου από ελαστομερές με πολυστρωματική μαλακή λιθογραφία και περιλαμβάνει μικρορευστονικές βαλβίδες μανδάλωσης που ελέγχονται ανεξάρτητα από ένα ενσωματωμένο υδροπνευματικό αποπολυπλέκτη. Το μικρορευστονικό σύστημα κατασκευάστηκε με έναν αποπολυπλέκτη τεσσάρων bit για τη δρομολόγηση παλμών πίεσης και κενού από μία απλή σύνδεση εισόδου σε καθεμία από τις 16 βαλβίδες ασφάλισης όπως φαίνεται στην εικόνα 2.3. Οι διάφοροι συνδυασμοί βαλβίδων μπορούν να σχηματίσουν τις τυπικές λογικές πύλες, δόθηκε η δυνατότητα να αναπτυχθούν πολύπλοκοι υδροπνευματικοί μικροεπεξεργαστές για το χειρισμό υγρών.



Εικόνα 2.4. Χειρισμός διακριτών μικροσταγονιδίων με ψηφιακά μικρορευστονικά. (α) εισαγωγή υγρού, (β) πόλωση πρώτου ηλεκτροδίου, (γ) πόλωση πρώτου και δεύτερου ηλεκτροδίου, και (δ) πόλωση όλων των ηλεκτροδίων [10].

Επιπλέον, εκτός από μικρορευστονικές λειτουργίες σε συνεχή ροή, δόθηκε η δυνατότητα για χειρισμό διακριτών μικροσταγονιδίων που οδήγησε στην ανάπτυξη των ψηφιακών μικρορευστονικών. Τα ηλεκτρολυτικά σταγονίδια ενεργοποιούνται με άμεσο ηλεκτρικό έλεγχο της επιφανειακής τάσης μέσω ενός ζεύγους επιπέδων ηλεκτροδίων. Εφαρμόζοντας διαφορά δυναμικού σε διαδοχικά ηλεκτρόδια, ένα σταγονίδιο μπορεί να «βγαίνει» από μια δεξαμενή, να μεταφέρεται σε οποιαδήποτε θέση στη συστοιχία, να συγχωνεύεται με άλλα σταγονίδια για την πραγματοποίηση αντιδράσεων ή να χωρίζεται σε δύο σταγονίδια. Ένα τέτοιο παράδειγμα χειρισμού μικροσταγονιδίων φαίνεται στην εικόνα 2.4. Η εξάλειψη του νεκρού όγκου, η ενίσχυση του λόγου ανάμιξης, η ακρίβεια στον έλεγχο του όγκου και η ενθυλάκωση βιομορίων για παρακολούθηση είναι τα πλεονεκτήματα των ψηφιακών μικρορευστονικών που προτάθηκαν έναντι των παραδοσιακών συστημάτων. Από τις αρχές της δεκαετίας του 2000, έχουμε την κατασκευή σύνθετων μικρορευστονικών συστημάτων, γεγονός που επέτρεψε τη χρήση τους σε εφαρμογές διάφορων βιοϊατρικών και χημικών αναλύσεων.

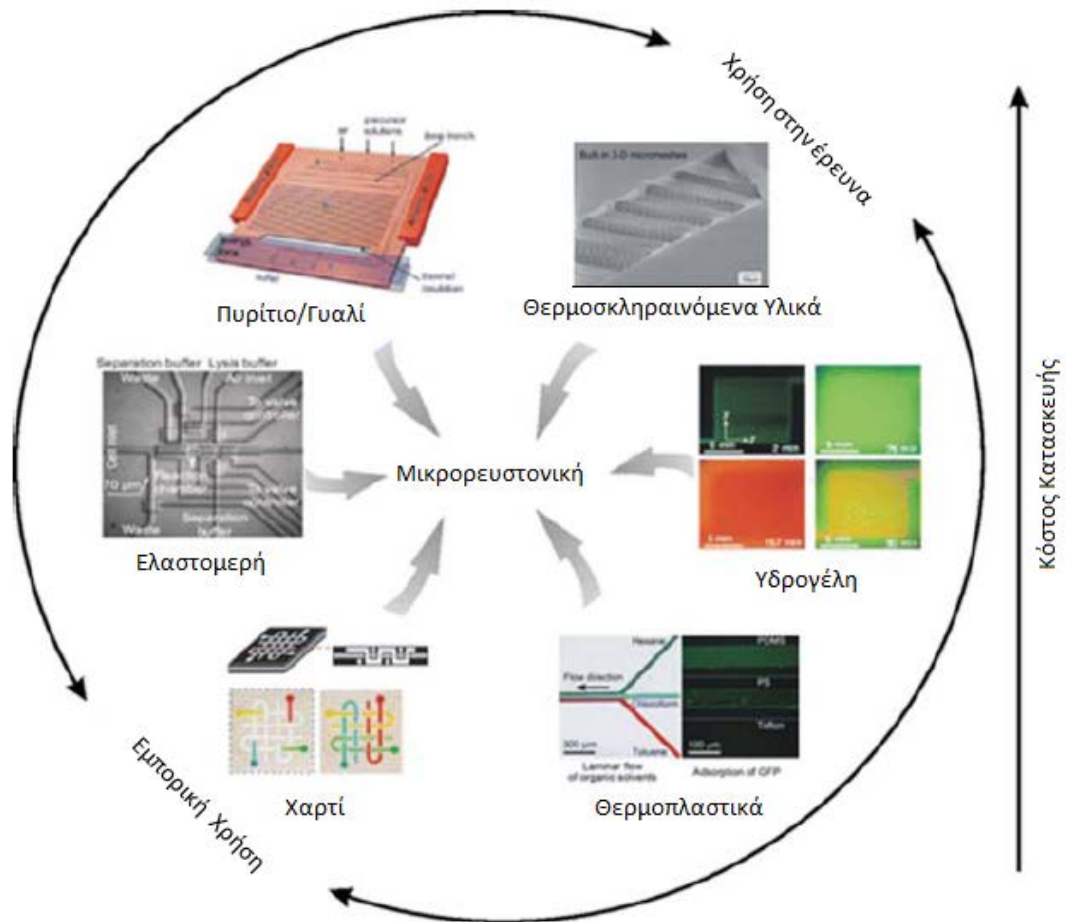
2.3 Διεργασίες κατασκευής μικρορρευστονικών συσκευών

2.3.1 Εισαγωγή

Τα οφέλη της μικρορρευστονικής τεχνολογίας μπορούν να πραγματοποιηθούν μόνο μέσω της κατασκευής των αντίστοιχων συσκευών. Ωστόσο, δεν υπήρξε ποτέ μια απλή υπόθεση η επιλογή των κατάλληλων υλικών και τεχνικών κατασκευής που πληρούν τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής και της αγοράς. Σε αυτό το κεφάλαιο, θα εισαχθεί μια ποικιλία τεχνολογιών διεργασιών για την παραγωγή μικρορρευστονικών συσκευών, ειδικά των συσκευών με βάση το πολυμερές. Από την άλλη πλευρά, στη μικροκλίμακα, οι επιφανειακές ιδιότητες θα μπορούσαν να ενισχυθούν σε μεγάλο βαθμό, καθώς αποτελούν τον κύριο παράγοντα για τη λειτουργικότητα της συσκευής. Πιο συγκεκριμένα, επιφανειακές ιδιότητες όπως η διαβρεξιμότητα και η πρόσφυση μπορεί να καθορίσουν τα χαρακτηριστικά των μικρορρευστονικών συσκευών σε πολλές εφαρμογές.

2.3.2 Κατασκευή μικρορρευστονικών συσκευών

Τα μικρορρευστονικά ξεκίνησαν από ανόργανα υλικά όπως πυρίτιο και γυαλί. Οι τεχνικές της διαδικασίας κατασκευής εξελίχθηκαν σε μεγάλο βαθμό από ολοκληρωμένα κυκλώματα ημιαγωγών (ICs) ή από μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα (MEMS). Ο ακριβής έλεγχος διαστάσεων στην κατασκευή, η εξαιρετική αντοχή σε διαλύτες και η τέλεια ιδιότητα επιφανείας σε εφαρμογές ηλεκτροφόρησης είναι μερικοί από τους κύριους λόγους για τα μικρορρευστονικά με βάση πυρίτιο και γυαλί. Τα μικρορρευστονικά με βάση τα πολυμερή ήρθαν πολύ αργότερα, αλλά εμφάνισαν ραγδαία ανάπτυξη τόσο στην έρευνα όσο και στη μαζική παραγωγή. Χάρη στην απλή αλλά υψηλής ποιότητας αναπαραγωγή μικρορρευστονικών συσκευών και των πολύ περίπλοκων χαρακτηριστικών τους με τη χρήση πολύ - διμεθυλοσιλοξάνης (PDMS), ενός είδους ελαστομερούς, η κατασκευή μικρορρευστονικών διατάξεων έγινε εξαιρετικά εύκολη. Για τη μαζική παραγωγή, υπάρχουν πλέον εξελιγμένες μέθοδοι κατασκευής, όπως χύτευση με έγχυση και πλαστική συγκόλληση έτοιμες για υιοθέτηση, κάνοντας εφικτές χαμηλού κόστους μίας χρήσης συσκευές. Η πρόσφατη υιοθέτηση τρισδιάστατης (3D) τεχνολογίας εκτύπωσης στα μικρορρευστονικά εισήγαγε θερμοσκληρυνόμενα υλικά στο πρωτότυπο της συσκευής.



Εικόνα 2.5. Απεικόνιση διαφορετικών υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή μικρορευστονικών συσκευών [10].

Τα μικρορευστονικά συστήματα χαρτιού έχουν δείξει τις δυνατότητές τους σε εξαιρετικά χαμηλού κόστους κατασκευές, ενώ η συσκευή υδρογέλης έχει χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές κυτταρικής καλλιέργειας. Η εικόνα 2.5 απεικονίζει τα διάφορα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή μικρορευστονικών και την απλοποιημένη σύγκριση μεταξύ των κύριων εφαρμογών τους και του κόστους. Ορισμένα χαρακτηριστικά και ιδιότητες αυτών των υλικών συνοψίστηκαν στον Πίνακα 2.1. Η κατανόηση της υλικής ιδιότητας θα μπορούσε να είναι κρίσιμη στην επιλογή κατάλληλων υλικών όπως και οι τεχνικές κατασκευής για συγκεκριμένες μικρορευστονικές εφαρμογές. Για παράδειγμα, η υψηλής πυκνότητας συστοιχία μικροκυλών που χρησιμοποιείται ως τριχοειδής αντλία θα μπορούσε να κατασκευαστεί εύκολα μόνο μέσω διαδικασίας ξηρής εγχάραξης πυριτίου, αλλά θα ήταν πολύ δύσκολη για χύτευση με έγχυση θερμοπλαστικών.

Υλικά	Πυρίτιο	Γυαλί	Πολυμερή
Κόστος Υλικού	Ακριβό (~1 \$/cm ²)	Ακριβό (0.2~0.4 \$/cm ²)	Φθηνό (~0.01 \$/cm ²)
Ευκολία Κατασκευής	Διαθέσιμο στη βιομηχανία των ημιαγωγών, εμπλέκοντας μια σειρά από διεργασίες και χημικά	Περιορισμός στη γεωμετρία λόγω της ισοτροπίας της εγχάραξης	Υψηλή επεξεργασιμότητα
Μαζικότητα Παραγωγής	Ναι, αργή διεργασία, υψηλό κόστος	Ναι, αργή διεργασία, υψηλό κόστος	Ναι, γρήγορη διαδικασία, χαμηλό κόστος
Οπτικά	Αδιαφανές	Διαφανές	Διαφανές, μπορεί να απορροφούν στο UV
Θερμική Αγωγιμότητα	~ 1.4 W/mK	~ 1 W/mK	~ 0.1 W/mK
Βιοσυμβατότητα	Συνήθως χρειάζεται επιφανειακή τροποποίηση	Ναι	Εξαρτάται από το πολυμερές και την εφαρμογή
Υψηλή Θερμοκρασία Αποστείρωσης	Ναι δυνατή	Ναι δυνατή	Τείνουν να παραμορφωθούν
Ηλεκτρική Αγωγιμότητα	Ημιαγωγός	Μονωτής	Μονωτής

Πίνακας 2.1. Ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μικρορευστονικών συσκευών[6].

2.3.2.1 Διαδικασία κατασκευής με πυρίτιο και γυαλί

Μια μικρορευστονική συσκευή αποτελείται γενικά από ενσωματωμένα κανάλια και κοιλότητες, καθώς και ανοίγματα οπών ως διεπαφές. Γενικά τα μικροχαρακτηριστικά (κανάλι και κοιλότητα) δημιουργούνται σε ένα κομμάτι της επίπεδης πλάκας και στη συνέχεια σφραγίζονται από ένα άλλο κομμάτι της επίπεδης πλάκας. Σε ορισμένες περιπτώσεις χρειάζονται οι ηλεκτρικές συνδέσεις για να ενσωματωθούν ενεργά εξαρτήματα όπως αισθητήρες ή θερμαντήρες. Ο Πίνακας 2.2 συνοψίζει τις οδηγίες επιλογής σχετικά με τις διαδικασίες κατασκευής συσκευών.

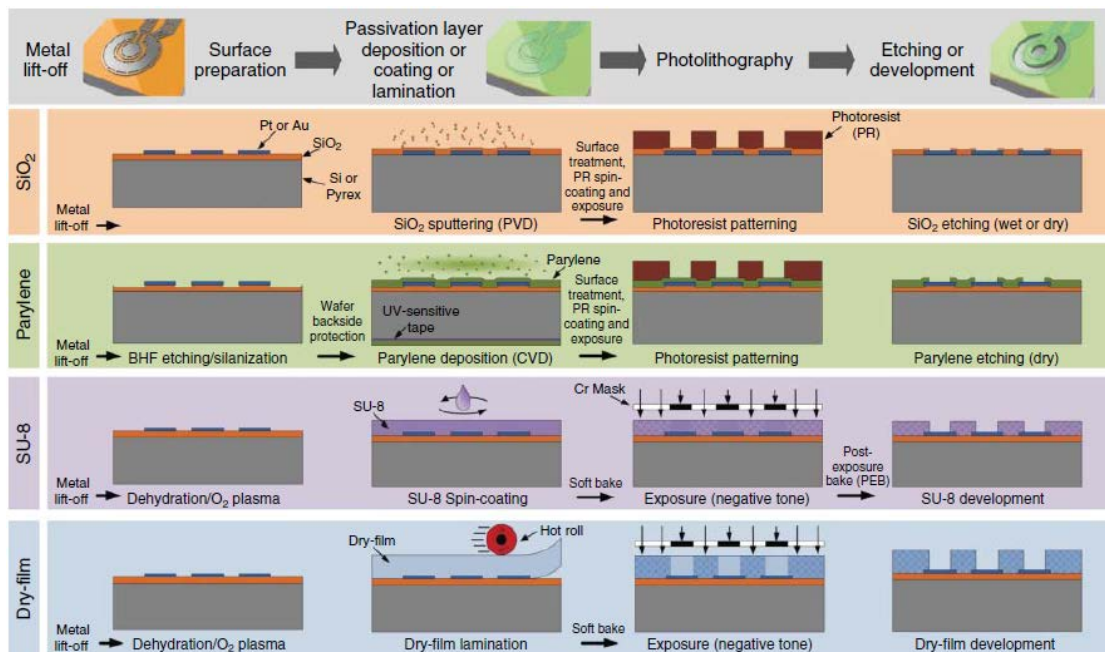
Φωτολιθογραφία

Τα σχήματα και οι διαστάσεις των χαρακτηριστικών (κανάλι, κοιλότητα, ηλεκτρόδιο κ.λπ.) ορίζονται συνήθως μέσω της διαδικασίας φωτολιθογραφίας. Στην επιφάνεια του υποστρώματος (γυαλί ή πυρίτιο), ένα στρώμα φωτοευαίσθητου

πολυμερούς (φωτοανθεκτικό) επικαλύπτεται μέσω επίστρωσης περιστροφής ή πλαστικοποίησης ξηρής μεμβράνης, προτού εκτεθεί σε έντονο φως σε επιλεκτικές περιοχές που ορίζονται από τη φωτομάσκα. Εναλλακτικά, το φωτοανθεκτικό στρώμα μπορεί να εκτεθεί μέσω άμεσης σάρωσης με λέιζερ ή ηλεκτρονικής δέσμης χωρίς τη χρήση φωτομάσκας. Οι εκτεθειμένες περιοχές θα μπορούσαν να διαλυθούν και να ξεπλυθούν μ. Το υπόλοιπο φωτοανθεκτικό θα σκληρύνει κάτω από το ψήσιμο, στο οποίο έγινε στρώμα προστασίας για περαιτέρω διαδικασία εγχάραξης.

Χαλκογραφία

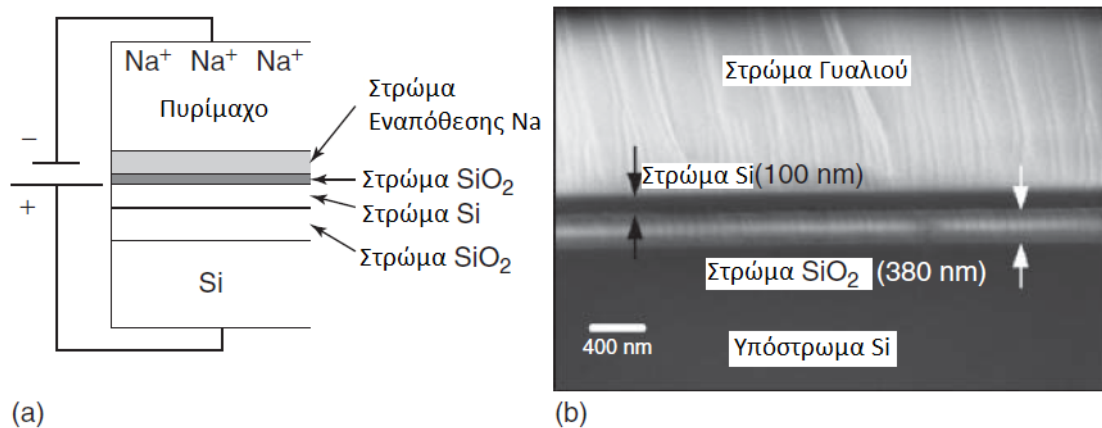
Μετά τη φωτολιθογραφία, η επιφάνεια του υποστρώματος καλύπτεται από στρώματα προστασίας σε επιλεκτικές περιοχές που ακολουθούν το σχεδιασμό. Η εγχάραξη είναι η επιλεκτική αφαίρεση υλικού από το υπόστρωμα και ο σχηματισμός μιας μικροδομής. Μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι η υγρή εγχάραξη, κατά την οποία βυθίζεται το υπόστρωμα σε αντιδραστικό χημικό διάλυμα και να αφαιρείται το υλικό στην εκτεθειμένη περιοχή. Για το υπόστρωμα πυριτίου, η υγρή εγχάραξη μπορεί να είναι ανισοτροπική, επειδή ο ρυθμός εγχάραξης εξαρτάται από τον κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό του πυριτίου και ποικίλλει σε διαφορετικές κατευθύνσεις. Ενώ για το γυαλί, η υγρή εγχάραξη είναι γενικά ισοτροπική, επιτυγχάνοντας τον ίδιο ρυθμό χάραξης σε όλες τις κατευθύνσεις. Μια άλλη μέθοδος εγχάραξης είναι η ξηρή εγχάραξη, για παράδειγμα, η ιοντοβολή. Μπορούν να δημιουργηθούν εξαιρετικά υψηλές δομές κατ' αναλογία διαστάσεων, όπως βαθιές οπές με ευθεία κάθετο το πλευρικό τοίχωμα σε υποστρώματα πυριτίου και γυαλιού χρησιμοποιώντας ξηρή εγχάραξη.



Εικόνα 2.6. Σχηματικό διάγραμμα των επιμέρους σταδίων για διεργασίες i) sputtering SiO₂, ii) εναπόθεση Parylene, iii) επίστρωση SU-8 και iv) επίστρωση ξηρού υμενίου [10].

Μεταλλοποίηση

Τα μικροηλεκτρόδια στο υπόστρωμα πρέπει να εναποτίθενται και να σχεδιάζονται σύμφωνα με το σχεδιασμό και να προστατεύονται κάτω από μονωμένο στρώμα. Η εικόνα 2.6 συνοψίζει τις διαθέσιμες τεχνικές για τη διαμόρφωση των μικροηλεκτροδίων μέσω της διαδικασίας ανύψωσης και της εναπόθεσης / σχηματοποίησης του στρώματος παθητικοποίησης. Το μεταλλικό υλικό αποτελείται από στρώμα 20nm Ti (για προσκόλληση) και στρώμα 200nm Pt, τα οποία εναποτίθενται μέσω κανονίου ηλεκτρονίων. Πριν από την εναπόθεση του μετάλλου, η επιφάνεια του υποστρώματος έχει καλυφθεί με ένα φωτοανθεκτικό στρώμα με ανάλογο μοτίβο. Το σχέδιο των μικροηλεκτροδίων σχηματίζεται απογυμνώνοντας το κάτω μέρος του φωτοανθεκτικού. Το SiO₂ είναι ένα υλικό παθητικοποίησης που χρησιμοποιείται συνήθως στη μικροπαρασκευή MEMS, το οποίο μπορεί να εναποτεθεί μέσω ψεκασμού και διαμόρφωσης με τυπική φωτολιθογραφία. Το παρυλένιο είναι ένα άλλο συνήθως παθητικό υλικό λόγω των ανώτερων μηχανικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων του. Μπορεί να διαμορφωθεί μέσω τυπικής φωτολιθογραφίας και να αφαιρεθεί μέσω ιοντοβολής ιόντων οξυγόνου. Το SU-8 είναι ένα φωτοανθεκτικό που χρησιμοποιείται ευρέως στη μικροκατασκευή MEMS, το οποίο δημιουργεί δομές υψηλής αναλογίας διαστάσεων μέσω τυπικής φωτολιθογραφίας. Από την άλλη πλευρά, η ξηρή μεμβράνη, μια φωτοανθεκτική μεμβράνη που χρησιμοποιείται στην κατασκευή πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων, μπορεί να εφαρμοστεί στην επιφάνεια χρησιμοποιώντας απλά εργαλεία πλαστικοποίησης. Τα μοτίβα μπορούν να δημιουργηθούν υπό έκθεση σε υπεριώδεις ακτίνες. Αν και η παθητικοποίηση ξηρού υμενίου είναι εύκολη και χαμηλού κόστους, η ανάλυση δεν είναι τόσο καλή όσο άλλες παθητικές μέθοδοι.



Εικόνα 2.7. (α) Σχηματική αναπαράσταση της αλληλουχίας στρωμάτων. (β) Εγκάρσια τομή από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης του στρώματος πυριτίου που συνδέεται με μονωτή (SiO₂) σε γυαλί [10].

Συγκόλληση

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας συγκόλλησης, δύο ή περισσότερα κομμάτια πυριτίου και / ή γυαλιού υποστρώματος ενώνονται και σχηματίζουν μια στοίβα. Η διαδικασία συγκόλλησης θα μπορούσε να είναι άμεση (χωρίς ενδιάμεσο υλικό) ή έμμεση (με ενδιάμεσο στρώμα, όπως κόλλα). Προκειμένου να επιτευχθεί ισχυρή συγκόλληση, τα υποστρώματα πρέπει να είναι εξαιρετικά επίπεδα, λεία, καθαρά και χωρίς κενά. Μια δημοφιλής διαδικασία συγκόλλησης πυριτίου-γυαλιού είναι η ανοδική συγκόλληση, όπου στο ζεύγος του υποστρώματος εφαρμόζεται ηλεκτρικό πεδίο και αυξημένη θερμοκρασία, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.7. Το βοριοπυριτικό γυαλί όπως το Pyrex 7740 έχει υψηλή συγκέντρωση Na^+ , τα οποία απομακρύνονται από τη διεπαφή υπό υψηλή αρνητική τάση. Η εξάντληση του Na^+ θα δημιουργήσει ένα υψηλό ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ των διεπαφών γυαλιού-πυριτίου, θα μεταφέρει το οξυγόνο από το γυαλί στην επιφάνεια και θα το συνδυάσει με το πυρίτιο για να σχηματίσει SiO_2 , το οποίο δημιουργεί ισχυρή συγκόλληση. Η αυξημένη θερμοκρασία θα αυξήσει την κινητικότητα των ιόντων και θα βοηθήσει τη διαδικασία συγκόλλησης.

2.3.2.2 Διεργασίες κατασκευής από πολυμερές

Υπάρχουν πολλές διαθέσιμες τεχνικές διεργασίας για την κατασκευή μικρορευστονικών συσκευών από πολυμερές. Ορισμένες τεχνικές έχουν καθιερωθεί στη μεταποιητική βιομηχανία όπως η χύτευση με έγχυση και η συγκόλληση με υπερήχους, αλλά εξακολουθούν να αντιμετωπίζουν νέες προκλήσεις από τις απαιτήσεις των μικρορευστονικών συσκευών. Κάποιες άλλες τεχνικές είναι νεοεμφανιζόμενες αλλά πολλά υποσχόμενες όπως η τεχνική *microembossing* και η τρισδιάστατη εκτύπωση, οι οποίες προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία στο σχεδιασμό και την κατασκευή μικρορευστονικών συσκευών από πολυμερή.

Στην κατασκευή μικρορευστονικών εμπλέκονται τρεις τύποι πολυμερών υλικών. Ένας τύπος είναι θερμοσκληρυνόμενος, του οποίου η T_g είναι πολύ υψηλή και κοντά στη θερμοκρασία αποσύνθεσης (TD). Θερμοσκληρυνόμενα υλικά όπως πολυϊμίδιο, φωτοανθεκτικοί παράγοντες όπως το SU-8 και φωτο-σκληρυνόμενες ρητίνες για στερεολιθογραφία (SLA) δεν μπορούν να αναμορφωθούν μετά τη σκλήρυνση.

Ένας άλλος τύπος είναι θερμοπλαστικά υλικά, όπως πολυμεθακρυλικό μεθύλιο (PMMA), πολυανθρακικό (PC) και συμπολυμερές κυκλικής ολεφίνης (COC). Τα θερμοπλαστικά μαλακώνουν με χαμηλή T_g , το οποίο είναι πολύ χαμηλότερο από τη θερμοκρασία αποσύνθεσης (TD), με αποτέλεσμα ένα μεγάλο παράθυρο διεργασίας ανασχηματισμού.

Ο τρίτος τύπος είναι τα ελαστομερή όπως το PDMS. Οι τεχνικές διεργασίες που συζητάμε σε αυτήν την ενότητα εστιάζουν κυρίως στην κατασκευή θερμοπλαστικών.

Διαμόρφωση

Τεχνικές Δυνατότητες					
Κατηγορίες	Μικροάλεση	Ανάγλυφο	Στερεολιθογραφία	Εγχυση Καλουπιού	
Ιδιότητες Υλικού					
Θερμοπλαστικά	●●●●	●●●●	●●●●*	●●●●	
Θερμοσκληραινόμενα	●●●●*	●●●●*	●●●●*	●●●●	
Ελαστομερή	●●●●	●●●●†	●●●●*	●●●●	
Μέταλλα	●●●●	●●●●‡	●●●●†	●●●●*	
Γυαλί/Κεραμικά	●●●●†	●●●●§	●●●●†	●●●●*	
Κερί	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	
Κατασκευαστικές Ιδιότητες					
Πρόσθετα Υψηλά Κλίμακα	Μη Προστιθέμενη Πολυπλοκότητα 8 : 1	Επιπλέον Στρώμα ανα Ύψος 2 : 1	Μη Προστιθέμενη Πολυπλοκότητα Εξαρτώμενη από τη μέθοδο	Μη Προστιθέμενη Πολυπλοκότητα 8 : 1	
3D Περιγράμματα	Συνεχή	Με Αναβαθμούς	Με Αναβαθμούς	Συνεχή	
Αιχμηρές Γωνίες	Μόνο Εξωτερικές	Εσωτερικές/Εξωτερικές	Εσωτερικές/Εξωτερικές	Εσωτερικές/Εξωτερικές	
Κοπές Ακριβείας	Με Ειδικά Εργαλεία	Αδύνατο	Ναι	Με Ειδικά Εργαλεία	
Αποτελέσματα					
Τραχύτητα Επιφάνειας	0.4–2 μm	Αναπαράγει την Τραχύτητα του Καλουπιού	0.4–6 μm	Αναπαράγει την Τραχύτητα του Καλουπιού	
Αυτοφθορισμός	Δεν Επηρεάζεται	Αυξάνεται με Επεξεργασία	Εξαρτάται από το υλικό	Δεν Επηρεάζεται	
Δυνατότητα Εφαρμογής					
●●●● Σε όλες τις συνθήκες	* Μόνο Σκληρωμένα	* Μη Σκληρωμένα	* Χρησιμοποιεί ρητίνες, οι οποίες όταν σκληρύνουν έχουν παρόμοιες ιδιότητες με το επιθυμητό πολυμερές	* Απαιτεί πρόσθετο πολυμερές/κερί	
●●●● Στις περισσότερες	† Ελλιπής Συνοχή και Χαρακτηρισμός	† Μόνο Θερμοπλαστικά Ελαστομερή	† Απαιτεί πρόσθετο πολυμερές/κερί		
●●●● Σε ειδικές συνθήκες		‡ Περιορίζεται σε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και λεπτά φύλλα			
●●●● Ανέφικτη		§ Μείγμα στρωμάτων με πολυμερές			

Σύγκριση Κόστους										
Κόστη Εγκατάστασης Εξοπλισμός Εργαλεία/Προμήθειες	Μικροάλεση (On-site)		Ανάγλυφο (On-site)		Στερεολιθογραφία (Outsourced)		Εγχυση Καλουπιού (Outsourced)			
	Χρόνος	Κόστος	Χρόνος	Κόστος	Χρόνος	Κόστος	Χρόνος	Κόστος	Χρόνος	Κόστος
Περιφερειακά έξοδα										
Καλούπι/Εργαλεία	N/A	N/A	N/A	N/A	4–15 d	\$55–321	N/A	N/A	N/A	\$2255
Κατασκευή συσκευής	N/A	N/A	11–15 d	\$137	N/A	N/A	4–6 d	\$33	11–15 d	\$2
Άμεσα έξοδα										
Εγκατάσταση μηχανής	10 m	N/A	N/A	N/A	5 m	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Εγκατάσταση υλικού	<5 m	\$1	N/A	N/A	< 5 m	\$1	N/A	N/A	N/A	N/A
Κατασκευή διάταξης	10 m	N/A	N/A	N/A	30 m	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Μερικό σύνολο:	25 m	\$1	N/A	N/A	40 m	\$1	N/A	N/A	N/A	N/A
Έξοδα (ανα συσκευή)										
1 Συσκευή	<1 h	\$1	11–15 d	\$137	4–15 d	\$56–322	4–6 d	\$33	11–15 d	\$2257
25 Συσκευές	1 d	\$1	11–15 d	\$137	6–17 d	\$3–14	4–6 d	\$33	11–15 d	\$92
50 Συσκευές	3 d	\$1	11–15 d	\$137	8–19 d	\$2–7	4–6 d	\$33	11–15 d	\$47

Πίνακας 2.2. Σύγκριση μεταξύ μικροάλεσης και άλλων μεθόδων μικροκατασκευής για πολυμερή, από την άποψη (α) συμβατότητας υλικού, δυνατότητας χαρακτηριστικών και ποιότητας και (β) κόστους. Το "Κόστος" (σε USD) είναι μια εκτίμηση, όπου η κατασκευή υπολογίζεται με βάση το κόστος των

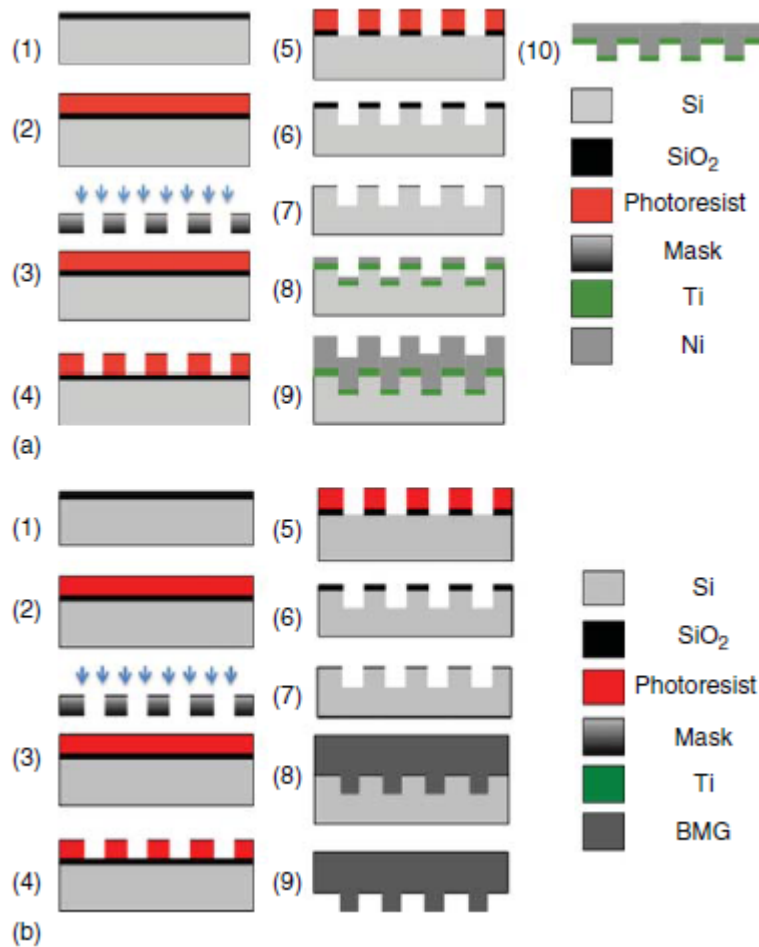
χρησιμοποιούμενων αγαθών (δεν συμπεριλαμβάνεται η εργασία · εκτιμάται από τα εργαστήρια άλλων συγγραφέων) και η εξωτερική ανάθεση βασίζεται στην χαμηλότερη τιμή που αποκτήσαμε για τις διαφορετικές ποσότητες. $N / A =$ δεν ισχύει [10].

Η διαμόρφωση πολυμερούς μπορεί να γίνει με καλούπι (χύτευση με έγχυση, ανάγλυφο) ή χωρίς καλούπι (μικρο-άλεση, εκτύπωση 3D). Ο πίνακας 2.2 συγκρίνει τις δυνατότητες διεργασίας και το κόστος τεσσάρων κύριων τεχνικών διαμόρφωσης πολυμερών, για παράδειγμα, μικρο-άλεση, θερμό ανάγλυφο, SLA και έγχυση. Η μικρο-άλεση και η SLA θα μπορούσαν να παρέχουν ένα ευρύ φάσμα δυνατοτήτων χαρακτηριστικών και να επιτύχουν σύνθετα χαρακτηριστικά, ενώ το θερμό ανάγλυφο και η χύτευση με έγχυση θα μπορούσαν να προσφέρουν πολύ υψηλή ποιότητα των τελικών μερών όσον αφορά την τραχύτητα της επιφάνειας και την ακρίβεια των διαστάσεων. Στη σύγκριση κόστους, η χύτευση με έγχυση χρειάζεται την υψηλότερη επένδυση σε υποδομές, εξοπλισμό και τεχνογνωσία. Εάν απαιτείται παραγωγή μεγάλου όγκου, η χύτευση με έγχυση και η καυτή ανάγλυφη μορφή είναι οικονομικά πιο αποδοτική ανά τεμάχιο. Αντίθετα, το κόστος ανά μέρος για μικρο-άλεση και SLA θα μπορούσε να είναι πιο σταθερό, ανεξάρτητα από την ποσότητα των παραγόμενων ανταλλακτικών. Γενικά, η μικρο-άλεση είναι η πιο κατάλληλη για γρήγορα πρωτότυπα λόγω του χαμηλού κόστους εκκίνησης, της υψηλής ανάλυσης και της ευελιξίας σχετικά με τις γεωμετρίες χαρακτηριστικών και τις επιλογές υλικών. Από την άλλη πλευρά, η χύτευση με έγχυση παραμένει η πιο κατάλληλη διαδικασία σχηματοποίησης για παραγωγή μεγάλου όγκου λόγω της υψηλής πιστότητας αναπαραγωγής και του χαμηλού κόστους ανά τεμάχιο.

Χρήση PDMS

Το PDMS είναι το πιο διαδεδομένο υλικό που χρησιμοποιείται σε εργαστήρια για τη δημιουργία πρωτοτύπων μικρορρευστών συσκευών μέσω χύτευσης. Ένα μείγμα υγρού PDMS και ενός παράγοντα διασύνδεσης χύνεται στην επιφάνεια ενός καλουπιού, όπου τα επιθυμητά μικρο-χαρακτηριστικά έχουν δημιουργηθεί μέσω επεξεργασίας με μικρομαγνητισμό και θέρμανσης. Μετά τη σκλήρυνση του, το PDMS μπορεί να αφαιρεθεί από την επιφάνεια του καλουπιού, ενώ τα μικρο-χαρακτηριστικά (κανάλια υγρού, κοιλότητες) έχουν αναπαραχθεί σε υψηλή πιστότητα. Αυτό το κομμάτι του αντιγράφου PDMS μπορεί να συνδεθεί με ένα γυάλινο πλακίδιο με απλή στοίβαξη και να σχηματίσει ένα πλήρες μικρορρευστονικό πρωτότυπο.

Κατασκευή καλουπιού



Εικόνα 2.8. Στάδια διεργασίας για την κατασκευή δομών και εναπόθεση Ni και μεταλλικού γυαλιού (BMG): (α) Διαδικασία UV-LIGA: (1) οξείδωση Si, (2) φωτοαντιστήρας επικάλυψης περιστροφής, (3) λιθογραφία UV, (4) ανάπτυξη, (5) εγχάραξη SiO₂ και αφαίρεση photoresist, (6) εγχάραξη RIE του Si, (7) επίστρωση PVD Ti και Ni, (8) ηλεκτρολυτική επίστρωση, (9) διάλυση Si και (10) στίλβωση πολυστρωματικών δομών. (β) θερμοπλαστική διαδικασία σχηματισμού: (1) - (7) είναι τα ίδια με τη διαδικασία UV-LIGA, (8) θερμοπλαστικό BMG που μετασχηματίζεται σε Si, (9) το Si που διαλύεται σε διάλυμα KOH [10].

Η διαδικασία αναπαραγωγής όπως η χύτευση με έγχυση και το θερμό ανάγλυφο απαιτούν καλούπι για τη διαδικασία, η οποία καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα των διαμορφωμένων μερών. Το καλούπι για συσκευές μικρορευστού πολυμερούς πρέπει να είναι φινιρισμένο με καθρέφτη για επίτευξη οπτικά διαφανούς και εξαιρετικά επίπεδης επιφάνειας λόγω της απαίτησης σύνδεσης του πολυμερούς. Ο χάλυβας είναι ένα συμβατικό υλικό που χρησιμοποιείται ως υλικό καλουπιού και τα χαρακτηριστικά του επεξεργάζονται μέσω αλέσματος. Ωστόσο, τα λεπτά χαρακτηριστικά (50 μm ή λιγότερο) που είναι πολύ συνηθισμένα στο σχεδιασμό μικρορευστονικών συσκευών, είναι εξαιρετικά δύσκολα για συμβατικές τεχνικές

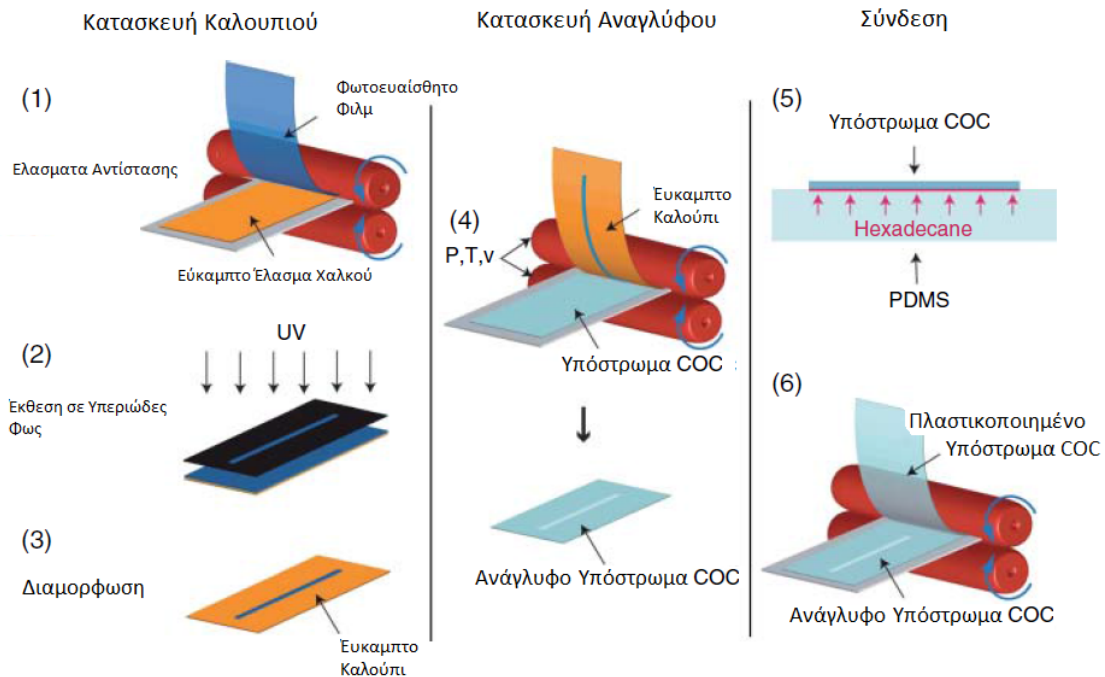
μικροαποκατάστασης όπως η μικροάλεση και η μικροηλεκτρική εκκένωση (EDM). Το ηλεκτρομορφοποιημένο νικέλιο και το μεταλλικό γυαλί (BMG) φαίνεται να είναι τα κατάλληλα υλικά σύνδεσης. η διαδικασία κατασκευής απεικονίζεται στην εικόνα 2.8. Το πυρίτιο κατασκευάζεται πρώτα μέσω τυπικής διαδικασίας λιθογραφίας UV και βαθιάς RIE, η οποία σχηματίζει τις μικροδομές με υψηλή αναλογία διαστάσεων. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε καλούπι νικελίου, μετά την επικάλυψη ενός λεπτού στρώματος Ti / Ni, το πυρίτιο τοποθετείται σε λουτρό νικελίου για ηλεκτρολυτική επίστρωση. Μόλις το στρώμα νικελίου φτάσει στο πάχος του στόχου, το κομμάτι τοποθετείται σε λουτρό KOH και διαλύεται το υλικό πυριτίου. Το παραμένον κομμάτι νικελίου πρέπει να γυαλιστεί περαιτέρω και να αλεσθεί στην επιθυμητή συνολική εξωτερική διάσταση.

Στην περίπτωση του BMG ως υλικό για καλούπι, το πυρίτιο χρησιμοποιείται ως καλούπι για την ανάγλυφη επίστρωση ενός κομματιού κενού BMG, μεταφέροντας τα χαρακτηριστικά του στο BMG. Το πυρίτιο διαλύεται στη συνέχεια σε διάλυμα KOH και κατασκευάζεται το καλούπι BMG.

Έγχυση

Κατά τη διαδικασία χύτευσης με έγχυση, οι θερμοπλαστικοί κόκκοι μεταφέρονται από τη χοάνη στα θερμαινόμενα βαρέλια. Το τετηγμένο πολυμερές υλικό ωθείται στην κοιλότητα του καλουπιού υπό πίεση και διατηρείται για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα προτού κρυώσει το καλούπι. Το πολυμερές τμήμα στερεοποιείται αφού η θερμοκρασία του καλουπιού μειωθεί κάτω από τη θερμοκρασία μετάπτωσης γυαλιού του πολυμερούς και εκτοξεύεται για να ολοκληρωθεί ο κύκλος συγκράτησης. Οι κοινές παράμετροι επεξεργασίας περιλαμβάνουν συνήθως θερμοκρασία τήξης, θερμοκρασία καλουπιού, ταχύτητα έγχυσης, πίεση έγχυσης, πίεση συγκράτησης και ούτω καθεξής. Η ποιότητα του εξαρτήματος μπορεί να μετρηθεί σε όρους πλήρους πλήρωσης, σταθερότητας διαστάσεων, υπολειμματικής τάσης και μηχανικών ιδιοτήτων. Ιδιαίτερα για τη χύτευση υψηλής ακρίβειας για μικρορρευστονικές συσκευές, η συρρίκνωση και η σταθερότητα του σχήματος θα μπορούσαν να προκαλέσουν προβληματισμούς λόγω του θερμικού ιστορικού της διαδικασίας χύτευσης. Αύξηση της πίεσης συγκράτησης ή παράταση του χρόνου ψύξης, θα μπορούσε να βοηθήσει στον περιορισμό της συρρίκνωσης αλλά με το κόστος του μεγάλου χρόνου κύκλου. Από την άλλη πλευρά, το «φαινόμενο δισταγμού» πρέπει να ληφθεί υπόψη όταν ο σχεδιασμός αποτελείται από μικροδομές υψηλού λόγου διαστάσεων επειδή το λειωμένο πολυμερές τείνει να ρέει πιο εύκολα σε κοιλότητες με περιοχές που έχουν σχετικά χαμηλότερη αντίσταση ροής, δηλαδή περιοχές με μεγαλύτερη διατομή, πριν την είσοδο σε λεπτότερα κανάλια, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε πρόωρη στερεοποίηση και να προκαλέσει ελλιπή πλήρωση πολυμερούς.

Θερμό ανάγλυφο



Εικόνα 2.9. Σχηματική αναπαράσταση των διαδικασιών με βάση το θερμό ανάγλυφο: (1) η ελασματοποίηση της ξηρής μεμβράνης αντιστέκεται στο υπόστρωμα, (2, 3) βήματα φωτολιθογραφίας, (4) αντιγραφή με ανάγλυφο, (5, 6) στάδια σύνδεσης [10].

Παρά τη χαμηλή απόδοση, το θερμό ανάγλυφο εξακολουθεί να είναι ελκυστική μέθοδος αναπαραγωγής για την κατασκευή πολυμερικών μικρορευστονικών συσκευών λόγω της απλής λειτουργίας του. Αρχικά, βάζουμε ένα καλούπι (χάλυβας, πυρίτιο, PDMS, κλπ.) με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά πάνω από το πολυμερές υπόστρωμα, σχηματίζοντας μια στοιβα. Στη συνέχεια βάζουμε αυτό τη στοιβα κάτω από ένα θερμό πιεστήριο. Με αυτό το τρόπο τα χαρακτηριστικά μπορούν να μεταφερθούν στην επιφάνεια του πολυμερούς με αυξημένη θερμοκρασία (πάνω από τη υαλώδη μετάβαση θερμοκρασία πολυμερούς) και πίεση. Κατόπιν, το πολυμερές τμήμα διαχωρίζεται από το καλούπι μόλις ψυχθεί η στοιβα. Η διεργασία διεκπεραίωσης της δημιουργίας ανάγλυφου με θερμότητα είναι γενικά χαμηλής ποιότητας, λόγω της λειτουργίας ενός μόνο τμήματος. Ωστόσο, υπάρχει μια παραλλαγή υψηλής απόδοσης, το ανάγλυφο του κυλίνδρου, που είναι μια συνεχής διαδικασία. Όπως φαίνεται στην εικόνα 2.9, η αναπαραγωγή των χαρακτηριστικών γίνεται μεταξύ δύο κυλίνδρων και όχι δύο πλακών. Το καλούπι είναι ένα εύκαμπτο φιλμ χαλκού, στο οποίο τα χαρακτηριστικά σχηματίζονται μέσω λιθογραφίας UV και μεταφέρονται σε υπόστρωμα C-O-C μέσω επαφής κυλίνδρου. Όλη η διαδικασία κατασκευής καλουπιού, αντιγραφής πολυμερούς και συγκόλλησης μπορεί να εφαρμοστεί σε πλατφόρμα κατασκευής με χρήση δυο κυλίνδρων (roll-to-roll).

Αφαίρεση λέιζερ

Σε αντίθεση από τη χύτευση PDMS, τη θερμοπλαστική χύτευση με έγχυση και τη διαδικασία θερμού ανάγλυφου, οι διαδικασίες άμεσης διαμόρφωσης όπως η αφαίρεση λέιζερ και η μικρο-άλεση δεν απαιτούν καλούπι. Το λέιζερ CO₂ έχει χρησιμοποιηθεί πολύ συχνά για τη δημιουργία μικροδιαύλων σε υπόστρωμα PMMA ως μια γρήγορη μέθοδος παραγωγής πρωτοτύπου. Όταν το λέιζερ CO₂ εκπέμπεται στην επιφάνεια PMMA, αυξάνει την τοπική θερμοκρασία, όπου το πολυμερές υλικό λιώνει και εξατμίζεται, αφήνοντας ένα κανάλι. Η επιφάνεια είναι συνήθως αρκετά τραχιά, ως προϊόν μηχανικής κατεργασίας, αλλά μπορεί να εξομαλυνθεί με θερμική ανόπτηση ή στίλβωση διαλύτη. Από την άλλη πλευρά, τα υπεριώδη λέιζερ UV, τα οποία έχουν υψηλή ενέργεια φωτονίων, έχουν εφαρμοστεί στην κατασκευή μικροδομών υψηλής ποιότητας σε περισσότερα πολυμερή υλικά. Όταν η ενέργεια είναι μεγαλύτερη από την ισχύ του μοριακού δεσμού, το υπεριώδες φωτόνιο σπάει το δεσμό απευθείας και αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια «κρύα» φωτοαφαίρεση.

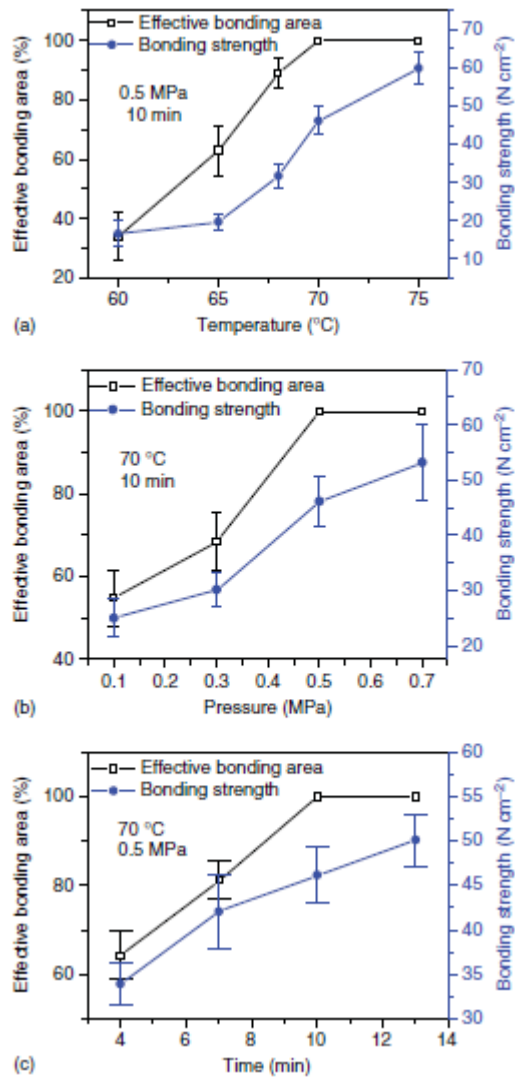
Μικροτριβή

Η μικροτριβή είναι ένας τρόπος παραγωγής μικροδιαύλων και άλλων σύνθετων χαρακτηριστικών μικροκλίμακας στην επιφάνεια του πολυμερούς αφαιρώντας άμεσα το υλικό μέσω της κίνησης εργαλείων κοπής υψηλής ταχύτητας. Η ανάλυση σχετίζεται στενά με τη ρύθμιση του μηχανήματος και την επιλογή του εργαλείου κοπής, το οποίο συνήθως ορίζει το ελάχιστο χαρακτηριστικό των τελικών εξαρτημάτων. Εκτός από την τραχύτητα της επιφάνειας, η παρουσία ανομοιογενειών κατά την εφαρμογή (bur) μπορεί να είναι μια άλλη ανησυχία, η οποία θα μπορούσε να μειωθεί με τη βελτιστοποίηση της διαδρομής εργαλείων.

Σύνδεση

Η σύνδεση πολυμερούς ενθυλακώνει τα ανοιχτά κανάλια και κοιλότητες στο υπόστρωμα πολυμερούς, χρησιμοποιώντας ένα άλλο κομμάτι πλάκας ή φιλμ πολυμερούς. Γενικά, απαιτείται καλή οπτική διαφάνεια και ισχυρή αντοχή συγκόλλησης υπό αυξημένη πίεση ροής για το τμήμα που έπεται της συγκόλλησης.

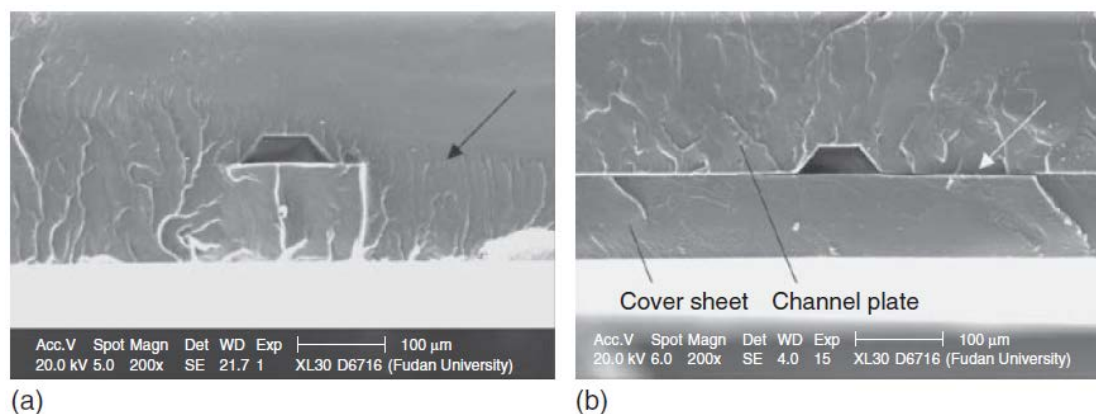
Θερμική συγκόλληση



Εικόνα 2.10 Σχηματικό διάγραμμα των σταδίων θερμικής συγκόλλησης. Επίδραση της θερμοκρασίας (a), της πίεσης (b) και του χρόνου (c) στην αποτελεσματική περιοχή συγκόλλησης και τη συγκόλληση.

Η θερμική συγκόλληση είναι η ένωση θερμοπλαστικών πλακών με επίπεδη και λεία επιφάνεια υπό θερμότητα και πίεση. Τουλάχιστον μία από τις πλάκες πρέπει να θερμανθεί σε θερμοκρασία κοντά ή υψηλότερη από την T_g , γεγονός που επιτρέπει την επαρκή αλληλεπίδραση των αλυσίδων πολυμερούς μαζί με την εφαρμοζόμενη δύναμη στη διεπαφή. Οι τρεις βασικές παράμετροι σε αυτήν τη διαδικασία είναι η θερμοκρασία, η πίεση και χρόνος συγκόλλησης, ο οποίος επηρεάζει την αποτελεσματική περιοχή συγκόλλησης και την αντοχή συγκόλλησης, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.10. Εκτός από την περιοχή συγκόλλησης και την αντοχή, η παραμόρφωση των χαρακτηριστικών που προκαλείται από τη διαδικασία συγκόλλησης είναι ένας άλλος σημαντικός δείκτης ποιότητας. Η επεξεργασία επιφάνειας θα μπορούσε να αυξήσει την επιφανειακή ενέργεια, να μειώσει τον χρόνο

συγκόλλησης και να μειώσει την παραμόρφωση των χαρακτηριστικών. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να προκύψει μερική στρέβλωση κατά τη διάρκεια της διαδικασίας λόγω της απελευθέρωσης υπολειμματικής τάσης, η οποία θα μπορούσε να εισαχθεί κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σχηματοποίησης όπως η χύτευση με έγχυση. Όταν εφαρμόζεται κατάλληλο διάλυμα διαλύτη, η επιφάνεια των θερμοπλαστικών μερών μπορεί να διαλυθεί και να στερεοποιηθεί μόλις εξατμιστεί το διάλυμα διαλύτη.



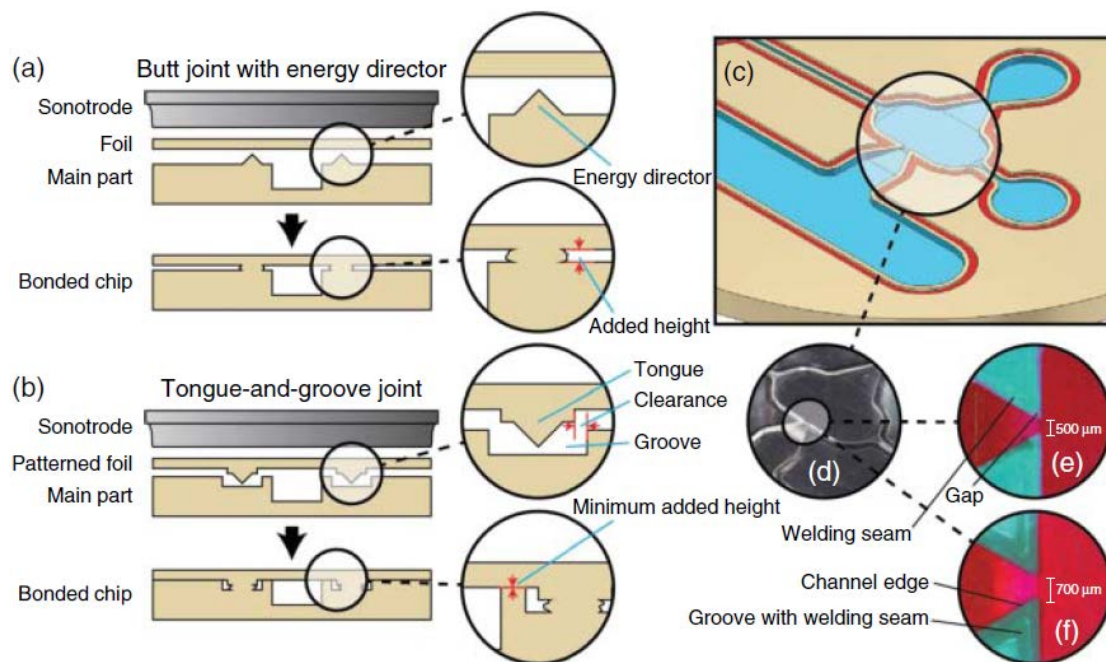
Εικόνα 2.11. Εικόνες από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) που απεικονίζουν τη διατομή του καναλιού σε PMMA που συνδέθηκε με (a) και χωρίς (b) τη βοήθεια του DBP στους 90°C. Επιτάχυνση τάσης: 20 kV και μεγέθυνση: 200 × .

Αυτή η επιφάνεια είναι τότε έτοιμη να συνδεθεί με ένα άλλο κομμάτι πολυμερούς σχηματίζοντας νέους χημικούς δεσμούς κατά μήκος της διεπαφής. Αυτή η μέθοδος συγκόλλησης με διαλύτη μπορεί να ενώσει τα θερμοπλαστικά μέρη σε πολύ χαμηλότερη θερμοκρασία σε σύγκριση με αυτή της θερμικής συγκόλλησης, η οποία απαλείφει τον κίνδυνο παραμόρφωσης που προκαλείται από τη θέρμανση. Το παρόμοιο σχήμα συγκόλλησης μπορεί να εφαρμοστεί σε πλαστικοποιητή, ο οποίος θα μπορούσε να μειώσει τις συνεκτικές διαμοριακές δυνάμεις κατά μήκος των αλυσίδων του πολυμερούς και επομένως να μειώσει τη θερμοκρασία μετάβασης γυαλιού. Η εικόνα 2.11 δείχνει τη σύνδεση της πλάκας PMMA χρησιμοποιώντας διάλυμα φθαλικού διβουτυλεστέρα (DBP) 5% (β / ο) σε ισοπροπανόλη κάτω από θερμοκρασία 90 ° C, η οποία είναι πολύ χαμηλότερη από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης του PMMA. Κατά τη συγκόλληση με διαλύτη ή πλαστικοποιητή, πρέπει να ληφθεί ιδιαίτερη προφύλαξη για την αποφυγή ζημιάς ή απόφραξης του μικροδιαύλου που προκαλείται από την ανεπιθύμητη έκθεση στα αντιδραστήρια συγκόλλησης.

Συγκόλληση με λέιζερ

Οι θερμοπλαστικές πλάκες μπορούν επίσης να ενωθούν με λέιζερ. Αφού έχουμε στοιβάξει ένα διαπερατό από λέιζερ πολυμερές (το κάλυμμα – πάνω μέρος) με ένα υλικό που απορροφά το λέιζερ (το κάτω μέρος), ένα λέιζερ υψηλής πυκνότητας μπορεί να περάσει μέσα από το κάλυμμα και να θερμάνει το κάτω μέρος. Το υλικό στη διεπαφή θα λιώσει και θα δημιουργήσει δεσμό. Αυτός ο μηχανισμός έχει εφαρμοστεί στη σύνδεση πλακών PMMA με υπέρυθρο (IR) λέιζερ, όπου το κάλυμμα είναι διαφανές και το κάτω μέρος είναι αδιαφανές. Όστε να συνδέονται δύο διαπερατές πλάκες, θα πρέπει να εφαρμοστεί ένα λεπτό στρώμα απορροφητικού υλικού IR μεταξύ των διεπαφών συγκόλλησης, οι οποίες απορροφούν την ενέργεια του λέιζερ και δημιουργούν τοπική θέρμανση, ενώνοντας τις δύο πλάκες σε καθορισμένες περιοχές. Ως τοπική τεχνική συγκόλλησης, η απόδοση της συγκόλλησης με λέιζερ σχετίζεται με την ταχύτητα σάρωσης και την ισχύ του λέιζερ.

Υπερηχητική συγκόλληση



Εικόνα 2.12. Σκίτσα δύο τύπων αρμών για συγκόλληση με υπερήχους και παρουσίαση των συστημάτων τσιπ με ομοειδείς αρμούς. (α) Σχηματική απεικόνιση των υλικών πριν και μετά τη συγκόλληση, με αποτέλεσμα ένα πρόσθετο ύψος καναλιού. (β) Σχηματική απεικόνιση ενός αρμού εξογκώματος και αυλακιού πριν και μετά τη συγκόλληση. Το επιπλέον υλικό εμπεριέχεται μέσα στην αυλάκωση, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει επιπλέον ύψος. (γ) Σχηματική απεικόνιση του μικρορευστονικού μέρους που δείχνει το σύστημα καναλιών (μπλε) και το αυλάκι (κόκκινο). (δ) Φωτογραφία του υπερηχητικά συγκολλημένου τσιπ με το ίδιο σύστημα καναλιού με σύνδεσμο άκρου. Το πλάτος της τριχοειδούς μικροβαλβίδας είναι 500

μm. Τα μέρη (ε) και (στ) δείχνουν μικρογραφίες τριχοειδών μικροβαλβίδων, γεμάτες με διάλυμα φθορίζουσας βαφής φθορισμού 1,3% (v / v) σαρκοζυλο Ροδαμίνης Β. Για την άρθρωση του άκρου, το υγρό εκτείνεται έξω από το κανάλι λόγω του προστιθέμενου ύψους μεταξύ του τσιπ και του φύλλου (ε), ενώ δεν παρατηρείται υγρό έξω από το κανάλι για τον σύνδεσμο εξογκώματος και αυλάκωσης (f). Η αντίθεση και το χρώμα ρυθμίστηκαν για ευκρίνεια. Η πιο σκοτεινή απόχρωση του τirkουάζ είναι ένα φαινόμενο συγκόλλησης γνωστό ως φλας που αλλάζει τις διαθλαστικές ιδιότητες του πολυμερούς [10].

Παρόμοια με τη συγκόλληση με λείζερ, η σύνδεση με υπερήχους ενώνει τα πολυμερή μέρη μέσω τοπικής διαδικασίας θέρμανσης, η οποία προκύπτει από τριβή δόνησης μεταξύ της διεπαφής σύνδεσης. Οι κατανομές της ενέργειας ορίζουν την περιοχή της θερμικής σύντηξης. Ο τυπικός χρόνος συγκόλλησης είναι πολύ μικρός σε σύγκριση με αυτόν στη θερμική συγκόλληση και τη συγκόλληση με διαλύτες, ενώ οι κύριες παράμετροι διεργασίας περιλαμβάνουν το πλάτος του μορφοτροπέα, το χρόνο συγκόλλησης, την πίεση και την ενέργεια. Η εικόνα 2.12 απεικονίζει το σχεδιασμό δύο τύπων σύνδεσης. Στο σχέδιο (Α), κατανομή ενέργειας κατορθώνει μια συγκόλληση αρμού με την αντίθετη πλάκα που δεν είχε επιπλέον δομή αρμού. Σε αυτήν την περίπτωση, απαιτείται μόνο μία πλάκα για να έχουμε διανομή ενέργειας για να καταστεί δυνατή η συγκόλληση, ενώ δεν απαιτείται ευθυγράμμιση μεταξύ των δύο μερών. Από την άλλη πλευρά, το λιωμένο πολυμερές από την ενέργεια μπορεί να δημιουργήσει ένα κενό και να αυξήσει το βάθος του καναλιού. Για τον σχεδιασμό (Β), ο οποίος χρησιμοποιεί την ένωση εξοχής και αυλακιού, πρέπει να δημιουργηθούν πρόσθετες δομές και στις δύο πλάκες συγκόλλησης και η ευθυγράμμιση πρέπει να γίνει πριν από τη συγκόλληση. Αυτός ο σχεδιασμός εξαλείφει την αλλαγή του βάθους καναλιού που προκαλείται από τη διαδικασία συγκόλλησης.

Συγκολλητική σύνδεση

Το υγρό συγκολλητικό που μπορεί να σκληρυνθεί με υπεριώδη ακτινοβολία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συγκόλληση μικρορρευστονικών συσκευών από πολυμερές. Ο τρόπος εφαρμογής της κόλλας πρέπει να επιλεγεί προσεκτικά για να αποφευχθεί η απόφραξη των μικροδιαύλων μετά την κολλητική σκλήρυνση. Μια άλλη μέθοδος συγκολλητικής σύνδεσης είναι η χρήση ταινιών ελασματοποίησης, όπως ταινίες ευαίσθητες στην πίεση και στη θερμότητα. Η διαδικασία ελασματοποίησης φιλμ θα μπορούσε να έχει υψηλή απόδοση με τη μέθοδο από ρολό σε ρολό. Η επένδυση της μεμβράνης ελασματοποίησης θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί άμεσα ως το στρώμα κάλυψης μικρορρευστονικών συσκευών όταν η συμβατότητα υλικού δεν αποτελεί πρόβλημα.

Μεταλλοποίηση

Η δημιουργία αγωγίμων ιχνών στην επιφάνεια του πολυμερούς δημιουργεί επιπρόσθετες ιδιότητες στις μικρορρευστονικές συσκευές όπως μικροηλεκτρόδια αισθητήρων και ενεργοποιητών, ηλεκτρικές διασυνδέσεις, κεραία, θερμαντήρες και ούτω καθεξής. Λεπτές στοιβάδες (συνήθως λιγότερο από 300 μm) μεταλλικού υλικού μπορούν να εναποτίθενται μέσω της διαδικασίας MEMS όπως ψεκασμός και εξάτμιση. Μια στοιβα μάσκας σκιάς στο υπόστρωμα θα καθορίσει το σχήμα των σχεδίων. Η ανάλυση θα περιοριστεί από την κατασκευή μάσκας σκιάς. Για παχύτερα ηλεκτρόδια, θα μπορούσε να εφαρμοστεί συμβατική τεχνική εκτύπωσης οθόνης, ενώ οι επιλογές υλικών περιορίζονται από τη διαθεσιμότητα των παστών (μίγματα) εκτύπωσης, που περιέχουν τα αγωγή σωματίδια. Η πρόσφυση μεταξύ του αγωγίμου στρώματος και του πολυμερούς υποστρώματος θα μπορούσε να προκαλεί ανησυχία ειδικά υπό την προϋπόθεση ότι η θερμοκρασία αλλάζει λόγω του απρόβλεπτου συντελεστή θερμικής διαστολής.

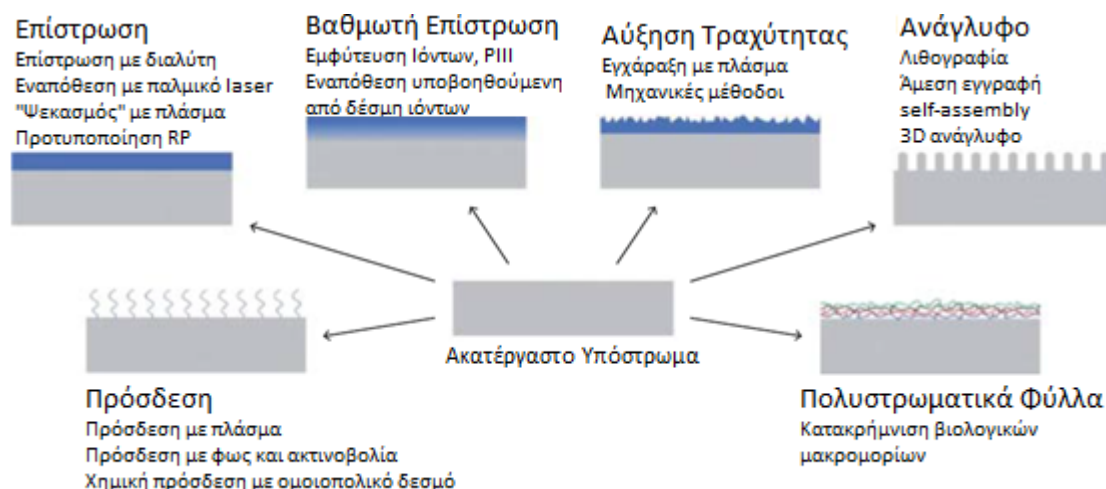
3D εκτύπωση

Τα τελευταία χρόνια, η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει εξελιχθεί γρήγορα σε μια σημαντική μέθοδο, η οποία έχει δείξει καλές δυνατότητες στην παραγωγή μικρορρευστονικών πολυμερών συσκευών. Διάφορες τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης όπως η στερεολιθογραφία (SLA), η μοντελοποίηση πολλαπλών αεριωθούμενων (MJM), η εκτύπωση inkjet με φωτοπολυμερές, η μοντελοποίηση σύντηξης απόθεσης (FDM) και η εξώθηση θερμοπλαστικού έχουν δείξει τις δυνατότητές τους να σχηματίζουν άμεσα τα ενσωματωμένα κανάλια σε πολυμερές χωρίς την ανάγκη διαδικασίας συγκόλλησης. Η τρισδιάστατη εκτύπωση παρέχει πολλές εναλλακτικές επιλογές μεθόδου κατασκευής πολυμερών μικρορρευστονικών συσκευών και εξαλείφει την ανάγκη της διαδικασίας ελασματοποίησης (συγκόλλησης). Προς το παρόν ορισμένοι παράγοντες, όπως η ανάλυση, οι ιδιότητες του υλικού (βιοσυμβατότητα, η οπτική διαφάνεια) και η απόδοση περιορίζουν τη χρήση τρισδιάστατης εκτύπωσης στα μικρορρευστονικά.

Επιφανειακή επεξεργασία

Η επιφάνεια του πολυμερούς μπορεί να τροποποιηθεί ώστε να είναι υδρόφιλη ή υδρόφοβη σύμφωνα με την ανάγκη μικρορρευστονικών εφαρμογών, όπως η φόρτωση υγρού δείγματος ή η διακοπή ροής. Μια τέτοια τροποποίηση μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω χημικής επικάλυψης και άλλων μεθόδων.

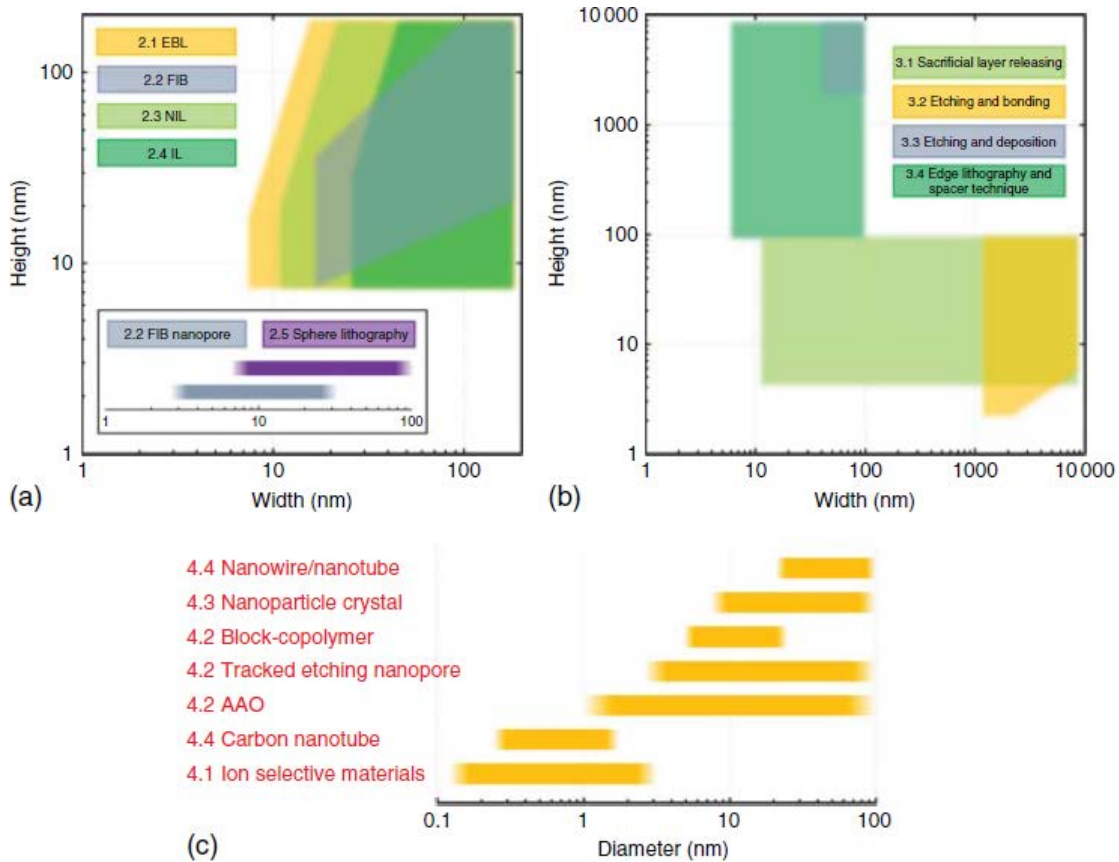
2.3.3 Επιφανειακή τροποποίηση κατά την κατασκευή



Εικόνα 2.13 Σχηματικά διαγράμματα τεχνικών τροποποίησης επιφάνειας [10].

Οι ιδιότητες επιφάνειας όπως η διαβρεξιμότητα παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στις μικρορευστοπονικές συσκευές. Υπάρχουν δύο τρόποι για τον έλεγχο της διαβρεξιμότητας των στερεών επιφανειών: χημική σύνθεση και γεωμετρικές δομές των επιφανειών. Γενικά, τα χρησιμοποιούμενα επιφανειακά υλικά για μικρορευστοπονική συσκευή, γυαλί και οξειδωμένο πυρίτιο έχουν εγγενή υδρόφιλη επιφάνεια, η οποία παράγει τριβή χαμηλής ροής νερού σε λεπτά κανάλια. Πρόσφατα, οι μικρορευστοπονικές συσκευές με βάση πολυμερή γίνονται πιο δημοφιλείς επειδή των εξαιρετικών ιδιοτήτων τους, όπως κανάλια χαμηλού κόστους και εύκολα δημιουργημένα. Ωστόσο, τα περισσότερα πολυμερή υλικά έχουν παρθένες επιφάνειες, με χαμηλές επιφανειακές ενέργειες, που είναι υδρόφοβες και όχι υδρόφιλες, γεγονός που οδηγεί σε προβλήματα όπως υψηλή αντίσταση ροής που ακόμη και φυσαλίδες σε λεπτά κανάλια, υψηλή πίεση λειτουργίας και υψηλή πολυπλοκότητα της συσκευής. Οι μέθοδοι τροποποίησης επιφανειών που έχουν δημοσιευτεί μέχρι σήμερα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε χημικές και φυσικές μεθόδους. Η χημική τροποποίηση ακινητοποιεί τα λειτουργικά μόρια για να δημιουργήσει τις επιθυμητές επιφανειακές ιδιότητες έτσι ώστε οι επιφάνειες να γίνουν παθητικές ή ενεργοποιημένες με προσκολλημένες χημικές ουσίες. Από την άλλη πλευρά, η φυσική τροποποίηση μπορεί να αλλάξει την τραχύτητα της επιφάνειας, το μέγεθος κόκκων και τα όρια κόκκων από την έκθεση σε λέιζερ, πλάσμα, θερμότητα ή στίλβωση. Η εικόνα 2.13 απεικονίζει τις πιο συνηθισμένες μεθόδους επιφανειακής τροποποίησης για μικρορευστοπονικά υλικά. Οι επιφάνειες μικρορευστοπονικών συσκευών μπορούν να τροποποιηθούν με αυτές τις απεικονιζόμενες μεθόδους για να ξεπεραστούν ή να μειωθούν οι εγγενείς ελλείψεις ή μειονεκτήματά τους.

2.3.4 Προοπτικές για την κατασκευή στο μέλλον



Εικόνα 2.14. Επιτεύξιμες γεωμετρίες και μεγέθη δυνατότητες νανορρευστονικών συσκευών χρησιμοποιώντας τρέχουσες προσεγγίσεις κατασκευής. α) τεχνικές με βάση τη νανολιθογραφία · (β) τεχνικές που βασίζονται σε MEMS · και (γ) τεχνικές που βασίζονται σε νανοϋλικά.

Θα μπορούσαν να παρατηρηθούν ορισμένες τάσεις σχετικά με την ανάπτυξη τεχνολογιών κατασκευής για μικρορρευστονικές συσκευές. Το επίπεδο ολοκλήρωσης και η πολυπλοκότητα του σχεδιασμού θα αυξηθούν, γεγονός που ενισχύει τις λειτουργίες του συστήματος μικρορρευστών. Περισσότερα εξαρτήματα, όπως βαλβίδες, φίλτρα, αισθητήρες και θερμαντήρες, πρέπει να ενσωματωθούν σε μια μικρορρευστοποιημένη συσκευή. Από την άλλη πλευρά, απαιτούνται ορισμένες δομές νανοκλίμακας, οι οποίες σχετίζονται με τη μελέτη των νανο-ρρευστών, τη μελέτη και την εφαρμογή της ροής υγρού σε κανάλια / πόρους με τουλάχιστον μία χαρακτηριστική διάσταση κάτω των 100 nm. Αυτές οι νανοδομές παρέχουν εξαιρετικά υψηλή αναλογία επιφάνειας προς όγκο και προσέγγιση στο μέγεθος σημαντικών βιομορίων όπως το DNA και η πρωτεΐνη. Εικόνα 2.14 δείχνει το τυπικό πλάτος καναλιού / ύψος καναλιού (βάθος) που μπορεί να επιτευχθεί με τις κύριες προσεγγίσεις κατασκευής που συνοψίζονται, οι οποίες είναι χρήσιμες για να καθοδηγήσουν τον αντίστοιχο σχεδιασμό της διαδικασίας κατασκευής. Οι τεχνικές που βασίζονται στη νανολιθογραφία περιλαμβάνουν δέσμη ηλεκτρονίων λιθογραφία

(EBL), εστιασμένη δέσμη ιόντων (FIB), λιθογραφία νανο-αποτύπωσης (NIL), ενδομετρική λιθογραφία (IL) και λιθογραφία σφαίρας (SL). Οι προσεγγίσεις νανοκατασκευής που βασίζονται σε MEMS περιλαμβάνουν την απελευθέρωση, την εγχάραξη και τη συγκόλληση, την εγχάραξη και την απόθεση και τη λιθογραφία ακμών. Οι τεχνικές που βασίζονται σε νανοϋλικά περιλαμβάνουν νανονήματα, νανοσωλήνες, συμπολυμερή υποστρώματα, νανοπόρους, ανοδιωμένο οξείδιο αλουμινίου (AAO) και ιοντο-επιλεκτικά υλικά.

2.4 Τεχνολογίες μικρορευστονικών συστημάτων

Ο χειρισμός μικρών ποσοτήτων υγρών (αέρια και / ή υγρά) για την πραγματοποίηση αντιδράσεων, αναλύσεων ή θεμελιωδών ερευνών σε υλικά, ενέργεια, περιβάλλον, ιατρική, βιολογία, φυσική και χημεία παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον τόσο για την επιστημονική έρευνα όσο και για τις βιομηχανικές εφαρμογές. Η μικρορευστονική είναι η επιστήμη και η τεχνολογία που επεξεργάζεται ή χειρίζεται μικρές ποσότητες υγρών από 10⁻⁶ έως 10⁻¹² nl (ή ακόμη και 10⁻¹⁵ nl) σε δομές ή κανάλια που έχουν τουλάχιστον μια διάσταση σε κλίμακα μικρομέτρου ή μικρότερη, ή από 1 μm έως 1 mm.

Αυτός ο κλάδος καθοδηγείται κυρίως από τεχνολογικές εφαρμογές που έχουν ως στόχο την ανάπτυξη ολοκληρωμένων εργαστηρίων μέσα σε chips. Υπάρχουν δύο βασικά είδη μικρορευστονικών συστημάτων, τα εργαστηριακά συστήματα (Lab-On-a-Chip) και τα συστήματα ανάλυσης (μ-TAS). Αν και οι δύο όροι χρησιμοποιούνται συχνά για την περιγραφή του ίδιου συστήματος, ο όρος Lab-On-a-Chip χρησιμοποιείται συνήθως για να περιγράψει συσκευές που ενσωματώνουν αρκετές εργαστηριακές διαδικασίες σε ένα μόνο τσιπ, ενώ ο όρος μ-TAS θεωρείται συχνά ότι ενσωματώνει όλες τις εργαστηριακές διαδικασίες που απαιτούνται για ανάλυση σε ένα μόνο τσιπ. Και για τις δύο περιπτώσεις, οι ροές υγρών σε ένα ή περισσότερα δίκτυα καναλιών, κατασκευασμένες από ένα στερεό υπόστρωμα, είναι το βασικό στοιχείο της αναλυτικής ή προπαρασκευαστικής λειτουργίας των συσκευών. Τα μικρορευστονικά έχουν γίνει γρήγορα σημαντικά εργαλεία σε διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένων των νέων τεχνολογιών σύνθεσης, καθώς και βασικών ερευνών για την ανίχνευση, οι οποίες τώρα δεν περιορίζονται στα δύο είδη μικρορευστονικών συσκευών σύμφωνα με την τρέχουσα πρόοδο σε αυτόν τον τομέα. Πολλά μικρορευστονικά συστήματα με τεχνολογίες εκνεφωτή ώστε να επιτυγχάνεται μικρορευστοποίηση ή ψεκασμός έχουν αναπτυχθεί εντατικά για ελεγχόμενα υλικά και χημικές συνθέσεις. Ένας λόγος για την ταχεία ανάπτυξή τους βασίζεται στην προβλεψιμότητα των ροών σε τέτοια κλίμακα και στον εξαιρετικό έλεγχο των διεπαφών σε μικροδιαύλους. Σήμερα τα μικρορευστονικά έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολλούς επιστημονικούς και βιομηχανικούς τομείς. Τις περισσότερες φορές

αντιμετωπίζονται ως εργαλεία για την έρευνα διαφόρων θεμάτων που σχετίζονται με τη χημεία, τα υλικά, τη βιολογία ή τη φυσική.

Η ανάμιξη υγρών (υγρά και / ή αέρια) είναι ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη μικρορρευστονικών διεργασιών, συμπεριλαμβανομένης της κινητήριας δύναμης και του συστήματος ελέγχου. Επί του παρόντος, οι κινητήριες δυνάμεις ρευστού για μικρορρευστονικές διεργασίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν κυρίως σε πέντε είδη μεθόδων:

- (i) μηχανικές μέθοδοι από μηχανικές αντλίες (π.χ. αντλία σύριγγας, αντλίες αυτοεκκίνησης, πιεζοηλεκτρικός ενεργοποιητής),
- (ii) μεθόδους οδήγησης πεδίου βαρύτητας,
- (iii) ηλεκτροκινητικές μέθοδοι με ηλεκτρικά πεδία,
- (iv) μέθοδοι οδήγησης μαγνητικού πεδίου, και
- (v) μέθοδοι ενεργοποίησης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου (π.χ. οπτικά πεδία ή οπτοθερμο-τριχοειδή εφέ).

Λόγω του υψηλού λόγου διαστάσεων (επιφάνεια / όγκος) και των επιδράσεων μεγέθους σε μικροδομές καθώς και λόγω των όγκων υγρού που κυμαίνονται από μικρόλιτρα έως picoliters ή ακόμη και femololiters, υπάρχουν μερικά μοναδικά χαρακτηριστικά στη μικρορρευστονική εκτός από τα υγρά, τα οποία ακολουθούν τις αρχές που βασίζονται στη συνέχεια του μέσου καθώς το μέγεθος της συσκευής ή η κλίμακα του συστήματος είναι μεγαλύτερη από την τυπική κλίμακα συνοχής φάσης.

Κάτω από την τυπική κλίμακα συνοχής φάσης (το κρίσιμο μέγεθος), οι κβαντοδυναμικές αρχές θα κυριαρχήσουν στη θερμοδυναμική κατάσταση του συστήματος.

Μεταξύ του κρίσιμου μεγέθους (π.χ. της ατομικής ή μοριακής κλίμακας) και της μακροκλίμακας, η οποία ονομάζεται συνήθως εύρος μεσοκλίμακας (π.χ., η μικρή διάσταση των μικροδιαύλων για αλλαγή της τριβής ρευστού και του αριθμού Reynolds, η μέση ελεύθερη διαδρομή των φωνονίων για τη θερμική μεταφορά, η μέση ελεύθερη διαδρομή κίνησης μορίων για ανάμιξη και χημική αντίδραση), υπάρχουν πολλά νέα φαινόμενα που δεν μπορούν να εξηγηθούν μόνο από την εξίσωση συνέχειας ή είναι πολύ δύσκολο να προσομοιωθούν από το κβαντικό δυναμικός μηχανισμός. Η κβαντική θεωρία μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για ποσοτικές προβλέψεις μερικών θερμοδυναμικών παραμέτρων (π.χ. ειδική χωρητικότητα θερμότητας) σε απλά συστήματα. Πρέπει να αναπτυχθούν νέες μέθοδοι θεωρίας και υπολογισμού για φυσικά συστήματα μεσοκλίμακας, τα οποία είναι ιδιαίτερα κρίσιμα για τη μάζα και τη θερμική μεταφορά στην πολυφασική ανάμιξη και αντίδραση.

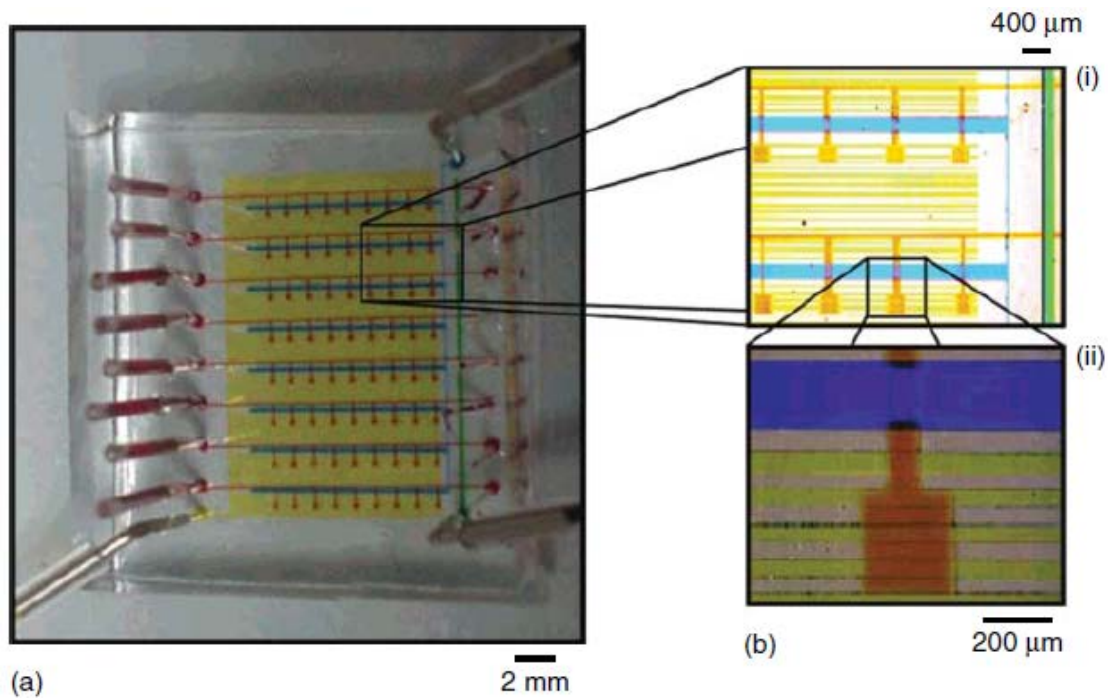
2.5 Ανάπτυξη μικρορρευστονικών συστημάτων για ειδικές εφαρμογές

Η ανάπτυξη της μικρορρευστονικής τεχνολογίας, έχει περάσει σε επόμενο στάδιο καταδεικνύοντας ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Οι συμβατικές βιοϊατρικές και χημικές αναλύσεις θα μπορούσαν να πραγματοποιούνται με ακρίβεια και αποτελεσματικότητα σε ένα μόνο μικρορρευστονικό σύστημα, λόγω χαρακτηριστικών που διαθέτουν τα μικρορρευστονικά συστήματα όπως η μικρογραφία και ο αυτοματισμός. Η επιλογή αυτή μπορεί να ενισχυθεί περισσότερο αν λάβουμε υπόψιν και άλλα πλεονεκτήματα όπως:

- α) η μικρότερη κατανάλωση δείγματος / αντιδραστηρίου,
- β) η μείωση του κινδύνου μόλυνσης,
- γ) το μικρότερο κόστος ανά ανάλυση,
- δ) η ελάττωση χρονοβόρων διαδικασιών,
- ε) η ενίσχυση της ευαισθησίας και της ακρίβειας και
- στ) η αύξηση της αξιοπιστίας.

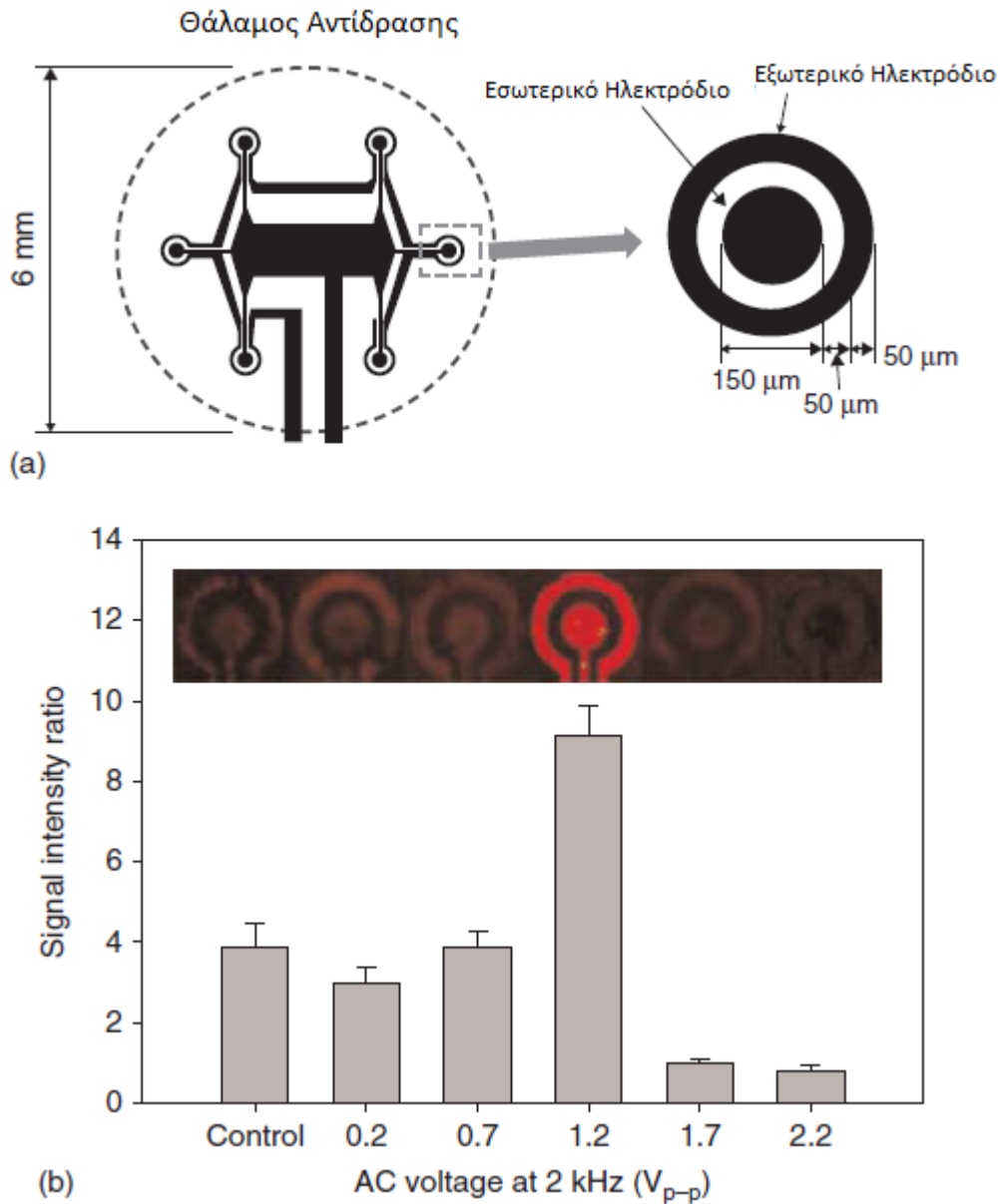
2.5.1 Βιοχημικές αναλύσεις DNA

Τα μικρορρευστονικά συστήματα έχουν χρησιμοποιηθεί και για βιοχημικές αναλύσεις DNA. Ένα πρωτοποριακό σύστημα δημοσιεύθηκε το 1998 [24], όπου ενσωματώθηκαν μικροκανάλια, θερμαντήρες, αισθητήρες θερμοκρασίας και ανιχνευτές φθορισμού. Η ηλεκτροοσμωτική αντλία χειριζόταν αυτόματα λειτουργίες όπως ο εντοπισμός του DNA, η ανάμιξη των αντιδραστηρίων και ο πολλαπλασιασμός, ο διαχωρισμός και η ανίχνευση προϊόντων DNA. Κατέστη έτσι δυνατή η ανίχνευση συγκεκριμένων ακολουθιών DNA από μια ολοκληρωμένη και αυτοματοποιημένη μικρορρευστονική συσκευή.



Εικόνα 2.15. Μικρο-ρρευστονικό σύστημα RT-PCR. (α) Φωτογραφία του συστήματος με χρωματισμό τροφίμων. (β) Οπτικές μικρογραφίες οκτώ θαλάμων αντίδρασης (i) και ενός θαλάμου αντίδρασης (ii).

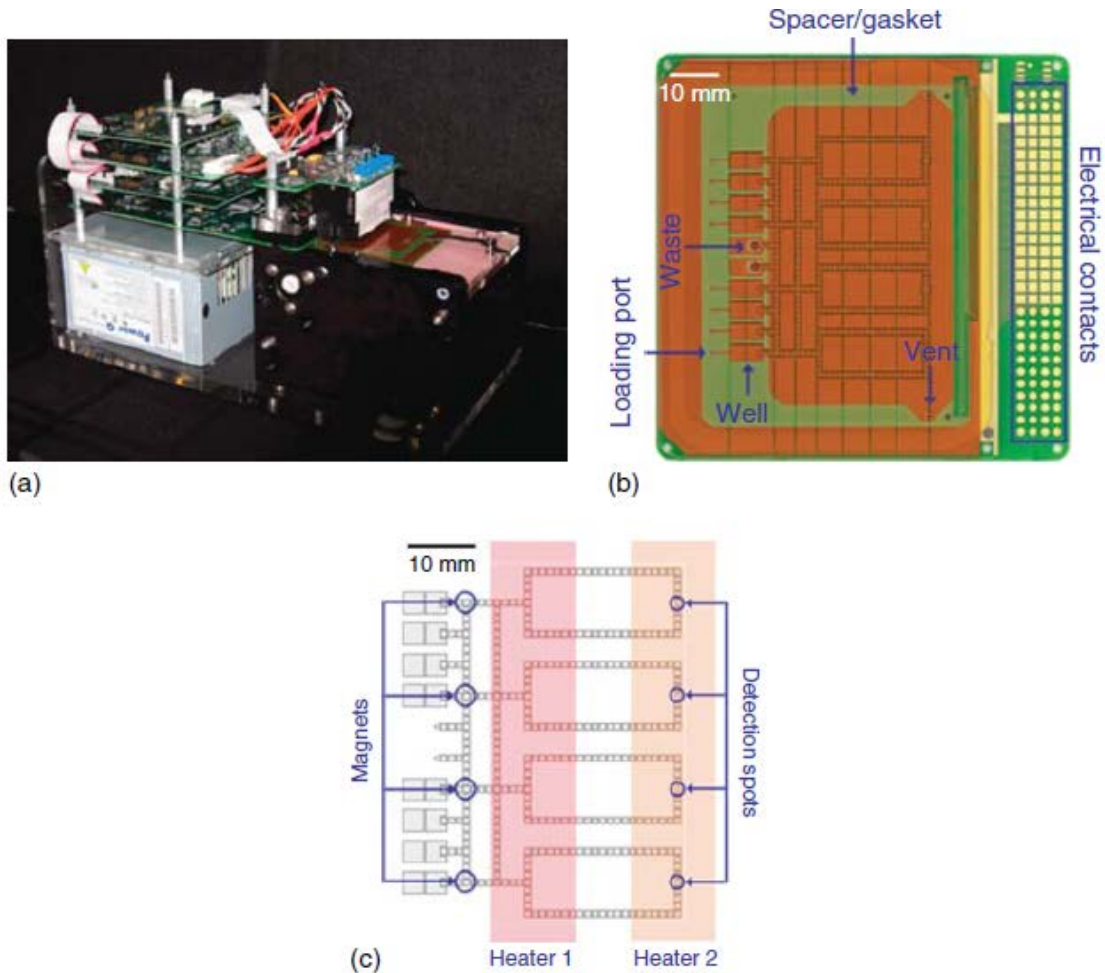
Ένα άλλο παράδειγμα αφορά την εκτέλεση αλυσιδωτής αντίδρασης αντίστροφης πολυμεράσης (RT-PCR). Αποδείχθηκε ότι ανιχνεύει λιγότερα από 50 αντίγραφα β-ακτίνης από ένα μόνο πρότυπο RNA. Μια φωτογραφία αυτού του μικρορρευστονικού συστήματος φαίνεται στην εικόνα 2.15. Το σύστημα αποτελείται από τρία στρώματα PDMS συνδεδεμένα σε γυάλινο υπόστρωμα. Από αυτή την εργασία δόθηκε η δυνατότητα για παράλληλη ανάλυση έκφρασης γονιδίων ενός κυττάρου. Επιπλέον, η υβριδοποίηση του DNA αποδείχθηκε ότι επιταχύνεται με τη μικρορρευστονική τεχνολογία. Η δυναμική υβριδοποίηση επιτεύχθηκε χάρη σε τοπικούς στροβιλισμούς, οι οποίοι δημιουργήθηκαν από ηλεκτροκινητικές δυνάμεις σε ένα ομόκεντρο κυκλικό μικροηλεκτρόδιο, που φαίνεται στην εικόνα 2.16 (α). Οι στροβιλισμοί αύξησαν την αποτελεσματικότητα σύγκρουσης μεταξύ κλώνων DNA στόχου που εναιωρήθηκαν σε διάλυμα και κλώνων DNA ανιχνευτή ακινητοποιημένων στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η δυναμική υβριδοποίηση 5 λεπτών αύξησε σημαντικά την αναλογία έντασης σήματος προς στατική υβριδοποίηση άνω της 1 ώρας, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.16 (β). Αυτή η μελέτη παρείχε μια στρατηγική για την επιτάχυνση του υβριδισμού του DNA για πρακτική και ταχεία συσκευή διάγνωσης.



Εικόνα 2.16. Ηλεκτροκίνητη επιτάχυνση του υβριδισμού DNA. (α) Απεικόνιση του ομόκεντρου κυκλικού μικροηλεκτροδίου για τη δημιουργία ηλεκτροκινητικών δυνάμεων για την επίτευξη δυναμικού υβριδισμού. (β) Αποτελέσματα δυναμικής υβριδοποίησης 5 λεπτών που αντιπροσωπεύονται από αναλογία έντασης σήματος κάτω από τις τάσεις AC στα 2 kHz και διαφορετικές τάσεις ενεργοποίησης των 0,2, 0,7, 1,2 και 2,2 V_{p-p} .

Εναλλακτικά, είχαμε και εφαρμογή ψηφιακών μικρορευστονικών στην αλυσιδωτή αντίδραση πολυμεράσης (PCR). Η PCR στα σταγονίδια έδειξε αποτελεσματικότητα ενίσχυσης χωρίς απώλεια εξάτμισης. Ο βέλτιστος χρόνος κράτησης βρέθηκε να είναι 9 και 30 δευτερόλεπτα για μετουσίωση και ανόπτηση / επέκταση, αντίστοιχα. Η PCR που βασίζεται σε σταγονίδια μπορεί να παρακολουθείται σε πραγματικό χρόνο και παρέχει ενίσχυση 10 κύκλους νωρίτερα από τα συμβατικά όργανα πάγκου. Επιπλέον, αναπτύχθηκε μια ψηφιακή μικρο-

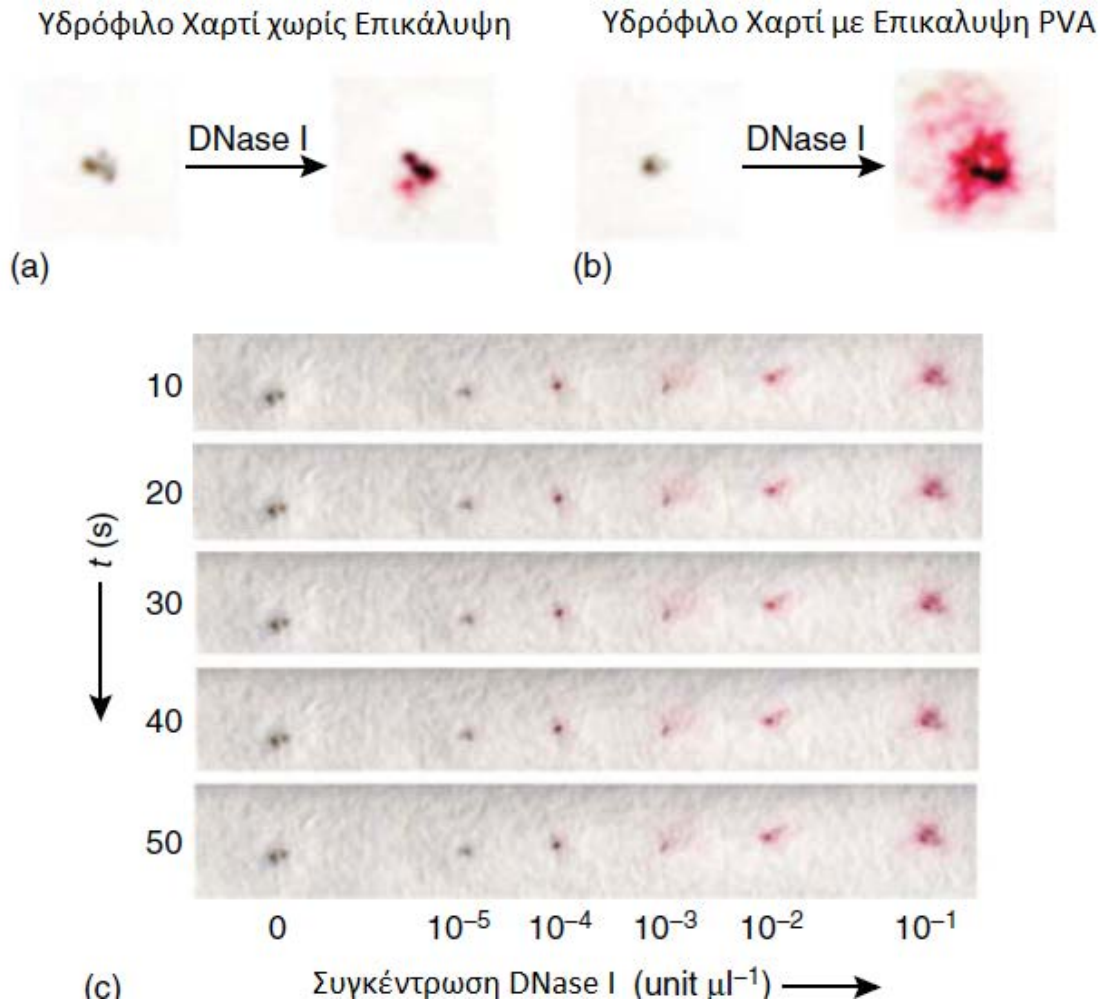
ρευστονική πλατφόρμα για πολυπλεξία PCR σε πραγματικό χρόνο, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.17. Αυτό το σύστημα χρησιμοποιήθηκε στην ανίχνευση ακολουθιών DNA ανθεκτικών στη μεθικιλίνη όπως των *Staphylococcus aureus*, *Mycoplasma pneumoniae* και *Candida albicans*.



Εικόνα 2.17. Αυτόνομο σύστημα ψηφιακών μικρορευστονικών PCR. (α) Το όργανο περιλαμβάνει τροφοδοσία ρεύματος, ηλεκτρονικά στοιχεία ελέγχου, μονάδα μέτρησης φθορισμού, θερμαντήρες και καταστρώματα κασετών (εμφανίζεται με κασέτα φορτωμένο). (β) Φωτογραφία συναρμολογημένου μικρορευστονικού φυσιγγίου που περιλαμβάνει τσιπ πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος, διαχωριστικό πολυμερούς / φλάντζα και γυάλινη πλάκα με οπές διάτρησης. (γ) Σχηματικό διάγραμμα του τσιπ PCR που δείχνει τις θέσεις των ηλεκτροδίων σε σχέση με θερμαντήρες, μαγνήτες και ανιχνευτές [10].

Σχετικά πρόσφατα, κατέστη δυνατή η ανίχνευση της δεοξυριβονουκλεάσης I (DNase I) από μικρορευστονικό σύστημα κατασκευασμένο από χαρτί, χρησιμοποιώντας χρωματομετρικούς ανιχνευτές χρυσών νανοσωματιδίων. Σε αυτό το έργο, συσσωματώματα χρωματισμένου DNA και νανοσωματιδίων χρυσού εντοπίστηκαν σε χάρτινα υποστρώματα. Η προσθήκη της DNase I διάλυσε τα

συσσωματώματα σε διασπαρμένα νανοσωματίδια χρυσού, τα οποία δημιούργησαν έντονο κόκκινο χρώμα στο χαρτί μέσα σε 1 λεπτό. Τόσο τα υδρόφοβα όσο και τα επικαλυμμένα (βινυλική αλκοόλη) (PVA) υδρόφιλα υποστρώματα χαρτιού είναι κατάλληλα για αυτήν τη πλατφόρμα και τα αποτελέσματά της φαίνονται στην εικόνα 2.18. Μπορεί να αποτελέσει μια απλή και πρακτική βιοχημική πλατφόρμα για διάγνωση ασθενειών, ανίχνευση παθογόνων και έλεγχο ποιότητας τροφίμων και νερού.

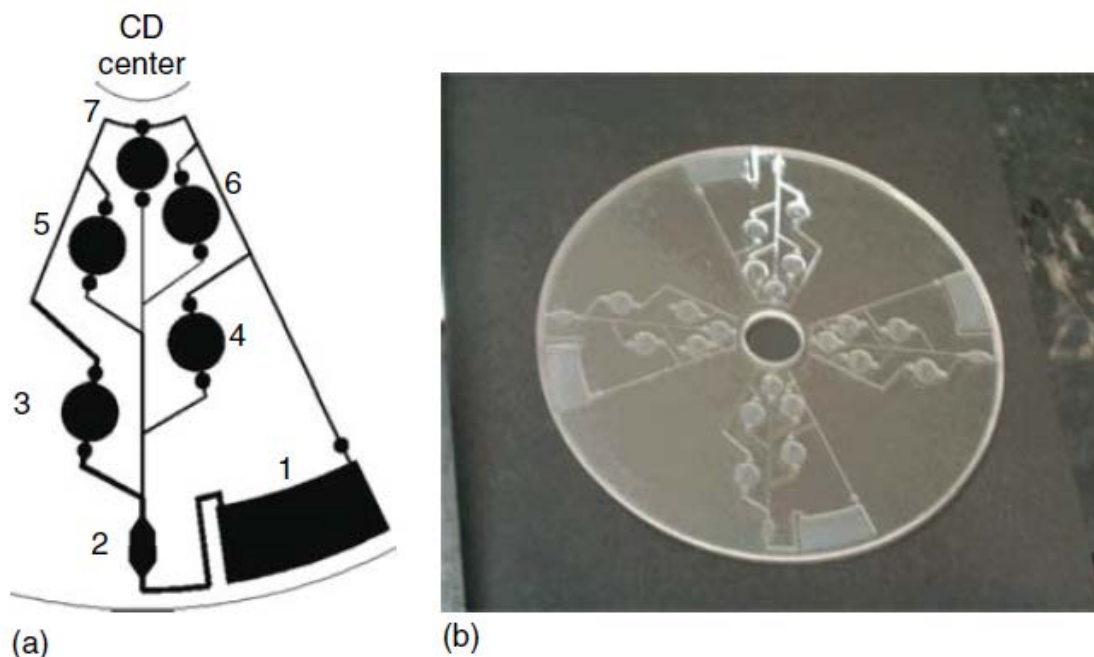


Εικόνα 2.18. Ανάλυση DNase I σε (α) μη επικαλυμμένο υδρόφιλο χαρτί και (β) υδρόφιλο χαρτί επικαλυμμένο με PVA. Εφαρμόστηκε ένα μικρόλιτρο διαλύματος DNase I στα (α) και (β). Οι εικόνες λήφθηκαν στα 20 δευτερόλεπτα μετά την προσθήκη διαλύματος DNase I. (γ) Ανάλυση DNase I σε υδρόφιλο χαρτί επικαλυμμένο με PVA ως συναρτήσεις του χρόνου ανάλυσης και της συγκέντρωσης DNase I [10].

2.5.2 Εφαρμογές διάγνωσης ασθενειών

Οι μικρορευστονικές συσκευές έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί εντατικά για ανιχνεύσεις διαφόρων ασθενειών. Συγκεκριμένα, βασίζονται στην ανοσοδοκιμασία, μια βιοαναλυτική τεχνική για τη μέτρηση της παρουσίας και της συγκέντρωσης του αντιγόνου σε βιολογικό υγρό. Χρησιμοποιείται ευρέως σε κλινικές, φαρμακευτικά

και επιστημονικά ερευνητικά εργαστήρια για διαγνωστικούς σκοπούς. Η λειτουργία αυτή περιλαμβάνει επαναλαμβανόμενα στάδια επώασης και πλύσης. Η αντίστοιχη συμβατική τεχνική χρησιμοποιεί μικροπλάκα πολλαπλών φρεατίων είναι δύσκολη και χρονοβόρα. Με την εισαγωγή μικρορευστονικής τεχνολογίας, η ανοσοδοκιμασία μπορεί να πραγματοποιηθεί αυτόματα αντλώντας διαδοχικά δείγματα και αντιδραστήρια στον θάλαμο αντίδρασης με βάση διάφορους μικρορευστονικούς μηχανισμούς χειρισμού. Για παράδειγμα, οι υδροπνευματικές μικροαντλίες ενσωματώθηκαν σε μια μικρορευστονική συσκευή για διαχείριση των αντιδραστηρίων και την ανίχνευση του ιού της ηπατίτιδας C (HCV) και της σύφιλης από δείγματα ορού. Ο χειρισμός υγρών βασίστηκε σε περισταλτική επίδραση που καθοδηγείται από φασική εκτροπή των μεμβρανών PDMS κατά μήκος του ρευστού καναλιού. Η διαδικασία ανίχνευσης είναι αυτόματη και ξεκίνησε με τη σύνδεση αντιγόνων, δηλαδή, HCV και σύφιλης, στους θαλάμους ανίχνευσης. Ο χειρισμός του ρευστού βασίστηκε στο περισταλτικό φαινόμενο που ελέγχεται από την περιοδική παραμόρφωση των αντλιών κατά μήκος του καναλιού, διαδικασία ανίχνευσης έγινε αυτόματα. Στη συνέχεια, ένα ρυθμιστικό δείγμα πλύσης και ένα δευτερεύον αντίσωμα επισημασμένο με περοξιδάση (HRP), για την απομόνωση και τη διακοπή της απομόνωσης, αντίστοιχα, εγχέεται διαδοχικά στους θαλάμους ανίχνευσης από τους πνευματικές μικροαντλίες. Τα αποτελέσματα ανοσοδοκιμασίας ανιχνεύθηκαν με τη μέτρηση της απορρόφησης. Αυτή η εργασία αποτελεί μια εξαιρετικά ενσωματωμένη μικρορευστονική συσκευή με δυνατότητα εκτέλεσης αυτόματου ανοσοπροσδιορισμού.

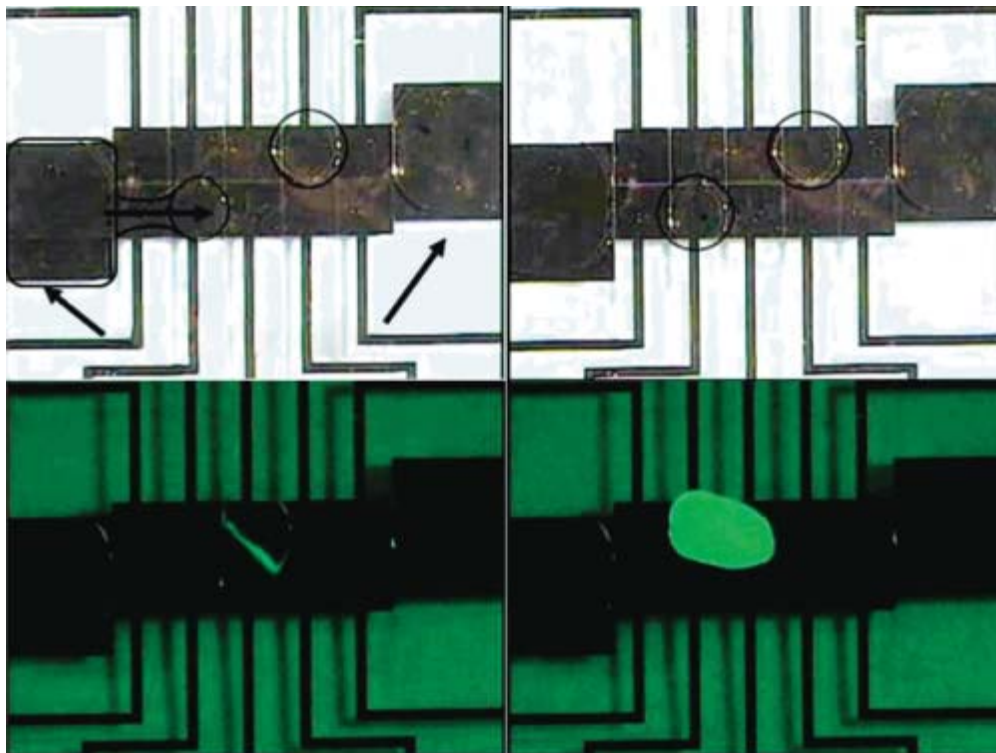


Εικόνα 2.19. Μικρορευστονική συσκευή βασισμένη σε συμπαγή δίσκο για την εφαρμογή ELISA. (α) Σχηματικό διάγραμμα συμπαγή δίσκου ακολουθίας πέντε βημάτων. (β) Ένα συμπαγής δίσκος με αριθμητικό έλεγχο [10].

Σε μια άλλη συσκευή, που βασίζεται σε συμπαγή δίσκο (CD), χρησιμοποιήθηκε φυγόκεντρος δύναμη για να επιτευχθεί διαδοχικός χειρισμός των αντιδραστηρίων. Η μικρορευστονική συσκευή που βασίζεται σε CD για ανάλυση ELISA φαίνεται στην εικόνα 2.19. Λόγω της εξέλιξης στην ακρίβεια του ελέγχου περιστροφής και της οπτικής ανάγνωσης στην τεχνολογία CD, τα μικρορευστονικά με βάση το CD αναμένεται να έχουν μεγάλη εμπορική δυναμική. Η ανοσοδοκιμασία εκτελείται ελέγχοντας την ταχύτητα περιστροφής του δίσκου. Διαφορετικά διαλύματα που εμπλέκονται στη διαδικασία υφίστανται επεξεργασία διαδοχικά και αυτόματα με φυγόκεντρη δύναμη. Η χρήση μικρορευστονικών με βάση το CD, απαιτεί λιγότερη κατανάλωση αντιδραστηρίου και μικρότερο χρόνο ανάλυσης σε σχέση με τη συμβατική μέθοδο.

Μια άλλη προσέγγιση για ανάλυση ELISA έχει υλοποιηθεί με χρήση υποστρώματος χαρτιού. Επιπλέον, μπόρεσε να ανιχνευθεί ένας τύπος ιών γρίπης A (H1N1) και (H3N2) με όρια ανίχνευσης $2,7 \times 10^3$ και $2,7 \times 10^4$ pfu / δοκιμασία για ανίχνευση H1 και H3, αντίστοιχα.

Η χρήση χαρτιού για την ανάπτυξη διαγνωστικών συσκευών έχει τα εξής πλεονεκτήματα λόγω του μικρού βάρους, της ευκολίας στη χρήση και το χαμηλό κόστος. Επιπρόσθετα, η χρήση διαγνωστικών δοκιμών με βάση το χαρτί είναι κατάλληλη για ταχεία εξέταση.



Εικόνα 2.20. Φθορίζουσα ενζυματική διαδικασία σε ψηφιακή μικρορευστονική συσκευή. (α) Ένα σταγονίδιο που περιέχει διφωσφορική φλουορεσκεΐνη (FDP) διανεμήθηκε από τη δεξαμενή στα δεξιά, ενώ (β) ένα σταγονίδιο αλκαλικής φωσφατάσης (AP) διανεμήθηκε από τη δεξαμενή στα αριστερά. (γ) Όταν τα σταγονίδια συγχωνεύθηκαν υπό φωτισμό φθορισμού, το προϊόν παρατηρήθηκε στη

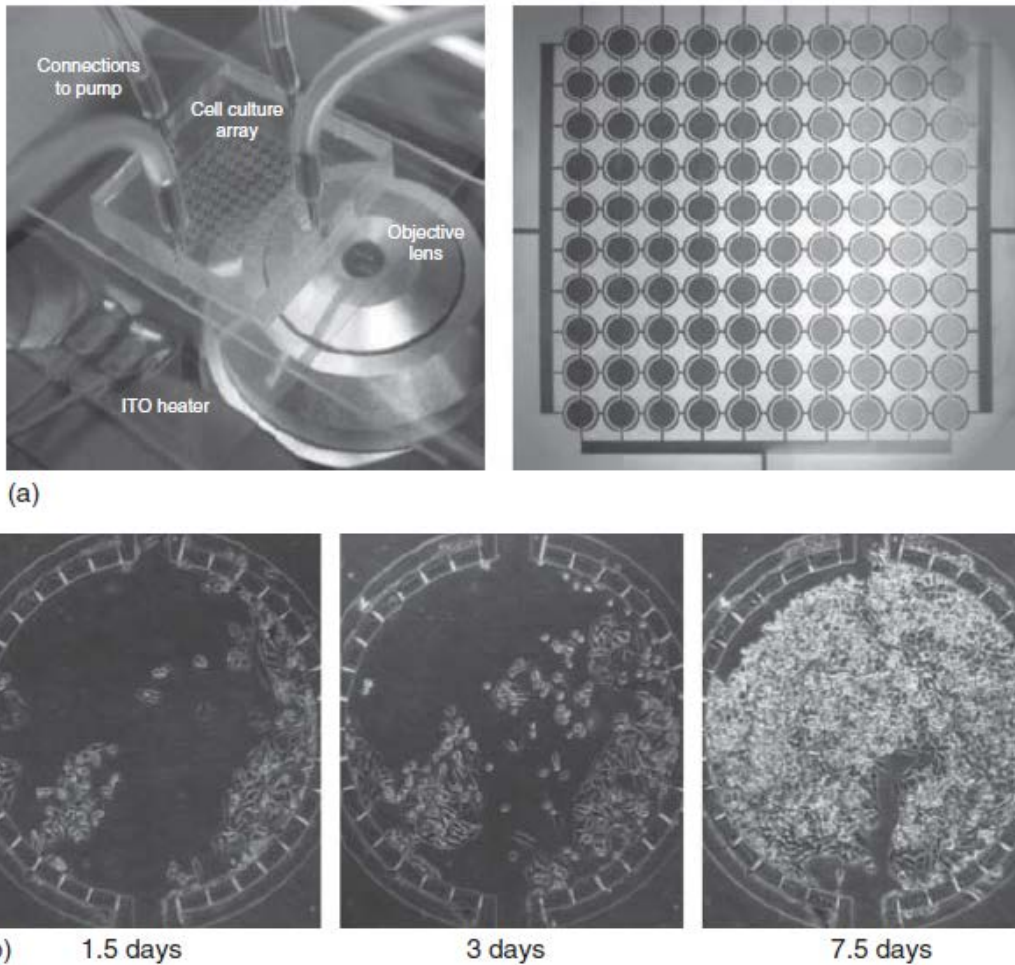
διεπαφή των σταγονιδίων. (δ) Μετά την ενεργή ανάμιξη, η αντίδραση προχώρησε στην ολοκλήρωση [10].

Μια άλλη μικρορρευστονική συσκευή βασίζεται στο χειρισμό της ηλεκτροδιαβροχοποίησης για να εκτελέσει ανάλυση πολυπλεγμένων ενζύμων. Τα δείγματα και τα αντιδραστήρια με τη μορφή διακριτών σταγονιδίων υποβλήθηκαν σε επεξεργασία στη συσκευή, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.20. Σταγονίδια αλκαλικής φωσφατάσης και διφωσφορικής φλουορεσκεΐνης συγχωνεύθηκαν και αναμίχθηκαν στη συσκευή, και στη συνέχεια το προϊόν φθορισμού ανιχνεύθηκε από τον αναγνώστη πλακών φθορισμού. Το όριο ανίχνευσης που επιτεύχθηκε ήταν $\sim 7,0 \times 10^{-20}$ M.

Επίσης, έχουν επιτευχθεί ετερογενείς ανοσοδοκιμασίες με αποτελεσματικό χειρισμό μαγνητικών μικροσφαιρίων χρησιμοποιώντας χειρισμό ηλεκτρομαγνητικής βροχής. Ένα σταγονίδιο δείγματος και ένα σταγονίδιο αντιδραστήριου που περιέχει μαγνητικά σφαιρίδια συζευγμένα με πρωτογενή αντισώματα, πρωτεΐνες αποκλεισμού και δευτερεύοντα αντισώματα εισάγονται στο σύστημα. Αυτά τα δύο σταγονίδια στη συνέχεια συγχωνεύονται, αναμιγνύονται και επωάζονται με χρήση της ηλεκτροδιαβροχής. Έχουμε επίσης και ένα μόνιμο μαγνήτη για την ακινητοποίηση των συμπλεγμάτων μικροσφαιριδίων. Τέλος, ένα σταγονίδιο αντιδραστήριου εφαρμόζεται για την ανίχνευση χημειοφωταύγειας. Με αυτό το τρόπο έχουν επιτευχθεί διαδοχικές ετερογενείς ανοσοδοκιμασίες σε ανθρώπινη ινσουλίνη και ιντερλευκίνη-6 (IL-6) με συνολικό χρόνο 7 λεπτών για κάθε ανάλυση.

2.5.3 Εφαρμογές σε κυτταρικές καλλιέργειες

Η κυτταρική καλλιέργεια είναι μια θεμελιώδης βιολογική τεχνική για διάφορες έρευνες όπως η μελέτη της φυσιολογίας και της χημείας των κυττάρων και η κυτταρική απόκριση υπό την επίδραση των ουσιών προς δοκιμή. Στην συμβατική πρακτική κυτταρικής καλλιέργειας, τα κύτταρα καλλιεργούνται σε δοχεία καλλιέργειας, δηλαδή σε τριγλίο Petri ή σε μικροπλάκα πολλαπλών φρεατίων. Κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας, το μέσο καλλιέργειας παρέχεται χειροκίνητα και αντικαθίσταται τακτικά. Αν και αυτή η λειτουργία είναι τυποποιημένη και χρησιμοποιείται ευρέως σήμερα, περιορίζει την απόδοση και τη δυνατότητα αυτοματοποίησης.



Εικόνα 2.21. Σύστημα καλλιέργειας κυττάρων σε μικρορρευστονική συσκευή. (α) Διάταξη θαλάμου καλλιέργειας 10×10 σε μικρορρευστονικό τσιπ τοποθετημένο σε οπτικό μικροσκόπιο. (β) Ανάπτυξη κυττάρων μέσα σε θάλαμο μικρορρευστονικής κυτταρικής καλλιέργειας. Τα κύτταρα HeLa θηλαστικών καλλιεργήθηκαν στο τριγλίο και αναπτύχθηκαν σχεδόν μαζικά μετά από 7,5 ημέρες.

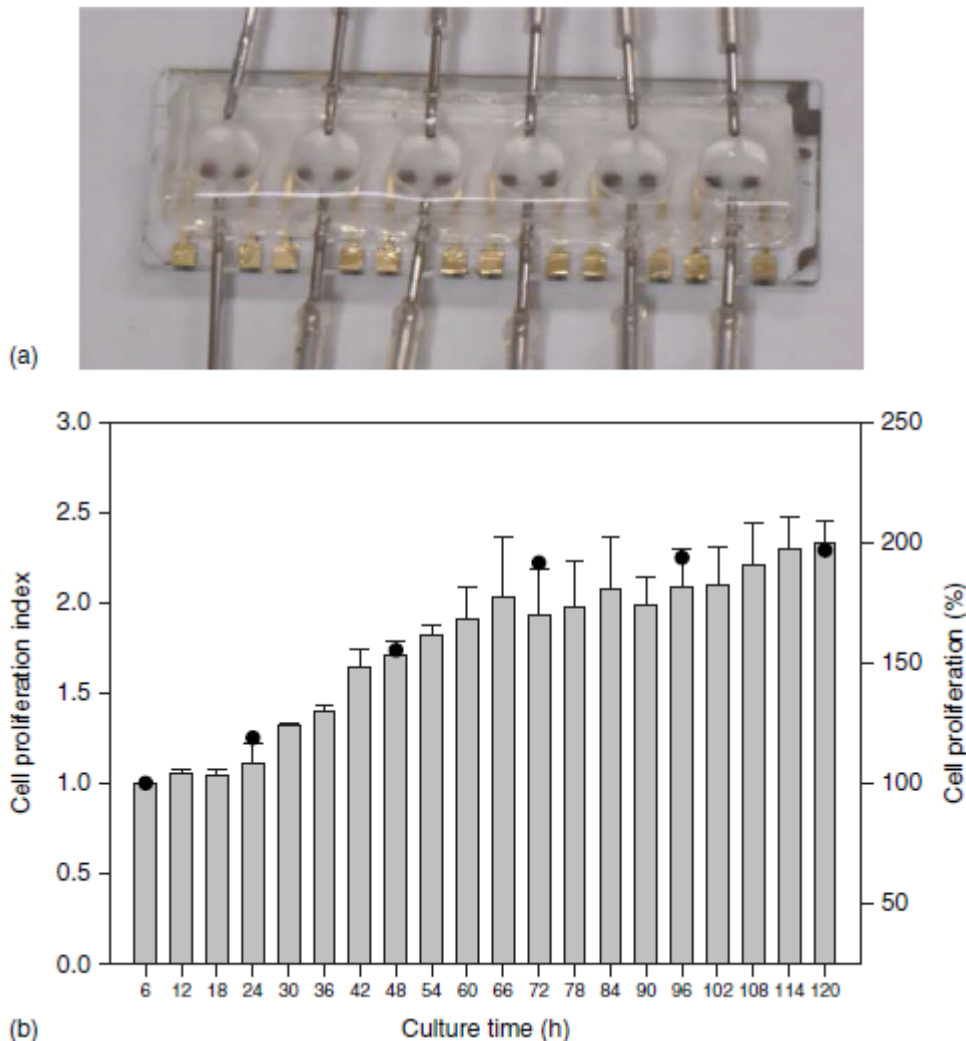
Λόγω της ανάπτυξης της μικρορρευστονικής τεχνολογίας, αναπτύχθηκαν και κατασκευάστηκαν συσκευές μικρορρευστονικών κυτταροκαλλιεργειών. Ένα παράδειγμα μικρορρευστονικής συσκευής κυτταρικής καλλιέργειας, φαίνεται στην εικόνα 2.21 (α), και αποτελείται από μια συστοιχία θαλάμων καλλιέργειας 10×10 . Τα κύτταρα HeLa θηλαστικών καλλιεργήθηκαν στο τριγλίο και αναπτύχθηκαν σχεδόν μαζικά μετά από 7,5 ημέρες, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.16 (β). Το συγκεκριμένο έργο αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη υλοποίηση μοντέλου μικρορρευστονικής κυτταρικής καλλιέργειας.

Χρησιμοποιώντας μικρο-ρρευστονική τεχνολογία για κυτταρική καλλιέργεια, υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα όπως:

- α) η παροχή κλειστού περιβάλλοντος χωρίς την ανάγκη επωαστήρα,
- β) η παρακολούθηση κυτταρικών αποκρίσεων σε πραγματικό χρόνο,

- γ) η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης αντιδραστηρίου και
- δ) η μείωση του αριθμού των κυττάρων σποράς.

Τα παραπάνω παραδείγματα βασίζονται σε ένα δισδιάστατο (2D) μοντέλο καλλιέργειας όπου τα κύτταρα απλώνονται σε μια επίπεδη επιφάνεια. Ωστόσο, πρόσφατες μελέτες ανέφεραν ότι τα δισδιάστατα μοντέλα καλλιέργειας δεν μπορούν να μιμηθούν καλά το φυσικό κυτταρικό μικροπεριβάλλον επειδή τα ζωικά κύτταρα κατοικούν σε τρισδιάστατο (3D) περιβάλλον. Ως εκ τούτου, προτάθηκε ένα τρισδιάστατο μοντέλο καλλιέργειας κυττάρων, στο οποίο τα κύτταρα ενθυλακώνονται και καλλιεργούνται σε τρισδιάστατο πολυμερές υλικό. Θεωρείται ότι πραγματοποιεί καλύτερη προσέγγιση των συνθηκών *in vivo* σε σχέση με τις δισδιάστατες επιφάνειες και παρέχει μια σημαντικά πιο φυσιολογική κατάσταση καλλιέργειας για δοκιμές με βάση τα κύτταρα.



Εικόνα 2.22. Παρακολούθηση του πολλαπλασιασμού των κυττάρων σε ένα μικρορευστονικό τσιπ τρισδιάστατης καλλιέργειας σε πραγματικό χρόνο. (α)

Φωτογραφία του μικρορρευστονικού τσιπ. (β) Ποσοτικός πολλαπλασιασμός κυττάρων σε περιβάλλον τρισδιάστατης καλλιέργειας για έως και 5 ημέρες [10].

Χαρακτηριστικά, αναπτύχθηκε ένα μικρορρευστονικό τσιπ τρισδιάστατης καλλιέργειας με στόχο την κατασκευή ενός ακριβούς, σταθερού και καλά καθορισμένου περιβάλλοντος για μελέτες. Το μικρορρευστονικό τσιπ αποτελούνταν από έξι τρισδιάστατους θαλάμους καλλιέργειας, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.22 (α). Ένα ζεύγος κατακόρυφων παράλληλων ηλεκτροδίων που βρίσκονται στα απέναντι πλευρικά τοιχώματα καλλιέργειας ενσωματώθηκε για την επιτόπια μέτρηση αντίστασης. Κύτταρα που βρίσκονται ενθυλακωμένα στην υδρογέλη τοποθετούνται στο θάλαμο, στον οποίο ασκείται ομοιόμορφο ηλεκτρικό πεδίο κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Επιτεύχθηκε μη επεμβατική παρακολούθηση της πολλαπλασιασμού των κυττάρων σε πραγματικό χρόνο, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.22 (β). Ο ποσοτικός πολλαπλασιασμός των κυττάρων μπορεί να πραγματοποιηθεί σε τρισδιάστατο περιβάλλον καλλιέργειας. Αυτή η μικρορρευστονική συσκευή προσφέρει μεγάλες δυνατότητες για την ανάπτυξη μιας αυτόματης πλατφόρμας υψηλής απόδοσης για εφαρμογές διαλογής φαρμάκων.

2.6 Προοπτικές

Όλα αυτά τα εξαιρετικά έργα καταδεικνύουν την ανάπτυξη της μικρορρευστονικής τεχνολογίας στα ερευνητικά εργαστήρια. Επιπλέον, ορισμένα από τα ερευνητικά έργα έχουν μετατραπεί σε εμπορικά προϊόντα. Για παράδειγμα, ένας φορητός και φιλικός προς τον χρήστη εξοπλισμός διάγνωσης αίματος που ονομάζεται Abbott i-STAT analyzer έχει προωθηθεί εμπορικά. Μερικές μόνο σταγόνες αίματος απαιτούνται για την ανάλυση αίματος και τα αποτελέσματα μεταφορτώνονται αυτόματα στο γράφημα του ασθενούς μέσα σε λίγα λεπτά. Επιπλέον, αναπτύχθηκε μια εμπορική πλατφόρμα, η Advanced Liquid Logic, βασισμένη στην τεχνολογία ψηφιακών μικρορρευστονικών για ανάλυση γονιδίων και πρωτεϊνών. Έχει σχεδιαστεί για έρευνα βιοεπιστημών και παρέχει οικονομικά αποδοτικές λύσεις αυτοματισμού για σύνθετες ροές εργασίας βιοπροσδιορισμού. Πλέον, εξοπλισμός για παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο τρισδιάστατων μικρορρευστονικών καλλιέργειών, έχει διατεθεί στο εμπόριο για εφαρμογές διαλογής φαρμάκων υψηλής απόδοσης. Ο εξοπλισμός αυτός ονομάζεται σύστημα xCELLigence, και το κύριο πλεονέκτημά του είναι η παροχή ποσοτικών δεικτών για την περιγραφή κυτταρικών αποκρίσεων κατά τη διάρκεια της πορείας καλλιέργειας. Ωστόσο, αυτά τα εξαιρετικά προϊόντα δεν έχουν μεγάλο αντίκτυπο στην αγορά. Οι περισσότερες από τις δοκιμές σε κλινικές και την έρευνα στα εργαστήρια εξακολουθούν να βασίζονται σε

συμβατικό εξοπλισμό. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι αυτά τα προσφάτως αναπτυγμένα μικρορρευστονικά προϊόντα χρειάζονται χρόνο για να ανταγωνιστούν τον υπάρχοντα εξοπλισμό που έχει τελειοποιηθεί εδώ και δεκαετίες. Αλλά αναμένεται ότι θα κυκλοφορήσουν στο εμπόριο ακόμη περισσότερα μικρορρευστονικά προϊόντα στο κοντινό μέλλον.

3^ο Κεφάλαιο: Προσομοιώσεις

3.1 Εισαγωγή

Έχουμε ήδη αναφέρει ότι το πρόβλημα που καλούμαστε να αντιμετωπίσουμε είναι η ανάπτυξη και λειτουργία ενός αισθητήρα νανοσωματιδίων, ο οποίος κατασκευάζεται πάνω σε αυτοκόλλητη ελαστική μεμβράνη. Αυτή η μεμβράνη κολλάται επάνω από την πλάκα όπου βρίσκεται χαραγμένο το μικρορευστονικό αυλάκι, το οποίο και κλείνει από επάνω. Φροντίζουμε ώστε η περιοχή ανάμεσα στα δυο ηλεκτρόδια να βρίσκεται επάνω από το μικρορευστονικό αυλάκι. Καθώς εφαρμόζουμε ένα ρυθμό ροής ρευστού στο κανάλι, συγκεκριμένα απιονισμένο νερό, με ειδική αντλία, η μεμβράνη παραμορφώνεται αναλόγως. Η παραμόρφωση της μεμβράνης έχει σαν αποτέλεσμα και παραμόρφωση του αισθητήρα. Έχουμε την επιδίωξη να «μεταφράζει» ο αισθητήρας αυτή την παραμόρφωση που υφίσταται λόγω της ροής του ρευστού στο κανάλι σε μεταβολή της αντίστασης αναφοράς του αισθητήρα. Για το λόγο αυτό, θεωρήσαμε σκόπιμο να πραγματοποιήσουμε κάποιες προσομοιώσεις όλου του συστήματος που θα μας βοηθούσαν να κατανοήσουμε καλύτερα τα πειραματικά αποτελέσματα και να έχουμε μια πιο αποκρυσταλλωμένη εικόνα. Στόχος μας είναι μέσω των προσομοιώσεων να αποκτήσουμε αποτελέσματα για πιέσεις αρχικά και παραμορφώσεις της μεμβράνης στη συνέχεια, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για τη διεξαγωγή πειραματικών μετρήσεων σε αισθητήρες παραμόρφωσης, που θα μπορέσουν να μας δώσουν τιμές για τις αντίστοιχες μεταβολές στην αντίσταση. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του λογισμικού COMSOL. Λόγοι περιορισμένης υπολογιστικής ισχύος και διαχείρισης μνήμης, με ανάγκασαν να χωρίσω το πρόβλημα σε δυο επιμέρους προβλήματα, τα οποία δεν θα λύνονταν ταυτόχρονα αλλά ανεξάρτητα το ένα από το άλλο. Το πρώτο πρόβλημα έχει να κάνει με τη ροή ρευστού στο μικρορευστονικό κανάλι και την πίεση που ασκεί αυτό στην άνω επιφάνεια του καναλιού και αποτελεί ένα πρόβλημα ρευστομηχανικής. Το δεύτερο πρόβλημα έχει να κάνει με την μεμβράνη και τον τρόπο που αυτή παραμορφώνεται όταν δέχεται τις τιμές των πιέσεων στα διάφορα σημεία της. Το δεύτερο πρόβλημα αποτελεί ουσιαστικά ένα πρόβλημα μηχανικής συνεχούς μέσου.

3.2 Βασικές αρχές και εξισώσεις ρευστομηχανικής^[7]

3.2.1 Είδη Ροής

Η ροή των πραγματικών ρευστών είναι ιξώδης. Τα πραγματικά ρευστά έχουν όλα ιξώδες, ανεξάρτητα αν αυτό είναι μικρό ή μεγάλο. Στην ιξώδη ροή, το ρευστό δεν ολισθαίνει πάνω στην επιφάνεια του στερεού, αλλά μένει προσκολλημένο σε αυτήν. Αυτή είναι και η βασική οριακή συνθήκη μη ολίσθησης, σύμφωνα με την οποία, τα πραγματικά ρευστά στα σημεία επαφής τους με στερεά σώματα αποκτούν την ταχύτητα του στερεού, με άλλα λόγια, η σχετική ταχύτητα του ρευστού ως προς το στερεό είναι μηδέν. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, η ταχύτητα των μορίων του ρευστού που βρίσκονται σε επαφή με το τοίχωμα (κατώτερο στρώμα) να είναι μηδέν. Αντίθετα όσο απομακρυνόμαστε από τα τοιχώματα η ταχύτητα του ρευστού αυξάνεται ανά στιβάδα και μεγιστοποιείται στο μέσο της απόστασης ανάμεσα στα δυο τοιχώματα. Μπορούμε να διακρίνουμε την ιξώδη ροή σε δυο επιμέρους κατηγορίες τη στρωτή και την τυρβώδη ροή.

Στρωτή ονομάζεται η ιξώδης ροή κατά την οποία τα σωματίδια του ρευστού κινούνται ομαλώς κατά στρώματα (ή στιβάδες). Σε κάθε τέτοιο στρώμα, η κατανομή της ταχύτητας του ρευστού είναι ομοιόμορφη σε όλη την έκταση της εγκάρσιας (ως προς τη διεύθυνση ροής) διατομής του στρώματος. Επομένως, κατά τη στρωτή ροή, η μόνη κίνηση που παρατηρείται είναι κατά τη διεύθυνση της ροής, αφού κατά την κάθετη προς αυτή διεύθυνση δεν υπάρχει συνιστώσα ταχύτητας. Κατά τη στρωτή ροή τα γειτονικά στρώματα δεν ανταλλάσσουν μεταξύ τους μάζα σε μορφή σωματιδίων.

Τυρβώδης ροή ονομάζεται η ιξώδης ροή κατά την οποία τα σωματίδια του ρευστού κινούνται σε ακανόνιστες τροχιές προς όλες τις διευθύνσεις με εντελώς τυχαίο τρόπο. Κατά την τυρβώδη ροή έχουμε και μακροσκοπική ανάμειξη των γειτονικών στρωμάτων του ρευστού. Οι ιδιότητες του ρευστού σε τυχαίο σημείο του πεδίου ροής διακυμαίνονται συνεχώς κατά εντελώς τυχαίο τρόπο και η τοπική ταχύτητα δεν μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου, αλλά παρουσιάζει ακανόνιστη, συνεχή διακύμανση μεγάλης συχνότητας.

Το κριτήριο για τη διάκριση στρωτής και τυρβώδους ροής αποτελεί ο αριθμός Reynolds, ο οποίος είναι καθαρός αριθμός. Η μετατροπή της στρωτής ροής σε τυρβώδη γίνεται όταν ο αριθμός Reynolds αποκτήσει μια κρίσιμη τιμή, Re_c , που είναι γνωστή ως κρίσιμος αριθμός Reynolds. Για συνήθεις αγωγούς, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η μετατροπή του είδους της ροής από στρωτή σε τυρβώδη συμβαίνει όταν ο αριθμός Reynolds υπερβεί την τιμή 2000:

$$Re_c = 2000$$

Στην πράξη για τιμές του αριθμού Reynolds κοντά στην κρίσιμη τιμή του έχουμε μια μεταβατική κατάσταση, η οποία ονομάζεται μεταβατική ροή.

3.2.2 Είδη Ρευστών

Το πρώτο πρόβλημα είναι ένα πρόβλημα ρευστομηχανικής και έχει να κάνει με τη διέλευση ρευστού, πιο συγκεκριμένα απιονισμένου νερού, από το μικροκανάλι. Κρίνεται σκόπιμο να δούμε τις θεμελιώδεις εξισώσεις της ρευστομηχανικής που διέπουν το συγκεκριμένο πρόβλημα. Αυτές τις εξισώσεις θα λύσω με χρήση του λογισμικού COMSOL. Έτσι, θα μπορέσω να βρω τις τιμές των πιέσεων που ασκούνται σε διάφορα σημεία της άνω επιφάνειας του καναλιού. Τα αποτελέσματα αυτής της προσομοίωσης θα αποτελέσουν τα δεδομένα εισόδου για την προσομοίωση της παραμόρφωσης που παρουσιάζει η μεμβράνη.

Όπως γνωρίζουμε, όταν επιδρούν ιξώδεις τάσεις στα ρευστά, αυτά παραμορφώνονται συνεχώς. Οι ιξώδεις τάσεις συνδέονται με τους αντίστοιχους ρυθμούς παραμόρφωσης των ρευστών με τις υλικές σχέσεις. Στη γενική τους μορφή, οι υλικές σχέσεις των ρευστών αποτελούν ένα αρκετά πολύπλοκο πρόβλημα. Στην περίπτωση των συνηθών ρευστών είναι σχετικά απλές. Ανάλογα με την υλική σχέση που τα διέπει και τη μορφή της, τα ρευστά μπορούν να διαιρεθούν σε δυο κύριες κατηγορίες: τα νευτωνικά και τα μη νευτωνικά.

Ως νευτωνικά ορίζονται τα ρευστά εκείνα στα οποία η ιξώδης τάση εξαρτάται από το ρυθμό παραμόρφωσης του ρευστού κατά γραμμικό τρόπο. Τα αέρια, καθώς και η πλειοψηφία των πιο συνηθισμένων υγρών και διαλυμάτων ουσιών με μικρό μοριακό βάρος, ανάμεσά τους συγκαταλέγονται ο αέρας και το νερό. Το ιξώδες αποτελεί ιδιαίτερο χαρακτηριστικό αυτών των ρευστών, καθώς αποτελεί πραγματική ιδιότητα και εμφανίζει συσχέτιση με την πίεση και τη θερμοκρασία.

Αντίστοιχα ως μη νευτωνικά ορίζονται τα ρευστά εκείνα στα οποία η εξάρτηση της ιξώδους τάσης από το ρυθμό παραμόρφωσης του ρευστού είναι μη γραμμική. Είναι επομένως λογικό, η καμπύλη ροής των μη νευτωνικών ρευστών να μην είναι ευθεία γραμμή, ενώ η κλίση της εξαρτάται επιπρόσθετα και από το ρυθμό διάτμησης του ρευστού. Τα μη νευτωνικά ρευστά εμφανίζουν ιδιαίτερη ρεολογική συμπεριφορά, η οποία αποτελεί ξεχωριστό κλάδο της ρευστομηχανικής, ονομάζεται ρεολογία και κατατάσσει τα μη νευτωνικά ρευστά σε τρεις μεγάλες ομάδες:

1. Μη νευτωνικά ρευστά ανεξάρτητα από το χρόνο. Σε αυτή την ομάδα ρευστών, έχουμε εξάρτηση του ρυθμού διάτμησης του ρευστού αποκλειστικά από το μέγεθος της διατμητικής τάσης.
2. Μη νευτωνικά ρευστά εξαρτώμενα από το χρόνο. Η ρεολογική συμπεριφορά αυτών των ρευστών εξαρτάται από το ρυθμό διάτμησης και την κατάστασή τους σε προηγούμενους χρόνους.
3. Ιξωδοελαστικά ρευστά. Σε αυτή την ομάδα, τα υλικά εμφανίζουν χαρακτηριστικά ρευστών, αλλά και χαρακτηριστικά στερεών.

Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε αποκλειστικά με τη ροή νευτωνικού ρευστού και συγκεκριμένα απιονισμένου νερού μέσα σε μικρορευστονικό κανάλι.

3.2.3 Οριακές Συνθήκες

Θα χρησιμοποιήσουμε διαφορικές εξισώσεις ροής για να περιγράψουμε το πεδίο ροής καθώς και τα φαινόμενα που το συνοδεύουν. Κρίνεται όμως αναγκαίος πρώτα ο ορισμός οριακών και αρχικών συνθηκών για να μπορέσουμε να προχωρήσουμε στη διαφορική ανάλυση του προβλήματος ροής.

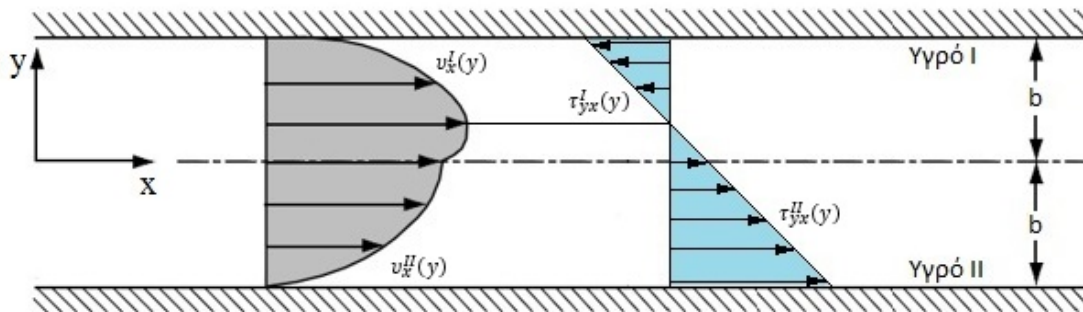
Οι οριακές συνθήκες αναφέρονται στα όρια του όγκου ελέγχου και διατυπώνουν κάποια φυσική αρχή, για τα όρια αυτά, η οποία ισχύει καθ' όλη τη διάρκεια εξέτασης του όγκου ελέγχου. Συγκεκριμένα, οι οριακές συνθήκες οριοθετούν το τμήμα στο χώρο που μας ενδιαφέρει. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος οριοθέτησης είναι μια ορατή φυσική διεπιφάνεια. Στο πρόβλημα που καλούμαστε να αντιμετωπίσουμε έχουμε τη διεπιφάνεια στερεού-ρευστού.

Διεπιφάνεια Στερεού-Ρευστού. Η συνθήκη μη ολίσθησης επικρατεί σε αυτή την περίπτωση. Σύμφωνα με τη συνθήκη αυτή τα πραγματικά ρευστά αποκτούν την ταχύτητα του στερεού στα σημεία επαφής τους με αυτό. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, το πρόβλημα ροής που φαίνεται στην εικόνα 3.1, να έχει οριακές συνθήκες στις θέσεις $y = +b$ και $y = -b$:

$$v_x^I|_{y=+b} = 0 \quad (3.1)$$

$$v_x^{II}|_{y=-b} = 0 \quad (3.2)$$

όπου v_x^I και v_x^{II} είναι οι ταχύτητες των υγρών I και II, αντίστοιχα.



Εικόνα 3.1. Σχηματική αναπαράσταση ανάμεσα σε δυο αναμείξιμα υγρά ανάμεσα σε δυο ακίνητες πλάκες.

Η χρονική στιγμή που επιθυμούμε να μελετήσουμε απομονώνεται από προηγούμενους χρόνους, χάρη στις αρχικές συνθήκες. Οι αρχικές συνθήκες είναι απαραίτητες, όταν η ροή του ρευστού είναι μη μόνιμη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι διαφορικές εξισώσεις ροής να περιέχουν παραγώγους των εξαρτημένων μεταβλητών ως προς το χρόνο. Για το λόγο αυτό κρίνεται αναγκαίο να έχουν ήδη οριστεί τιμές ή κατανομές τιμών για όλες τις εξαρτημένες μεταβλητές στην αρχική χρονική στιγμή ($t=0$), προτού επιχειρήσουμε να επιλύσουμε ένα πρόβλημα μη μόνιμης ροής.

Το ίδιο το πρόβλημα μας υποδεικνύει τις σωστές οριακές και αρχικές συνθήκες, οι οποίες θα πρέπει να καταλήγουν σε λύσεις με φυσικό νόημα.

3.2.4 Διαφορική Εξίσωση Συνέχειας

Η αρχή διατήρησης της μάζας για ένα ορισμένο σημείο του χώρου εκφράζεται μαθηματικά από τη διαφορική εξίσωση συνέχειας. Αρχικά, θα πρέπει να εφαρμόσουμε την αρχή διατήρησης της μάζας σε έναν απειροστό όγκο ελέγχου, οποίος είναι ακίνητος και μέσα από αυτόν περνάει ένα ρευστό. Ο νόμος διατήρησης της μάζας για τον όγκο ελέγχου παίρνει την ακόλουθη μορφή[7]:

Ρυθμός εισροής μάζας στον όγκο ελέγχου	—	Ρυθμός εκροής μάζας από τον όγκο ελέγχου	=	Ρυθμός συσσώρευσης στον όγκο ελέγχου.
---	---	--	---	--

Αξίζει να σημειωθεί, ότι οι τιμές των όρων στη παραπάνω εξίσωση είναι στιγμιαίες, αφού, αναφερόμαστε σε μια δεδομένη χρονική στιγμή, t_0 . Ειδικά στην περίπτωση του απειροστού όγκου ελέγχου για δεδομένη στιγμή t_0 , περνάει μάζα ρευστού ίση με $\rho dx dy dz$.

Αρχικά θα πρέπει να θεωρήσουμε ότι το ρευστό εισέρχεται στον όγκο ελέγχου από τις αρνητικές επιφάνειες και εξέρχεται από τις θετικές επιφάνειές του. Ο ρυθμός $\dot{m}_{(-x)}$ με τον οποίο το ρευστό εισέρχεται στον όγκο ελέγχου μέσω της αρνητικής x-επιφάνειας (εμβαδού $dy dz$) υπολογίζεται:

$$\dot{m}_{(-x)} = \rho v_x dy dz \quad (3.3)$$

Αντίστοιχα, ο ρυθμός $\dot{m}_{(+x)}$ με τον οποίο το ρευστό εξέρχεται από τον όγκο ελέγχου μέσα από τη θετική x-επιφάνειας, θα είναι:

$$\dot{m}_{(+x)} = \left(\rho v_x + \frac{\partial}{\partial x} (\rho v_x) dx \right) dy dz \quad (3.4)$$

Αντίστοιχα για τους ρυθμούς ροής μάζας για τις δυο y-επιφάνειες, με εμβαδό $dx dz$ και για τις δυο z-επιφάνειες, με εμβαδό $dx dy$, προκύπτουν ανάλογες σχέσεις. Επομένως, ο ρυθμός καθαρής εισροής μάζας στον όγκο ελέγχου θα είναι το άθροισμα αυτών των όρων:

$$\begin{aligned} & [\dot{m}_{(-x)} + \dot{m}_{(-y)} + \dot{m}_{(-z)}] - [\dot{m}_{(+x)} + \dot{m}_{(+y)} + \dot{m}_{(+z)}] = \\ & = - \left(\frac{\partial}{\partial x} (\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho v_y) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho v_z) \right) dx dy dz \quad (3.5) \end{aligned}$$

Με αντικατάσταση στους όρους της εξίσωσης θα έχουμε:

$$\left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho v_y) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho v_z) \right] dx dy dz = 0 \quad (3.6)$$

Εάν απαλείψουμε το στοιχειώδη όγκος $dx dy dz$ ($\neq 0$), τότε καταλήγουμε:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z) = 0 \quad (3.7)$$

Η διαφορική εξίσωση που προκύπτει, με χρήση του ανυσματικού διαφορικού τελεστή ∇ μπορεί να γραφεί σε πιο συνεπτυγμένη μορφή:

$$\nabla = \mathbf{i} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial}{\partial z} \quad (3.8)$$

Στη συνέχεια, οι τρεις τελευταίοι όροι στο πρώτο μέλος της εξίσωσης μπορούν να αντικατασταθούν από την απόκλιση του διανύσματος $\rho \mathbf{v}$:

$$\nabla \cdot \rho \mathbf{v} = \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z) \quad (3.9)$$

Επομένως η διαφορική εξίσωση γίνεται:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{v} = 0 \quad (3.10)$$

Η εξίσωση αυτή καθορίζει τη σχέση μεταξύ της πυκνότητας και της ταχύτητας του ρευστού σε κάθε σημείο του πεδίου ροής και αποτελεί τη γενική μορφή της διαφορικής εξίσωσης συνέχειας. Όλες οι περιπτώσεις τρισδιάστατης ροής, είτε αυτή είναι μόνιμη ή μη μόνιμη, είτε είναι στρωτή ή τυρβώδης, είτε είναι συμπιεστή ή ασυμπίεστη για ένα καθαρό ρευστό ή ένα ομοιογενές μείγμα ρευστών μπορούν να περιγραφούν από τη διαφορική εξίσωση συνέχειας, εφόσον δεν έχουμε πυρηνικές ή χημικές αντιδράσεις στον απειροστό όγκο ελέγχου. Στην περίπτωση της διφασικής ροής η πυκνότητα είναι ασυνεχής συνάρτηση, γεγονός που χρήζει ιδιαίτερη προσοχής κατά την εφαρμογή της.

Εάν θεωρήσουμε ότι είμαστε ένας κινούμενος παρατηρητής μέσα στο κινούμενο ρευστό, θα πρέπει να τροποποιήσουμε την εξίσωση, με χρήση της ανυσματικής ταυτότητας:

$$\nabla \cdot \rho \mathbf{v} = \mathbf{v} \cdot \nabla \rho + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} \quad (3.11)$$

Θα τροποποιηθεί έτσι:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \rho + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (3.12)$$

Η υλική παράγωγος της πυκνότητας θα ισούται με το άθροισμα των δυο πρώτων όρων της εξίσωσης:

$$\frac{D\rho}{Dt} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \rho \quad (3.13)$$

η σχέση θα είναι:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (3.14)$$

Με αυτό το τρόπο, μπορούμε να υπολογίσουμε το ρυθμό μεταβολής της πυκνότητας που αντιλαμβανόμαστε καθώς κινούμαστε μαζί με το ρευστό και αποτελεί μια ακόμη μορφή της διαφορικής εξίσωσης συνέχειας. Και αυτή η μορφή της εξίσωσης συνέχειας ισχύει για κάθε περίπτωση τρισδιάστατης ροής, εφόσον η σύσταση του ρευστού παραμένει αμετάβλητη.

Η διαφορική εξίσωση συνέχειας έχει τέσσερις αγνώστους: την πυκνότητα ρ και τις τρεις συνιστώσες της ταχύτητας. Για το λόγο αυτό, με εξαίρεση κάποιες απλές περιπτώσεις, απαιτούνται επιπλέον εξισώσεις για την επίλυσή της. Η επίλυση της διαφορικής εξίσωσης συνέχειας είναι αρκετά δύσκολη καθώς είναι μη γραμμική. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι περιέχει δυο μεταβλητές την πυκνότητα και την ταχύτητα.

Όπως προαναφέραμε, σε ειδικές περιπτώσεις ροής, η διαφορική εξίσωση συνέχειας μπορεί να απλοποιηθεί αρκετά.

Συγκεκριμένα στην περίπτωση μόνιμης ροής, η πυκνότητα ρ του ρευστού είναι χρονικά αμετάβλητη. Επομένως ο πρώτος όρος της εξίσωσης είναι μηδέν και η διαφορική εξίσωση θα είναι:

$$\nabla \cdot \rho \mathbf{v} = 0 \quad (3.15)$$

Συμπεραίνουμε ότι ο ρυθμός καθαρής εκροής μάζας ρευστού ανά μονάδα όγκου σε κάθε σημείο του πεδίου ροής είναι μηδέν στη μόνιμη ροή, επομένως:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z) = 0 \quad (3.16)$$

Αντίστοιχα στην περίπτωση ασυμπίεστης ροής, οι μεταβολές της πυκνότητας του ρευστού σε όλη την έκταση του πεδίου ροής είναι αμελητέες. Έτσι, ο πρώτος όρος της εξίσωσης (3.10) είναι μηδέν, ενώ μπορούμε να απαλείψουμε τη σταθερή πυκνότητα ρ από το δεύτερο όρο. Σε αυτή την περίπτωση, η διαφορική εξίσωση συνέχειας θα είναι:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (3.17)$$

Η εξίσωση αυτή μπορεί να προκύψει και από την εξίσωση (3.14), αν μηδενίσουμε την υλική παράγωγο της πυκνότητας.

$$\frac{D\rho}{Dt} \quad (3.18) \quad (\text{Συνθήκη ασυμπίεστης ροής})$$

Αυτή είναι και η μαθηματική συνθήκη της ασυμπίεστης ροής, που ισχύει στις εξής περιπτώσεις:

1. Όταν μηδενίζονται και οι δυο όροι στο δεύτερο μέλος της εξίσωσης (3.13), Αυτό συμβαίνει όταν η ροή είναι μόνιμη, δηλαδή:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (3.19) \quad (\text{Μόνιμο πεδίο πυκνότητας})$$

Ταυτόχρονα, η πυκνότητα του ρευστού είναι ομοιόμορφη σε όλο το πεδίο ροής, κάτι που εξασφαλίζεται από τη συνθήκη:

$$\nabla \rho = 0 \quad (3.20) \quad (\text{Ομοιόμορφο πεδίο πυκνότητας})$$

2. Όταν το άθροισμα των δυο όρων του δεύτερου μέλους της εξίσωσης (3.13) είναι μηδέν, δηλαδή, όταν ισχύει η σχέση:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\mathbf{v} \cdot \nabla \rho \quad (3.21)$$

Τότε η ροή θα είναι μη μόνιμη και το πεδίο πυκνότητας του ρευστού ανομοιόμορφο.

Η ισχύς της συνθήκης ασυμπίεστης ροής δε συνεπάγεται κατ' ανάγκη και μόνιμη ροή.

3.2.5 Διαφορική Εξίσωση Ορμής

Ο δεύτερος νόμος κίνησης του Newton σε ένα συγκεκριμένο σημείο του χώρου εκφράζεται μαθηματικά από την διαφορική εξίσωση ορμής. Αρχικά, πρέπει να εφαρμόσουμε την αρχή διατήρησης της ορμής σε έναν απειροστό όγκο ελέγχου, ο οποίος είναι ακίνητος και μέσα από αυτόν περνάει ένα ρευστό, μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, t_0 .

Ο όγκος ελέγχου, τη χρονική στιγμή t_0 , θα περιέχει ορμή, ίση με $\rho v dx dy dz$, δηλαδή:

$$\text{Ρυθμός που μεταβάλλεται η ορμή μέσα στον όγκο ελέγχου} = \frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{v}) dx dy dz \quad (3.22)$$

Ο ρυθμός εισροής ορμής στον όγκο ελέγχου μέσω της αρνητικής x-επιφάνειας, $\dot{P}_{(-x)}$, θα είναι:

$$\dot{P}_{(-x)} = \rho \mathbf{v} v_x dy dz \quad (3.23)$$

Αντίστοιχα, ο ρυθμός εκροής ορμής από τη θετική x-επιφάνεια:

$$\dot{P}_{(+x)} = \left(\rho \mathbf{u} u_x + \frac{\partial}{\partial x} (\rho \mathbf{u} u_x) dx \right) dy dz \quad (3.24)$$

Αντίστοιχα για τους ρυθμούς μεταφοράς ορμής για τις δυο y- και για τις δυο z-επιφάνειες, προκύπτουν ανάλογες σχέσεις. Επομένως, ο ρυθμός καθαρής εισροής ορμής στον όγκο ελέγχου θα είναι το άθροισμα αυτών των όρων:

$$\begin{aligned} & [\dot{P}_{(-x)} + \dot{P}_{(-y)} + \dot{P}_{(-z)}] - [\dot{P}_{(+x)} + \dot{P}_{(+y)} + \dot{P}_{(+z)}] = \\ & = - \left(\frac{\partial}{\partial x} (\rho \mathbf{u} u_x) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho \mathbf{u} u_y) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho \mathbf{u} u_z) \right) \end{aligned} \quad (3.25)$$

ή σε ανυσματικό συμβολισμό:

$$-(\nabla \cdot \rho \mathbf{u}) dx dy dz \quad (3.26)$$

Ο διαφορικός όγκος ελέγχου δέχεται την επίδραση από σωματικές και επιφανειακές δυνάμεις. Ένα εξωτερικό πεδίο δυνάμεων (συνήθως, το πεδίο βαρύτητας της γης) μέσα στο οποίο βρίσκεται ο όγκος αυτός είναι υπεύθυνο για τις σωματικές δυνάμεις, οι οποίες ασκούνται πάνω σε ολόκληρο τον όγκο ελέγχου. Επάνω στον απειροστό όγκο ελέγχου θα ασκούνται δυνάμεις βαρύτητας, $d\mathbf{F}_g$, με συνισταμένη:

$$d\mathbf{F}_g = \rho g dx dy dz \quad (3.27)$$

Όπου g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας:

$$\mathbf{g} = \mathbf{i}g_x + \mathbf{j}g_y + \mathbf{k}g_z \quad (3.28)$$

Αντίστοιχα το περιβάλλον που είναι σε άμεση επαφή με τον όγκο ελέγχου και αλληλεπιδρά με αυτόν μέσω των επιφανειακών δυνάμεων, οι οποίες ασκούνται πάνω στην επιφάνεια του όγκου ελέγχου. Στην περίπτωση που καλούμαστε να μελετήσουμε, η επιφάνεια ελέγχου δεν τέμνει στερεά σώματα (όπως συμβαίνει με το θεωρούμενο όγκο ελέγχου). Επομένως, μόνο η πίεση και το ιξώδες είναι υπεύθυνα για τις δυνάμεις που ασκούνται στην επιφάνεια. Αντίστοιχα, η συνισταμένη των επιφανειακών δυνάμεων, $d\mathbf{F}_s$, θα είναι:

$$d\mathbf{F}_s = \mathbf{i}dF_{s,x} + \mathbf{j}dF_{s,y} + \mathbf{k}dF_{s,z} \quad (3.29)$$

Όπου οι $dF_{s,x}$, $dF_{s,y}$ και $dF_{s,z}$ αποτελούν τις καρτεσιανές συνιστώσες της. Κάθε συνιστώσα αποτελεί το αλγεβρικό άθροισμα των δυνάμεων που ασκούνται σε κάθε επιφάνεια του όγκου ελέγχου στην αντίστοιχη διεύθυνση αναφοράς, και θα είναι:

$$dF_{s,x} = (\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}_x) dx dy dz \quad (3.30)$$

Όπου $\boldsymbol{\sigma}_x$ είναι το άνυσμα της τάσης που ασκείται πάνω στη επιφάνεια x και ορίζεται:

$$\boldsymbol{\sigma}_x = \mathbf{i}\sigma_{xx} + \mathbf{j}\sigma_{xy} + \mathbf{k}\sigma_{xz} \quad (3.31)$$

$$dF_{s,y} = (\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}_y) dx dy dz \quad (3.32)$$

$$dF_{s,z} = (\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}_z) dx dy dz \quad (3.33)$$

Αν πολλαπλασιάσουμε τις τρεις εξισώσεις με i , j και k , και τις αθροίσουμε κατά μέλη, θα έχουμε υπολογίσει τη συνισταμένης dF_s των επιφανειακών δυνάμεων:

$$dF_s = [\nabla \cdot (\mathbf{i}\sigma_x + \mathbf{j}\sigma_y + \mathbf{k}\sigma_z)] dx dy dz \quad (3.34)$$

Χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{i}\sigma_x + \mathbf{j}\sigma_y + \mathbf{k}\sigma_z \quad (3.35)$$

Μετασχηματίζεται σε:

$$dF_s = [\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}] dx dy dz \quad (3.36)$$

Εάν αντικαταστήσουμε τους όρους της εξίσωσης, τότε:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) dx dy dz = (-\nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} + \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}) dx dy dz \quad (3.37)$$

Απαλείφουμε το στοιχειώδη όγκο, αφού έχουμε μόνιμη ροή:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) = -\nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} + \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} \quad (3.38)$$

Αυτή η σχέση είναι η διαφορική εξίσωση ορμής τύπου Euler, η οποία θα πρέπει να ισχύει σε κάθε σημείο του πεδίου ροής ανεξάρτητα από το είδος του ρευστού. Αξίζει να αναφέρουμε ότι, οι όροι $\nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u}$ και $\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}$ δεν είναι απλές αποκλίσεις, λόγω της δυαδικής φύσης των μεγεθών $\rho \mathbf{u} \mathbf{u}$ και $\boldsymbol{\sigma}$. Η φυσική ερμηνεία τους είναι ανάλογη της απόκλισης $\nabla \cdot \rho \mathbf{u}$:

$$\nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Ρυθμός καθαρής εκροής ορμής ανά μονάδα όγκου από} \\ \text{ένα ορισμένο σημείο του χώρου, λόγω μεταφοράς του ρευστού} \end{array} \right\}$$

Άρα η (3.38) γίνεται:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) = -\nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} - \nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (3.39)$$

Επίσης, σύμφωνα με:

$$\boldsymbol{\sigma} = -p\mathbf{U} + \boldsymbol{\tau} \quad (3.40)$$

Βρήκαμε το συσχετισμό του δυαδικού τάσης, $\boldsymbol{\sigma}$, με τους δυαδικούς πίεσης $-p\mathbf{U}$, και ιξώδους τάσης, $\boldsymbol{\tau}$. Η συνηθέστερη μορφή της διαφορικής εξίσωσης ορμής τύπου Euler, είναι:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = \rho \mathbf{g} - \nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (3.41)$$

Από την ολική επιτάχυνση a , ενός κινούμενου σωματιδίου:

$$a = \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \quad (3.42)$$

Θα έχουμε:

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = \rho \mathbf{g} - \nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (3.43)$$

Αυτή είναι η διαφορική εξίσωση ορμής τύπου Lagrange, σύμφωνα με την οποία ένα σωματίδιο του ρευστού επιταχύνεται υπό την επίδραση των δυνάμεων βαρύτητας, πίεσης και ιξώδους.

Αρχίζουν να διαφοροποιούνται οι εξισώσεις για νευτωνικά και μη νευτωνικά ρευστά με τη διαφορική εξίσωση ορμής να αποκτά διαφορετική μορφή σε κάθε περίπτωση.

Τα νευτωνικά ρευστά παρουσιάζουν ρεολογική συμπεριφορά, που περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\boldsymbol{\tau} = \mu \dot{\boldsymbol{\gamma}} + \left[\left(\kappa - \frac{2}{3} \mu \right) \nabla \cdot \mathbf{v} \right] \mathbf{U} \quad (3.44)$$

Αντίστοιχα, η διαφορική εξίσωση ορμής (τύπου Lagrange) θα είναι:

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = \rho \mathbf{g} - \nabla p + \nabla \cdot \left\{ \mu \dot{\boldsymbol{\gamma}} + \left[\left(\kappa - \frac{2}{3} \mu \right) \nabla \cdot \mathbf{v} \right] \mathbf{U} \right\} \quad (3.45)$$

Στην ειδική περίπτωση της ασυμπίεστης ροής, η απόκλιση της ταχύτητας είναι μηδέν, και έχουμε:

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = \rho \mathbf{g} - \nabla p + \nabla \cdot \mu \dot{\boldsymbol{\gamma}} \quad (3.46)$$

Όταν το ιξώδες είναι σταθερό:

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = \rho \mathbf{g} - \nabla p + \mu \nabla \cdot \dot{\boldsymbol{\gamma}} \quad (3.47)$$

Αντίθετα όταν η ροή είναι ασυμπίεστη:

$$\nabla \cdot \dot{\gamma} = \nabla^2 v \quad (3.48)$$

η διαφορική εξίσωση ορμής (τύπου Lagrange) σε αυτή την περίπτωση θα είναι:

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \rho \mathbf{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (3.49)$$

Η εξίσωση αυτή ονομάζεται εξίσωση Navier – Stokes. Ωστόσο, θα πρέπει να ικανοποιούνται τρεις προϋποθέσεις για να μπορούμε να την εφαρμόσουμε:

- ✓ Νευτωνικό ρευστό
- ✓ Ασυμπίεστη ροή
- ✓ Σταθερό ιξώδες

3.2.6 Εξισώσεις Navier - Stokes

Στο πεδίο ροής κατά Euler, η εξίσωση Navier-Stokes θα είναι:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = \rho \mathbf{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (3.50)$$

Οι συνιστώσες της εξίσωσης αυτής θα είναι:

$$\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) \quad (3.51)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) \quad (3.52)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) \quad (3.53)$$

Η εξίσωση Navier-Stokes απλοποιείται στην εξίσωση Euler, όταν έχουμε άτριβη ροής (ιξώδες $\mu=0$):

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \rho \mathbf{g} - \nabla p \quad (3.54)$$

Η αναλυτική λύση των διαφορικών εξισώσεων Navier-stokes είναι δύσκολη. Αυτό οφείλεται αφενός στο γεγονός ότι οι εξισώσεις Navier-Stokes είναι μερικές διαφορικές εξισώσεις δευτέρου βαθμού. Επιπλέον, ο τελεστής μεταφοράς $\mathbf{u} \cdot \nabla(\)$ καθιστά τις εξισώσεις αυτές μη γραμμικές. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται διάφορες αριθμητικές μέθοδοι για την επίλυση αυτών των εξισώσεων, οι οποίες όμως δίνουν προσεγγιστικές λύσεις. Μόνο σε απλές περιπτώσεις ροής, όπως π.χ. η στρωτή ροή νευτωνικών ρευστών σε αγωγούς κυκλικής διατομής, μπορεί να δώσει ακριβείς λύσεις των εξισώσεων Navier-Stokes.

Παρόλαυτά, οι εξισώσεις Navier-Stokes ισχύουν για κάθε πρόβλημα ροής. Το γεγονός αυτό μας απαλλάσσει από το να καταστρώνουμε κάθε φορά το σχετικό ισοζύγιο δυνάμεων σε κάθε πρόβλημα ροής. Κρίνεται αναγκαίο όμως, να αναγνωρίσουμε και να απαλείψουμε κάποιους όρους στις εξισώσεις Navier-Stokes, σε περιπτώσεις που αυτοί είναι μηδενικοί ή αμελητέου μεγέθους. Έτσι, οι διαφορικές εξισώσεις Navier-Stokes μπορεί να απλοποιηθούν σημαντικά.

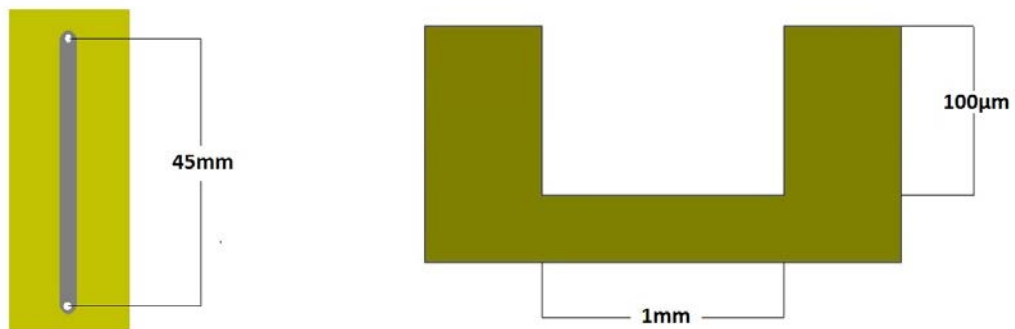
Οι τρεις εξισώσεις Navier-Stokes μαζί με την εξίσωση συνέχειας αποτελούν ένα σύστημα τεσσάρων διαφορικών εξισώσεων με εννέα αγνώστους (την πίεση, την πυκνότητα, το ιξώδες, τις τρεις συνιστώσες της ταχύτητας και τις τρεις συνιστώσες της επιτάχυνσης βαρύτητας). Η πυκνότητα, το ιξώδες και η επιτάχυνση της βαρύτητας είναι συνήθως γνωστά, σε προβλήματα ροής. Με τον τρόπο αυτόν οι άγνωστοι περιορίζονται σε τέσσερις (η πίεση και οι τρεις συνιστώσες της ταχύτητας). Εάν καθοριστούν οι αρχικές και οριακές συνθήκες, το σύστημα των τεσσάρων διαφορικών εξισώσεων συνέχειας είναι επιλύσιμο.

Αυτό το σύστημα των τεσσάρων διαφορικών εξισώσεων, δηλαδή της εξίσωσης συνέχειας και των τριών εξισώσεων Navier-Stokes, χρειάζεται να επιλύσουμε στην περίπτωση του μικρορευστονικού μας καναλιού. Με τον τρόπο αυτό, θα καταφέρουμε να μοντελοποιήσουμε τη συμπεριφορά που εμφανίζει το μικρορευστονικό κανάλι για διάφορες τιμές ροής απιονισμένου νερού. Έτσι, κατ' επέκταση θα μπορέσουμε να υπολογίσουμε και τις πιέσεις που ασκούνται στην άνω επιφάνεια του για όλες τις τιμές ροής. Το λογισμικό COMSOL είναι ένα πολύτιμο εργαλείο, το οποίο μετά από τις δικές μου ρυθμίσεις, θα λύσει αυτό το σύστημα εξισώσεων και θα μας δώσει τα αποτελέσματα για την πίεση στην άνω επιφάνεια του καναλιού.

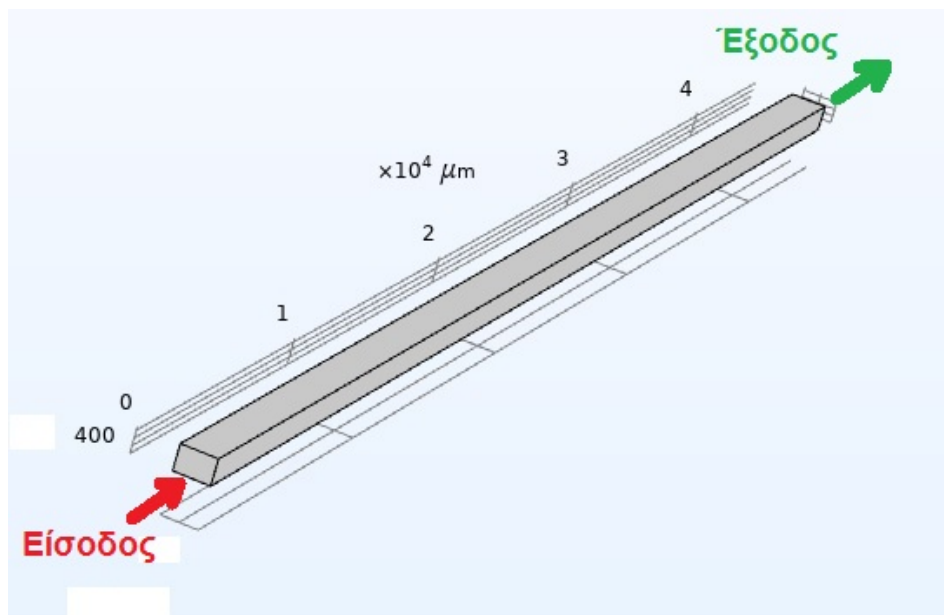
3.3 Προσομοιώσεις ροής σε μικρορευστονικό κανάλι

3.3.1 Εισαγωγή

Στην προσπάθειά μου να μοντελοποιήσω το πρόβλημα, έπρεπε να κάνω κάποιες έπρεπε να κάνω κάποιες παραδοχές που απλούστευαν σε μεγάλο βαθμό το πρόβλημα. Αρχικά, κατά τη μοντελοποίηση του προβλήματος στο λογισμικό COMSOL θεωρώ έναν αγωγό ορθογωνικής διατομής με πλάτος και ύψος ίδιο με του πραγματικού καναλιού. Το μήκος αυτού του αγωγού είναι ίσο με την απόσταση ανάμεσα στα δυο κέντρα των οπών εισόδου και εξόδου του πραγματικού μικροκαναλιού. Οι διαστάσεις μήκος, πλάτος και ύψος του πραγματικού καναλιού φαίνονται στην εικόνα 3.2. Στο μοντέλο υπολογισμού το ρευστό εισέρχεται από τη μια πλευρά και εξέρχεται από την άλλη, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.3.



Εικόνα 3.2. Σχηματικό διάγραμμα του μικρορευστονικού καναλιού, όπου φαίνονται οι διαστάσεις του ($L \times w \times h = 45\text{mm} \times 1\text{mm} \times 100\mu\text{m}$).



Εικόνα 3.3. Σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου υπολογισμού από το πρόγραμμα.

3.3.2 Μελέτη ανεξαρτησίας της λύσης από το πλέγμα υπολογισμού

Έχουμε ήδη αναφέρει ότι πραγματοποιήσαμε τις προσομοιώσεις του μικρορευστονικού καναλιού με τη χρήση του λογισμικού COMSOL. Το λογισμικό COMSOL βασίζεται στην αριθμητική επίλυση των προβλημάτων φυσικής με τη μέθοδο των πεπερασμένων σημείων. Είναι επομένως εύκολο να κατανοήσουμε τον καίριο ρόλο που παίζει το πλέγμα των σημείων που καλείται να υπολογίσει το πρόγραμμα. Το πλέγμα υπολογισμού είναι τόσο σημαντικό, ώστε το ίδιο το πρόγραμμα διαφοροποιεί την πυκνότητα και τη μορφολογία του ανάλογα με τη φύση του προβλήματος. Στα δυο προβλήματα που κλήθηκα να αντιμετωπίσω «κατασκευάσα» τα δικά μου πλέγματα υπολογισμού προσαρμοσμένα στις ιδιαίτερες ανάγκες του κάθε προβλήματος. Κρίθηκε επίσης αναγκαίο να διεξάγω τη μελέτη ανεξαρτησίας της λύσης από το πλέγμα υπολογισμού και τον υπολογισμό του σχετικού σφάλματος. Δηλαδή, η τιμή της εκάστοτε λύσης που βρίσκω πρέπει να είναι ανεξάρτητη από τον αριθμό των σημείων του πλέγματος υπολογισμού. Ένα ευρέως αποδεκτό πλέγμα υπολογισμού θα πρέπει να δίνει λύσεις με σχετικό σφάλμα, μικρότερο του 1%.

Η μελέτη ανεξαρτησίας της λύσης από το πλέγμα υπολογισμού, στην περίπτωση του μικρορευστονικού καναλιού, περιλαμβάνει τον υπολογισμό της ταχύτητας του ρευστού σε ένα συγκεκριμένο σημείο για διάφορους αριθμούς σημείων.

Προτού προχωρήσουμε όμως στον υπολογισμό της ταχύτητας ενός σημείου, είναι απαραίτητο να υπολογίσουμε τον αριθμό Reynolds που έχει το ρευστό κατά τη διαδρομή του μέσα στο μικρορευστονικό κανάλι. Στόχος μας είναι να βρούμε το μέγιστο αριθμό Reynolds για το συγκεκριμένο πρόβλημα, ώστε να αποφανθούμε εάν η ροή γίνεται κάποια στιγμή τυρβώδης, οπότε η ταχύτητα του σημείου γίνεται ακαθόριστη και μεταβάλλεται κατά εντελώς τυχαίο τρόπο. Στην περίπτωση της τυρβώδους ροής θα πρέπει να ακολουθήσουμε άλλη μέθοδο. Επομένως, είναι βασικό να πραγματοποιήσουμε τη μελέτη ανεξαρτησίας της λύσης από το πλέγμα με το μέγιστο αριθμό Reynolds, ο οποίος μπορεί να μας καθορίσει αν μια ροή είναι στρωτή ή τυρβώδης. Ο τύπος που μας δίνει τον αριθμό Reynolds ενός ρευστού μέσα σε έναν αγωγό είναι:

$$Re = \frac{\rho v D_H}{\mu} = \frac{v D_H}{\nu} = \frac{Q D_H}{\nu A} = \frac{W D_H}{\mu A} \quad (3.55)$$

Όπου

D_H : η υδραυλική διάμετρος του αγωγού (η εσωτερική διάμετρος του αγωγού εάν αυτός είναι κυκλικός) (m),

Q : ο ογκομετρικός ρυθμός ροής (m^3/s)

A : το εμβαδόν της διατομής του αγωγού (m^2)

ν : η μέση ταχύτητα του ρευστού (m/s)

μ : το δυναμικό ιξώδες του ρευστού ($\text{Pa s} = \text{N s/m}^2 = \text{kg/(m s)}$)

ν : το κινηματικό του ιξώδες

ρ : η πυκνότητα του ρευστού (kg/m^3)

W : ο ρυθμός ροής μάζας του ρευστού

Για αγωγούς ορθογωνικής διατομής η υδραυλική τους διάμετρος δίνεται από τη σχέση:

$$D_H = \frac{4A}{P} \quad (3.56)$$

όπου

P : η βρεχόμενη περίμετρος, η οποία ορίζεται ως η συνολική περίμετρος όλων των τοιχωμάτων του καναλιού που βρίσκονται σε επαφή με το ρευστό.

Από την παραπάνω σχέση μπορούμε να συμπεράνουμε ότι ο αριθμός Reynolds εξαρτάται:

- Από τη φύση του ρευστού και τις ιδιότητες του (πυκνότητα, δυναμικό ιξώδες, κινηματικό ιξώδες)
- Από τις εσωτερικές διαστάσεις του αγωγού
- Από τη μέση ταχύτητα του ρευστού μέσα στον αγωγό, και κατ' επέκταση από τον ογκομετρικό ρυθμό ροής του.

Με βάση το πρόβλημα που καλούμαι να αντιμετωπίσω έχουμε δεδομένες τις διαστάσεις του καναλιού και αναφερόμαστε σε ένα μόνο ρευστό, απιονισμένο νερό.

Άρα το μόνο κριτήριο που μπορεί να αυξήσει τον αριθμό Reynolds είναι ο ογκομετρικός ρυθμός ροής του ρευστού.

Επομένως για να βρούμε το μέγιστο αριθμό Reynolds, που μπορεί να έχει το πρόβλημα αρκεί να βάλουμε στον τύπο 3.55 τον μέγιστο ρυθμό ροής που χρησιμοποιήσαμε, τα 1000μl/min.

Άρα θα έχουμε:

$$D_H = \frac{4 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1 \cdot 10^{-3}}{(2 \cdot 1) \cdot 10^{-3} + (2 \cdot 0,1) \cdot 10^{-3}} = \frac{0,4 \cdot 10^{-6}}{2,2 \cdot 10^{-3}} = 0,1818 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$Re = \frac{(166,667 \cdot 10^{-10}) \cdot 0,1818 \cdot 10^{-3}}{(8,91710^{-7}) \cdot 1,1 \cdot 10^{-6}} = \frac{166,667 \cdot 0,1818}{8,917 \cdot 1,1} = 3,0891$$

$$3,0891 < 2000 \rightarrow Re_{max} < Re_c$$

Άρα η ροή στο πρόβλημά μας θα είναι στρωτή σε κάθε περίπτωση που αντιμετωπίζουμε. Επομένως, μπορούμε να προχωρήσουμε στη μελέτη ανεξαρτησίας της λύσης από το πλέγμα υπολογισμού.

Επιλέγω αρχικά έναν πληθυσμό 100 στοιχείων για το πλέγμα υπολογισμού, και υπολογίζω την ταχύτητα του ρευστού σε ένα εντελώς τυχαίο σημείο A (24747μm, 196μm, 77μm) του καναλιού. Στη συνέχεια αυξάνω τα σημεία του πλέγματος σε 284 και βρίσκω την ταχύτητα για το συγκεκριμένο σημείο. Για να υπολογίσω το σφάλμα επί τοις εκατό του στον υπολογισμό της ταχύτητας παίρνω την απόλυτη τιμή της διαφοράς της τρέχουσας τιμής της ταχύτητας από την προηγούμενη τιμή επί 100% προς την τρέχουσα τιμή:

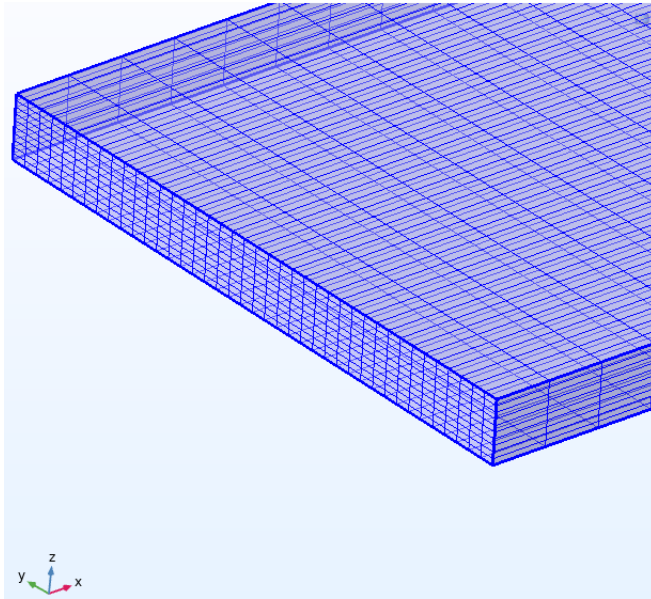
$$\text{σφάλμα}\% = \frac{|\text{τρέχουσα τιμή} - \text{προηγούμενη τιμή}|}{\text{τρέχουσα τιμή}} \cdot 100\% \quad (3.57)$$

Συνεχίζω αυτή τη διαδικασία διπλασιάζοντας περίπου τον αριθμό των στοιχείων κάθε φορά μέχρις ότου το σφάλμα υπολογισμού πέσει κάτω από το 1%. Με αυτό τον τρόπο, προέκυψε ο πίνακας 3.1 με το πλήθος στοιχείων, την ταχύτητα στο συγκεκριμένο σημείο και το σφάλμα επί τοις εκατό στον υπολογισμό της.

Πλήθος Στοιχείων	Ταχύτητα (m/s)	Σφάλμα (%)
100	0,17148	
284	0,18973	9,61893217
610	0,18672	1,61203942
1772	0,18458	1,15938888
2924	0,18274	1,00689504
5925	0,18031	1,347679
12575	0,18245	1,17292409
24300	0,18463	1,18073986
60000	0,18579	0,62436084
103200	0,18629	0,26839873

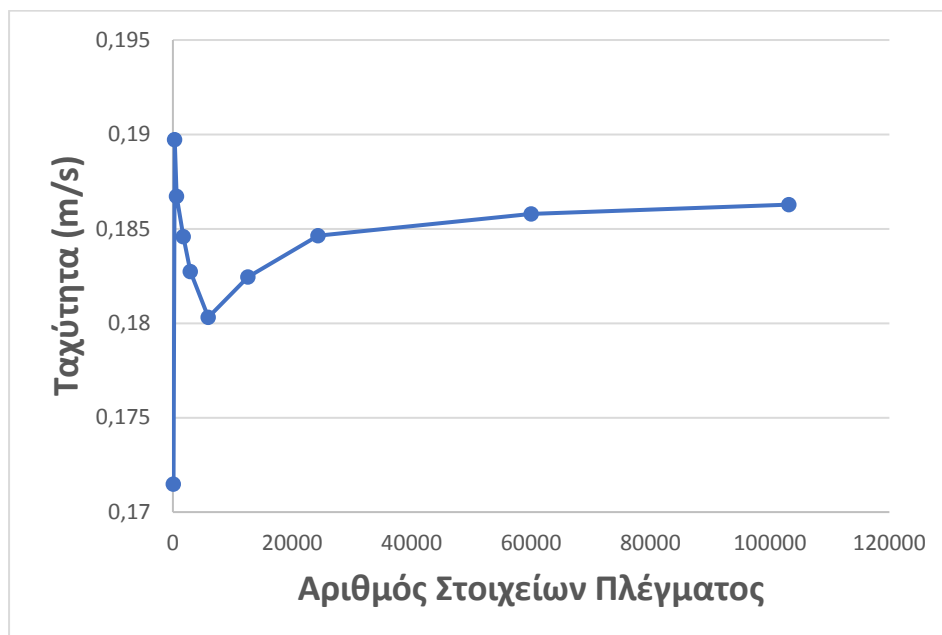
Πίνακας 3.1. Πλήθος στοιχείων στο πλέγμα υπολογισμού, η τιμή της ταχύτητας του ρευστού καθώς και το σχετικό σφάλμα για ένα συγκεκριμένο σημείο.

Με βάση όλα αυτά, κατέληξα στην τελική επιλογή των 60000 στοιχείων υπολογισμού με σφάλμα 0,62436%.

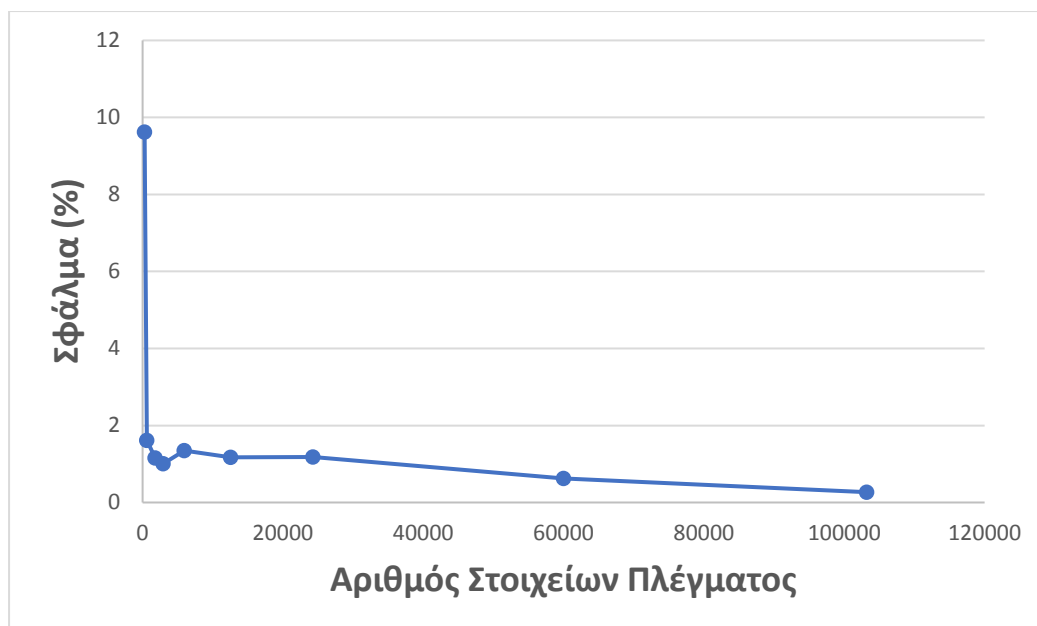


Εικόνα 3.4. Απεικόνιση μέρους του πλέγματος υπολογισμού για το μικρορευστονικό κανάλι, μέσω του λογισμικού COMSOL.

Το πλέγμα που επιλέξαμε για τις προσομοιώσεις του μικρορευστονικού καναλιού, είναι, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.4, ένα πλέγμα εξαεδρικών στοιχείων, το οποίο είναι ομοιόμορφο, καθώς δεν υπήρχε πύκνωση σε περιοχή του υπολογιστικού χωρίου. Αυτά τα χαρακτηριστικά διασφαλίζουν την σωστή κατανομή και ποιότητα των στοιχείων του πλέγματος.



Εικόνα 3.5. Διάγραμμα της διακύμανσης της ταχύτητας για ένα συγκεκριμένο σημείο, ανάλογα με τον αριθμό των στοιχείων στο πλέγμα υπολογισμού.



Εικόνα 3.6. Διάγραμμα του σφάλματος υπολογισμού στην ταχύτητα ενός συγκεκριμένου σημείου, ανάλογα με τον αριθμό των στοιχείων στο πλέγμα υπολογισμού.

3.3.3 Οριακές και αρχικές συνθήκες

Έχοντας επιλέξει το κατάλληλο πλέγμα μπορούμε να ορίσουμε τις οριακές και αρχικές συνθήκες του προβλήματος για να προχωρήσουμε στην προσομοίωση. Έχουμε ήδη αναφερθεί ότι πρόκειται για ροή πραγματικού ρευστού, άρα ιξώδη ροή. Επομένως ισχύει η συνθήκη της μη ολίσθησης, γεγονός που σημαίνει ότι η ταχύτητα του ρευστού πάνω στα τοιχώματα του καναλιού είναι μηδέν.

Επιπλέον, έχω υπολογίσει και τον μέγιστο αριθμό Reynolds που μπορούμε να έχουμε στο πρόβλημα, που είναι πολύ χαμηλότερος από τον κρίσιμο αριθμό Reynolds ($3,89 < 2000$). Άρα, η ροή μέσα στον αγωγό είναι στρωτή σε όλες τις περιπτώσεις. Επομένως, η μόνη κίνηση που παρατηρείται είναι κατά τη διεύθυνση της ροής, αφού κατά την κάθετη προς αυτή διεύθυνση δεν υπάρχει συνιστώσα ταχύτητας. Η κατανομή της ταχύτητας του ρευστού είναι ομοιόμορφη σε όλη την έκταση της εγκάρσιας (ως προς τη διεύθυνση ροής) διατομής του κάθε στρώματος.

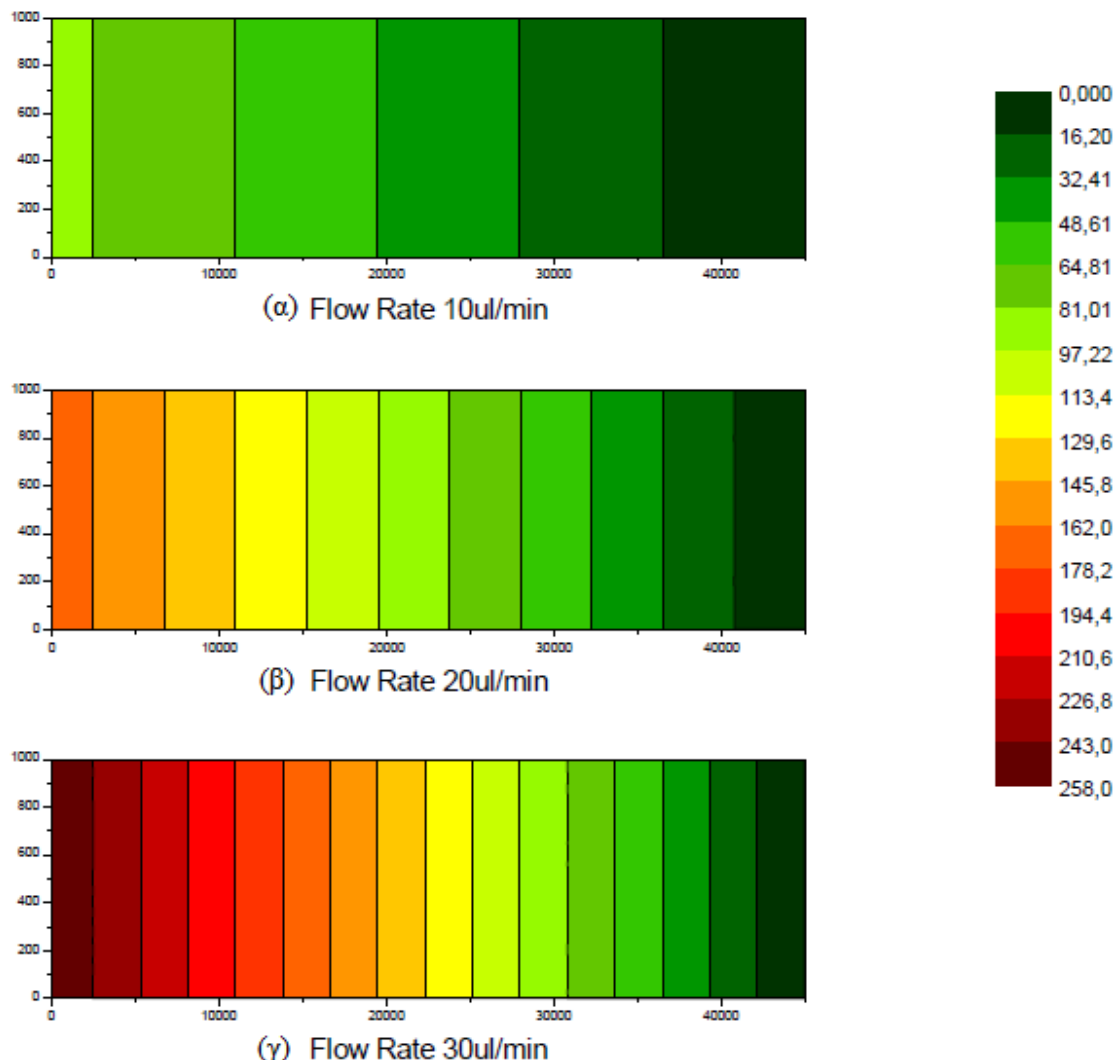
Τέλος, για το πρόβλημα έχουμε:

- Γνωστό τον ογκομετρικό ρυθμό ροής στην είσοδο του καναλιού
- Μηδενική πίεση κατά την έξοδο του καναλιού

Επιπλέον, οι προσομοιώσεις πραγματοποιούνται σε θερμοκρασία $T = 293,15\text{K}$.

3.3.4 Διαγράμματα Προσομοιώσεων

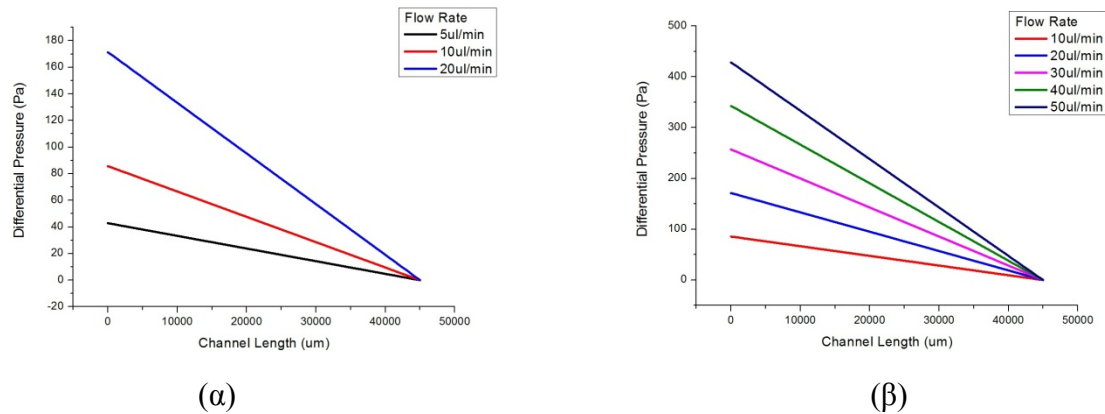
Χρωματική Κλίμακα Πίεσης(Χ.Κ.Π.)(Pa)



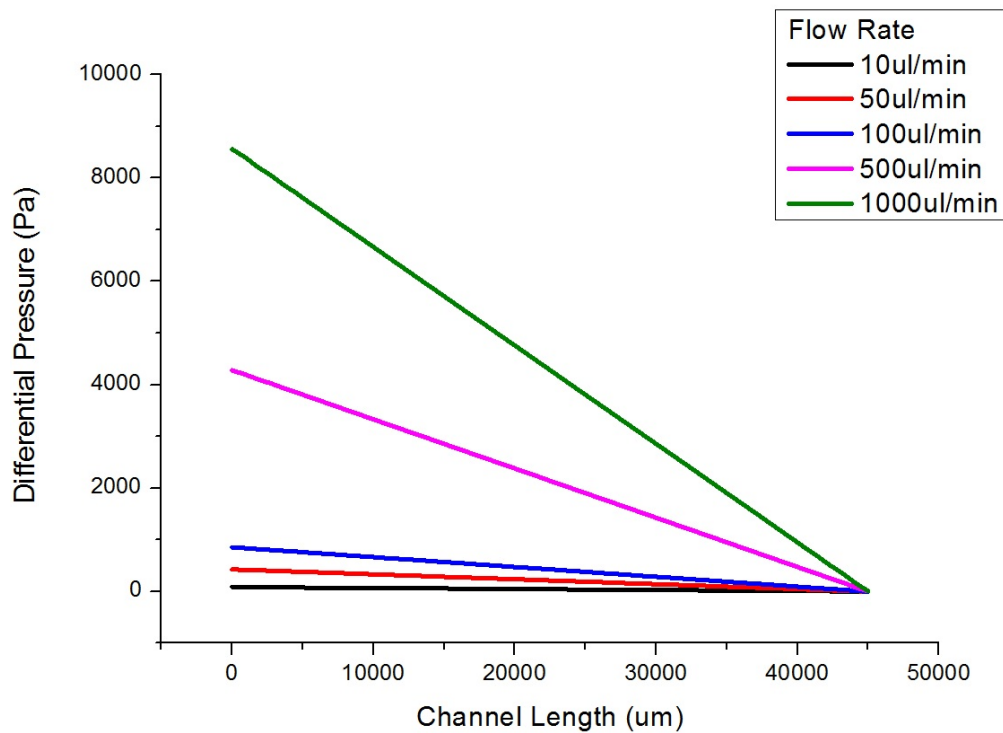
Εικόνα 3.7. Σχηματική αναπαράσταση της κάτοψης του μικροκαναλιού με τις πιέσεις που ασκούνται στην επάνω επιφάνεια του σε Pa, σύμφωνα με τη χρωματική κλίμακα στο πλάι, για ροές: (α) 10 $\mu\text{lit}/\text{min}$, (β) 20 $\mu\text{lit}/\text{min}$, (γ) 30 $\mu\text{lit}/\text{min}$.

Μπορούμε να δούμε καλύτερα την πίεση που ασκείται στη μεμβράνη, σε όλο το μήκος του καναλιού, στα ακόλουθα συγκριτικά διδιάστατα διαγράμματα που

αφορούν τα σημεία πάνω στο μέσο του καναλιού ($y=500\mu\text{m}$) για όλες τις τιμές ροής που έχουν δοκιμαστεί.



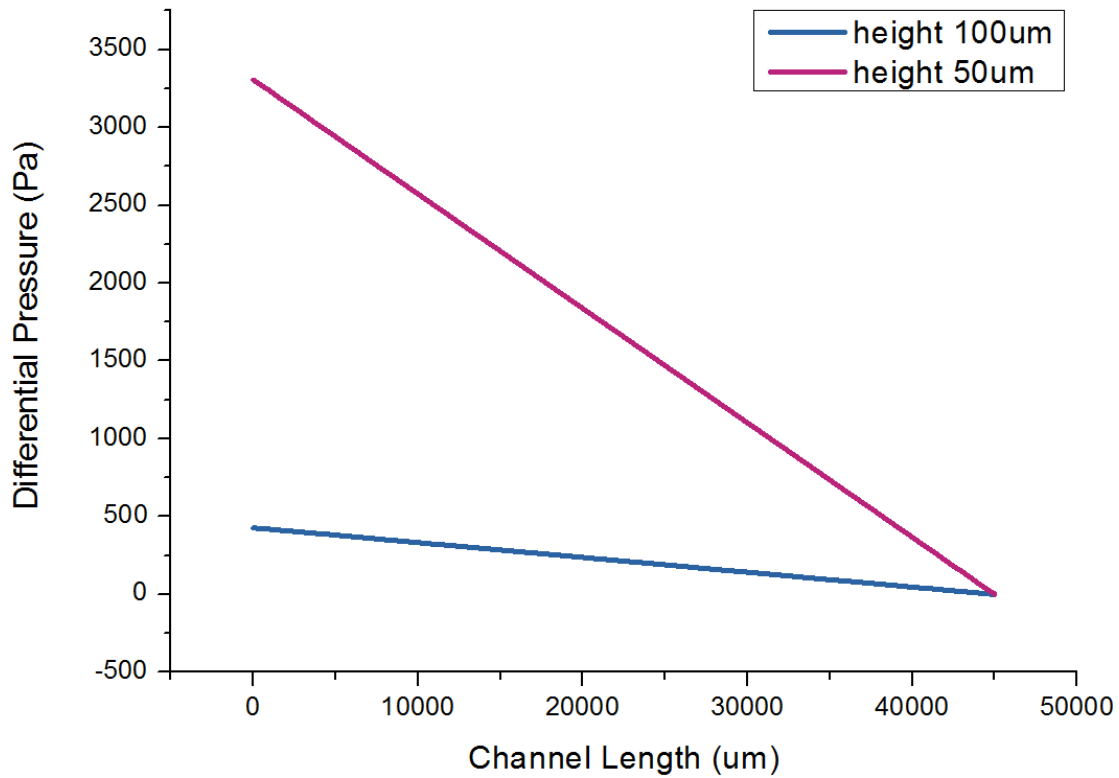
Εικόνα 3.8. Διαγράμματα πιέσεων που ασκούνται στη μεμβράνη του μικρορευστονικού καναλιού για τιμές ροής: (α) 5 – 10 – 20μl/min, (β) 10 – 20 – 30 – 40 – 50μl/min.



Εικόνα 3.9. Ενδεικτικό διάγραμμα πιέσεων που ασκούνται στη μεμβράνη του μικρορευστονικού καναλιού για τιμές ροής 10 – 50 – 100 – 500 – 1000μl/min.

3.3.5 Προσομοιώσεις πίεσης για διαφορετικά ύψη καναλιών

Έχουμε υποδιπλασιάσει το ύψος του καναλιού στα 50 μm διατηρώντας όλες τις διαστάσεις ίδιες. Στόχος μας είναι να δούμε στο ακόλουθο διάγραμμα τη μεταβολή της πίεσης που ασκείται στα δυο κανάλια για την ίδια τιμή ροής που είναι 50 $\mu\text{l}/\text{min}$.

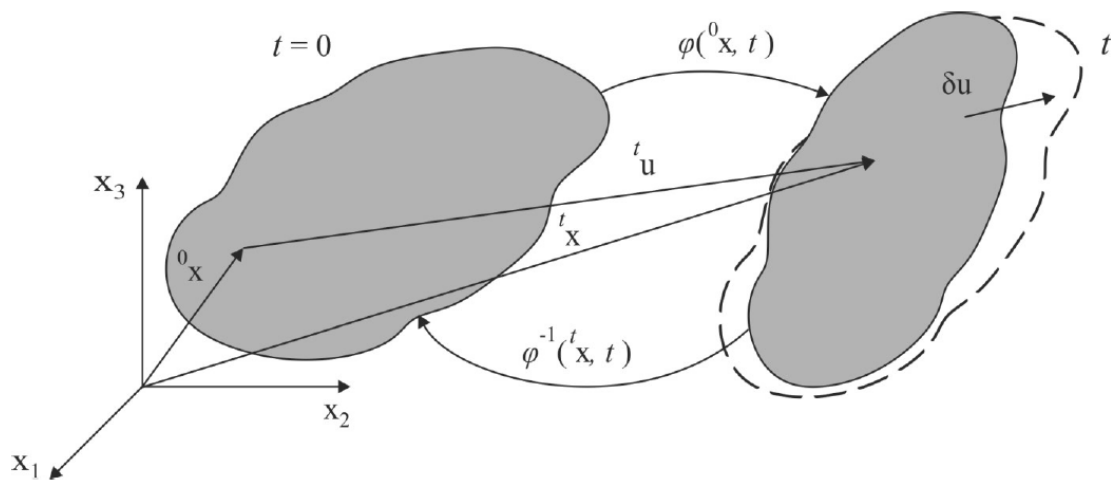


Εικόνα 3.10. Διάγραμμα μεταβολής της πίεσης για ροή 50 $\mu\text{l}/\text{min}$ και βάθη καναλιών 50 μm και 100 μm .

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε ο υποδιπλασιασμός στο βάθος του καναλιού προκαλεί υπερδιπλασιασμό της πίεσης που δέχεται η ελαστική μεμβράνη.

3.4 Βασικές αρχές και εξισώσεις μηχανικής συνεχούς μέσου

Εάν θέλουμε να κατανοήσουμε τη συμπεριφορά του αισθητήρα μας, θα πρέπει πρώτα να κατανοήσουμε τη συμπεριφορά της ελαστικής μεμβράνης από πολυολεφίνη, πάνω στην οποία είναι κατασκευασμένος. Ο αισθητήρας νανοσωματιδίων μαζί με τη μεμβράνη αποτελούν ένα Μικρο-Ηλεκτρο-Μηχανικό σύστημα (MEMS: Micro-Electro-Mechanical System), το οποίο μπορεί να ανιχνεύσει την ύπαρξη ή τις μεταβολές της ροής σε ένα μικρορευστονικό κανάλι. Κρίνεται λοιπόν αναγκαίο, να εισάγουμε κάποιες βασικές αρχές και εξισώσεις της μηχανικής συνεχούς μέσου που θα μας επιτρέψουν να εμπεδώσουμε τα φαινόμενα και τις παραμορφώσεις που υφίσταται η μεμβράνη. Αυτές τις παραμορφώσεις καθώς και άλλες μπορεί να τις υποστεί οποιοδήποτε ελαστικό σώμα, που υπόκειται στις ίδιες ακριβώς αρχές. Μπορούμε λοιπόν να εξετάσουμε τι συμβαίνει σε ένα τυχαίο ελαστικό σώμα και να ανάγουμε αυτές τις εξισώσεις στην περίπτωση της μεμβράνης. Αυτές τις εξισώσεις καλούμαστε να επιλύσουμε με τη βοήθεια του λογισμικού COMSOL, ώστε να μοντελοποιήσουμε τη συμπεριφορά της μεμβράνης.



Εικόνα 3.11. Σχηματική αναπαράσταση της κίνηση ενός τυχαίου στερεού σώματος.

Ας θεωρήσουμε ένα συνεχές στερεό σώμα, με τυχαίο σχήμα, που είναι φτιαγμένο από γραμμικά ελαστικό υλικό. Το σώμα αρχίζει να κινείται από την απαραμόρφωτη κατάσταση της χρονικής στιγμής $t = 0$ στην παραμορφωμένη κατάσταση της χρονικής στιγμής t , εξαιτίας της επιβολής εξωτερικών φορτίσεων. Σε κάθε μια από αυτές τις χρονικές στιγμές αντιστοιχεί στο σώμα μια διαφορετική απεικόνιση, όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στην εικόνα 3.11. Στη χρονική στιγμή $t = 0$, έχουμε την αρχική απεικόνιση του, η οποία θεωρείται και απεικόνιση αναφοράς. Τη χρονική στιγμή t έχουμε την τρέχουσα απεικόνιση. Με την πάροδο του χρόνου η κίνηση του σώματος μπορεί να περιλαμβάνει μετατοπίσεις, περιστροφές και

παραμορφώσεις. Το γεγονός αυτό κάνει αυτές τις δύο απεικονίσεις διαφέρουν μεταξύ τους. Παρόλαυτά όμως, το σώμα δεν παρουσιάζει θραύση υλικού ή διείσδυση τμημάτων του. Επιπλέον, μπορούμε να απαλείψουμε την επίδραση αδρανειακών όρων, θεωρώντας στατικές τις οι εξωτερικές φορτίσεις λόγω της αρκετά αργής τους αύξησης. Έχοντας κάνει αυτές τις παραδοχές μπορούμε να παρομοιώσουμε ικανοποιητικά το φαινόμενο παραμόρφωσης αυτού του τυχαίου ελαστικού σώματος, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.11, και κατ' επέκταση της ελαστικής μεμβράνης πάνω από το κανάλι. Λαμβάνοντας υπόψη τη στατική φύση αυτού του προβλήματος, η μεταβλητή t δεν έχει την έννοια του χρόνου, αλλά ουσιαστικά χρησιμοποιείται για να περιγράψει την κίνηση του σώματος.[8]

Πρέπει να ορίσουμε το διάνυσμα θέσης ενός υλικού σημείου του σώματος στην τρέχουσα απεικόνιση:

$${}^t \mathbf{x} = \varphi({}^0 \mathbf{x}, t) \quad (3.58)$$

Αντίστοιχα, το διάνυσμα μετατόπισης του σημείου, από την αρχική στην τρέχουσα απεικόνιση:

$${}^t \mathbf{u} = {}^t \mathbf{x} - {}^0 \mathbf{x} = \varphi({}^0 \mathbf{x}, t) - {}^0 \mathbf{x} \quad (3.59)$$

όπου ${}^0 \mathbf{x}$ το διάνυσμα θέσης του σημείου στην αρχική απεικόνιση και φ μια διανυσματική συνάρτηση που αντιστοιχεί αμφιμονοσήμαντα τις θέσεις του σημείου στις δύο απεικονίσεις.

Η παραμόρφωση που εμφανίζεται γύρω από αυτό το σημείο μπορεί να προσδιοριστεί με τον τανυστή κλίσης ή βαθμίδα παραμόρφωσης ${}^t \mathbf{F}$ και τον αντίστροφο του ${}^0 \mathbf{F}$, όπου ισχύουν οι σχέσεις, αντίστοιχα:

$${}^t \mathbf{F} = \frac{\partial \varphi({}^0 \mathbf{x}, t)}{\partial {}^0 \mathbf{x}} = \frac{\partial {}^t \mathbf{x}}{\partial {}^0 \mathbf{x}} = \nabla_0 {}^t \mathbf{x} \quad \text{ή} \quad {}^t F_{ij} = \frac{\partial {}^t x_i}{\partial {}^0 x_j} = {}^t x_{i,j} \quad (3.60)$$

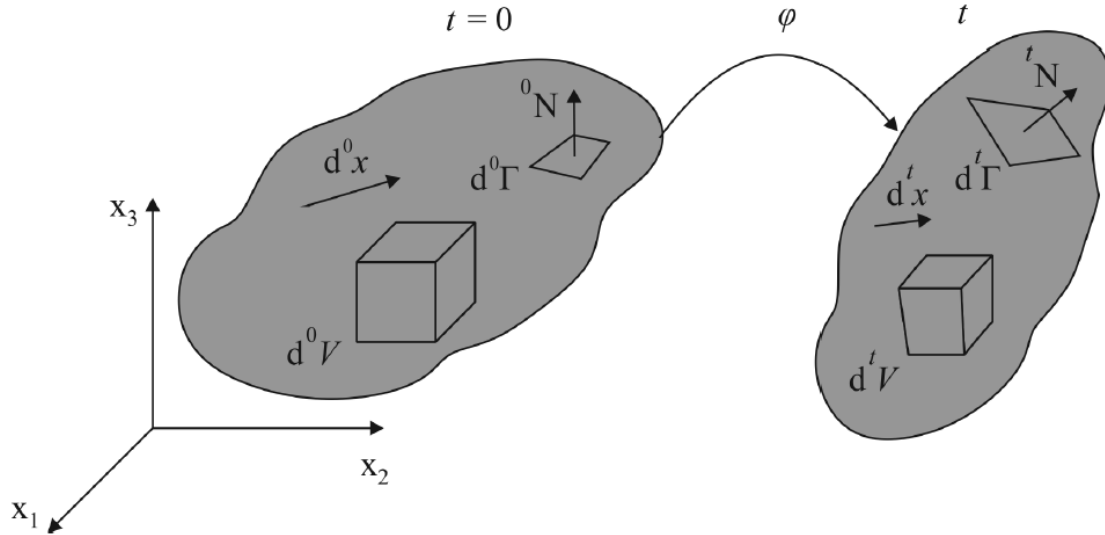
$${}^0 \mathbf{F} = \frac{\partial \varphi^{-1}({}^t \mathbf{x}, t)}{\partial {}^t \mathbf{x}} = \frac{\partial {}^0 \mathbf{x}}{\partial {}^t \mathbf{x}} = \nabla {}^0 \mathbf{x} \quad \text{ή} \quad {}^0 F_{ij} = \frac{\partial {}^0 x_i}{\partial {}^t x_j} = {}^0 x_{i,j} \quad (3.61)$$

όπου φ^{-1} η αντίστροφη της διανυσματικής συνάρτησης φ . Ο επάνω αριστερά δείκτης στο ${}^t \mathbf{F}$ συμβολίζει την απεικόνιση της χρονικής στιγμής, με βάση την οποία αναφέρεται η κλίση παραμόρφωσης. Αντίστοιχα, ο κάτω αριστερά δείκτης συμβολίζει την απεικόνιση της χρονικής στιγμής ως προς την οποία εκφράζεται. Στην περίπτωση που αναφερόμαστε στην ίδια απεικόνιση, τότε ο κάτω αριστερά δείκτης παραλείπεται.

Με τη χρήση της (3.58), η κλίση παραμόρφωσης, (3.59), μπορεί να γραφεί συναρτήσει της μετατόπισης ως εξής:

$${}^t_0\mathbf{F} = \nabla_0 {}^t\mathbf{u} + \mathbf{I} \quad (3.62)$$

όπου \mathbf{I} ο μοναδιαίος τανυστής δεύτερης τάξης.



Εικόνα 3.12. Σχηματική αναπαράσταση της αντιστοίχισης των στοιχειωδών διανυσμάτων, επιφανειών και όγκων του τυχαίου στερεού σώματος ανάμεσα σε αρχική και τρέχουσα απεικόνιση.

Τα υλικά σημεία σε δύο απεικονίσεις μπορούν να συσχετιστούν από την κλίση παραμόρφωσης, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.12. Εάν θεωρήσουμε $d^0\mathbf{x}$ στην αρχική απεικόνιση το απειροστό διάνυσμα σχετικής θέσης για δύο γειτονικά σημεία του στερεού, τότε το αντίστοιχο διάνυσμα, $d^t\mathbf{x}$, στην τρέχουσα απεικόνιση θα είναι:

$$d^t\mathbf{x} = {}^t_0\mathbf{F} d^0\mathbf{x} \quad (3.63)$$

Επίσης, για τις απειροστές επιφάνειες στην εικόνα 3.12 ισχύει:

$${}^t\mathbf{N} d^t\Gamma = \det {}^t_0\mathbf{F} {}^0\mathbf{F}^T {}^0\mathbf{N} d^0\Gamma \quad (3.64)$$

όπου $\det {}^t_0\mathbf{F}$ η ιακωβιανή ορίζουσα της κλίσης παραμόρφωσης, ${}^t\mathbf{N}$ και ${}^0\mathbf{N}$ τα μοναδιαία κάθετα διανύσματα στις επιφάνειες $d^t\Gamma$ και $d^0\Gamma$, αντίστοιχα.

Αντίστοιχα, για τους απειροστούς όγκους d^0V και d^tV , όπως φαίνονται στην εικόνα 2, θα έχουμε:

$$d^tV = \det {}^t_0\mathbf{F} d^0V \quad (3.65)$$

Επιπλέον, θα ισχύει η αρχή διατήρησης μάζας, αφού δεν έχουμε μεταβολή της ύλης κατά την κίνηση του στερεού και θα ισχύει:

$${}^t\rho d^tV = {}^0\rho d^0V \quad (3.66)$$

όπου ${}^t\rho$ και ${}^0\rho$ η πυκνότητα μάζας στην τρέχουσα και την αρχική απεικόνιση, αντίστοιχα. Χρησιμοποιώντας την (3.60), η (3.61) γράφεται:

$${}^t\rho = \frac{{}^0\rho}{\det {}^t_0\mathbf{F}} \quad (3.67)$$

Η διαφορά του μέτρου των διανυσμάτων $d^0\mathbf{x}$ και $d^t\mathbf{x}$ μπορεί να περιγράψει την παραμόρφωση του ελαστικού σώματος, συγκεκριμένα:

$$d^t\mathbf{x}d^t\mathbf{x} - d^0\mathbf{x}d^0\mathbf{x} \quad (3.68)$$

Με την χρήση της (3.63), η (3.68) γίνεται:

$$\frac{1}{2} \left(d^t\mathbf{x}d^t\mathbf{x} - d^0\mathbf{x}d^0\mathbf{x} \right) = d^0\mathbf{x}^T {}^t_0\boldsymbol{\varepsilon} d^0\mathbf{x} \quad (3.69)$$

όπου

$${}^t_0\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2} \left({}^t_0\mathbf{F}^T {}^t_0\mathbf{F} - \mathbf{I} \right) = \frac{1}{2} \left({}^t_0\mathbf{C} - \mathbf{I} \right) \quad (3.70)$$

ο τανυστής παραμόρφωσης Green-Lagrange και

$${}^t_0\mathbf{C} = {}^t_0\mathbf{F}^T {}^t_0\mathbf{F} \quad (3.71)$$

ο δεξιός τανυστής παραμόρφωσης Cauchy-Green.

Εισάγοντας την (3.62) στο μεσαίο όρο της (3.70) προκύπτει:

$${}^t_0\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2} \left[\underbrace{\nabla_0 {}^t\mathbf{u} + (\nabla_0 {}^t\mathbf{u})^T}_{\text{Γραμμικοί όροι}} + \underbrace{\nabla_0 {}^t\mathbf{u} (\nabla_0 {}^t\mathbf{u})^T}_{\text{Μη γραμμικοί όροι}} \right] \quad (3.72)$$

Η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφεί χρησιμοποιώντας συνιστώσες:

$${}^t_0\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left({}^t u_{i,j} + {}^t u_{j,i} + {}^t u_{k,i} {}^t u_{k,j} \right) \quad (3.73)$$

Όπου $t_{u_{i,j}} = \partial^t u_i / \partial^0 u_j$. Η επανάληψη του δείκτη k στην (3.73) συμβολίζει την άθροιση του γινομένου των όρων.

Συγκεκριμένα μπορούμε να παραλείψουμε τους μη γραμμικούς όρους της εξίσωσης, λόγω γραμμικής ανάλυσης, με αποτέλεσμα οι παραμορφώσεις να είναι:

$$\mathbf{e} = \frac{1}{2} \left[\nabla_0 \mathbf{u} + (\nabla_0 \mathbf{u})^T \right] \quad (3.74)$$

Επειδή στη γραμμική ανάλυση οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται με βάση την αρχική απεικόνιση, οι παραμορφώσεις, \mathbf{e} , δεν έχουν άνω ή και κάτω αριστερό δείκτη.

Το διάνυσμα τάσης σε ένα εσωτερικό σημείο της τρέχουσας απεικόνισης θα είναι:

$${}^t \mathbf{t} = \lim_{\Delta^t \Gamma \rightarrow 0} \frac{\Delta^t \mathbf{f}}{\Delta^t \Gamma} = \frac{d^t \mathbf{f}}{d^t \Gamma} \quad (3.75)$$

όπου $\Delta^t \mathbf{f}$ το διάνυσμα της δύναμης που αναπτύσσεται σε αυτό το σημείο και $\Delta^t \Gamma \rightarrow 0$ η επιφάνεια που το περικλείει. Το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα ${}^t \mathbf{N}$ επάνω στην επιφάνεια $\Delta^t \mathbf{f}$ και το διάνυσμα τάσης ${}^t \mathbf{t}$ συνδέονται με τη σχέση:

$${}^t \mathbf{t} = {}^t \boldsymbol{\sigma} {}^t \mathbf{N} \quad (3.76)$$

όπου ${}^t \boldsymbol{\sigma}$ ο συμμετρικός τανυστής τάσης Cauchy, ο οποίος προσδιορίζει τις πραγματικές εσωτερικές τάσεις στην άγνωστη τρέχουσα απεικόνιση.

Οι τάσεις εκφράζονται, σε αρκετές περιπτώσεις, με βάση μια γνωστή απεικόνιση, όπως η αρχική για παράδειγμα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, να χρησιμοποιούνται άλλοι τανυστές τάσης, αντί για τον τανυστή Cauchy. Εισάγοντας τις σχέσεις (3.76) και (3.64) στην (3.75) και λύνοντας ως προς τις εσωτερικές δυνάμεις $d^t \mathbf{f}$ θα έχουμε:

$$d^t \mathbf{f} = {}^t \mathbf{P} d^t \Gamma {}^t \mathbf{N} \quad (3.77)$$

όπου

$${}^t \mathbf{P} = \det {}^t \mathbf{F} {}^t \boldsymbol{\sigma} {}^0 \mathbf{F}^T \quad (3.78)$$

ο 1ος τανυστής τάσης Piola-Kirchoff. Σύμφωνα με τη σχέση (3.78), ο τανυστής ${}^t \mathbf{P}$ δεν είναι κατ' ανάγκη συμμετρικός, καθώς προκύπτει από το γινόμενο του συμμετρικού τανυστή Cauchy και του τανυστή κλίσης παραμόρφωσης που δεν είναι εν γένει συμμετρικός. Το γεγονός αυτό καθιστά αναγκαία την εισαγωγή ενός άλλου τανυστή, ο οποίος είναι συμμετρικός και προκύπτει από την αντιστοίχιση δυο διανυσμάτων δύναμης σε αρχική ($d^0 \mathbf{f}$) και τελική απεικόνιση ($d^t \mathbf{f}$) στη σχέση (3.77), δηλαδή θα ισχύει:

$$d^0 \mathbf{f} = {}^0 \mathbf{F} d^t \mathbf{f} \quad (3.79)$$

Χρησιμοποιώντας τις (3.77) και (3.78), η (3.79) γράφεται ως:

$$d^0 \mathbf{f} = {}_0^t \mathbf{S} d^t \Gamma^t \mathbf{N} \quad (3.80)$$

όπου

$${}_0^t \mathbf{S} = \det {}_0^t \mathbf{F} {}_t^0 \mathbf{F}^T {}_t^0 \boldsymbol{\sigma} {}_t^0 \mathbf{F}^T \quad (3.81)$$

ο 2ος τανυστής τάσης Piola-Kirchhoff. Με βάση την (3.67), η (3.81) γίνεται:

$${}_0^t \mathbf{S} = \frac{{}_0^t \rho}{{}_t^0 \rho} {}_t^0 \mathbf{F}^T {}_t^0 \boldsymbol{\sigma} {}_t^0 \mathbf{F}^T \quad \text{ή} \quad {}_0^t S_{ij} = \frac{{}_0^t \rho}{{}_t^0 \rho} {}_t^0 F_{im} {}_t^0 F_{jn} {}_t^0 \sigma_{mn} \quad (3.82)$$

Λύνοντας την (25) ως προς τον τανυστή τάσης Cauchy προκύπτει:

$${}_t^0 \boldsymbol{\sigma} = \frac{{}_t^0 \rho}{{}_0^t \rho} {}_0^t \mathbf{F} {}_0^t \mathbf{S} {}_0^t \mathbf{F}^T \quad \text{ή} \quad {}_t^0 \sigma_{mn} = \frac{{}_t^0 \rho}{{}_0^t \rho} {}_0^t F_{mi} {}_0^t F_{nj} {}_0^t S_{ij} \quad (3.83)$$

Συμπερασματικά, θα μπορούσαμε να συνοψίσουμε την φυσική σημασία που έχουν οι τανυστές τάσης:

Ο τανυστής τάσεων Cauchy αναφέρεται σε δυνάμεις της τρέχουσας απεικόνισης ανηγμένες σε παραμορφωμένες επιφάνειες της τρέχουσας απεικόνισης.

Ο 1^{ος} τανυστής Piola – Kirchhoff αναφέρεται σε δυνάμεις της τρέχουσας απεικόνισης ανηγμένες σε απαραμόρφωτες επιφάνειες της αρχικής απεικόνισης.

Ο 2^{ος} τανυστής Piola – Kirchhoff αναφέρεται σε δυνάμεις της τρέχουσας απεικόνισης ανηγμένες σε απαραμόρφωτες επιφάνειες της αρχικής απεικόνισης. Η διαφορά του όμως σε σχέση με τον 1^ο τανυστή Piola – Kirchhoff έχει να κάνει με το γεγονός ότι η ανάλυση της τρέχουσας δύναμης σε συνιστώσες πραγματοποιείται με διαφορετικό σύστημα αναφοράς.

Καταλήγοντας, συμπεραίνουμε ότι ο 2^{ος} τανυστής Piola – Kirchhoff ουσιαστικά «παρακολουθεί και συμβαδίζει» με τις στροφές (στροφή στερεού σώματος και διατμητικές παραμορφώσεις) που υφίσταται κατά την παραμόρφωση, ο στοιχειώδης όγκος, ενώ ο τανυστής τάσεων Cauchy και ο 1^{ος} τανυστής Piola – Kirchhoff ορίζονται με βάση πάντα τους άξονες του συστήματος αναφοράς της εκάστοτε απεικόνισης. Σε περιπτώσεις μη γραμμικών προβλημάτων στη μηχανική παραμορφώσεων ο 2^{ος} τανυστής Piola – Kirchhoff ενδείκνυται ως ένα ιδιαίτερα αποτελεσματικό εργαλείο.

3.4.1 Εξίσωση Στατικής Ισορροπίας

Η εξίσωση στατικής ισορροπίας στην τρέχουσα απεικόνιση θα είναι:

$$\operatorname{div}^t \boldsymbol{\sigma} + {}^t \mathbf{f}^B = \mathbf{0} \quad (3.84)$$

όπου div το σύμβολο της απόκλισης και ${}^t \mathbf{f}^B$ οι μαζικές δυνάμεις ανά μονάδα όγκου. Το σύνορο ${}^t \Gamma$ της απεικόνισης αποτελείται από τα μη επικαλυπτόμενα τμήματα ${}^t \Gamma_u$ και ${}^t \Gamma_\sigma$, για τα οποία ισχύει:

$${}^t \Gamma = {}^t \Gamma_u \cup {}^t \Gamma_\sigma \text{ και } \Gamma_u \cap \Gamma_\sigma = \emptyset \quad (3.85)$$

Οι μετατοπίσεις, ${}^t \mathbf{u}$, στο τμήμα ${}^t \Gamma_u$ θεωρούνται προκαθορισμένες, άρα:

$${}^t \mathbf{u}({}^t \mathbf{x}, t) = \mathbf{u} \quad \forall {}^t \mathbf{x} \in {}^t \Gamma_u \quad (3.86)$$

ενώ οι επιβαλλόμενες επιφανειακές τάσεις, ${}^t \mathbf{t}$, στο τμήμα ${}^t \Gamma_\sigma$ θα βασίζονται στο θεώρημα Cauchy της σχέσης (3.71):

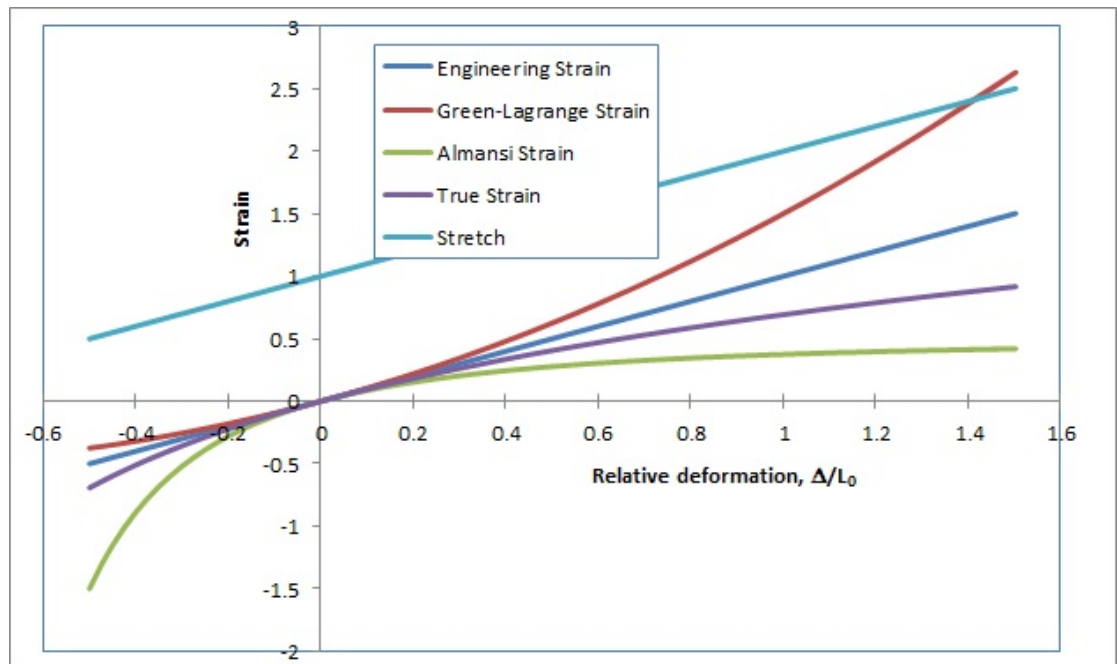
$${}^t \boldsymbol{\sigma}({}^t \mathbf{x}, t) {}^t \mathbf{N} = {}^t \mathbf{t}({}^t \mathbf{x}, t) \quad \forall {}^t \mathbf{x} \in {}^t \Gamma_\sigma \quad (3.87)$$

όπου οι σχέσεις (3.86) και (3.87) είναι γνωστές ως συνοριακές συνθήκες Neumann και Dirichlet, αντίστοιχα.

Γενικά, η αναλυτική επίλυση της εξίσωσης στατικής ισορροπίας (3.84) δεν είναι δυνατή. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, να αναζητούνται προσεγγιστικές λύσεις με χρήση υπολογιστικών μεθόδων, όπως των αυτή πεπερασμένων στοιχείων.

Για να μπορέσουμε να υπολογίσουμε την παραμόρφωση, τη μετατόπιση θέσης των σημείων της μεμβράνης, αλλά και γενικά να κατορθώσουμε να μοντελοποιήσουμε τη συμπεριφορά της ελαστικής μεμβράνης υπό την επίδραση των πιέσεων που δέχεται στην κάτω επιφάνειά της από το νερό, όταν περνάει από το μικρορευστονικό κανάλι, είμαστε υποχρεωμένοι να επιλύσουμε την αντίστοιχη εξίσωση στατικής ισορροπίας της μεμβράνης. Το έργο αυτό μπόρεσα να το πραγματοποιήσω με τη βοήθεια του εξειδικευμένου λογισμικού COMSOL, που επιλύει προβλήματα φυσικής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Ευτυχώς, οι παραμορφώσεις που υφίσταται η μεμβράνη είναι πολύ μικρές και γραμμικές. Το γεγονός αυτό αφενός διευκολύνει αρκετά τους υπολογισμούς που καλείται να κάνει το πρόγραμμα. Αφετέρου, ταυτίζει όλους τους συντελεστές παραμόρφωσης μεταξύ τους, όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στην εικόνα 3.13.



Εικόνα 3.13. Διάγραμμα των συντελεστών παραμόρφωσης ενός τοιχώματος σε συνάρτηση με τη σχετική παραμόρφωση του μέσου.[25]

3.5 Προσομοιώσεις παραμόρφωσης ελαστικής μεμβράνης

3.5.1 Εισαγωγή

Κατά τη μοντελοποίηση της μεμβράνης με τη χρήση του λογισμικού COMSOL, χρειάστηκε να προχωρήσω σε κάποιες παραδοχές, οι οποίες θα απλούστευαν αρκετά το πρόβλημα. Στο μοντέλο του προγράμματος θεωρούμε ότι η μεμβράνη είναι τέλεια πακτωμένη στις άκρες του καναλιού και δεν ξεκολλάει από αυτές καθόλου, όσο υψηλή πίεση και αν της ασκήσουμε.

Στην προσπάθειά μας να μοντελοποιήσουμε τη μεμβράνη και τη συμπεριφορά της χρησιμοποιήσαμε δυο πιθανά πάχη που μπορεί να έχει η κόλλα όταν η μεμβράνη είναι κολλημένη επάνω στο μικροκανάλι. Το πρώτο πάχος είναι 10 μm και το δεύτερο 20 μm . Άρα το συνολικό πάχος της δομής μεμβράνης – κόλλας, όταν αυτή βρίσκεται κολλημένη στο μικροκανάλι, είναι: α) 60 μm και β) 70 μm . Για καθένα από τα δυο πάχη έχουμε υπολογίσει: 1) την κάθετη μετατόπιση της μεμβράνης (deflection) και 2) την παραμόρφωση επί τοις εκατό (strain %), για όλες τις τιμές ροής που έχουμε δοκιμάσει. Στη συνέχεια συγκρίνουμε την κάθετη μετατόπιση και την παραμόρφωση που εμφανίζουν τα δυο πάχη για συγκεκριμένες τιμές ροής. Σε όλες τις περιπτώσεις χρησιμοποιήσαμε τις συνοριακές συνθήκες Neumann και Dirichlet, που προαναφέραμε.

3.5.2 Μελέτη Ανεξαρτησίας της λύσης από το πλέγμα υπολογισμού

Αντίστοιχα, προτού προβούμε σε προσομοιώσεις και υπολογισμούς για την ελαστική μεμβράνη, πραγματοποιήσα μελέτη ανεξαρτησίας της λύσης από το πλέγμα υπολογισμού. Στη συγκεκριμένη μελέτη υπολογίσαμε τη μετατόπιση από την αρχική θέση ενός συγκεκριμένου σημείου με δεδομένη τιμή πίεσης και για διάφορους αριθμούς στοιχείων του πλέγματος.

Επιλέγω αρχικά έναν πληθυσμό 100 στοιχείων για το πλέγμα υπολογισμού, και υπολογίζω τη μετατόπιση από την αρχική θέση σε ένα εντελώς τυχαίο σημείο της μεμβράνης **B** (24747μm, 196μm, 42μm). Στη συνέχεια αυξάνω τα στοιχεία του πλέγματος σε 200 και υπολογίζω εκ νέου τη μετατόπιση για το συγκεκριμένο σημείο. Για να υπολογίσω το σφάλμα επί τοις εκατό του στον υπολογισμό της μετατόπισης παίρνω την απόλυτη τιμή της διαφοράς της τρέχουσας τιμής της μετατόπισης από την προηγούμενη τιμή επί 100% προς την τρέχουσα τιμή:

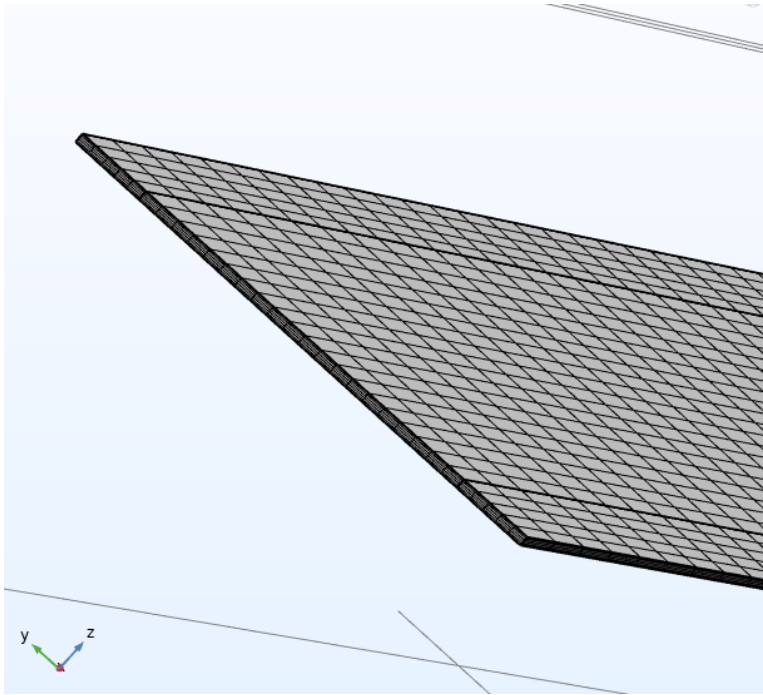
$$\text{σφάλμα}\% = \frac{|\text{τρέχουσα τιμή} - \text{προηγούμενη τιμή}|}{\text{τρέχουσα τιμή}} \cdot 100\% \quad (3.88)$$

Αριθμός Στοιχείων	Μετατόπιση	Σφάλμα (%)
90	8,2489	
200	7,1853	14,8024439
375	8,394	14,3995711
700	9,583	12,4073881
1500	9,9692	3,87393171
3000	9,9692	0
7500	9,9692	0
15000	9,9692	0
30000	9,9692	0
60000	9,9692	0

Πίνακας 3.2. Πλήθος στοιχείων στο πλέγμα υπολογισμού, η τιμή της μετατόπισης καθώς και το σχετικό σφάλμα για ένα συγκεκριμένο σημείο της μεμβράνης.

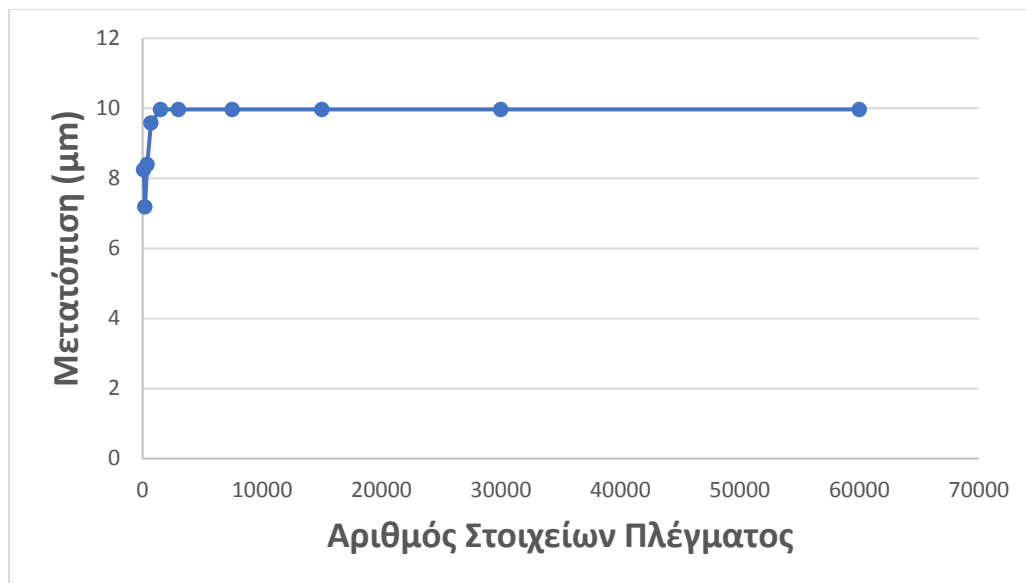
Συνεχίζω αυτή τη διαδικασία διπλασιάζοντας περίπου τον αριθμό των στοιχείων κάθε φορά μέχρις ότου το σφάλμα υπολογισμού πέσει κάτω από το 1%. Με αυτό τον τρόπο, προέκυψε ο πίνακας 3.2 με το πλήθος στοιχείων, τη μετατόπιση του συγκεκριμένου σημείου και το σφάλμα επί τοις εκατό στον υπολογισμό της.

Σύμφωνα με τη μελέτη το σχετικό σφάλμα για 30000 είναι 0%, που αποτελεί και την επιλογή μας.

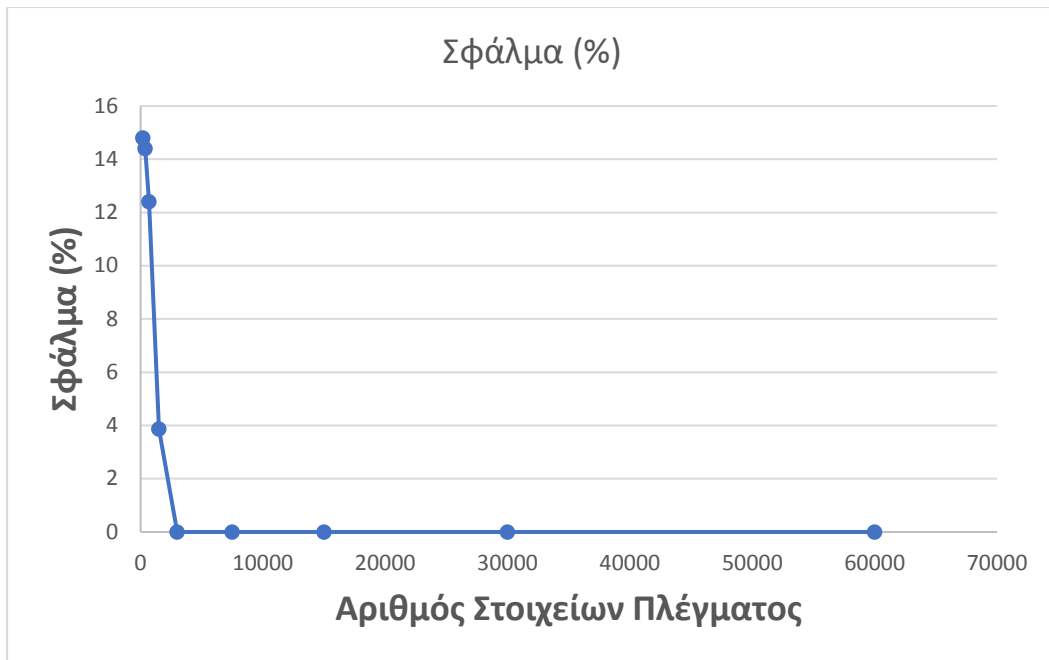


Εικόνα 3.14. Απεικόνιση μέρους του πλέγματος υπολογισμού για τη μεμβράνη, μέσω του λογισμικού COMSOL.

Το πλέγμα που επιλέξαμε για τις προσομοιώσεις της παραμόρφωσης στη μεμβράνη, είναι, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.14, ένα πλέγμα εξαεδρικών στοιχείων, το οποίο είναι ομοιόμορφο, καθώς δεν υπήρχε πύκνωση σε περιοχή του υπολογιστικού χωρίου. Αυτά τα χαρακτηριστικά διασφαλίζουν την σωστή κατανομή και ποιότητα των στοιχείων του πλέγματος.



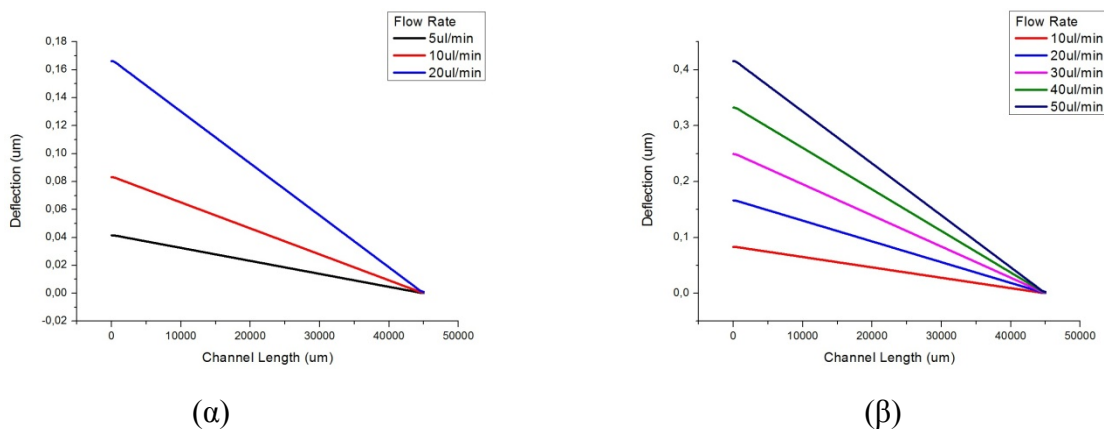
Εικόνα 3.15. Διάγραμμα της διακύμανσης της μετατόπισης για ένα συγκεκριμένο σημείο, ανάλογα με τον αριθμό των στοιχείων στο πλέγμα υπολογισμού.



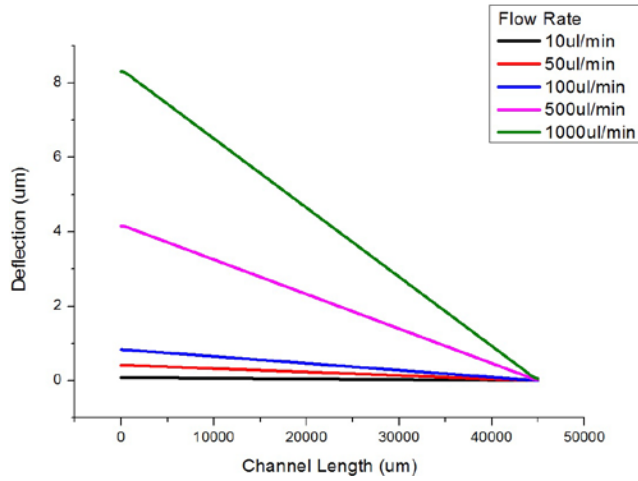
Εικόνα 3.16. Διάγραμμα του σφάλματος υπολογισμού στη μετατόπιση ενός συγκεκριμένου σημείου, ανάλογα με τον αριθμό των στοιχείων στο πλέγμα υπολογισμού.

3.5.3 Συνολικό Πάχος Μεμβράνης – κόλλας 60μm

Κάθετη Μετατόπιση (Deflection)

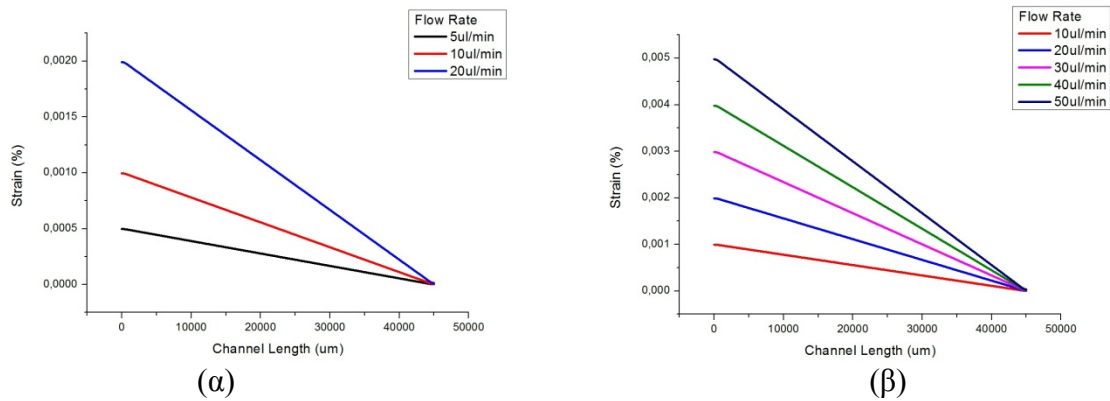


Εικόνα 3.17. Διαγράμματα κάθετης μετατόπισης της μεμβράνης για τιμές ροής: (α) 5 – 10 – 20μl/min, (β) 10 – 20 – 30 – 40 – 50μl/min.

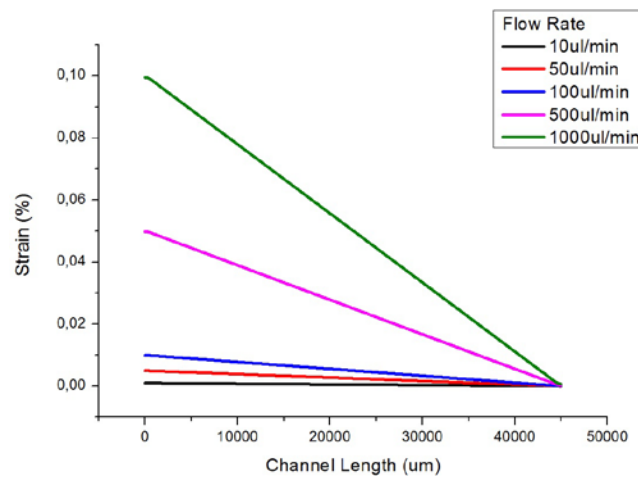


Εικόνα 3.18. Ενδεικτικό διάγραμμα κάθετης μετατόπισης της μεμβράνης για τιμές ροής 10 – 50 – 100 – 500 – 1000μl/min.

Παραμόρφωση (επί τοις εκατό – strain%)



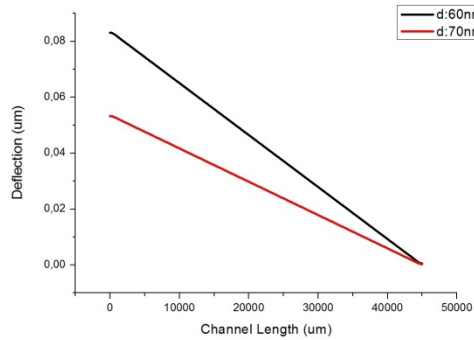
Εικόνα 3.19. Διαγράμματα ποσοστιαίας παραμόρφωσης της μεμβράνης για τιμές ροής: (α) 5 – 10 – 20μl/min, (β) 10 – 20 – 30 – 40 – 50μl/min.



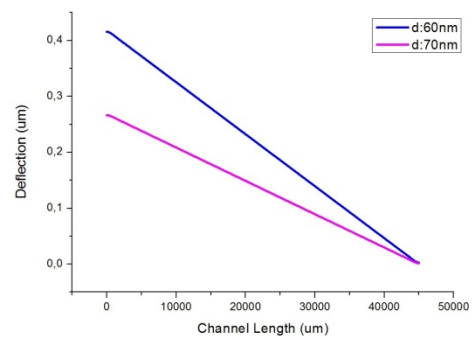
Εικόνα 3.20. Ενδεικτικό διάγραμμα ποσοστιαίας παραμόρφωσης της μεμβράνης για τιμές ροής 10 – 50 – 100 – 500 – 1000μl/min.

3.5.4 Συγκριτικά διαγράμματα για πάχη 60 και 70 μm

Ροές 10 και 50 $\mu\text{l}/\text{min}$

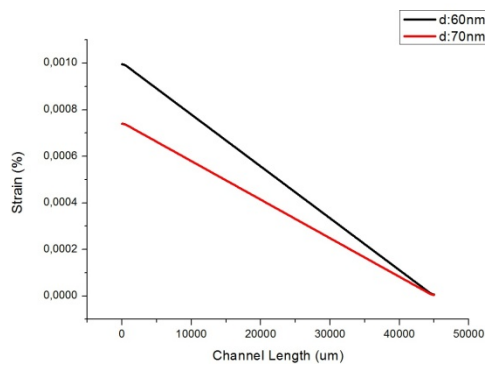


(α)

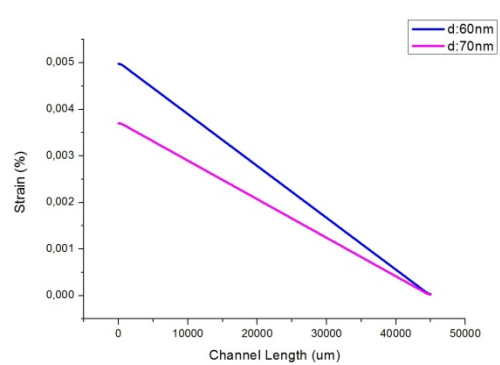


(β)

Εικόνα 3.21. Διαγράμματα κάθετης μετατόπισης της μεμβράνης με πάχος 60 και 70 μm για ροές: (α) 10 $\mu\text{l}/\text{min}$, (β) 50 $\mu\text{l}/\text{min}$.



(α)



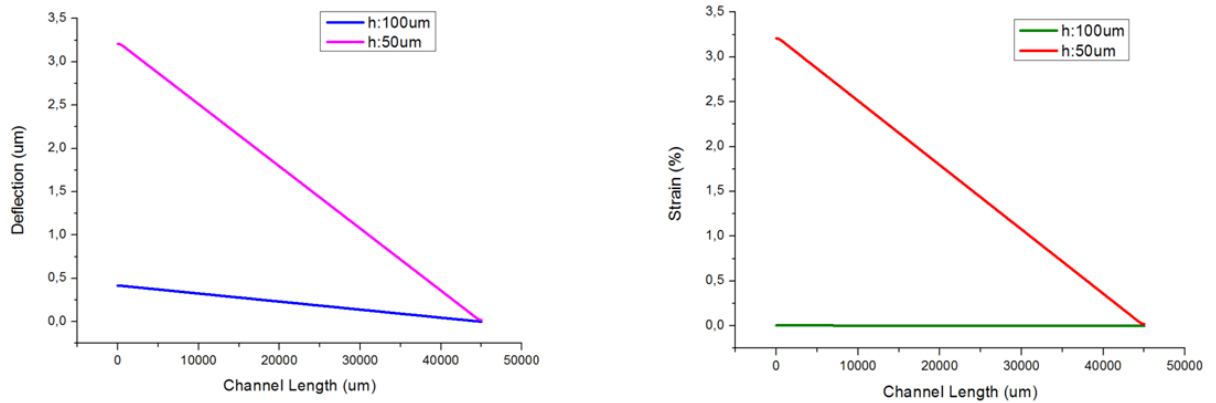
(β)

Εικόνα 3.22. Διαγράμματα ποσοστιαίας παραμόρφωσης της μεμβράνης με πάχος 60 και 70 μm για ροές: (α) 10 $\mu\text{l}/\text{min}$, (β) 50 $\mu\text{l}/\text{min}$.

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε από τα διαγράμματα των εικόνων 3.21 και 3.22, το πάχος d της μεμβράνης παίζει σημαντικό ρόλο, προκαλώντας εμφανείς διαφοροποιήσεις τόσο στην κάθετη μετατόπιση, όσο και στην παραμόρφωση

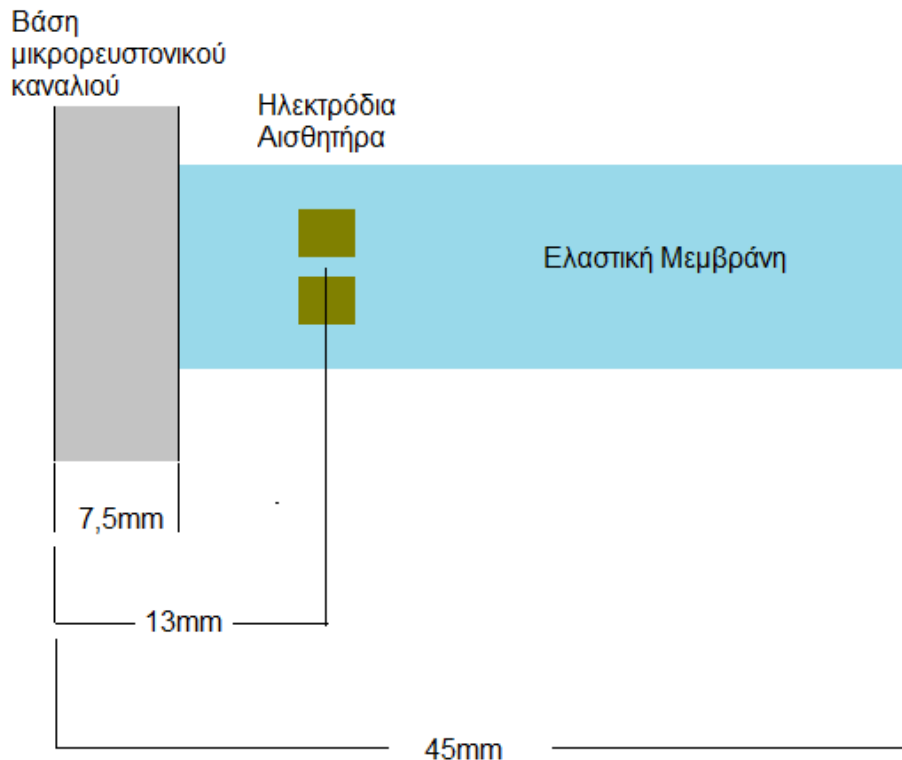
3.5.5 Συγκριτικά διαγράμματα για διαφορετικά ύψη καναλιών

Αντίστοιχα, εάν υποδιπλασιάσουμε το ύψος του μικροκαναλιού μπορούμε να παρατηρήσουμε αξιοσημείωτες διαφορές στην κάθετη μετατόπιση και την παραμόρφωση, σύμφωνα με τα διαγράμματα της εικόνας 3.23.



Εικόνα 3.23. Διαγράμμα (α) κάθετης μετατόπισης και (β) παραμόρφωσης για βάθος καναλιού: 1) 50 μm και 2) 100 μm.

3.5.6 Υπολογισμός μεγεθών στη θέση του αισθητήρα



Εικόνα 3.24. Σχηματική αναπαράσταση της κάτοψης του μικρορρευστονικού καναλιού με τη μεμβράνη προσκολλημένη σε αυτό. Επάνω στη μεμβράνη βλέπουμε τα ηλεκτρόδια του αισθητήρα και από πάνω είναι η βάση του που συνδέει το κανάλι με την παροχή νερού.

Κάνοντας κάποιες προσεγγίσεις μπορούμε να προσδιορίσουμε με σχετική ακρίβεια τη θέση του αισθητήρα πάνω στο μικρορρευστονικό κανάλι, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.24. Στόχος μας είναι να βρίσκεται ο αισθητήρας όσο το δυνατόν πιο κοντά στην αρχή του καναλιού για να έχουμε τη μέγιστη πίεση και κατ' επέκταση παραμόρφωση. Μας περιορίζει ωστόσο, η βάση του μικρορρευστονικού καναλιού που καταλαμβάνει τα πρώτα 7,5 mm του μήκους του. Έτσι αναγκασόμαστε να τοποθετήσουμε τον αισθητήρα πιο μετά στη θέση $x=13$ mm από την αρχή του καναλιού.

Με αυτό το δεδομένο μπορέσαμε να εξάγουμε από τις προσομοιώσεις, αποτελέσματα για την πίεση και την κάθετη μετατόπιση που εμφανίζει ο αισθητήρας. Τα αποτελέσματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της παραμόρφωσης:

3ο Κεφάλαιο: Προσομοιώσεις

1. Από την ομάδα του εργαστηρίου με χρήση μηχανήματος που διαθέτει ειδικό έμβολο (εικόνα 3.25) και μας επιτρέπει να εισάγουμε πιέσεις και να παρατηρούμε την παραμόρφωση ενός αισθητήρα καθώς και τη μεταβολή της αντίστασής του.
2. Από το πρόγραμμα με νέες προσομοιώσεις.

Το γεγονός αυτό μας έδωσε τη δυνατότητα να συγκρίνουμε άμεσα τα αποτελέσματα των παραμορφώσεων από πειραματικά δεδομένα και από τις προσομοιώσεις. Παρατηρούμε στους πίνακες 3.4 και 3.5 από τα αποτελέσματα των παραμορφώσεων ότι οι τιμές των πειραματικών μετρήσεων και προσομοιώσεων συμπίπτουν.

flow(μlit/min)\thickness(μm)	d(μm)		
	60(50 + 10)	70(50 + 20)	100(50 + 50)
10	0.059381	0.038061	0.01379
50	0.296904	0.190306	0.068948
100	0.593808	0.380612	0.137897
500	2.969033	1.903056	0.689482
1000	5.93793	3.806024	1.378933

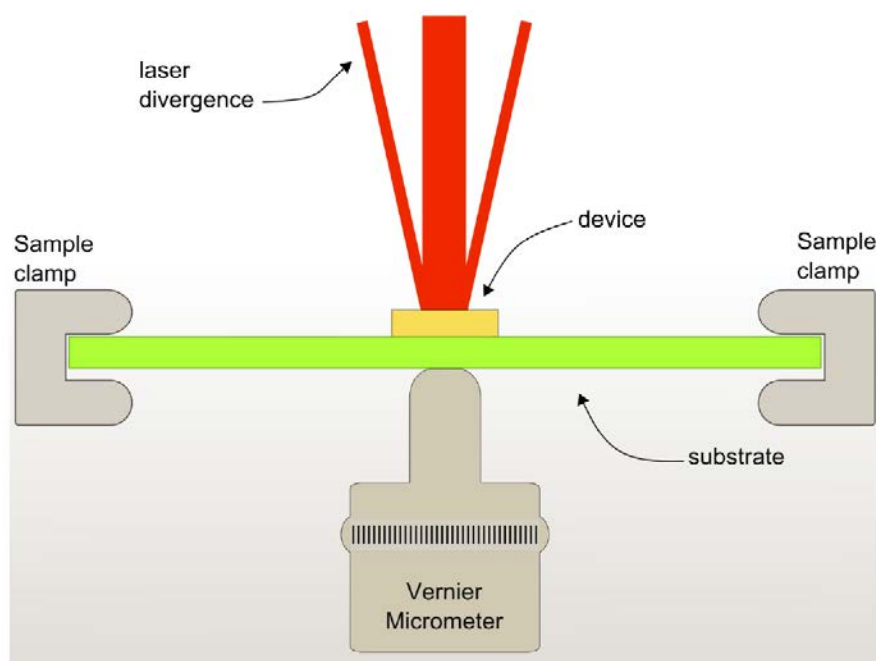
Πίνακας 3.3. Πίνακας των κάθετων τιμών μετατόπισης, για συγκεκριμένους ρυθμούς ροής και συγκεκριμένες τιμές πάχους d της μεμβράνης, που προέρχονται από τις προσομοιώσεις.

flow(μlit/min)/thickness(μm)	strain%		
	60(50 + 10)	70(50 + 20)	100(50 + 50)
10	7,12E-04	5,29E-04	2,69E-04
50	0,003558	0,002645	0,001343
100	0,007115	0,005291	0,002685
500	0,035576	0,026455	0,013426
1000	0,071151	0,052908	0,026851

Πίνακας 3.4. Πίνακας των παραμορφώσεων επί τοις εκατό, για συγκεκριμένους ρυθμούς ροής και συγκεκριμένες τιμές πάχους d της μεμβράνης, που προέρχονται από τις προσομοιώσεις.

flow($\mu\text{lit}/\text{min}$)\thickness(μm)	strain%		
	60(50 + 10)	70(50 + 20)	100(50 + 50)
10	0.0007	0.0005	0.0003
50	0.0036	0.0027	0.0014
100	0.0071	0.0053	0.0028
500	0.0356	0.0266	0.0138
1000	0.0711	0.0532	0.0276

Πίνακας 3.5 Πίνακας των παραμορφώσεων επί τοις εκατό, για συγκεκριμένους ρυθμούς ροής και συγκεκριμένες τιμές πάχους d της μεμβράνης, που προέρχονται από πειραματικές μετρήσεις αισθητήρων παραμόρφωση με ειδικό εργαλείο που διαθέτει κατάλληλο έμβολο, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.25.



Εικόνα 3.25. Σχηματική αναπαράσταση του μηχανισμού δημιουργίας παραμορφώσεων σε ελαστικά υποστρώματα με χρήση ειδικού εμβόλου.[8]

4^ο Κεφάλαιο: Πειραματικές Μετρήσεις

4.1 Εισαγωγή

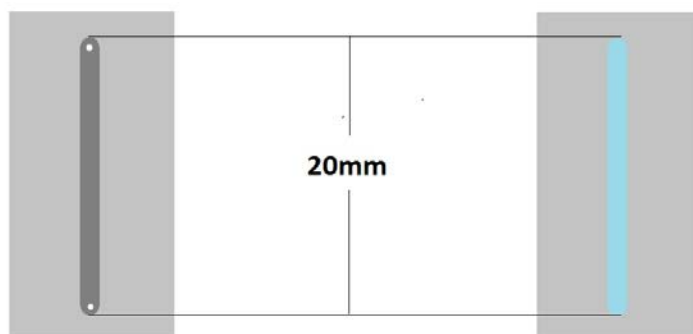
Κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής των πειραμάτων μας χρησιμοποιήσαμε μικροροϊκά κανάλια με διαφορετικές διαστάσεις και κατάσκευασμένα από διαφορετικά υλικά. Το γεγονός αυτό μας βοήθησε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι τόσο οι διαστάσεις, όσο και το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο το κανάλι διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά του αισθητήρα μας.

Οι διατάξεις καναλιών που έχουμε χρησιμοποιήσει είναι οι ακόλουθες:

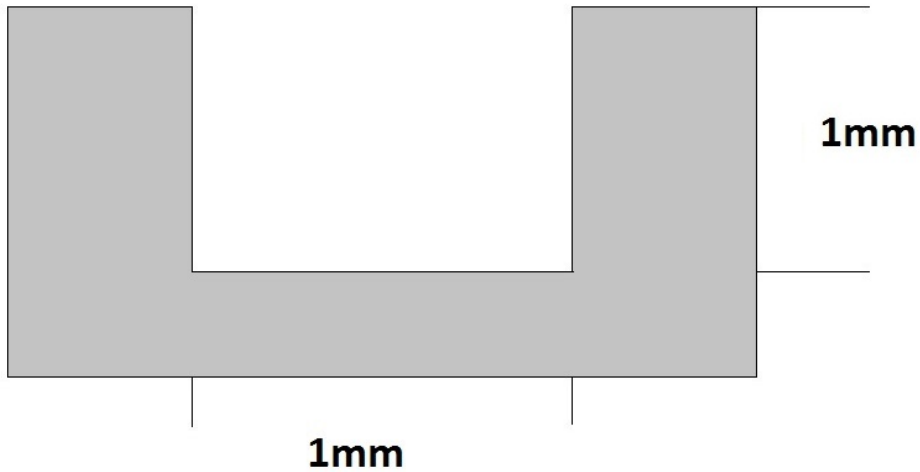
4.2 Κανάλι τύπου 1

Υλικό κατασκευής: PMMA

Διαστάσεις:

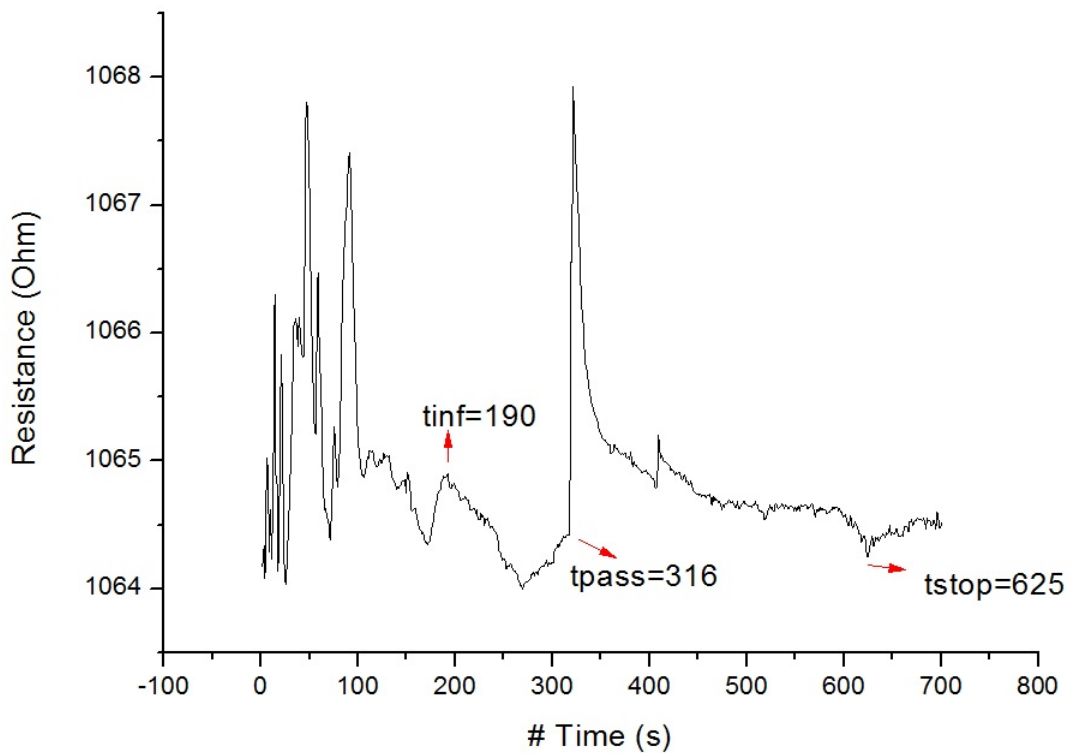


(α)



(β)

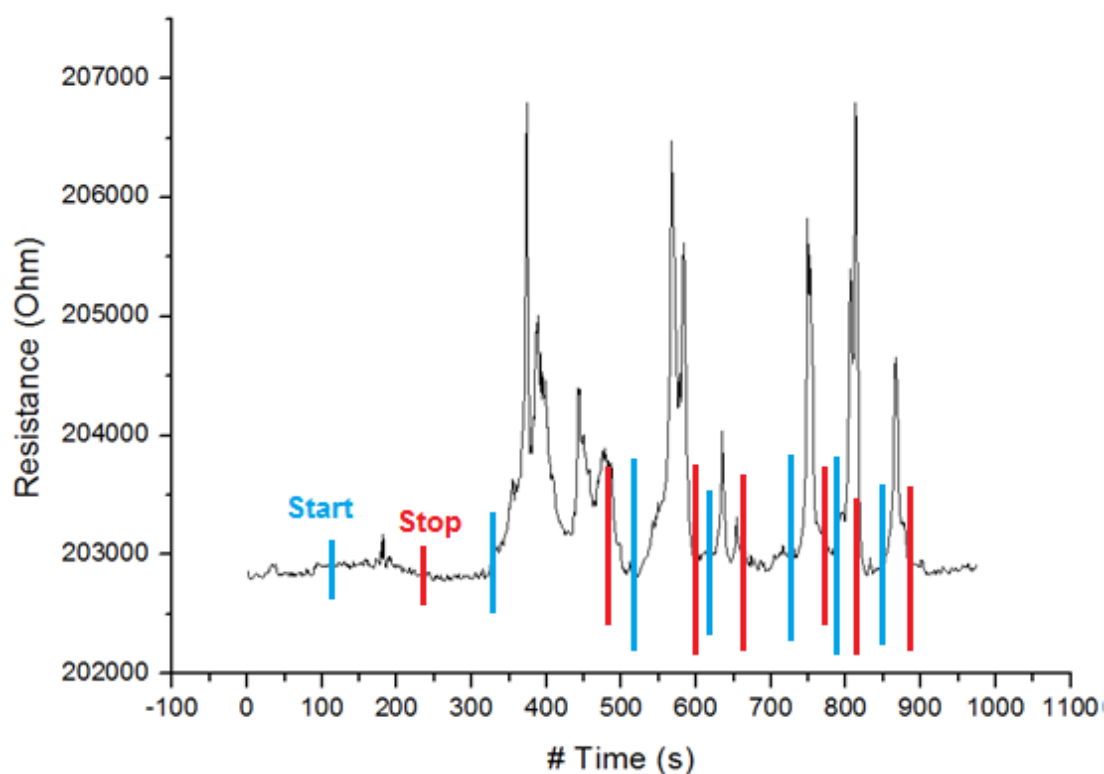
Εικόνα 4.1. (α) Σχηματική απεικόνιση της κάτοψης του καναλιού (μήκος $l=20\text{mm}$), (β) Σχηματική απεικόνιση της διατομής του καναλιού ($w=1\text{mm}$, $h=1\text{mm}$).



Εικόνα 4.2. Διάγραμμα αντίστασης – χρόνου για τον αισθητήρα 6β.

Το διάγραμμα της εικόνας 4.2 προέκυψε όταν κολλήσαμε το ζεύγος αισθητήρων 6 πάνω σε κανάλι τύπου 1. Στη συνέχεια αρχίσαμε να μετράμε τον αισθητήρα 6β και

εφαρμόσαμε ροή 20μl/min τη χρονική στιγμή 190s, αφού πρώτα περιμέναμε να σταματήσει ο αρχικός θόρυβος στην καταγραφή της αντίστασης. Το αποτέλεσμα αν και φαίνεται εκ πρώτης όψεως ότι έχει τη μορφή παλμού, στη πραγματικότητα διακρίνουμε ένα βήμα και μια υψηλότερη στάθμη.



Εικόνα 4.3. Διάγραμμα αντίστασης – χρόνου για τον αισθητήρα 7.

Το διάγραμμα της εικόνας 4.3 προέκυψε από τον αισθητήρα 7, με αντίσταση αναφοράς 203KΩ υπόστρωμα αλουμίνας (ALD), και εφαρμόσαμε διαφορετικές τιμές ροής κατά την ίδια μέτρηση, ως εξής:

- a. Ροή-> 10μl/min
Η χρονική στιγμή κατά την οποία ξεκίνησε η παροχή είναι η 120s.
Η χρονική στιγμή κατά την οποία το νερό περνάει κάτω από τον αισθητήρα μας είναι η 175s.
Η χρονική στιγμή κατά την οποία σταματάει η παροχή είναι η 240s.
- b. Ροή-> 50μl/min
Η χρονική στιγμή κατά την οποία ξεκίνησε η παροχή είναι η 340s.
Η χρονική στιγμή κατά την οποία σταματάει η παροχή είναι η 480s.
- c. Ροή-> 40μl/min

Η χρονική στιγμή κατά την οποία ξεκίνησε η παροχή είναι η 520s.
Η χρονική στιγμή κατά την οποία σταματάει η παροχή είναι η 600s.

d. Ροή-> 20μl/min

Η χρονική στιγμή κατά την οποία ξεκίνησε η παροχή είναι η 620s.
Η χρονική στιγμή κατά την οποία σταματάει η παροχή είναι η 660s.

e. Ροή-> 30μl/min

Η χρονική στιγμή κατά την οποία ξεκίνησε η παροχή είναι η 735s.
Η χρονική στιγμή κατά την οποία σταματάει η παροχή είναι η 770s.

f. Ροή-> 50μl/min

Η χρονική στιγμή κατά την οποία ξεκίνησε η παροχή είναι η 790s.
Η χρονική στιγμή κατά την οποία σταματάει η παροχή είναι η 820s.

g. Ροή-> 30μl/min

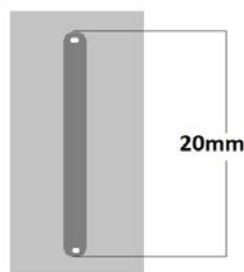
Η χρονική στιγμή κατά την οποία ξεκίνησε η παροχή είναι η 850s.
Η χρονική στιγμή κατά την οποία σταματάει η παροχή είναι η 880s.

Διαπιστώνουμε επιτυχία στη διάκριση διαφορετικών ροών. Παρολαυτά υπάρχει αρκετός θόρυβος. Ενώ οι δυο κορυφές των 30μl/min διαφέρουν λίγο μεταξύ τους.

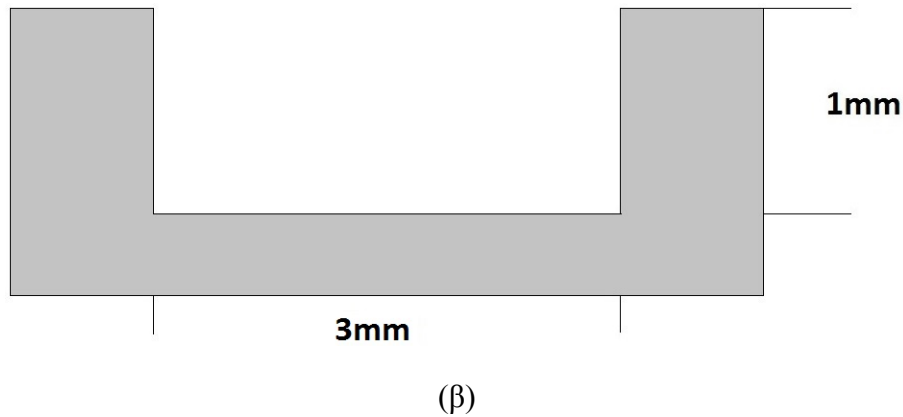
4.3 Κανάλι τύπου 2

Υλικό κατασκευής: PMMA

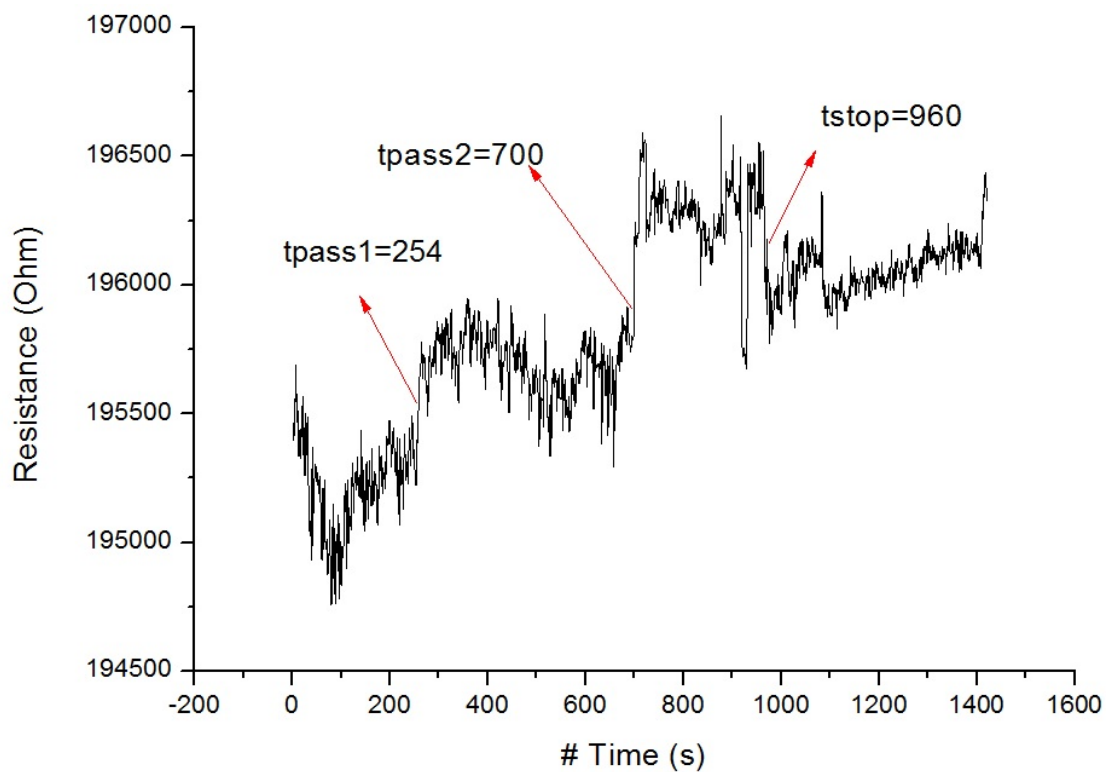
Διαστάσεις:



(α)



Εικόνα 4.4. (α) Σχηματική απεικόνιση της κάτοψης του καναλιού (μήκος $l=20\text{mm}$), (β) Σχηματική απεικόνιση της διατομής του καναλιού ($w=3\text{mm}$, $h=1\text{mm}$).



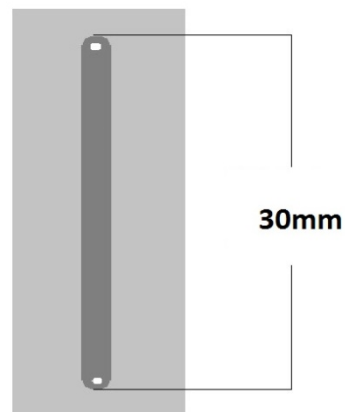
Εικόνα 4.5. Διάγραμμα αντίστασης – χρόνου για τον αισθητήρα 6.

Το διάγραμμα της εικόνας 4.5 προέκυψε όταν κολλήσαμε το ζεύγος αισθητήρων 6 πάνω σε κανάλι τύπου 2. Στη συνέχεια αρχίσαμε να μετράμε τον αισθητήρα 6 και εφαρμόσαμε ροή $70\mu\text{l}/\text{min}$. Το νερό περνάει από τον αισθητήρα μας τη χρονική στιγμή 254s . Στη συνέχεια, ενώ ήδη έχουμε τη ροή των $70\mu\text{l}/\text{min}$, αυξάνουμε τη ροή σε $600\mu\text{l}/\text{min}$, την οποία σταματάμε τελείως τη χρονική στιγμή 960s .

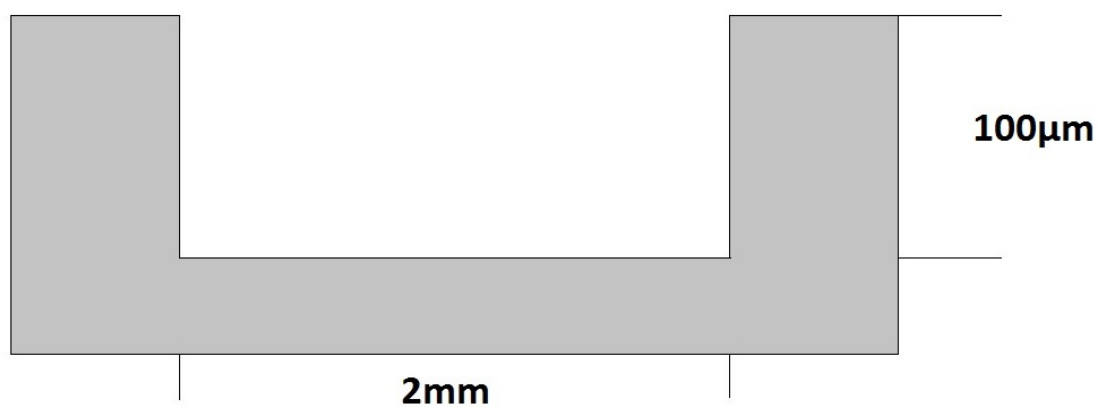
4.4 Κανάλι τύπου 3

Υλικό κατασκευής: PMMA

Διαστάσεις:



(α)



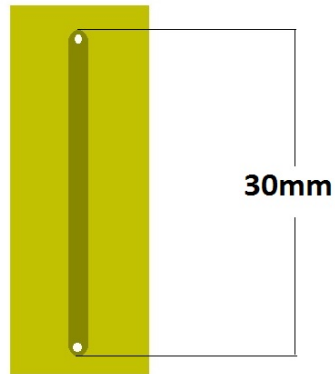
(β)

Εικόνα 4.6. (α) Σχηματική απεικόνιση της κάτοψης του καναλιού (μήκος $l=30\text{mm}$), (β) Σχηματική απεικόνιση της διατομής του καναλιού ($w=2\text{mm}$, $h=100\mu\text{m}$).

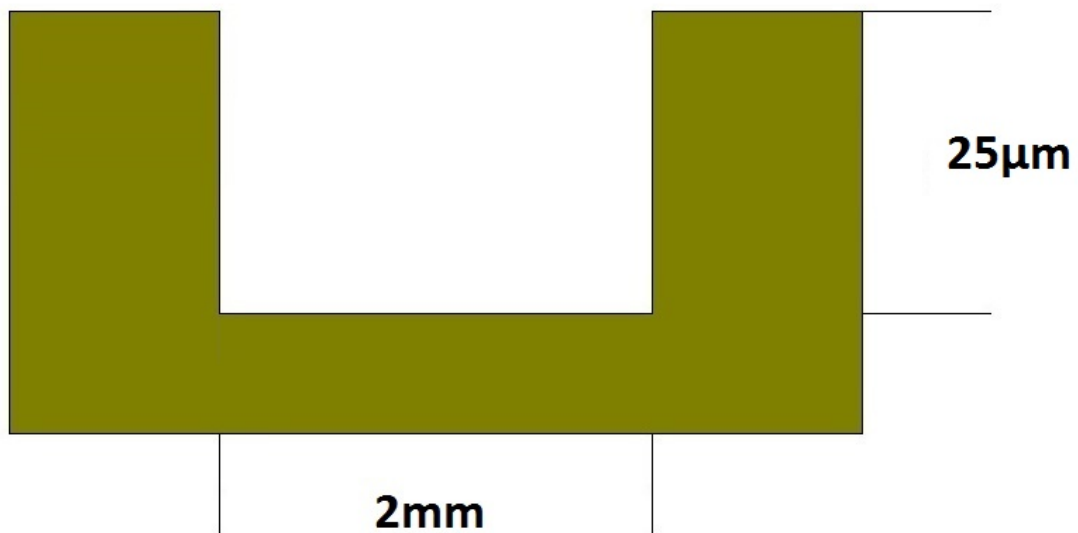
4.5 Κανάλι τύπου 4

Υλικό κατασκευής: PCB

Διαστάσεις:

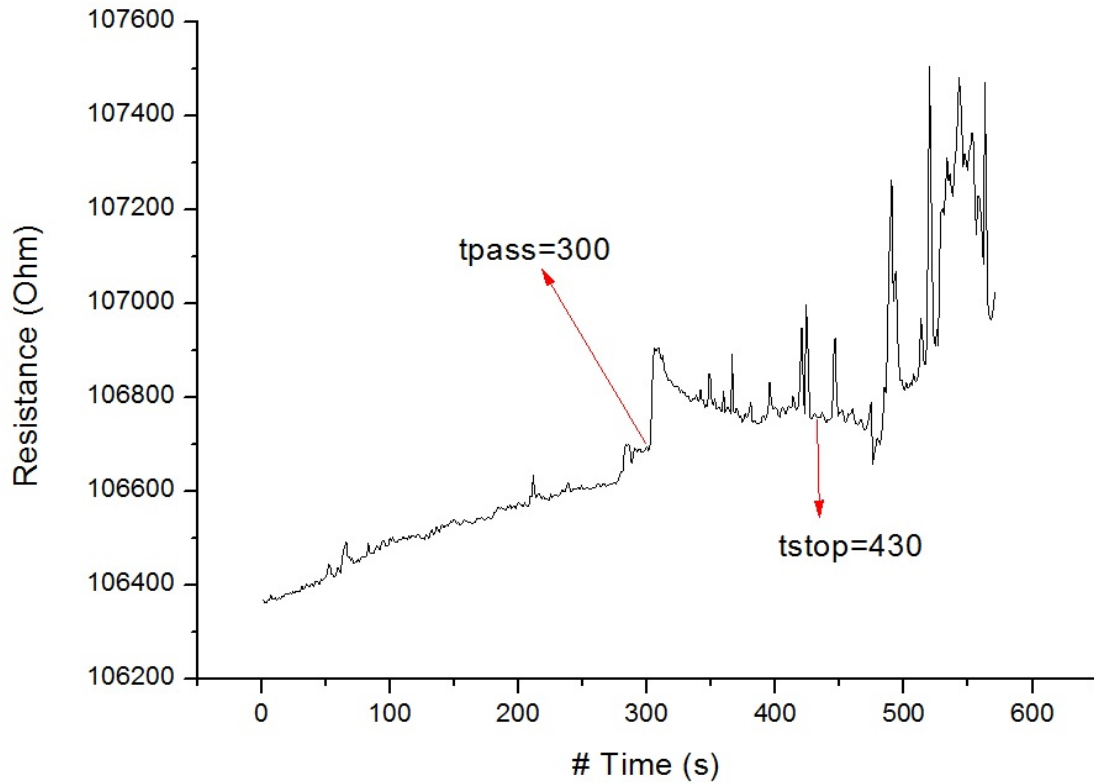


(α)



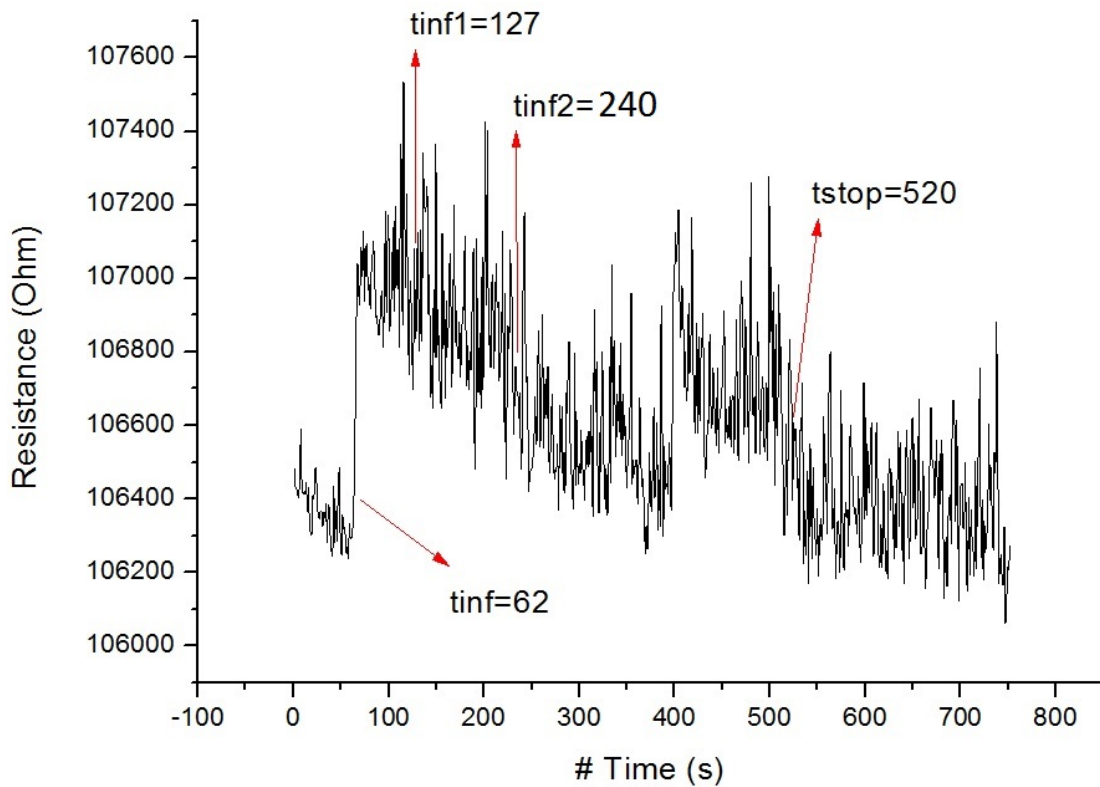
(β)

Εικόνα 4.7. (α) Σχηματική απεικόνιση της κάτοψης του καναλιού (μήκος $l=30\text{mm}$), (β) Σχηματική απεικόνιση της διατομής του καναλιού ($w=2\text{mm}$, $h=25\mu\text{m}$).



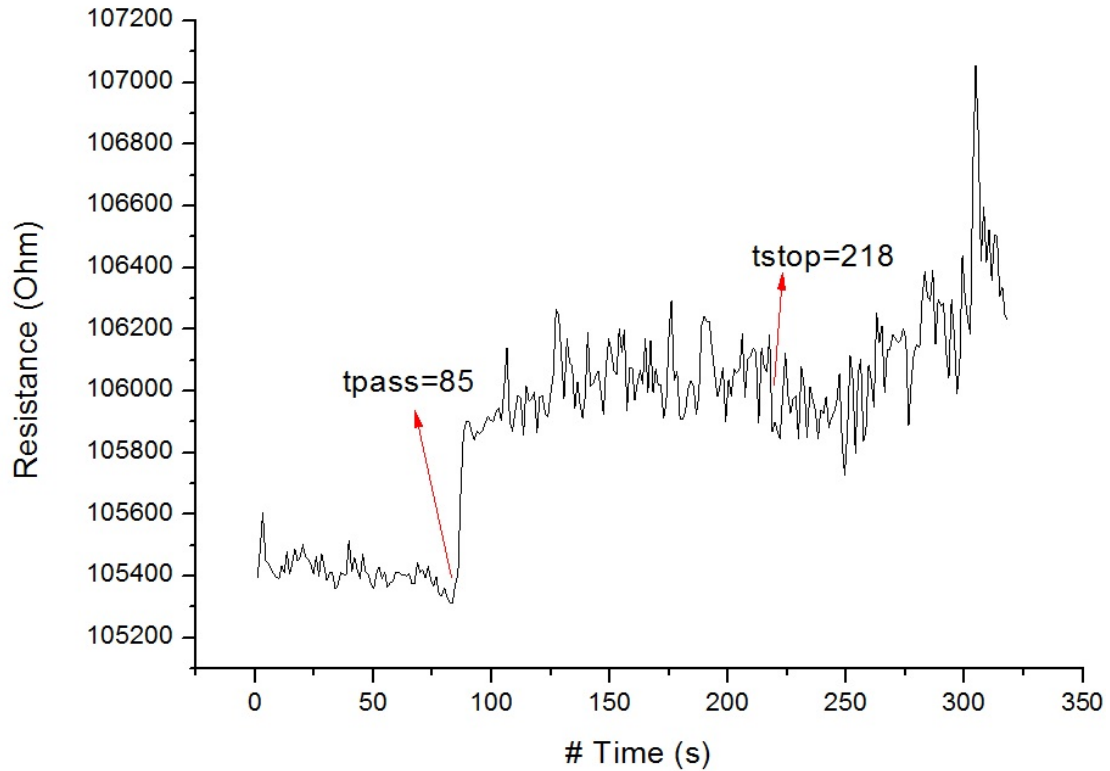
Εικόνα 4.8. Διάγραμμα αντίστασης – χρόνου για τον αισθητήρα 9β.

Το διάγραμμα της εικόνας 4.8 προέρχεται από τον αισθητήρα 9β, τον οποίο κολλήσαμε στο κανάλι που είναι κατασκευασμένο από PCB. Στην αντλία βάλαμε ροή 10μl/min. Το νερό περνάει τη χρονική στιγμή 300s από τον αισθητήρα. Σταματάμε την παροχή τη χρονική στιγμή 430s.



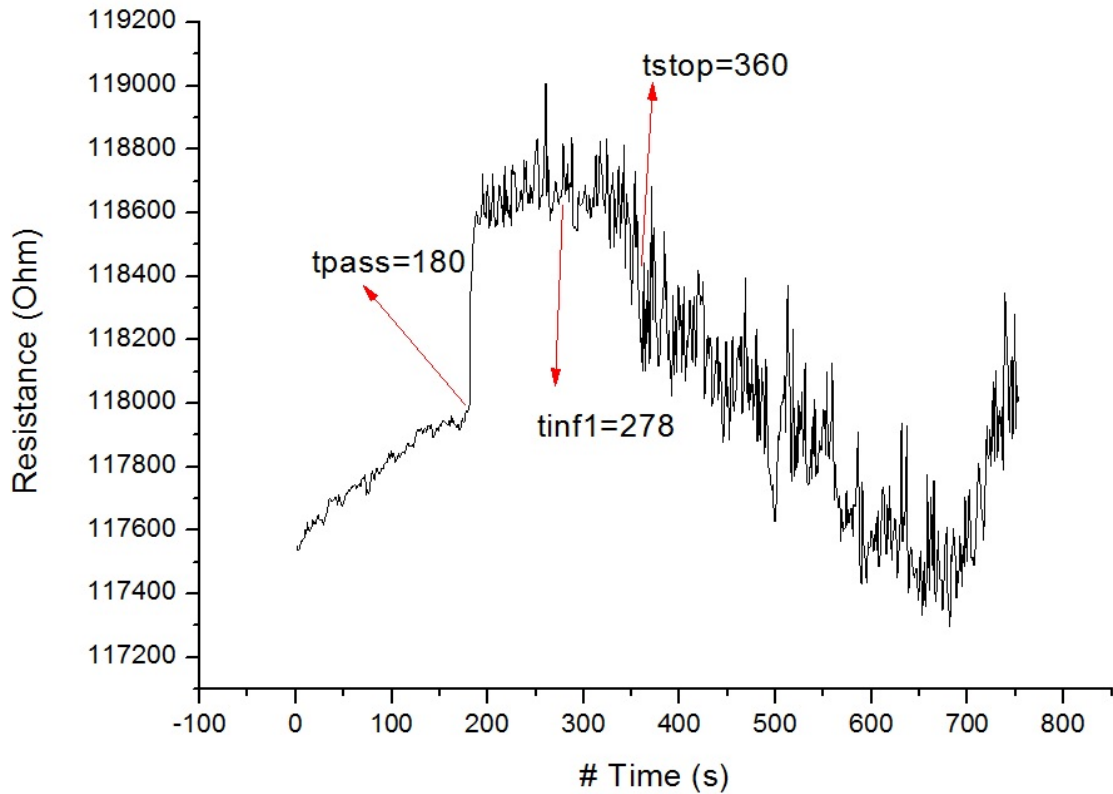
Εικόνα 4.9. Διάγραμμα αντίστασης – χρόνου για τον αισθητήρα 9β.

Το διάγραμμα της εικόνας 4.9 προέρχεται από τον αισθητήρα 9β, τον οποίο κολλήσαμε στο κανάλι που είναι κατασκευασμένο από PCB. Στην αντλία βάλαμε ροή 500μl/min. Το νερό περνάει τη χρονική στιγμή 60s από τον αισθητήρα. Ενώ ήδη έχουμε τη ροή των 500μl/min, αυξάνουμε τη ροή σε 700μl/min, τη χρονική στιγμή 127s. Στη συνέχεια, ενώ ήδη έχουμε τη ροή των 700μl/min, μειώνουμε τη ροή σε 500μl/min, τη χρονική στιγμή 240s, την οποία σταματάμε τελείως τη χρονική στιγμή 520s. Παρατηρούμε ότι ο αισθητήρας κατάφερε να ανιχνεύσει μόνο τη πρώτη ροή και όχι τις άλλες δυο που ακολούθησαν. Αξίζει να σημειωθεί ότι μετά την πρώτη ροή έχουμε δραματική αύξηση του θορύβου στο σήμα.



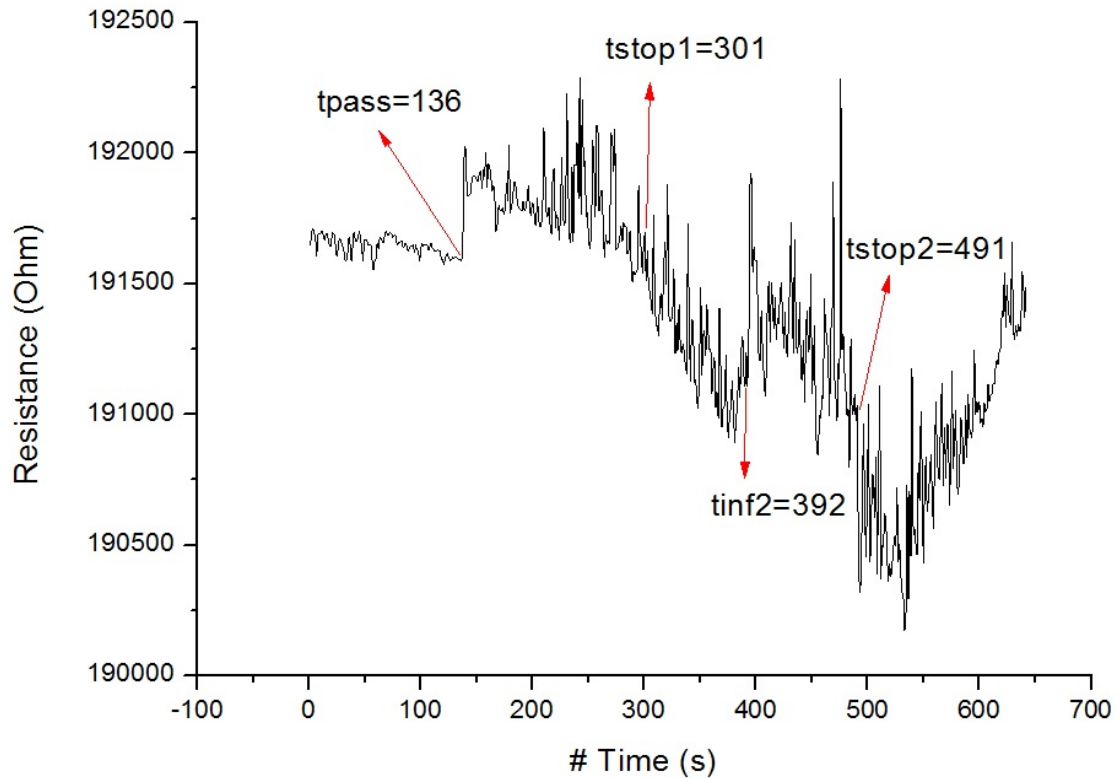
Εικόνα 4.10. Διάγραμμα αντίστασης – χρόνου για τον αισθητήρα 9β.

Το διάγραμμα της εικόνας 4.10 προέρχεται από τον αισθητήρα 9β, τον οποίο κολλήσαμε στο κανάλι που είναι κατασκευασμένο από PCB. Στην αντλία βάλαμε ροή 250μl/min. Το νερό περνάει τη χρονική στιγμή 80s από τον αισθητήρα. Σταματάμε τη παροχή τη χρονική στιγμή 218s.



Εικόνα 4.11. Διάγραμμα αντίστασης – χρόνου για τον αισθητήρα 9β.

Το διάγραμμα της εικόνας 4.11 προέρχεται από τον αισθητήρα 9β, τον οποίο κολλήσαμε στο κανάλι που είναι κατασκευασμένο από PCB. Στην αντλία βάλαμε ροή 300μl/min. Το νερό περνάει τη χρονική στιγμή 180s από τον αισθητήρα. Ενώ ήδη έχουμε τη ροή των 300μl/min, αυξάνουμε τη ροή σε 700μl/min, τη χρονική στιγμή 278s, την οποία σταματάμε τελείως τη χρονική στιγμή 360s. Παρατηρούμε ότι ο αισθητήρας κατάφερε να ανιχνεύσει μόνο τη πρώτη ροή και όχι τις άλλες δυο που ακολούθησαν. Αξίζει να σημειωθεί ότι μετά την πρώτη ροή έχουμε δραματική αύξηση του θορύβου στο σήμα.



Εικόνα 4.12. Διάγραμμα αντίστασης – χρόνου για τον αισθητήρα 9β.

Το διάγραμμα της εικόνας 4.12 προέρχεται από τον αισθητήρα 9β, τον οποίο κολλήσαμε στο κανάλι που είναι κατασκευασμένο από PCB. Στην αντλία βάλαμε ροή 200μl/min. Το νερό περνάει τη χρονική στιγμή 137s από τον αισθητήρα. Ενώ ήδη έχουμε τη ροή των 200μl/min, αυξάνουμε τη ροή σε 900μl/min, τη χρονική στιγμή 301s, την οποία σταματάμε τελείως τη χρονική στιγμή 491s. Παρατηρούμε ότι ο αισθητήρας κατάφερε να ανιχνεύσει και τις δυο ροές που βάλαμε. Αξίζει να σημειωθεί ότι μετά την πρώτη ροή έχουμε δραματική αύξηση του θορύβου στο σήμα.

4.6 Κανάλι τύπου 5

Υλικό κατασκευής: PCB

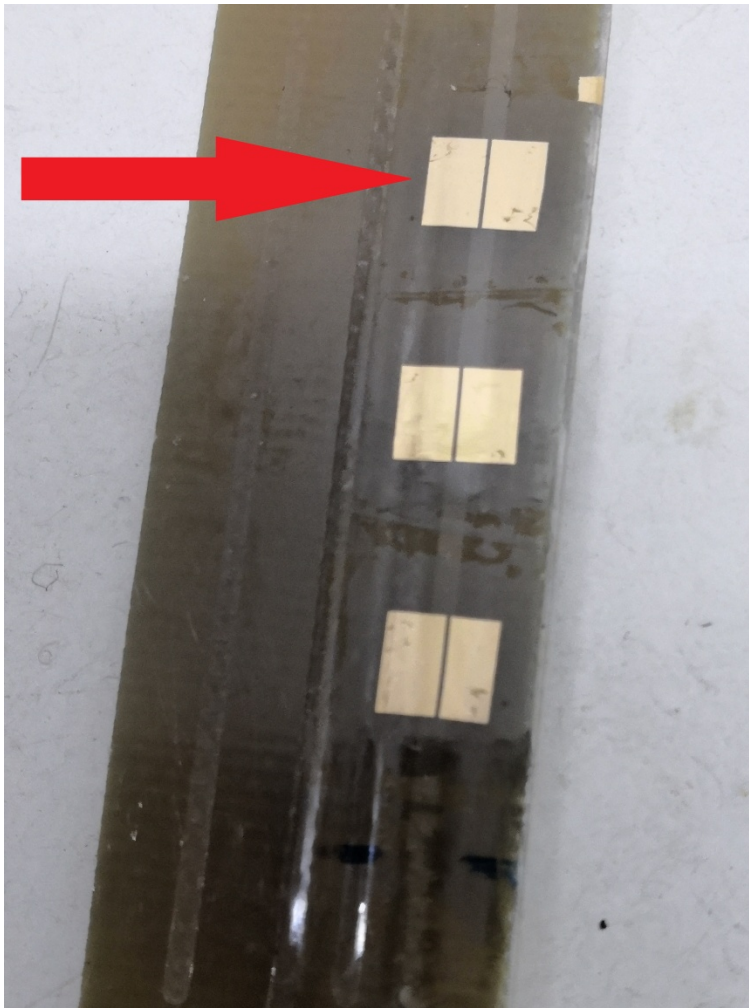
Διαστάσεις:



Εικόνα 4.13. Σχηματικό διάγραμμα του μικροροϊκού καναλιού, όπου φαίνονται οι διαστάσεις του ($L \times w \times h = 45\text{mm} \times 1\text{mm} \times 100\mu\text{m}$).

Αρχικά το κανάλι κατασκευάστηκε με μηχανικά μέσα (φρέζα) πάνω σε υπόστρωμα PCB στις εγκαταστάσεις του πολυτεχνείου. Έχοντας έτσι τη δυνατότητα να καθορίσουμε εμείς τις διαστάσεις του καναλιού. Ήδη είχαμε παρατηρήσει από τα αποτελέσματα του λογισμικού COMSOL ότι οι διαστάσεις του καναλιού έχουν καίρια σημασία για την πίεση που ασκείται στον αισθητήρα. Έχοντας τώρα ένα ρηχό αλλά και με μεγαλύτερο μήκος κανάλι ($L \times w \times h = 45\text{mm} \times 1\text{mm} \times 100\mu\text{m}$), μπορούμε να πραγματοποιήσουμε τα πειράματά μας. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτές είναι οι διαστάσεις του καναλιού που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις με τη χρήση του λογισμικού COMSOL.

4.6.1 Τριπλέτα Αισθητήρων



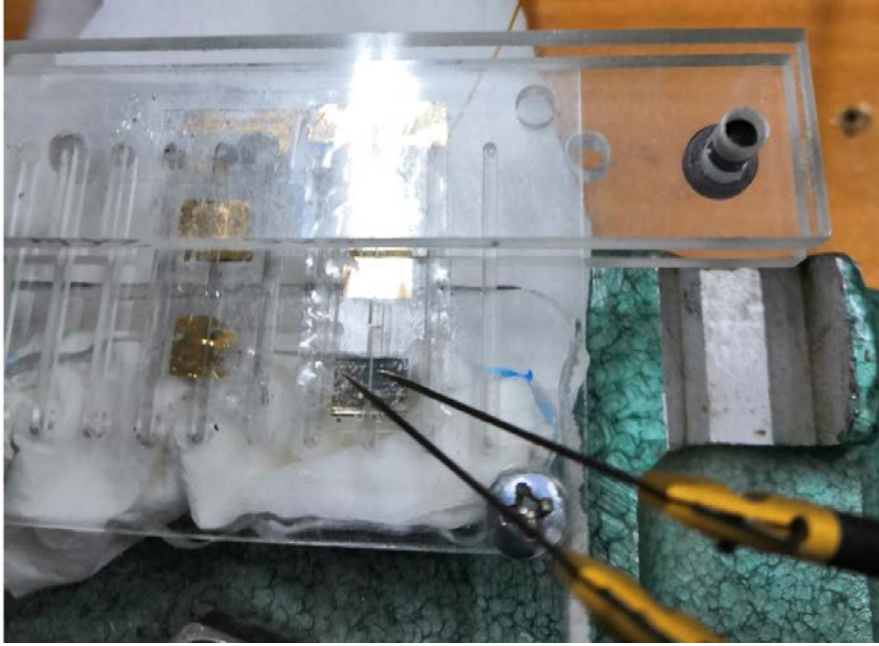
Εικόνα 4.14. Φωτογραφία της τριπλέτας κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων. Το κόκκινο βέλος δείχνει τον αισθητήρα 1 που χαρακτηρίζουμε.

Στη περίπτωση της τριπλέτας των αισθητήρων ακολουθήθηκε διαφορετική διαδικασία κατασκευής. Παρατηρώντας πειραματικά ότι ο τρόπος και ο βαθμός κόλλησης του αισθητήρα στο κανάλι επηρεάζει δραματικά τη λειτουργία του και την απόδοσή του, επιλέξαμε να κολλήσουμε πολύ καλά μια απλή μεμβράνη πολυολεφίνης πάνω στο κανάλι. Στη συνέχεια πήραμε όλη αυτή τη διάταξη και κατασκευάσαμε πάνω της τα ηλεκτρόδια τριών αισθητήρων και κάναμε την εναπόθεση των νανοσωματιδίων.

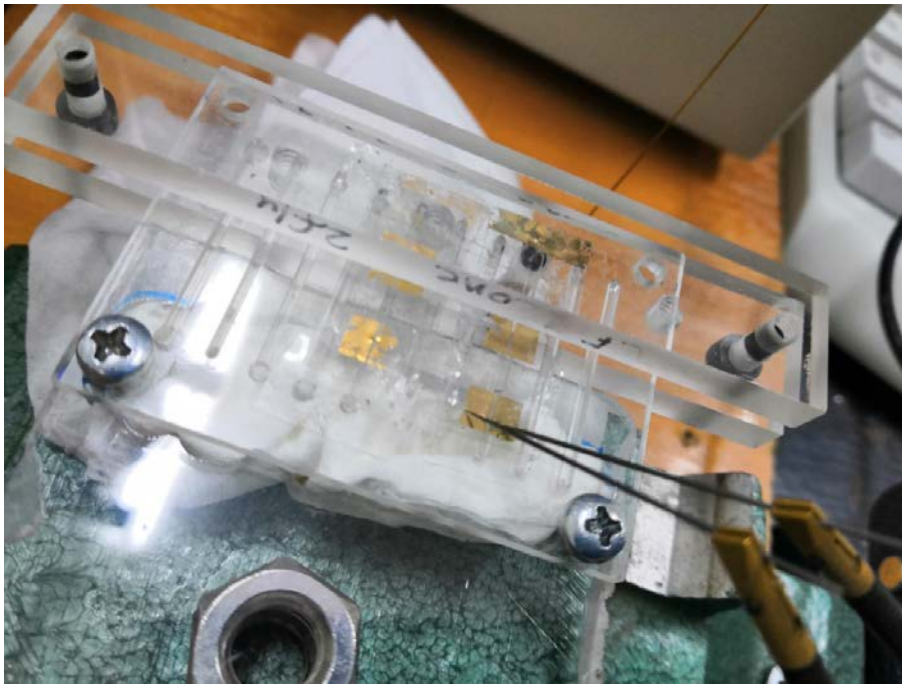


Εικόνα 4.15. Η συνολική διάταξη αισθητήρων-βάσης-αντλίας κατά τη μέτρηση.

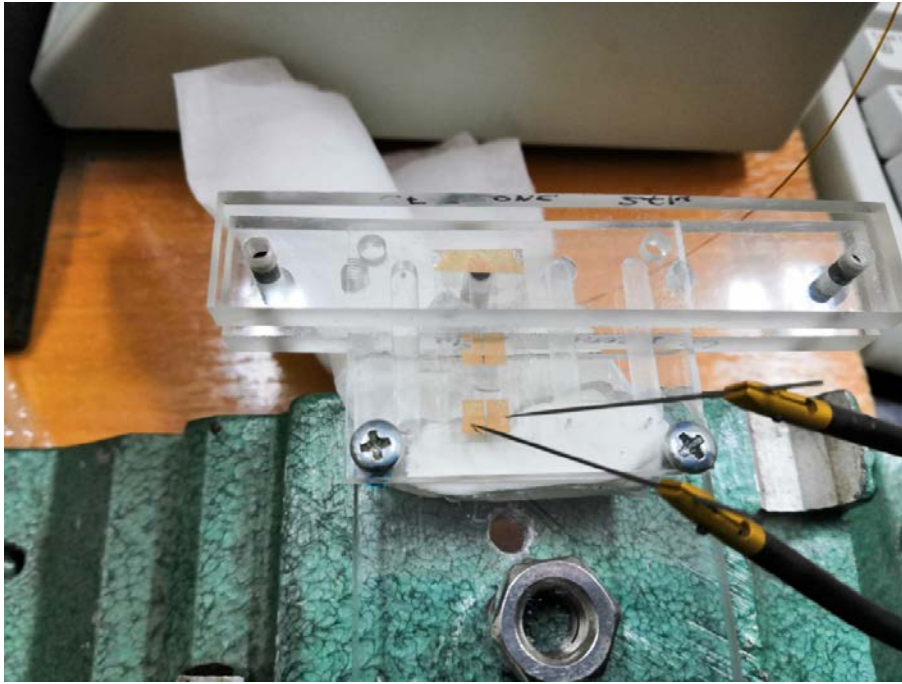
Τα αποτελέσματα ήταν άκρως ενθαρρυντικά κατά το χαρακτηρισμό του ενός από τους τρεις αισθητήρες, που έχει τη μεγαλύτερη αρχική αντίσταση 20KΩ. Παρατήρησα θεαματική βελτίωση, αφού ο αισθητήρας αυτός είναι σταθερός και αξιόπιστος, αφού ανιχνεύει πάντα τη ροή υγρού από κάτω του. Επιπλέον, παρουσιάζει επαναληψιμότητα, χαρακτηριστικό το οποίο απουσίαζε από τις προηγούμενες διατάξεις. Επιπρόσθετα, αυτός ο αισθητήρας ανιχνεύει τόσο τη διέλευση υγρού από το κανάλι, όσο και το σταμάτημα της ροής σε αντίθεση με άλλους αισθητήρες που ανίχνευαν μόνο τη διέλευση ή απλά εμφάνιζαν μια αιχμή στο γράφημα και μετά επανέρχονταν στην αντίσταση αναφοράς. Όλα αυτά τα γνωρίσματα τον κάνουν να ξεχωρίζει από τις προηγούμενες αισθητήριες διατάξεις που χαρακτήρισα. Έχει κατορθώσει να ανιχνεύσει ροές που κυμαίνονται από τα 5μl/min έως και τα 500 μl/min. Δεν επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε μεγαλύτερες ροές, καθώς αυτό θα μπορούσε να επηρεάσει την κόλληση της πολυολεφίνης στο κανάλι, όπως είχαμε δει και πιο πριν.



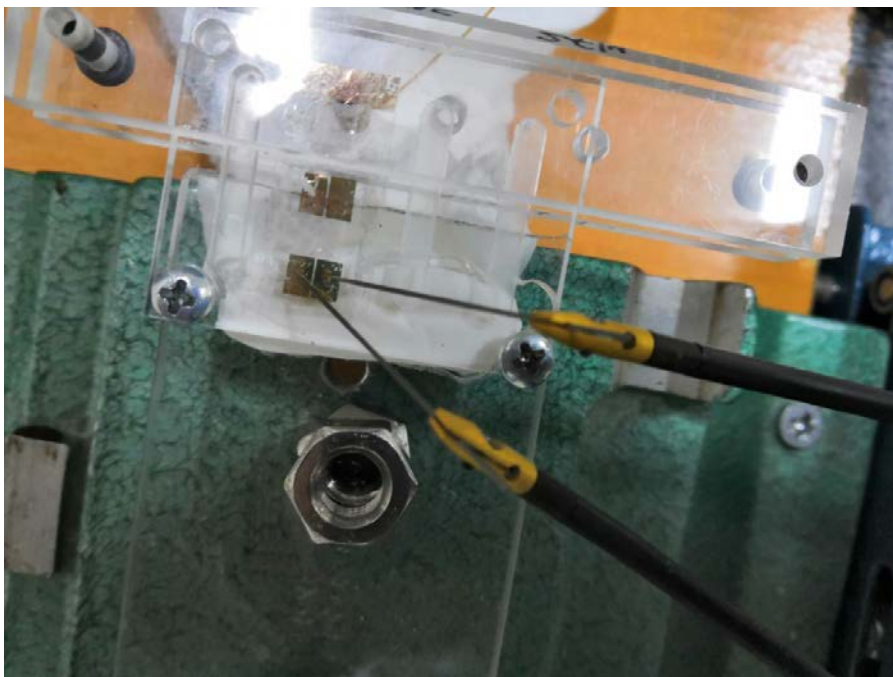
Εικόνα 4.16.



Εικόνα 4.17.



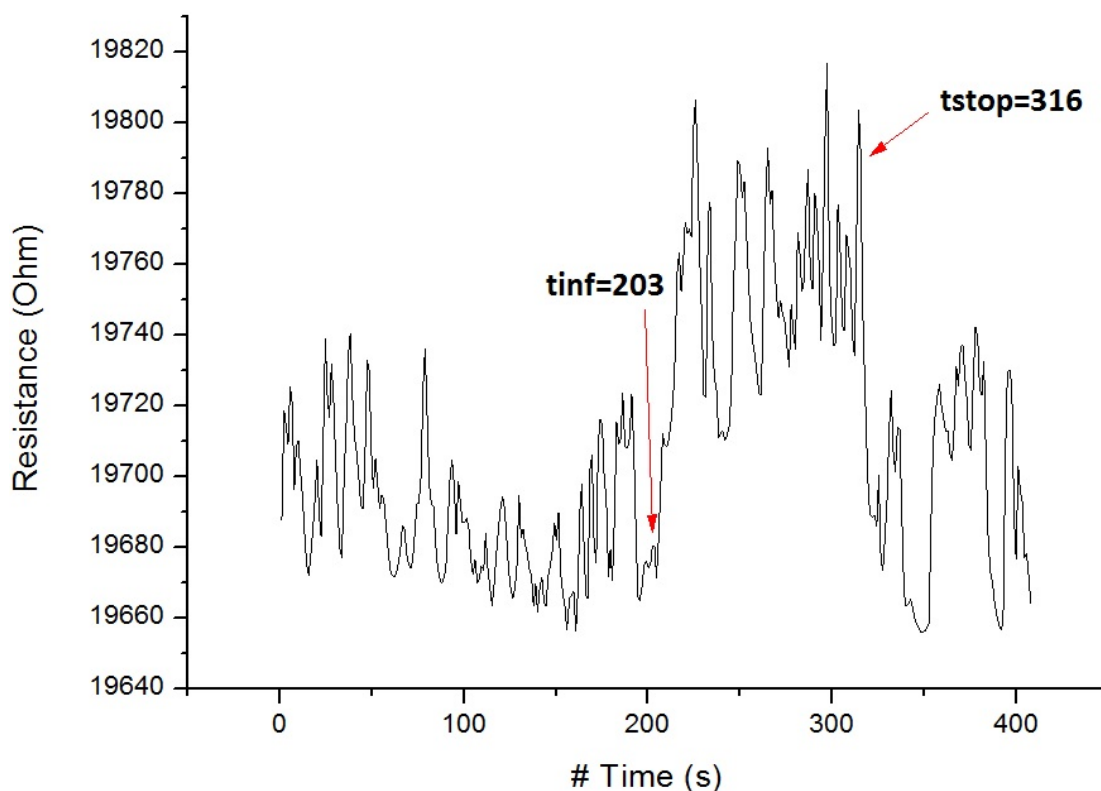
Εικόνα 4.18



Εικόνα 4.19

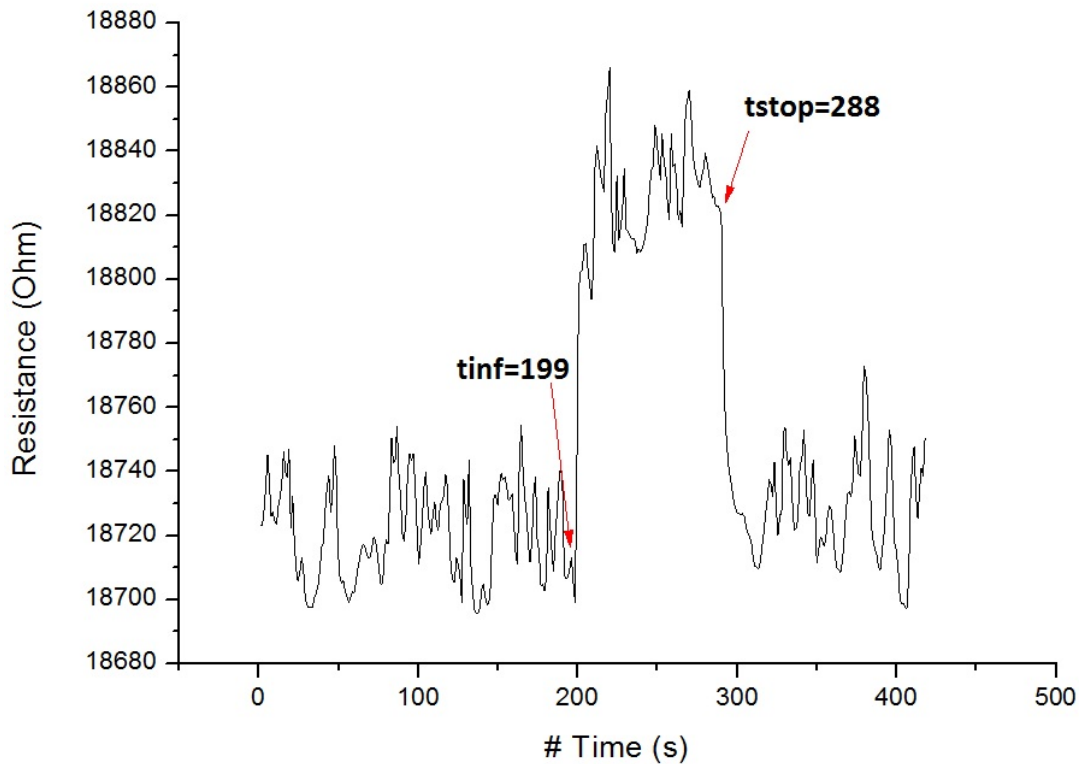
Εικόνες 4.16, 4.17, 4.18, 4.19. Στιγμιότυπα όπου φαίνεται το μέτωπο της ροής νερού σε μικροροϊκά κανάλια, κατασκευασμένα από PMMA.

Ας δούμε τα διαγράμματα αντίστασης-χρόνου για κάποιες ενδεικτικές μετρήσεις.



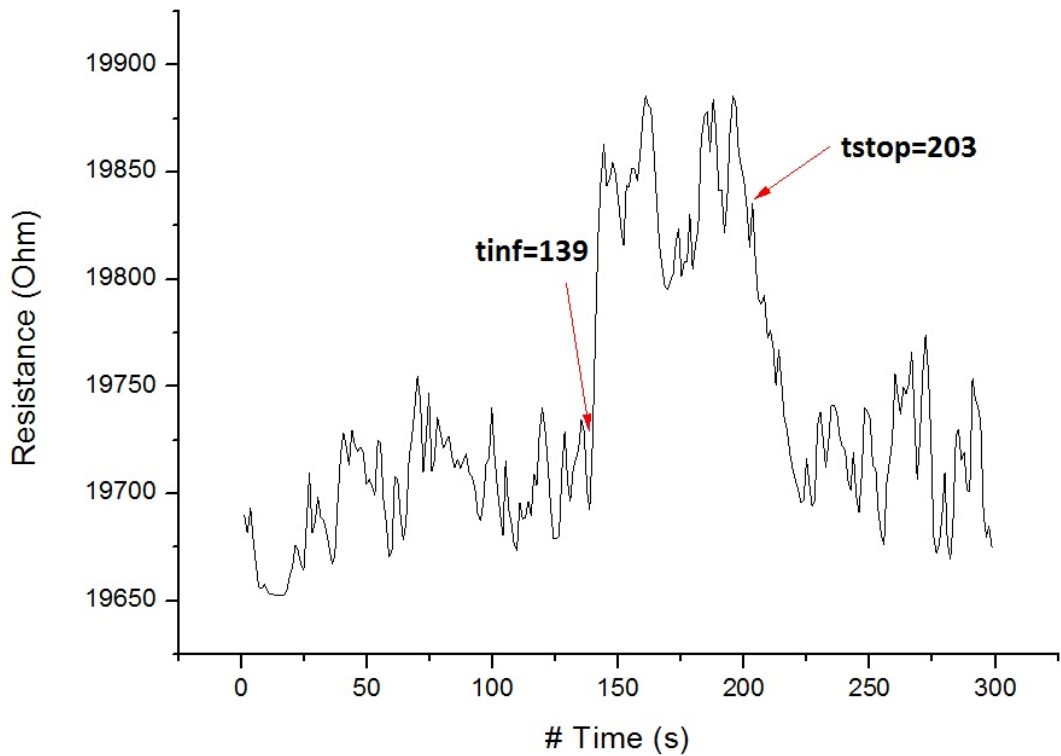
Εικόνα 4.20. Διάγραμμα αντίστασης – χρόνου για τον αισθητήρα τριπλέτας.

Στο διάγραμμα της εικόνας 4.20 εφαρμόσαμε τιμή ροής 100μl/min κατά τη χρονική στιγμή $t_{inf}=203$ s και τη σταματήσαμε τη χρονική στιγμή $t_{stop}=316$ s. Η αλλαγή στην αντίσταση είναι εμφανής και βλέπουμε τη δημιουργία μιας υψηλής στάθμης καθ' όλη τη διάρκεια της ροής. Παρόλαυτά, μετά το σταμάτημα η αντίσταση πέφτει σε μια χαμηλότερη στάθμη, αλλά σε υψηλότερα επίπεδα σε σχέση με την αρχική. Ο λόγος $(\Delta R/R)\%$ ισούται με 0,426%.



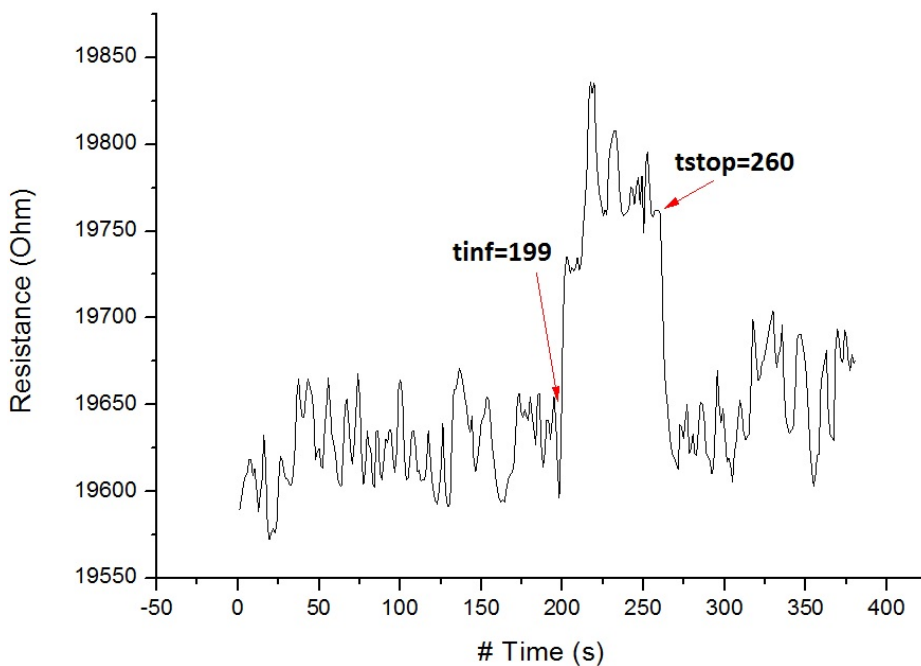
Εικόνα 4.21. Διάγραμμα αντίστασης – χρόνου για τον αισθητήρα τριπλέτας.

Στο διάγραμμα της εικόνας 4.21 εφαρμόσαμε τιμή ροής 200μl/min κατά τη χρονική στιγμή $t_{inf}=199s$ και τη σταματήσαμε τη χρονική στιγμή $t_{stop}=288s$. Η αλλαγή στην αντίσταση είναι εμφανής και βλέπουμε τη δημιουργία μιας υψηλής στάθμης καθ' όλη τη διάρκεια της ροής. Ο λόγος $(\Delta R/R)\%$ ισούται με 0,524% περίπου.



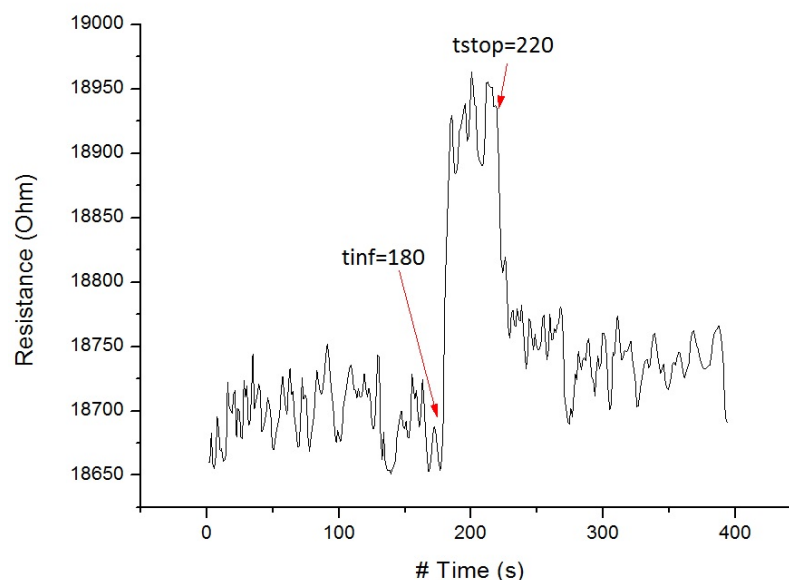
Εικόνα 4.22. Διάγραμμα αντίστασης – χρόνου για τον αισθητήρα τριπλέτας.

Στο διάγραμμα της εικόνας 4.22 εφαρμόσαμε τιμή ροής 300μl/min κατά τη χρονική στιγμή $t_{inf}=139s$ και τη σταματήσαμε τη χρονική στιγμή $t_{stop}=203s$. Η αλλαγή στην αντίσταση είναι εμφανής και βλέπουμε τη δημιουργία μιας υψηλής στάθμης καθ' όλη τη διάρκεια της ροής. Ο λόγος $(\Delta R/R)\%$ ισούται με 0,661% περίπου.



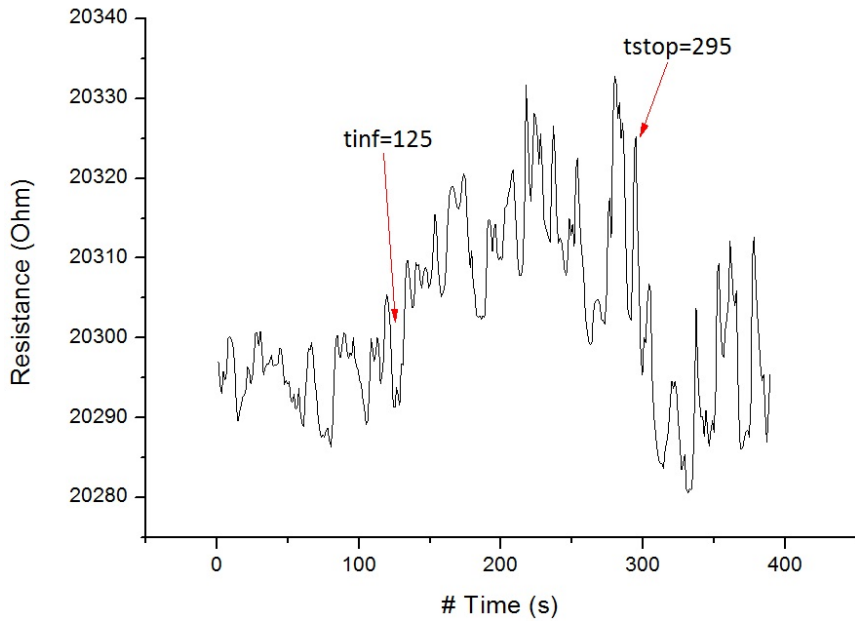
Εικόνα 4.23. Διάγραμμα αντίστασης – χρόνου για τον αισθητήρα τριπλέτας.

Στο διάγραμμα της εικόνας 4.23 εφαρμόσαμε τιμή ροής 400μl/min κατά τη χρονική στιγμή $t_{inf}=199s$ και τη σταματήσαμε τη χρονική στιγμή $t_{stop}=260s$. Η αλλαγή στην αντίσταση είναι εμφανής και βλέπουμε τη δημιουργία μιας υψηλής στάθμης καθ' όλη τη διάρκεια της ροής. Παρόλαυτά, μετά το σταμάτημα η αντίσταση πέφτει σε μια χαμηλότερη στάθμη, αλλά σε υψηλότερα επίπεδα σε σχέση με την αρχική. Ο λόγος $(\Delta R/R)\%$ ισούται με 0,9235%.



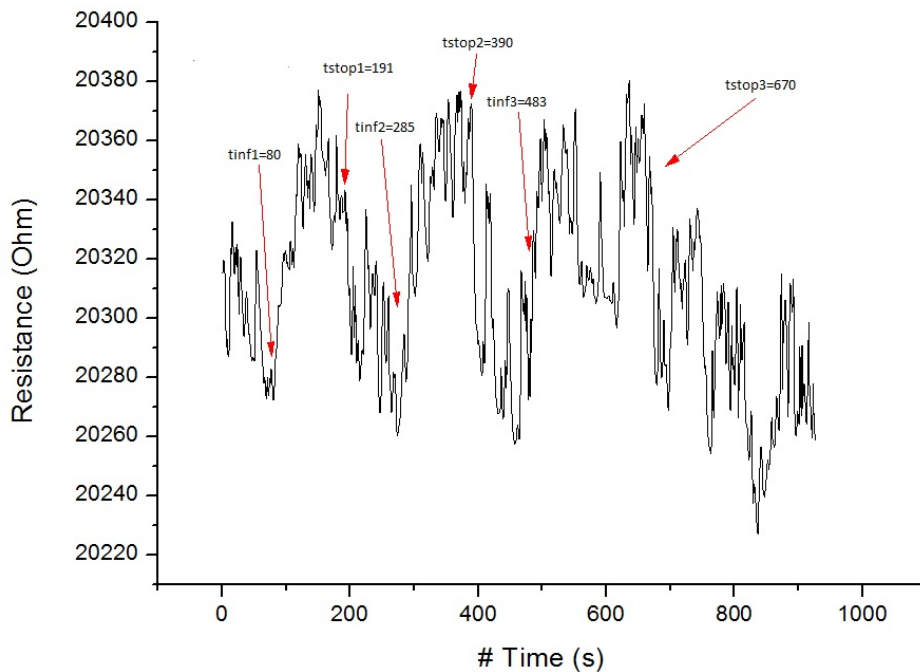
Εικόνα 4.24. Διάγραμμα αντίστασης – χρόνου για τον αισθητήρα τριπλέτας.

Στο διάγραμμα της εικόνας 4.24 εφαρμόσαμε τη μεγαλύτερη τιμή ροής 500μl/min κατά τη χρονική στιγμή $t_{inf}=180s$ και τη σταματήσαμε τη χρονική στιγμή $t_{stop}=220s$. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε η αλλαγή στην αντίσταση είναι εμφανέστατη. Βλέπουμε τη δημιουργία μιας υψηλής στάθμης καθ' όλη τη διάρκεια της ροής. Εντούτοις μετά το σταμάτημα η αντίσταση πέφτει σε μια χαμηλότερη στάθμη αλλά μεγαλύτερη της αρχικής. Η συγκεκριμένη μέτρηση μας έχει δώσει και το μεγαλύτερο λόγο $(\Delta R/R)\%$, ο οποίος ισούται με 1,1% περίπου.

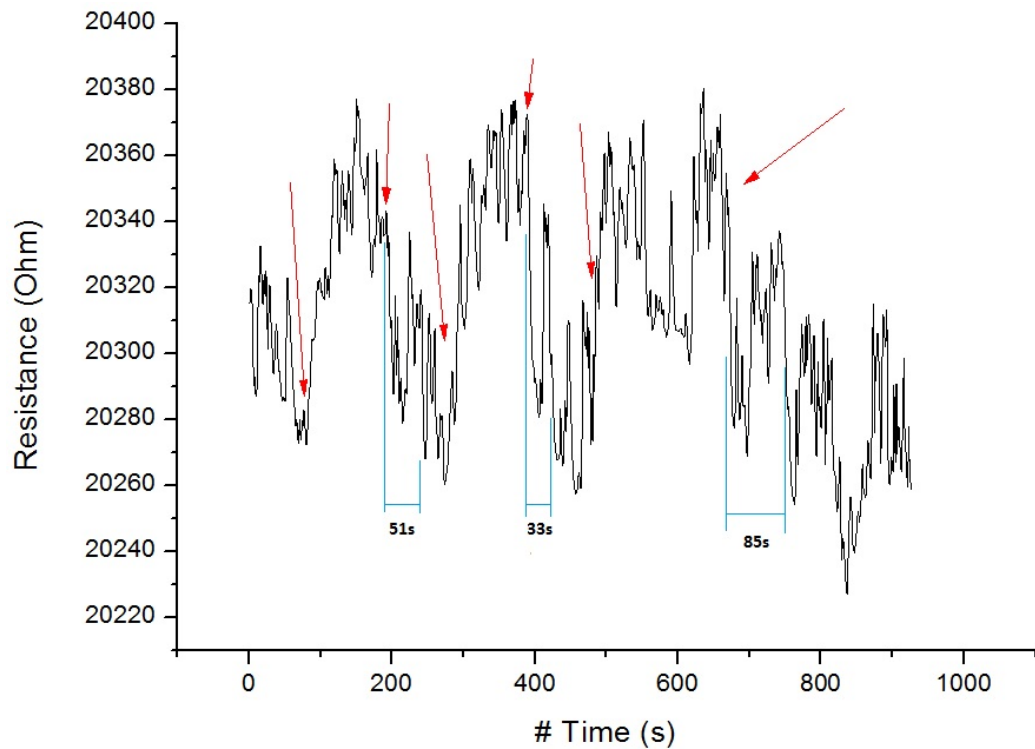


Εικόνα 4.25. Διάγραμμα αντίστασης – χρόνου για τον αισθητήρα τριπλέτας.

Στη μέτρηση στην εικόνα 4.25 έχουμε εφαρμόσει μια αρκετά χαμηλή ροή των 10μl/min κατά τη χρονική στιγμή $t_{inf}=125s$ και τη σταματήσαμε τη χρονική στιγμή $t_{stop}=295s$. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε ο παλμός φαίνεται αρκετά καλά. Ένα ακόμη χαρακτηριστικό είναι η μεγάλη αύξηση του θορύβου στο σήμα μας μόλις η ροή περάσει κάτω από τον αισθητήρα μας.



(α)

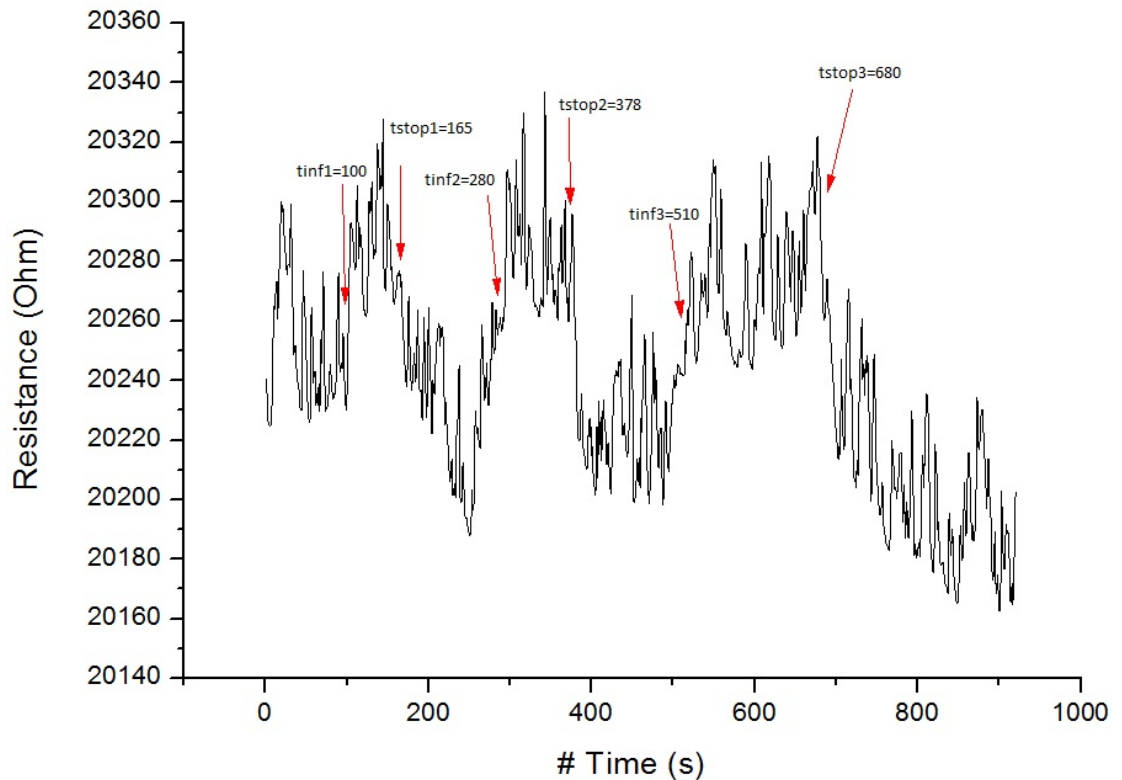


(β)

Εικόνα 4.26. Διάγραμμα αντίστασης – χρόνου για τον αισθητήρα τριπλέτας.

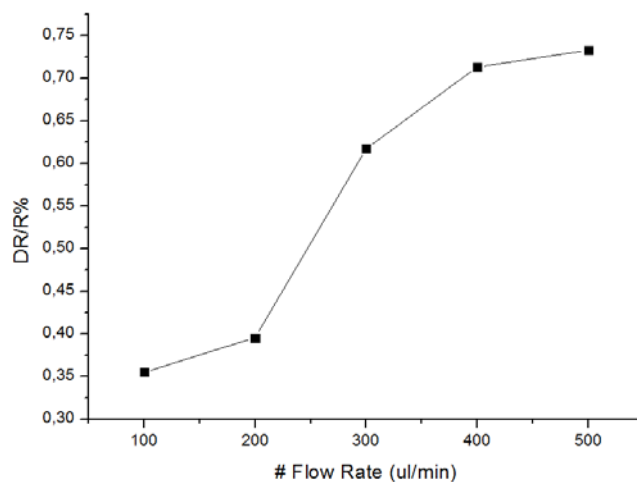
Στη μέτρηση 4.26 (α) εφαρμόσαμε τρεις διακριτές ροές των 40μl/min και τις οποίες κρατήσαμε για συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Οι αντίστοιχες τιμές έγχυσης και παύσης φαίνονται πάνω στο διάγραμμα. Ο αισθητήρας μπόρεσε να ανιχνεύσει επιτυχώς τις συγκεκριμένες ροές.

Στη μέτρηση 4.26 (β), το μόνο σημείο αδυναμίας που μπορούμε να δούμε είναι ότι αμέσως μετά τους χρόνους παύσης των ροών όπου η αντίσταση δεν πέφτει ραγδαία αλλά χρειάζεται κάποιο χρονικό διάστημα για να ισορροπήσει στα αρχικά επίπεδα, το οποίο σημειώνεται με γαλάζιο.

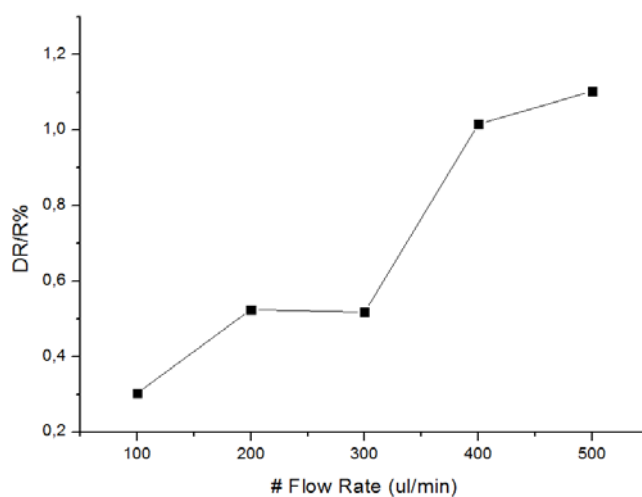


Εικόνα 4.27. Διάγραμμα αντίστασης – χρόνου για τον αισθητήρα τριπλέτας.

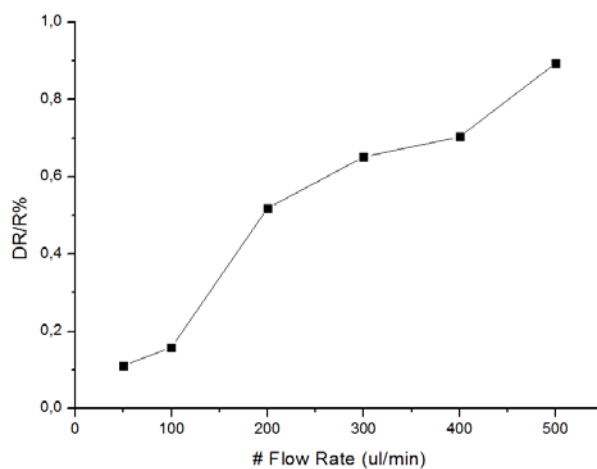
Στη μέτρηση της εικόνας 4.27 εφαρμόσαμε τρεις διακριτές ροές των 50μl/min και τις οποίες κρατήσαμε για συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Οι αντίστοιχες τιμές έγχυσης και παύσης φαίνονται πάνω στο διάγραμμα. Ο αισθητήρας μπόρεσε να ανιχνεύσει επιτυχώς τις συγκεκριμένες ροές. Σε σύγκριση με το αντίστοιχο διάγραμμα των 40μl/min, παραπάνω, παρατηρούμε ότι οι αντίστοιχοι παλμοί είναι πιο ευδιάκριτοι κατά το τελειώμά τους. Ίσως έχει συντελέσει σε αυτό το γεγονός η υψηλότερη τιμή ροής.



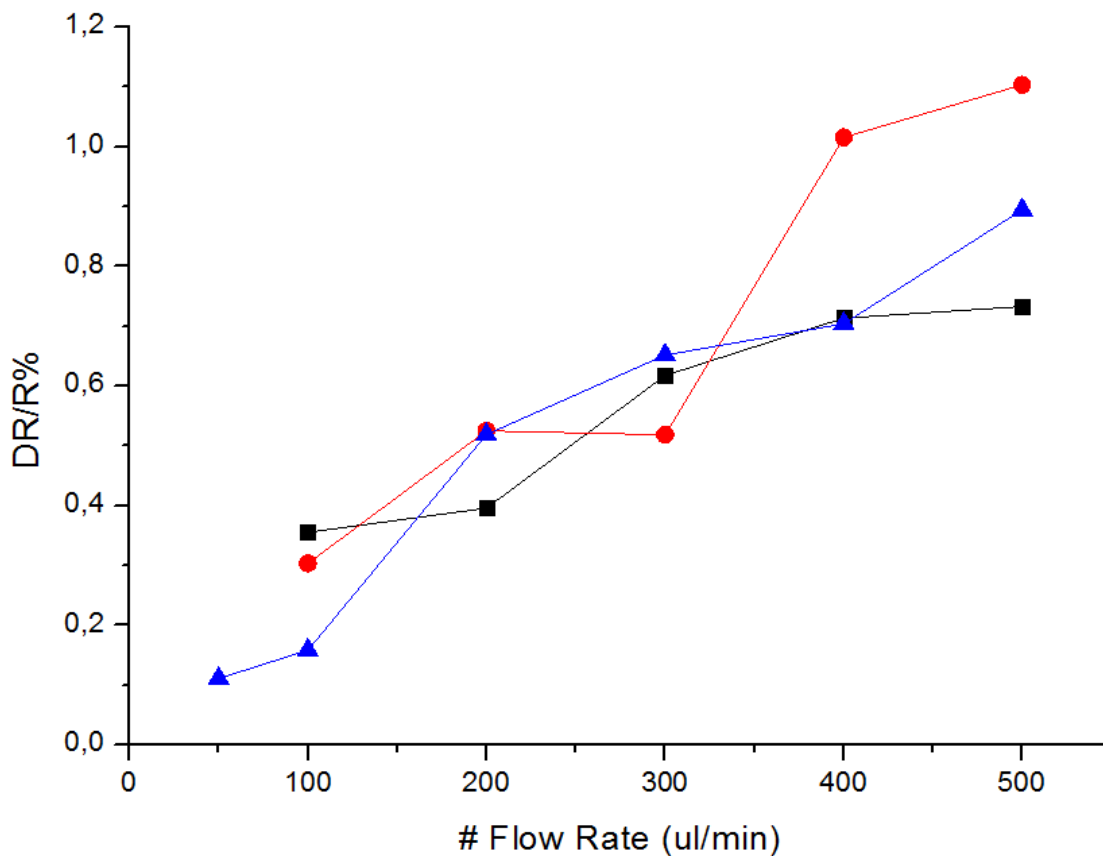
Εικόνα 4.28. Διάγραμμα λόγου μεταβολής της αντίστασης – ρυθμού ροής για τον αισθητήρα τριπλέτας



Εικόνα 4.29. Διάγραμμα λόγου μεταβολής της αντίστασης – ρυθμού ροής για τον αισθητήρα τριπλέτας



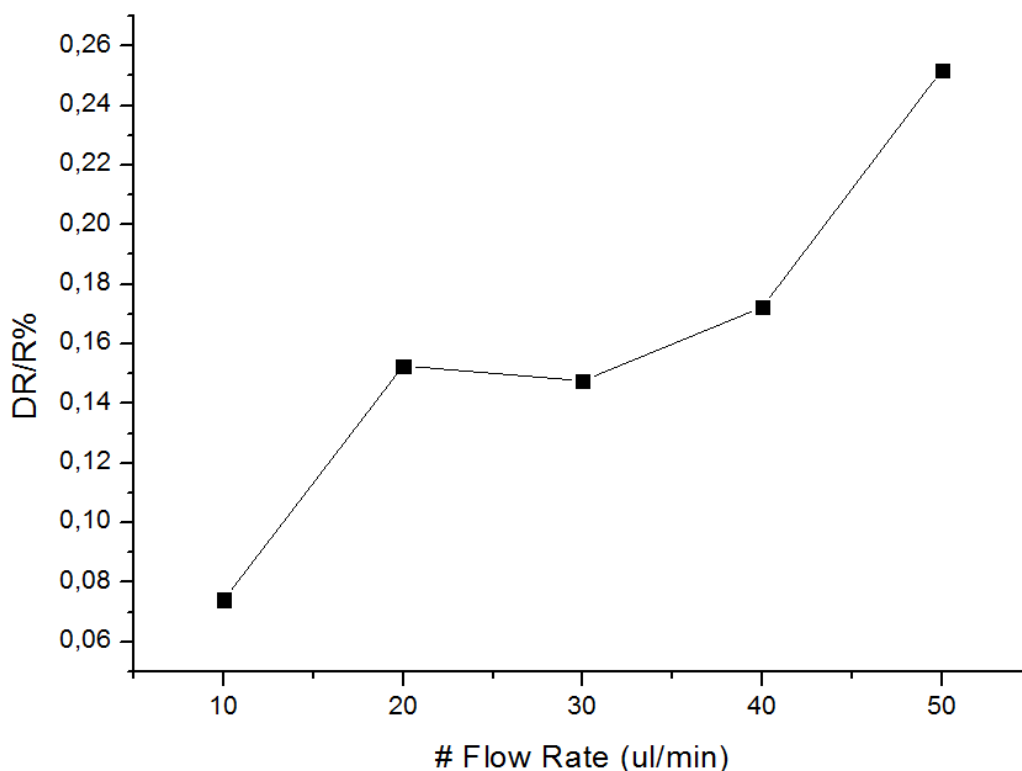
Εικόνα 4.30. Διάγραμμα λόγου μεταβολής της αντίστασης – ρυθμού ροής για τον αισθητήρα τριπλέτας



Εικόνα 4.31. Συγκεντρωτικό διάγραμμα λόγου μεταβολής της αντίστασης – ρυθμού ροής για τον αισθητήρα τριπλέτας

Στις εικόνες 4.28 – 4.30 παρατηρούμε τη μεταβολή του λόγου $(\Delta R/R)\%$ σε συνάρτηση με το ρυθμό ροής για ροές 100-500μl/min για τέσσερα διαφορετικά σετ μετρήσεων του ίδιου αισθητήρα. Τα σετ μετρήσεων διαφέρουν μεταξύ τους λόγω της διαφορετικής αντίστασης αναφοράς.

Στο συγκεντρωτικό διάγραμμα της εικόνας 4.31, βλέπουμε ότι οι καμπύλες ταυτίζονται μεταξύ τους σε ορισμένα σημεία και εμφανίζουν παρόμοιες κλίσεις. Γενικά, παρατηρούμε διαφορετικές τιμές του λόγου $(\Delta R/R)\%$ για ίδιες τιμές ροής, αλλά σε διαφορετικά χρονικά σετ μετρήσεων, όπου έχουμε διαφορετική αντίσταση αναφοράς.



Εικόνα 4.32. Διάγραμμα μεταβολή του λόγου ($\Delta R/R$)% σε συνάρτηση με το ρυθμό ροής για ροές 10-50μl/min για τον αισθητήρα τριπλέτας

Στο διάγραμμα της εικόνας 4.32 μπορούμε να παρατηρήσουμε αλληλοεπικαλύψεις κοντινών τιμών ροής, με αποτέλεσμα την αδυναμία διάκρισής τους, όπως στην περίπτωση των 20 και 30μl/min. Συγκεκριμένα, στο παραπάνω διάγραμμα η ροή των 30μl/min είναι ελάχιστα μικρότερη από τη ροή των 20μl/min. Αντίθετα για μεγαλύτερες τιμές ροής τα αποτελέσματα είναι πιο ξεκάθαρα.

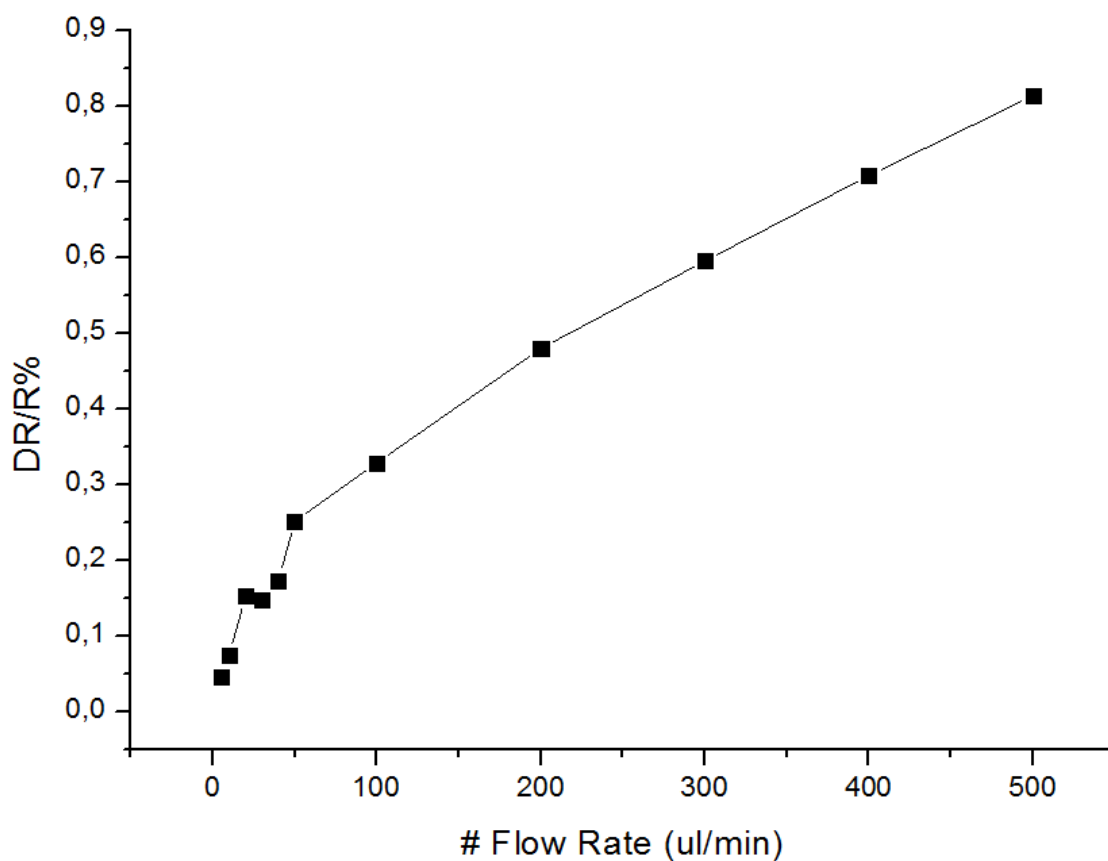
Τώρα μπορούμε να ενώσουμε το διάγραμμα της εικόνας 4.32 με ροές 10-50μl/min και το διάγραμμα στην εικόνα 4.30 που αποτελεί συνδυασμό των διαγραμμάτων 17-20 για ροές 100-500μl/min στον παρακάτω πίνακα που περιλαμβάνει τιμές ροής από 5 έως 500μl/min.

Ρυθμός Ροής (μl/min)	($\Delta R/R$)%
5	0,0468125
10	0,07408
20	0,1526
30	0,1476

40	0,17227
50	0,25185
100	0,32897
200	0,479683
300	0,59555
400	0,708445
500	0,813525

Πίνακας 4.1. Τιμές ρυθμού ροής και μέσης τιμής για το λόγο $(\Delta R/R)\%$ του αισθητήρα 1 της τριπλέτας.

Απόρροια του πίνακα 4.1 αποτελεί το παρακάτω συγκεντρωτικό διάγραμμα.

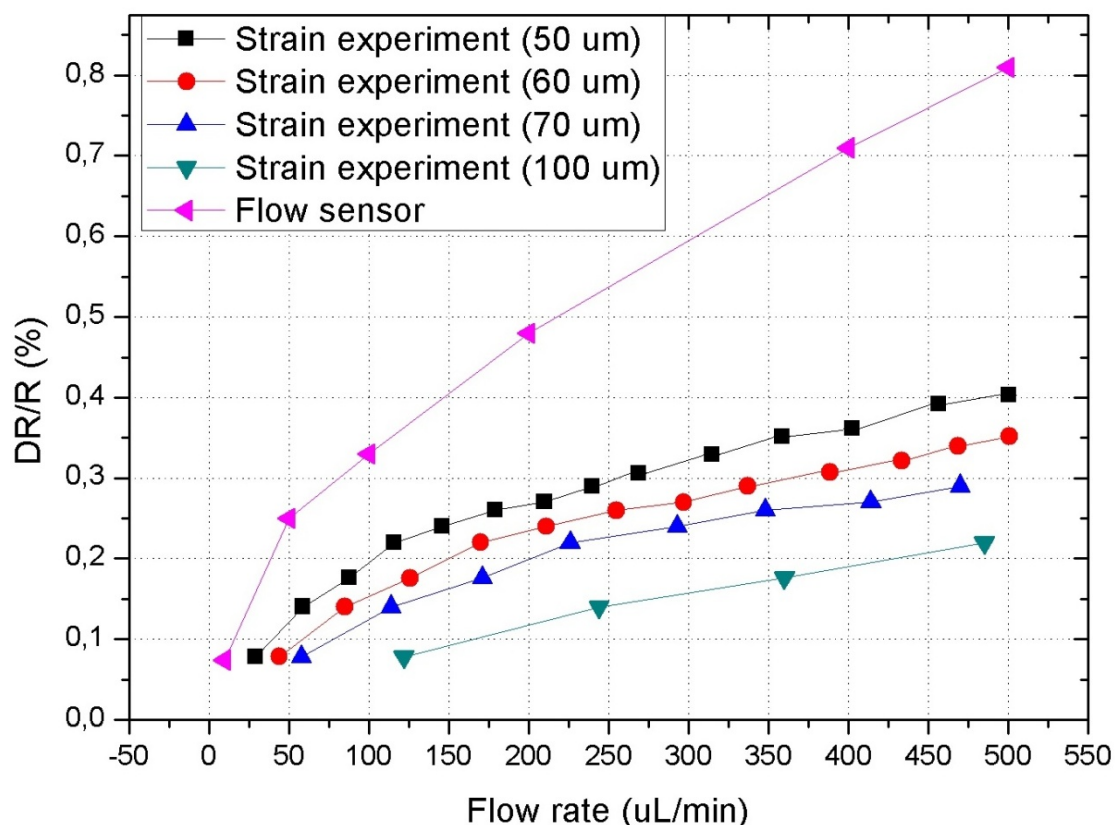


Εικόνα 4.33. Τελικό διάγραμμα μεταβολής του λόγου $(\Delta R/R)\%$ σε συνάρτηση με το ρυθμό ροής για ροές 5-500μl/min.

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε υπάρχει ένα «λάθος» στο διάγραμμα στην εικόνα 4.33 καθώς ο λόγος $(\Delta R/R)\%$ για ροή 30μl/min είναι ελάχιστα μικρότερος από

τον αντίστοιχο για τη ροή των 20μl/min, που είναι μικρότερη. Κάτι τέτοιο «χαλάει» τη γραμμικότητα του αισθητήρα και δεν έχει κάποια φυσική σημασία.

Επίσης η κλίση της καμπύλης είναι διαφορετική για ροές 5-50μl/min και για ροές 50-500μl/min. Το γεγονός αυτό ίσως σχετίζεται με το γεγονός ότι ο αισθητήρας φτάνει πιο εύκολα σε κορεσμό για υψηλές τιμές ροών.



Εικόνα 4.33. Συγκεντρωτικό διάγραμμα λόγου μεταβολής της αντίστασης και των ρυθμών ροής για αισθητήρες ροής που έχουν χαρακτηριστεί στο εργαστήριο. Με ροζ χρώμα φαίνεται η καμπύλη απόκρισης του αισθητήρα τριπλέτας (Flow sensor), τον οποίο χαρακτηρίσα και έχουμε αναφερθεί πιο πριν.

Οι υπόλοιποι αισθητήρες, στους οποίους αναφέρεται και το συνολικό πάχος υποστρώματος, είναι αισθητήρες παραμόρφωσης στους οποίους έχουν δοκιμαστεί από ειδικό μηχάνημα που διαθέτει κατάλληλο έμβολο, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.25, οι τιμές κάθετης μετατόπισης (deflection) και παραμόρφωσης (strain) που βρήκα στις προσομοιώσεις στο 3^ο κεφάλαιο. Με αυτό τον τρόπο κατορθώσαμε να μετατρέψουμε τις τιμές κάθετης μετατόπισης και παραμόρφωσης από τις προσομοιώσεις σε τιμές λόγου μεταβολής της αντίστασης. Έτσι, μπορέσαμε να συγκρίνουμε άμεσα τα αποτελέσματα από τις πειραματικές μετρήσεις με αυτά των προσομοιώσεων.

Μπορούμε να παρατηρήσουμε μια ξεκάθαρη απόκλιση της καμπύλης των πειραματικών μετρήσεων (ροζ) με τις καμπύλες που βασίστηκαν στα δεδομένα των προσομοιώσεων. Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται στην σταδιακή αποκόλληση της μεμβράνης με την αύξηση των τιμών ρυθμών ροής για τις πειραματικές

μετρήσεις. Αντίθετα, στις προσομοιώσεις έχουμε αναφέρει και πιο πριν ότι θεωρήσαμε πως η μεμβράνη είναι τέλεια κολλημένη στο κανάλι και δεν αποκολλάται με τίποτα. Ένας ακόμη λόγος μπορεί να είναι το γεγονός ότι κατά τις προσομοιώσεις επιλέξαμε ως υλικό της μεμβράνης το πολυαιθυλένιο, αφού δεν μπορέσαμε να βρούμε επαρκή στοιχεία για τη μοντελοποίηση της πολυολεφίνης. Το πολυαιθυλένιο και η πολυολεφίνη μπορεί να είναι συγγενή υλικά, παρόλαυτά όμως μπορεί να έχουν ελαφρώς διαφορετική ελαστικότητα, η οποία όμως μπορεί να κάνει μεγάλη διαφορά στη μικροκλίμακα.

Για τιμές ρυθμών ροής έως 500μl/min παρατηρούμε ότι ο αισθητήρας τριπλέτας παρουσιάζει πολύ καλύτερη απόκριση. Με βάση τα πειραματικά μας δεδομένα για ρυθμούς ροής άνω των 500μl/min, η απόκριση του αισθητήρα τριπλέτας μειώνεται βαθμιαία, γεγονός που συνδέεται με τη σταδιακή αποκόλληση της μεμβράνης.

5^ο Κεφάλαιο: Συμπεράσματα και Προοπτικές

5.1 Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας θα μπορούσαμε να καταλήξουμε σε ορισμένα συμπεράσματα, που μπορεί να τα έχουμε αναφέρει και πιο πάνω, τα οποία παρουσιάζουμε συγκεντρωτικά εδώ.

- ❖ Η κόλληση της μεμβράνης είναι βασικός παράγοντας για την αποτελεσματική λειτουργία του αισθητήρα μας. Στις μετρήσεις που πραγματοποιήσαμε, η κόλληση της μεμβράνης αποτελούσε λόγο λειτουργίας ή μη του αισθητήρα μας. Για τιμές ροής πάνω από 400μl/min περίπου, οι αισθητήρες χάνουν τη γραμμικότητά τους και παύουν να αποκρίνονται τόσο καλά. Πιστεύεται ότι το γεγονός αυτό έχει να κάνει με την κόλληση.
- ❖ Ένας άλλος παράγοντας που παίζει καίριο ρόλο είναι το υλικό και το πάχος της μεμβράνης, όπως μπορέσαμε να δούμε και από τα δεδομένα των προσομοιώσεων.
- ❖ Οι διαστάσεις και το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο το κανάλι διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά του αισθητήρα μας.
- ❖ Τα ηλεκτρόδια των αισθητήρων φθείρονται ανεπανόρθωτα καθώς «τραυματίζονται» από τις ακίδες μέτρησης. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι αισθητήρες να αχρηστεύονται μετά από κάποιο αριθμό μετρήσεων.
- ❖ Έχοντας εφαρμόσει επανειλημμένα πολύ χαμηλές ροές (0,1-1 μl/min), μπορούμε να πούμε με ασφάλεια ότι παρά τα προβλήματα και την συνολική αστάθεια της διάταξης, ο αισθητήρας έχει εμφανίσει κάποια σημάδια απόκρισης.

5.1.1 Προτάσεις για μελλοντική μελέτη

- ✓ Εφαρμογή νέων αποτελεσματικότερων τρόπων κόλλησης της μεμβράνης που θα την σταθεροποιούν για μεγαλύτερες τιμές ροής.
- ✓ Χρήση ελαστικότερων υλικών ως υπόστρωμα για την κατασκευή του αισθητήρα

- ✓ Κατασκευή νέων μικρορρευστονικών καναλιών από νέα υλικά σε νέες διαστάσεις. Εάν κατορθώσουμε να ελαχιστοποιήσουμε το ύψος των μικρορρευστονικών καναλιών και αυξήσουμε το πλάτος τους, τότε θα έχουμε πολύ καλύτερες αποκρίσεις από τους ίδιους αισθητήρες.
- ✓ Χρήση αγωγίμης κόλλας και καλωδίων, ώστε να μην «τραυματίζονται» τα ηλεκτρόδια του αισθητήρα από τις ακίδες μετά από μεγάλο αριθμό μετρήσεων, γεγονός που τον καθιστά άχρηστο.

5.2 Προοπτικές

Όταν αντιμετωπιστούν όλα τα προβλήματα, τα οποία ανακύπτουν κατά την ανάπτυξη του αισθητήρα ανίχνευσης ροής, θα είμαστε σε θέση να έχουμε στα χέρια μας έναν αισθητήρα με αξιόλογη συμπεριφορά που μπορεί να ανιχνεύσει και να διακρίνει μεγάλο εύρος ροών με αρκετά χαμηλότερο κόστος σε σχέση με τον ανταγωνισμό. Έτσι, μειώνεται κατ' επέκταση και το κόστος των μικρορρευστονικών διατάξεων.

Οι αισθητήρες νανοσωματιδίων πάνω σε ελαστικό υπόστρωμα, που κατασκευάζονται στις εγκαταστάσεις του καθαρού χώρου στο ΕΜΠ, θα μπορούσαν κάλλιστα να διαδραματίσουν καίριο ρόλο στη λειτουργία των μικρορρευστονικών διατάξεων. Το ελαστικό και αυτοκόλλητο υπόστρωμα του αισθητήρα μας δίνει τη δυνατότητα να τον κολλήσουμε επάνω σε μια πληθώρα υλικών από τα οποία κατασκευάζονται τα μικρορρευστονικά κανάλια. Αξίζει να αναφερθούμε στο γεγονός ότι υπάρχει δυνατότητα χρήσης του αισθητήρα με μικρορρευστονικά συστήματα από χαρτί. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, επικρατεί η αντίληψη ότι τα συστήματα αυτά πρόκειται να αποτελέσουν το μέλλον της μικρορρευστονικής τεχνολογίας.

Οι εφαρμογές που θα μπορούσε να έχει ένας τέτοιος αισθητήρας ροής είναι άκρως ενδιαφέρουσες και ιδιαίτερα σημαντικές. Ο αισθητήρας αυτός θα μπορούσε να αποτελέσει μέρος σύνθετων μικρορρευστονικών συστημάτων με κανάλια, μικροαντλίες και μικροαναμείκτες που μπορούν να επιτελέσουν περίπλοκες χημικές και βιολογικές διεργασίες με υψηλότερη ταχύτητα, μεγαλύτερη αξιοπιστία και χαμηλότερο κόστος σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα. Συγκεκριμένα, ένα τέτοιο μικρορρευστονικό σύστημα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της ποιότητας του νερού σε χώρες του Τρίτου Κόσμου. Επίσης, έχοντας ως είσοδο κάποια βιολογικό υγρό θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως διαγνωστική συσκευή που θα μας δείχνει την κατάσταση της υγείας του ατόμου. Τέλος, ένα τέτοιο μικρορρευστονικό σύστημα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ακόμη και ως διαγνωστική συσκευή για την ανίχνευση παθογόνων μικροοργανισμών και ιών με τη μορφή rapid test. Με αυτό τον τρόπο θα μπορούσαμε να ανιχνεύσουμε έγκαιρα και με μικρό κόστος κρούσματα μιας φονικής πανδημίας, όπως αυτή που αντιμετωπίζουμε σήμερα, θωρακίζοντας τον πληθυσμό.

6. Βιβλιογραφία

6.1 Ελληνική

1. Τσουκαλάς Δημήτριος, «Απόσπασμα Σημειώσεων του Μεταπτυχιακού Μαθήματος Μίκρο-Νάνο Αισθητήρες», ΣΕΜΦΕ, ΕΜΠ, Αθήνα, (2010)
2. Gardner W. Julian, «Μικροαισθητήρες», Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, (2000)
3. Elgar P., «Αισθητήρες Μέτρησης και Ελέγχου», Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, (2000)
4. Μουσαδάκος Δημήτριος, «Αισθητήρες παραμόρφωσης αποτελούμενοι από σύνολα νανοσωματιδίων, Μεταπτυχιακή Εργασία, ΕΜΠ, (2011)
5. Μούτουλας Ευάγγελος, «Αυτοματοποίηση διαδικασίας χαρακτηρισμού αισθητήρων παραμόρφωσης βασισμένων σε νανοσωματίδια πλατίνας», Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, (2017)
6. Τσουγένη Αικατερίνη, «Μίκρο και Νάνο Σχηματοποίηση Πολυμερών για την Κατασκευή Μικρο-Αναλυτικών Διατάξεων», Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Χημείας, ΕΚΠΑ, (2010)
7. Παπαϊωάννου Θ. Άγγελος, «Μηχανική των Ρευστών Ι», 2^η Έκδοση, Εκδόσεις Κοράλι, Αθήνα, (2002)
8. Μπουμπούλας Αθανάσιος, «Δυναμική και ευστάθεια δομικών στοιχείων που φέρουν αναπνέουσα ρωγμή», Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, (2018)
9. Τσίππρας Βασίλειος, «Διατμητικές τάσεις λόγω στρέβλωσης στις μη γραμμικές στρεπτικές ταλαντώσεις ράβδου με τη μέθοδο συνοριακών στοιχείων», Μεταπτυχιακή Εργασία, ΕΜΠ, (2009)

6.2 Ξένη

10. Song Yujun, Cheng Daojian, Zhao Liang, "Microfluidics Fundamentals, Devices and Applications", Wiley-VCH, Weinheim, Germany, (2018)
11. Tabeling Patrick, "Introduction to Microfluidics", Oxford University Press, Oxford, UK, (2005)
12. Sangeetha M. Neralagatta, Decorde Nicolas, Viallet Benoit, Viau Guillaume, Ressler Laurence, "Nanoparticle-Based Strain Gauges Fabricated by Convective Self Assembly: Strain Sensitivity and Hysteresis with Respect to Nanoparticle Sizes", *J. Phys. Chem.*, 117, p.1935–1940, (2013)
13. Yin Jun, Hu Peipei, Luo Jin, Wang Lingyan, Cohen F. Melissa, Zhong Chuan-Jian, "Molecularly Mediated Thin Film Assembly of Nanoparticles on Flexible Devices: Electrical Conductivity versus Device Strains in Different Gas/Vapor Environment", *ACS Nano*, Vol.5, No.8, p.6516-6526, (2011)
14. Segev-Bar Meital, Haick Hossam, "Flexible Sensors Based on Nanoparticles", *ACS Nano*, Vol.7, No.10, p.8366-8378, (2013)
15. Chatzandroulis Stavros, Tsoukalas Dimitris, Neukomm A. Peter, "A Miniature Pressure System with a Capacitive Sensor and a Passive Telemetry Link for Use in Implantable Applications", *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 9, No.1, (2000)
16. Jiang Yusheng, Wang Hui, Li Shunbo, Wen Weijia, "Applications of Micro/Nanoparticles in Microfluidic Sensors: A Review", *Sensors*, 14, p.6952-6964, (2014)
17. Kuo T. W. Jonathan, Yu Lawrence, Meng Ellis, "Micromachined Thermal Flow Sensors—A Review", *Micromachines*, 3, p.550-573, (2012)
18. Pagonis N. D., Petropoulos A., Kaltsas G., Nassiopoulou G.A., Tserepi A., "Novel microfluidic flow sensor based on a microchannel capped by porous silicon", *phys. stat. sol.*, 204, No. 5, 1474–1479, (2007)
19. SadAbadi Hamid, Badilescu Simona, Packirisamy Muthukumaran, Wóthrich Rolf, "PDMS-Gold Nanocomposite Platforms with Enhanced Sensing Properties", *Journal of Biomedical Nanotechnology* Vol. 8, p.1–11, (2012)
20. Rajavelu M., Sivakumar D., Daniel Joseph R., Sumangala K., "Perforated diaphragms employed piezoresistive MEMS pressure sensor for sensitivity

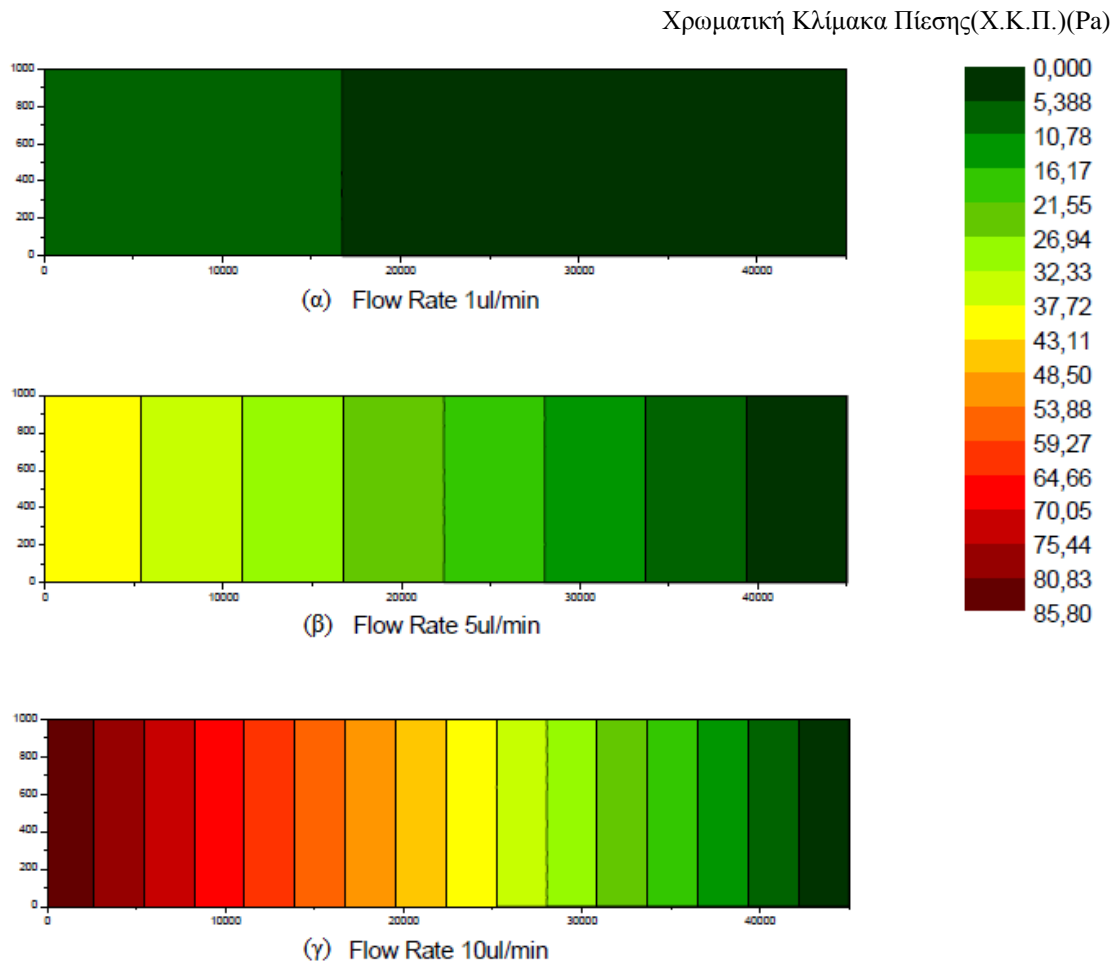
6. Βιβλιογραφία

- enhancement in gas flow measurement”, *Flow Measurement and Instrumentation* 35, p. 63–75, (2014)
21. Groenesteijn Jarno, “Microfluidic platform for Coriolis-based sensor and actuator systems”, PhD Thesis, University of Twente, Netherlands, (2016)
 22. Segev-Bar Meital, Landman Avigail, Nir-Shapira Maayan, Shuster Gregory, Haick Hossam,” A Tunable Touch Sensor and Combined Sensing Platform: Towards Nanoparticle-based Electronic Skin”, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, (2013)
 23. Kang Daeshik, Pikhitsa V. Peter, Choi Whan Yong, Lee Chanseok, Shin Soo Sung, Piao Linfeng, Park Byeonghak, Suh Kahp-Yang, Kim Tae-il, Choi Mansoo, “Ultrasensitive mechanical crack-based sensor inspired by the spider sensory system”, *Nature*, Vol.516, 11 December, (2014)
 24. Burns, M.A., Johnson, B.N., Brahmasandra, S.N. et al., “An integrated nanoliter DNA analysis device”, *Science*, 282, 484–487, (1998)
 25. <https://www.comsol.com/multiphysics/analysis-of-deformation>

6. Βιβλιογραφία

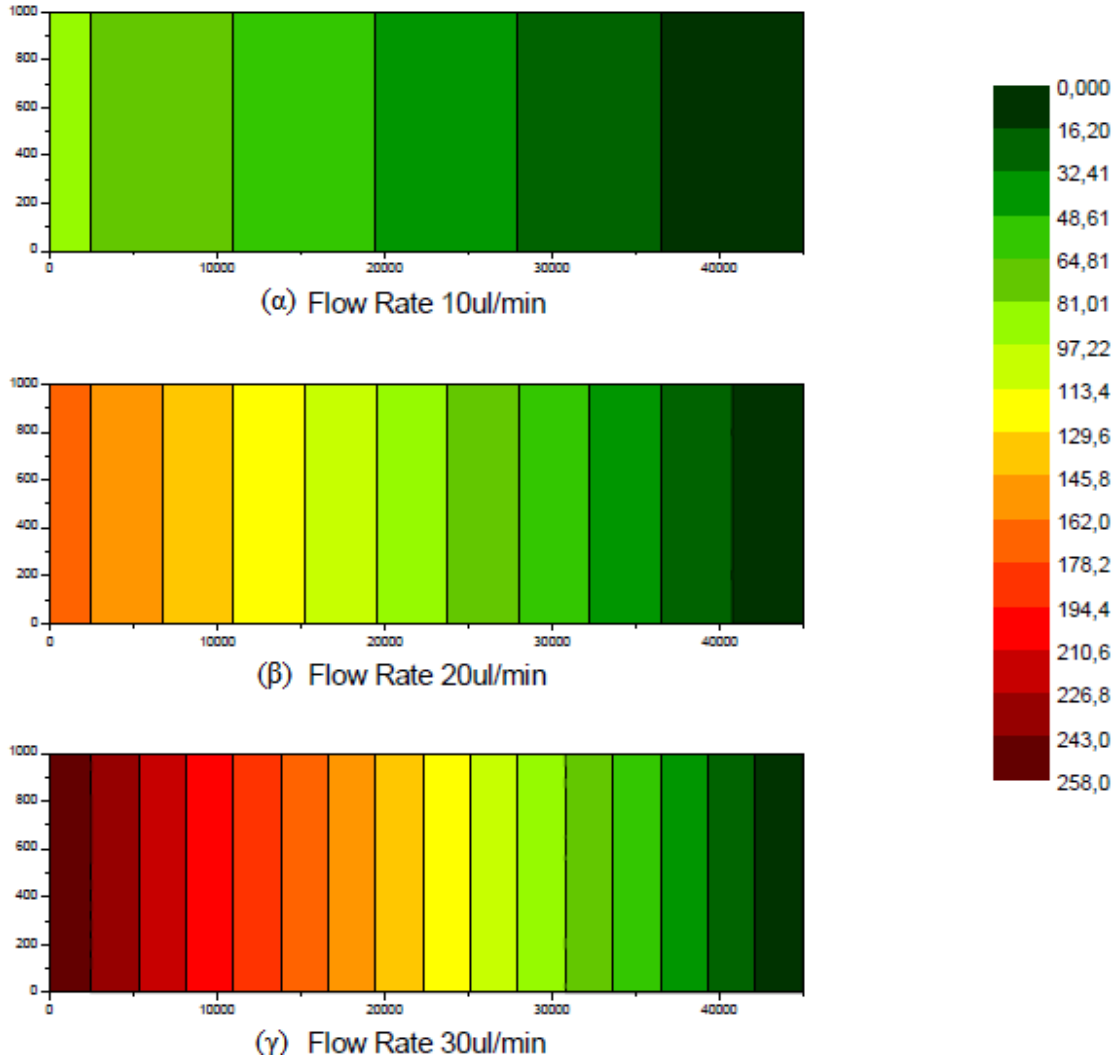
Παράρτημα Α

Διαγράμματα προσομοιώσεων Μικρορευστονικού καναλιού



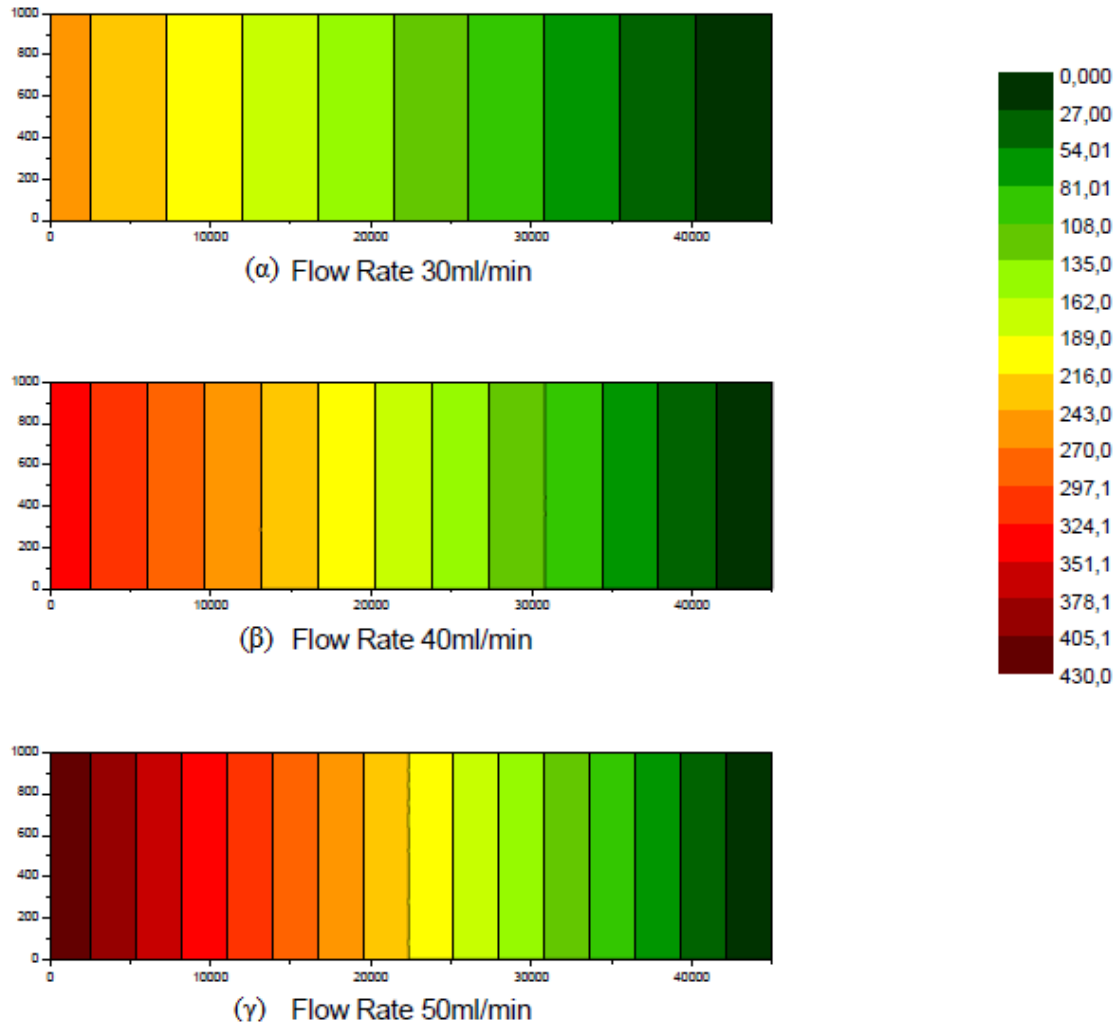
Εικόνα Α.1. Σχηματική αναπαράσταση της κάτοψης του μικροκαναλιού με τις πιέσεις που ασκούνται στην επάνω επιφάνεια του σε Pa, σύμφωνα με τη χρωματική κλίμακα στο πλάι, για ροές: (α) 1 $\mu\text{lit}/\text{min}$, (β) 5 $\mu\text{lit}/\text{min}$, (γ) 10 $\mu\text{lit}/\text{min}$.

X.K.Π. (Pa)



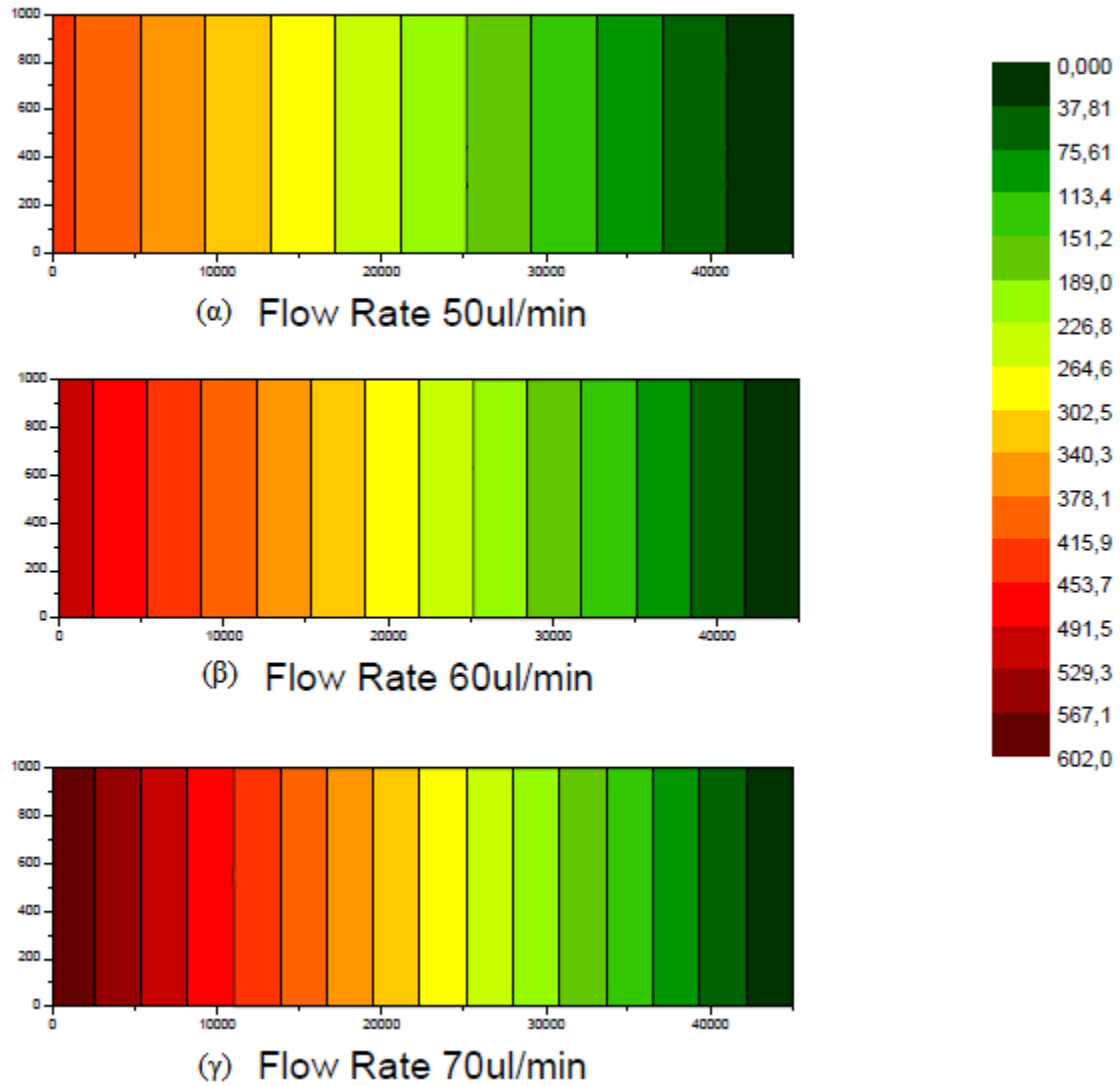
Εικόνα Α.2. Σχηματική αναπαράσταση της κάτοψης του μικροκαναλιού με τις πιέσεις που ασκούνται στην επάνω επιφάνεια του σε Pa, σύμφωνα με τη χρωματική κλίμακα στο πλάι, για ροές: (α) 10 μlit/min, (β) 20 μlit/min, (γ) 30 μlit/min.

X.K.II. (Pa)



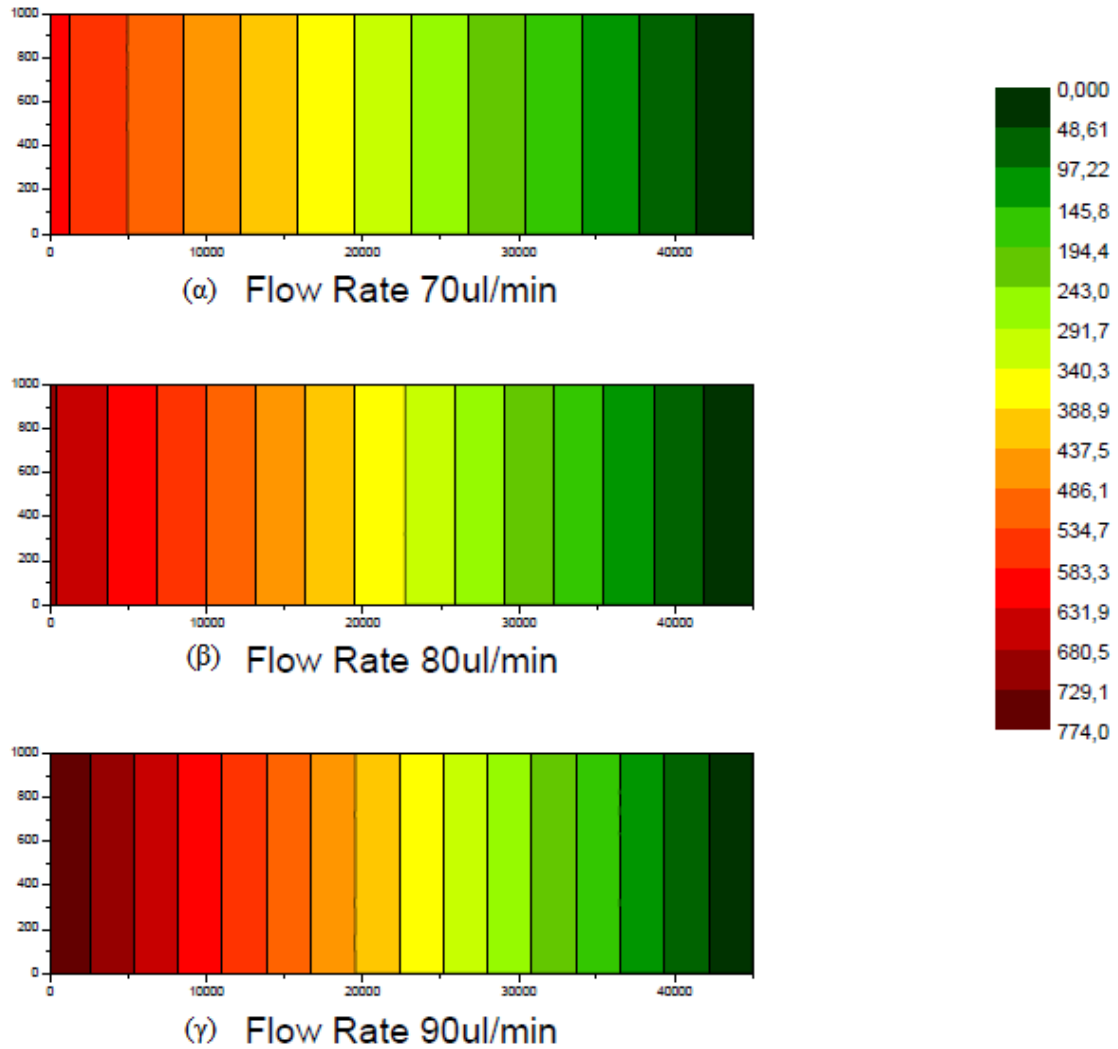
Εικόνα Α.3. Σχηματική αναπαράσταση της κάτοψης του μικροκαναλιού με τις πιέσεις που ασκούνται στην επάνω επιφάνεια του σε Pa, σύμφωνα με τη χρωματική κλίμακα στο πλάι, για ροές: (α) 30 $\mu\text{lit}/\text{min}$, (β) 40 $\mu\text{lit}/\text{min}$, (γ) 50 $\mu\text{lit}/\text{min}$.

X.K.Π. (Pa)



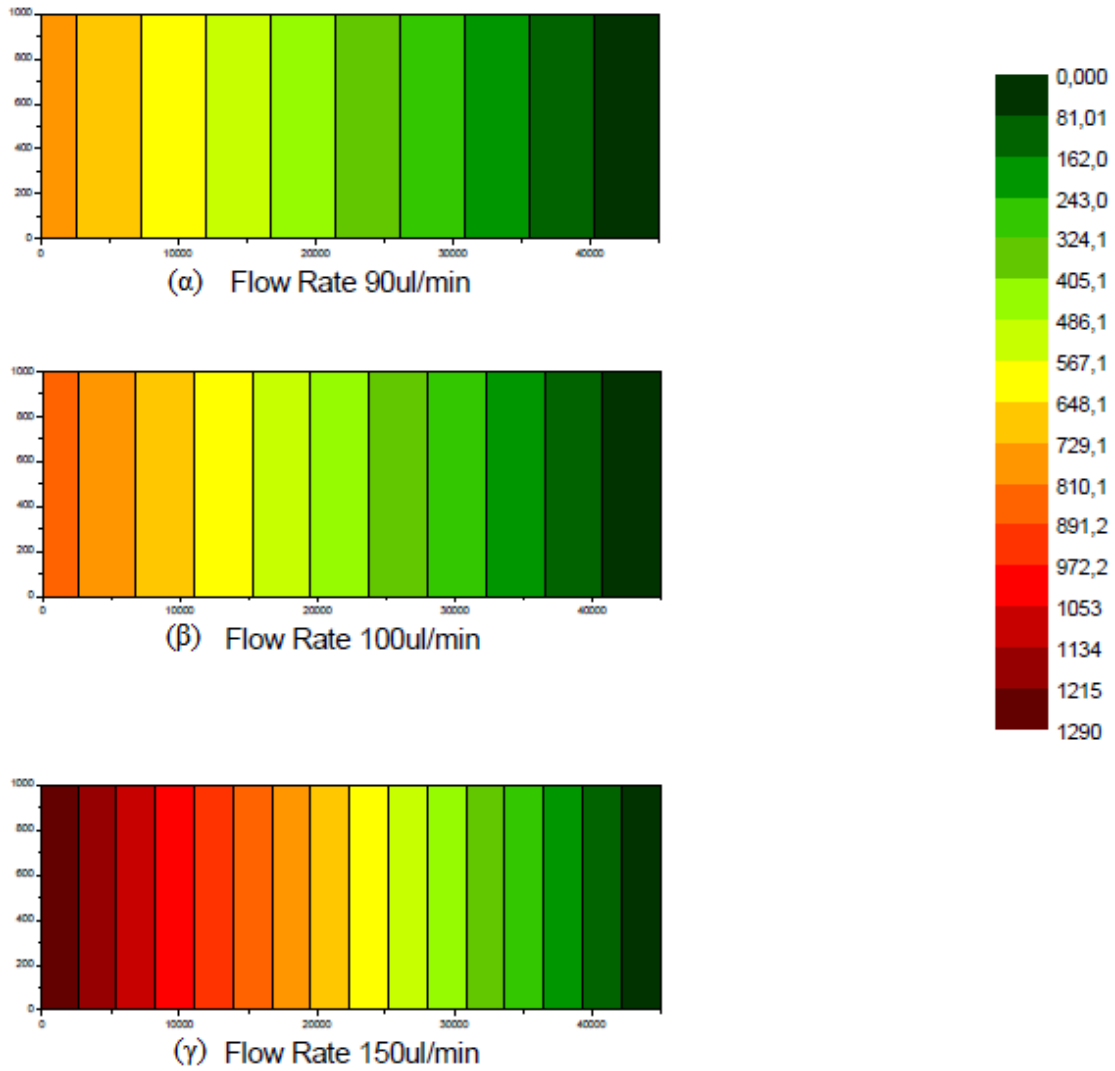
Εικόνα Α.4. Σχηματική αναπαράσταση της κάτοψης του μικροκαναλιού με τις πιέσεις που ασκούνται στην επάνω επιφάνεια του σε Pa, σύμφωνα με τη χρωματική κλίμακα στο πλάι, για ροές: (α) 50 μlit/min, (β) 60 μlit/min, (γ) 70 μlit/min.

X.K.II. (Pa)



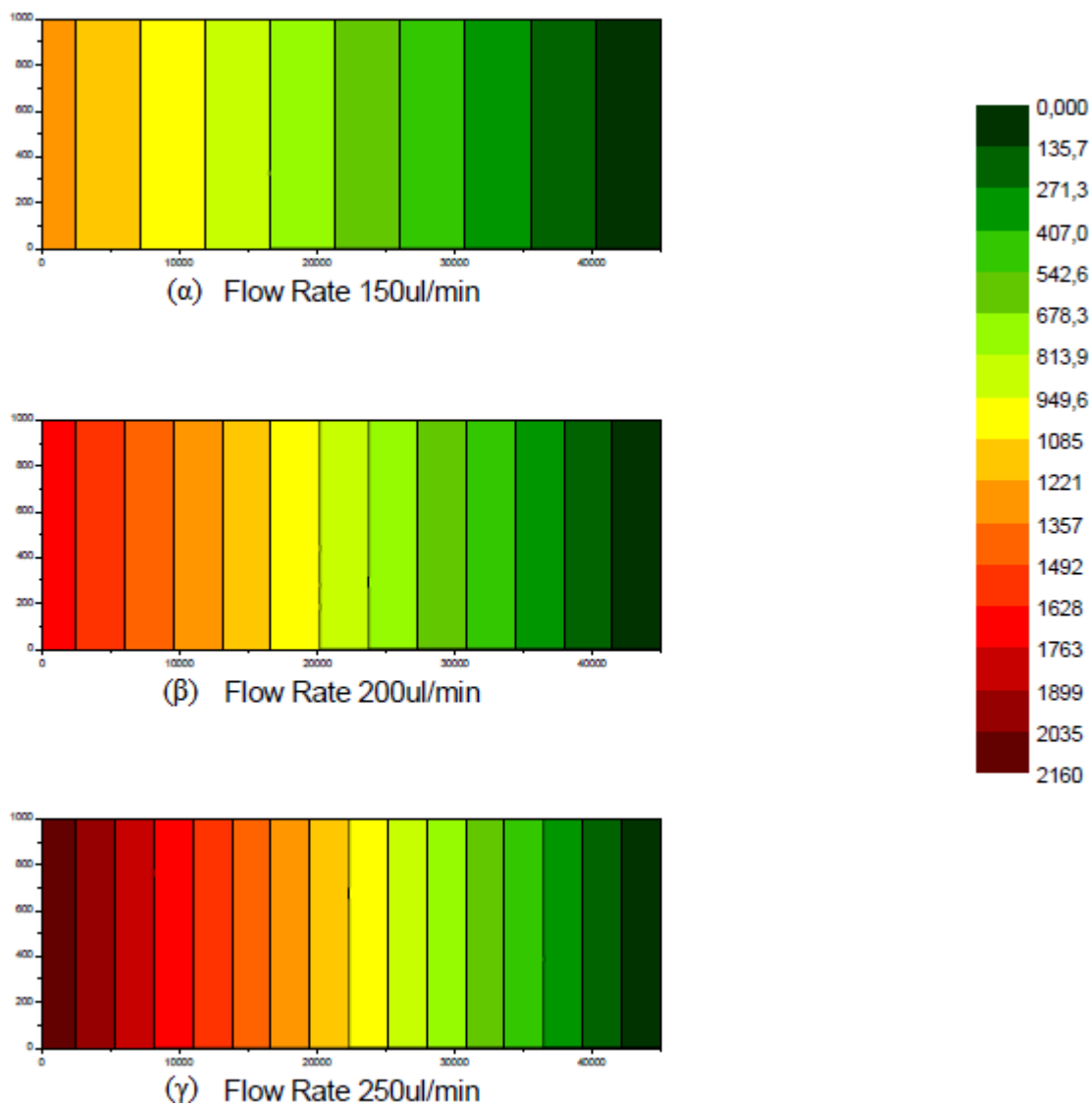
Εικόνα Α.5. Σχηματική αναπαράσταση της κάτοψης του μικροκαναλιού με τις πιέσεις που ασκούνται στην επάνω επιφάνεια του σε Pa, σύμφωνα με τη χρωματική κλίμακα στο πλάι, για ροές: (α) 70 $\mu\text{lit}/\text{min}$, (β) 80 $\mu\text{lit}/\text{min}$, (γ) 90 $\mu\text{lit}/\text{min}$.

X.K.Π. (Pa)



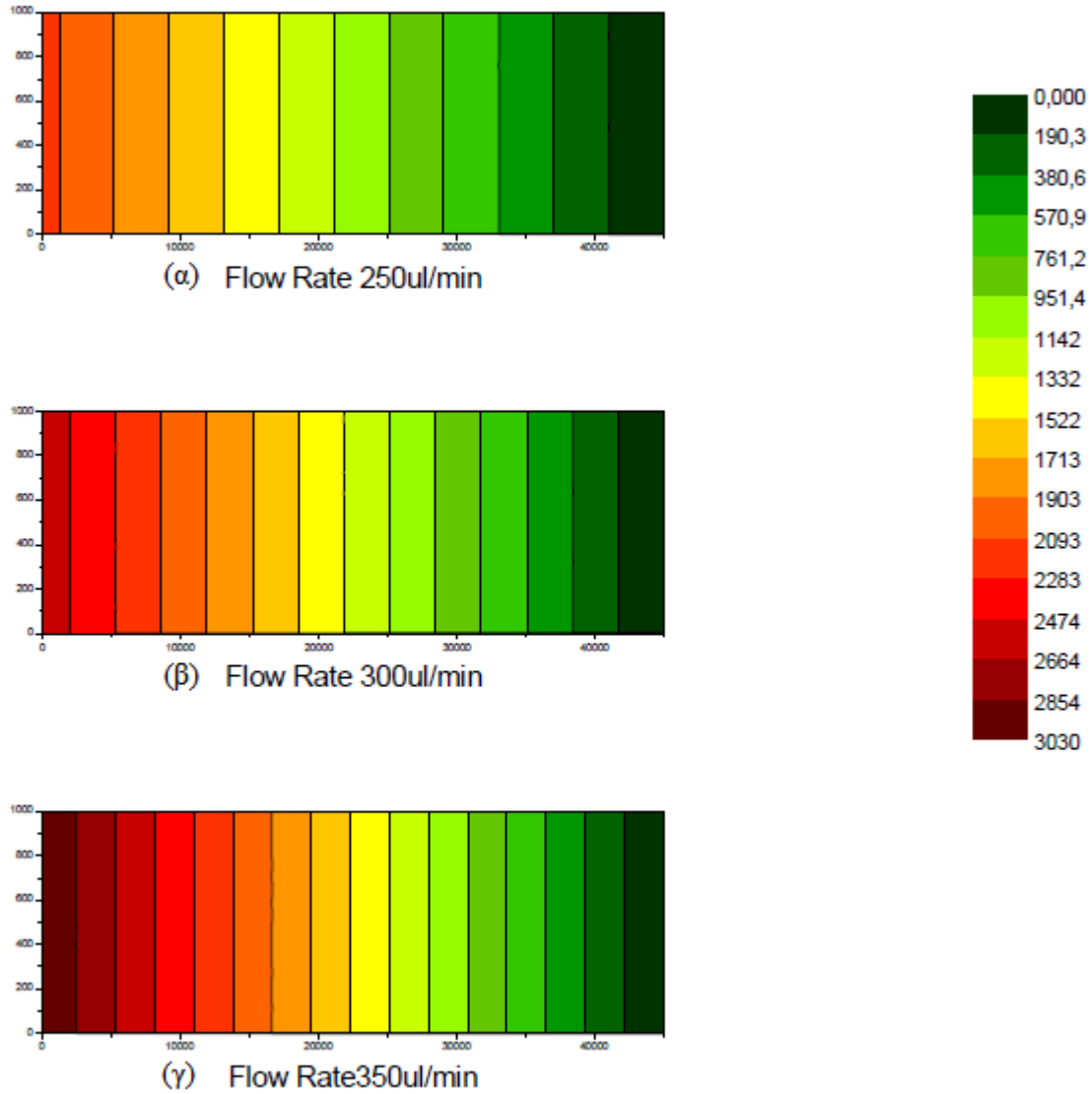
Εικόνα Α.6. Σχηματική αναπαράσταση της κάτοψης του μικροκαναλιού με τις πιέσεις που ασκούνται στην επάνω επιφάνεια του σε Pa, σύμφωνα με τη χρωματική κλίμακα στο πλάι, για ροές: (α) 90 $\mu\text{lit}/\text{min}$, (β) 100 $\mu\text{lit}/\text{min}$, (γ) 150 $\mu\text{lit}/\text{min}$.

X.K.II. (Pa)



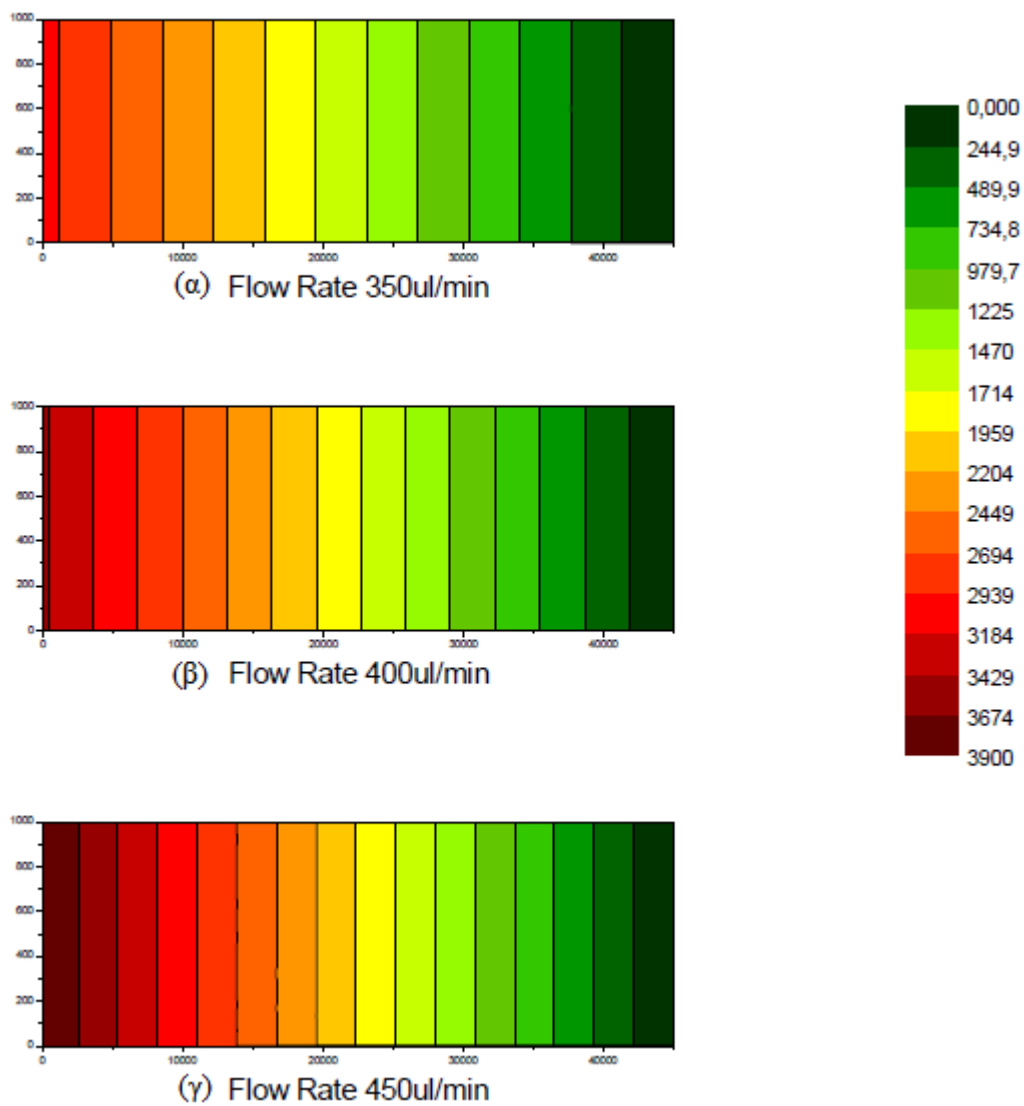
Εικόνα Α.7. Σχηματική αναπαράσταση της κάτοψης του μικροκαναλιού με τις πιέσεις που ασκούνται στην επάνω επιφάνεια του σε Pa, σύμφωνα με τη χρωματική κλίμακα στο πλάι, για ροές: (α) 150 μlit/min, (β) 200 μlit/min, (γ) 250 μlit/min.

X.K.II. (Pa)

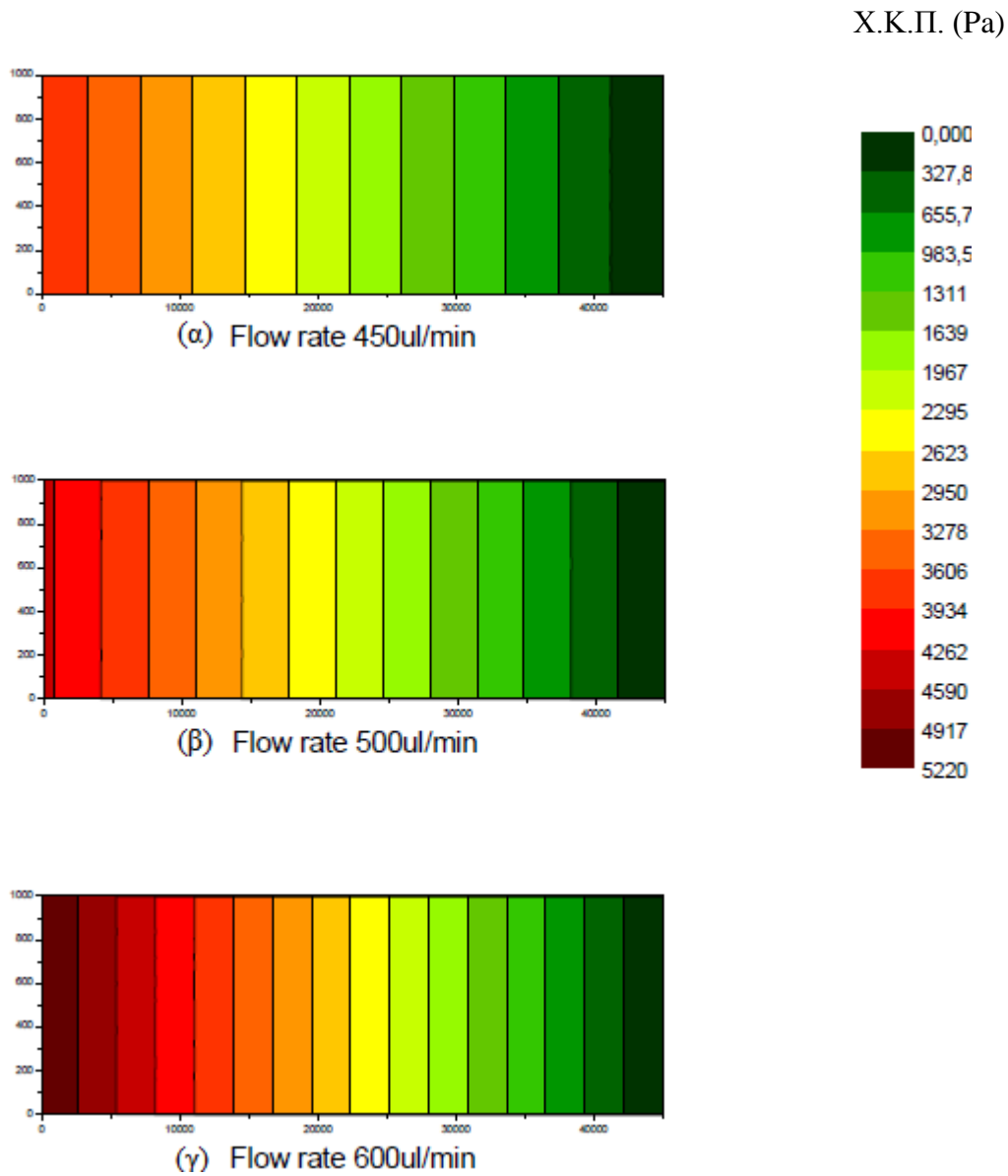


Εικόνα Α.8. Σχηματική αναπαράσταση της κάτοψης του μικροκαναλιού με τις πιέσεις που ασκούνται στην επάνω επιφάνεια του σε Pa, σύμφωνα με τη χρωματική κλίμακα στο πλάι, για ροές: (α) 250 $\mu\text{lit}/\text{min}$, (β) 300 $\mu\text{lit}/\text{min}$, (γ) 350 $\mu\text{lit}/\text{min}$.

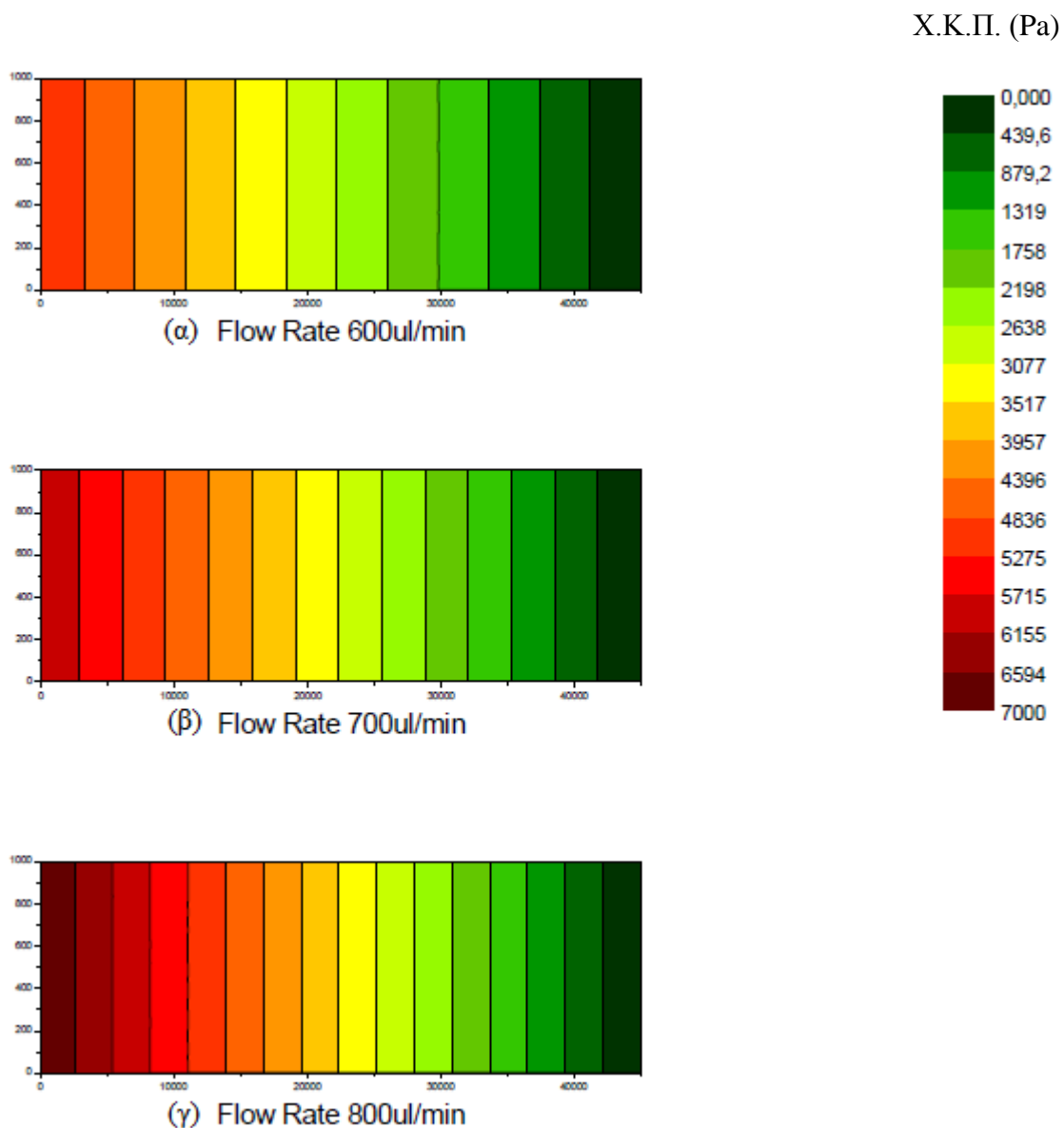
X.K.II. (Pa)



Εικόνα Α.9. Σχηματική αναπαράσταση της κάτοψης του μικροκαναλιού με τις πιέσεις που ασκούνται στην επάνω επιφάνεια του σε Pa, σύμφωνα με τη χρωματική κλίμακα στο πλάι, για ροές: (α) 350 $\mu\text{lit}/\text{min}$, (β) 400 $\mu\text{lit}/\text{min}$, (γ) 450 $\mu\text{lit}/\text{min}$.

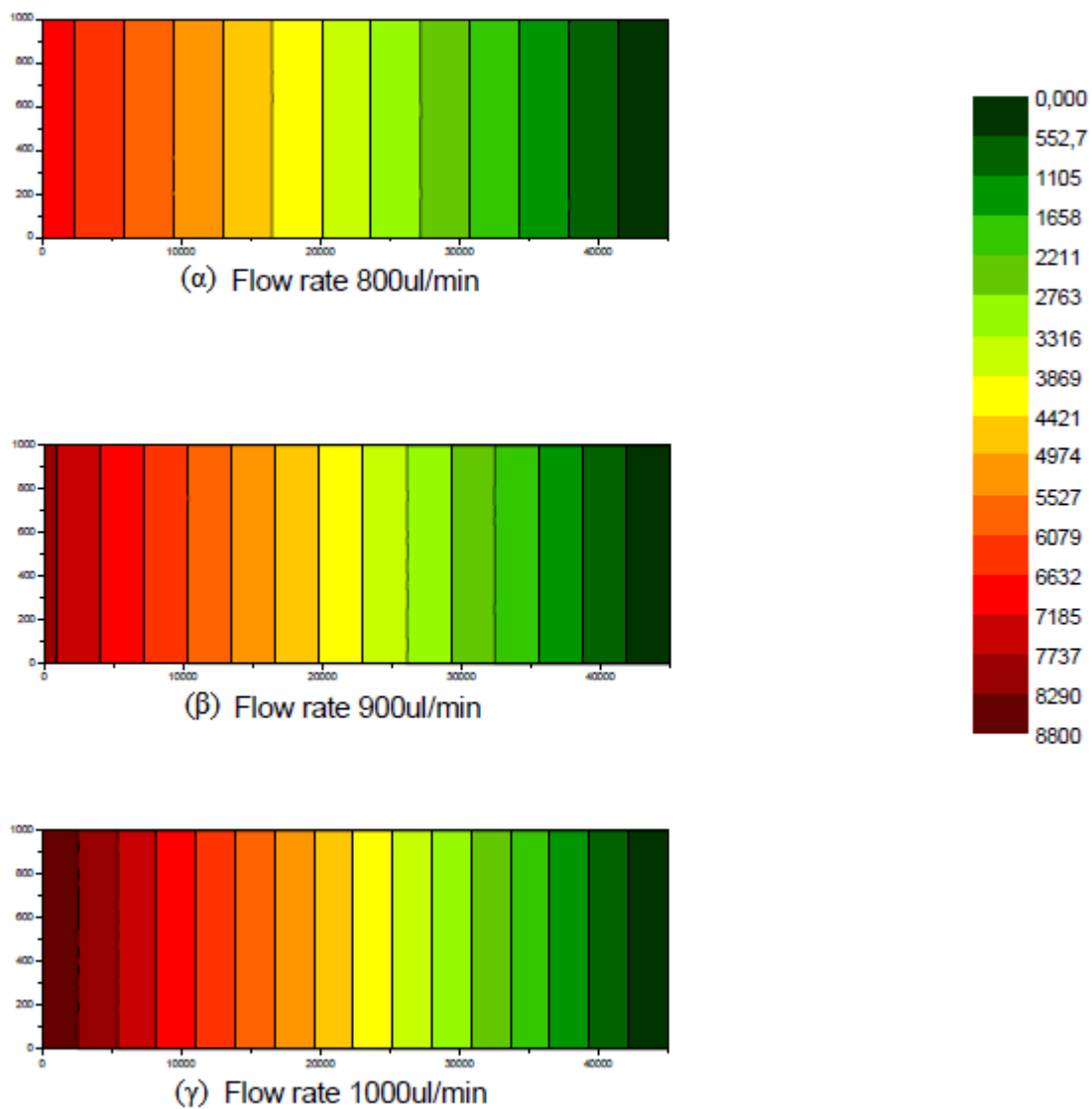


Εικόνα Α.10. Σχηματική αναπαράσταση της κάτοψης του μικροκαναλιού με τις πιέσεις που ασκούνται στην επάνω επιφάνεια του σε Pa, σύμφωνα με τη χρωματική κλίμακα στο πλάι, για ροές: (α) 450 $\mu\text{lit}/\text{min}$, (β) 500 $\mu\text{lit}/\text{min}$, (γ) 600 $\mu\text{lit}/\text{min}$.



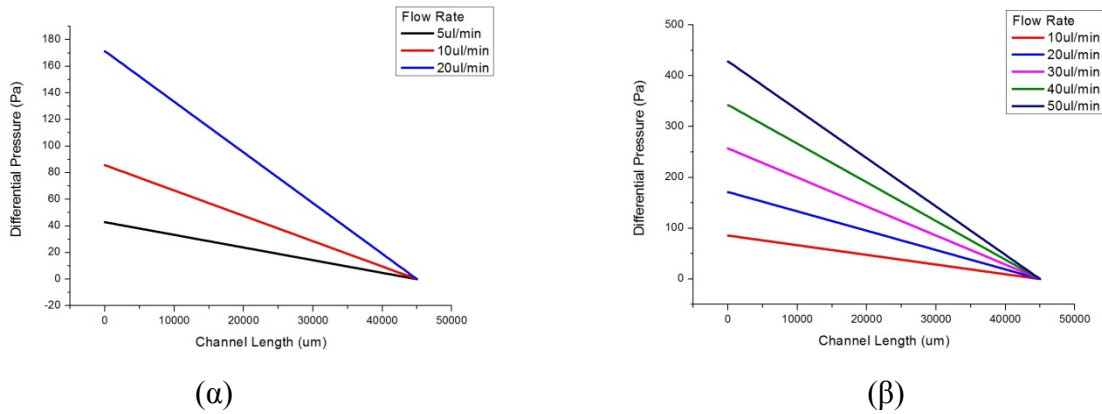
Εικόνα Α.11. Σχηματική αναπαράσταση της κάτοψης του μικροκαναλιού με τις πιέσεις που ασκούνται στην επάνω επιφάνεια του σε Pa, σύμφωνα με τη χρωματική κλίμακα στο πλάι, για ροές: (α) 600 $\mu\text{lit}/\text{min}$, (β) 700 $\mu\text{lit}/\text{min}$, (γ) 800 $\mu\text{lit}/\text{min}$.

X.K.II. (Pa)

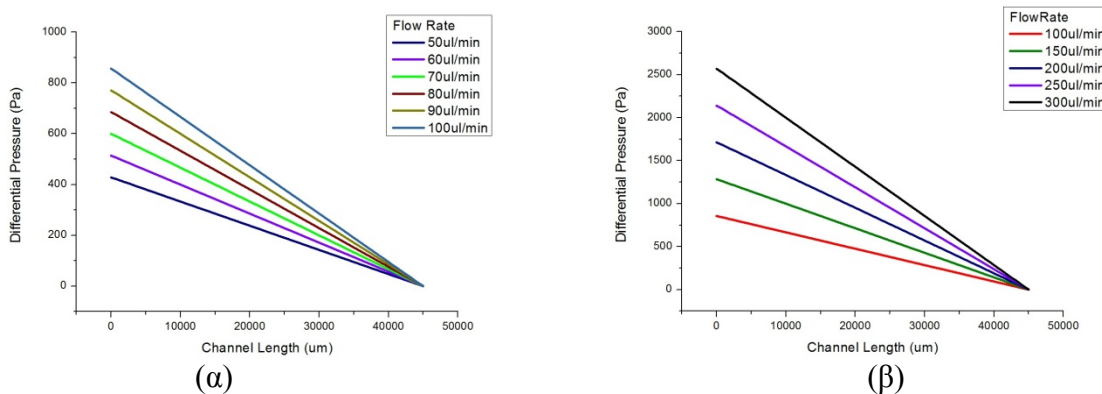


Εικόνα Α.12. Σχηματική αναπαράσταση της κάτοψης του μικροκαναλιού με τις πιέσεις που ασκούνται στην επάνω επιφάνεια του σε Pa, σύμφωνα με τη χρωματική κλίμακα στο πλάι, για ροές: (α) 800 $\mu\text{lit}/\text{min}$, (β) 900 $\mu\text{lit}/\text{min}$, (γ) 1000 $\mu\text{lit}/\text{min}$.

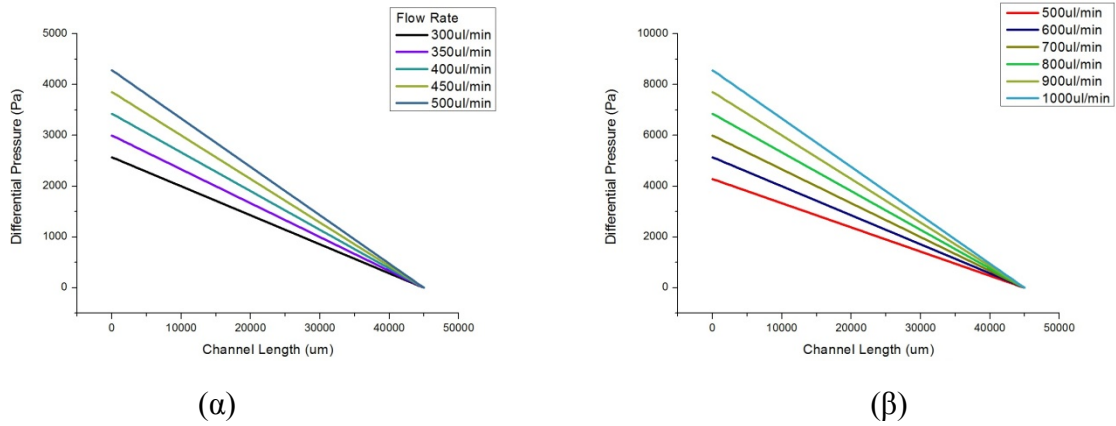
Μπορούμε να δούμε καλύτερα την πίεση που ασκείται στη μεμβράνη, σε όλο το μήκος του καναλιού, στα ακόλουθα συγκριτικά διδιάστατα διαγράμματα που αφορούν τα σημεία πάνω στο μέσο του καναλιού ($y=500\mu\text{m}$) για όλες τις τιμές ροής που έχουν δοκιμαστεί.



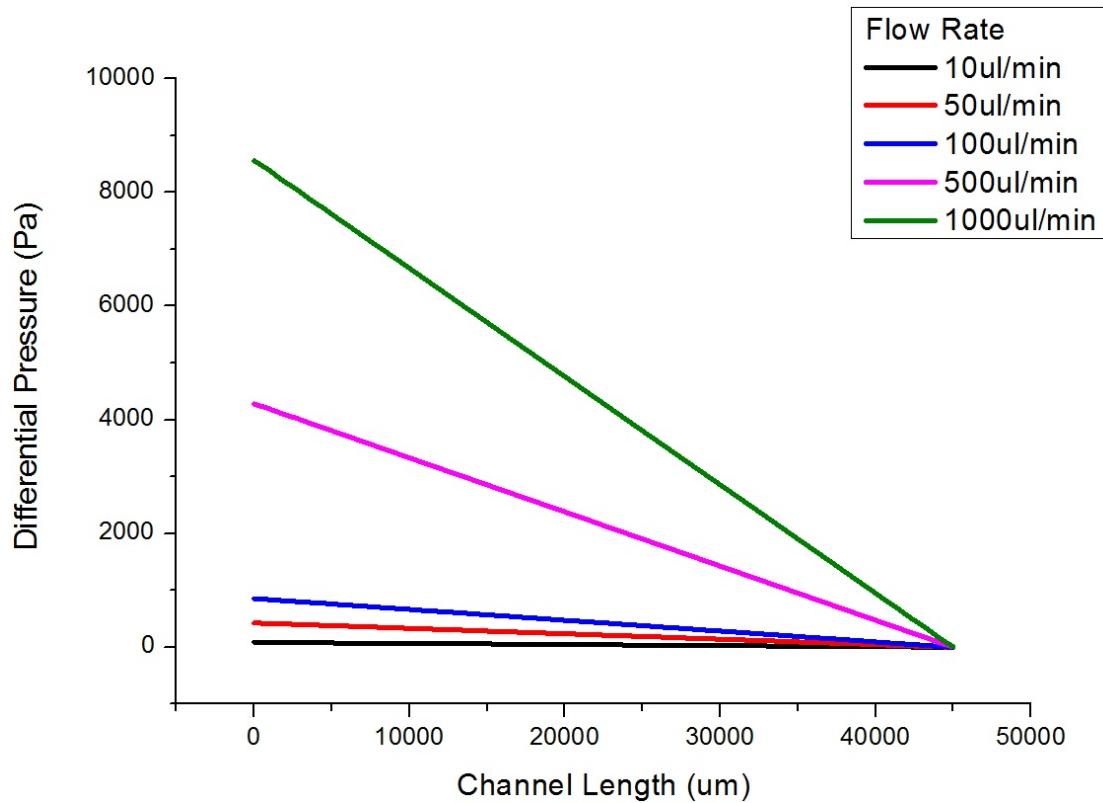
Εικόνα Α.13. Διαγράμματα πιέσεων που ασκούνται στη μεμβράνη του μικρορευστονικού καναλιού για τιμές ροής: (α) 5 – 10 – 20 $\mu\text{l}/\text{min}$, (β) 10 – 20 – 30 – 40 – 50 $\mu\text{l}/\text{min}$.



Εικόνα Α.14. Διαγράμματα πιέσεων που ασκούνται στη μεμβράνη του μικρορευστονικού καναλιού για τιμές ροής: (α) 50 – 60 – 70 – 80 – 90 – 100 $\mu\text{l}/\text{min}$, (β) 100 – 150 – 200 – 250 – 300 $\mu\text{l}/\text{min}$.



Εικόνα Α.15. Διαγράμματα πιέσεων που ασκούνται στη μεμβράνη του μικρορευστονικού καναλιού για τιμές ροής: (α) 300 – 350 – 400 – 450 – 500μl/min, (β) 500 – 600 – 700 – 800 – 900 – 1000μl/min.



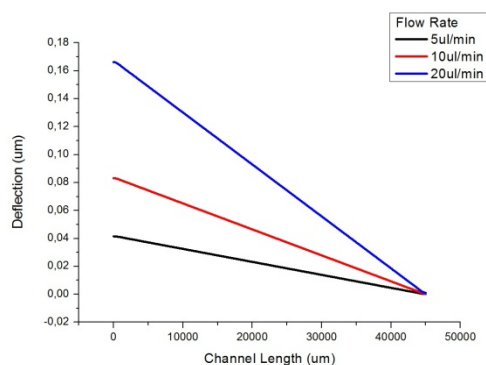
Εικόνα Α.16. Ενδεικτικό διάγραμμα πιέσεων που ασκούνται στη μεμβράνη του μικρορευστονικού καναλιού για τιμές ροής 10 – 50 – 100 – 500 – 1000μl/min.

Παράρτημα Β

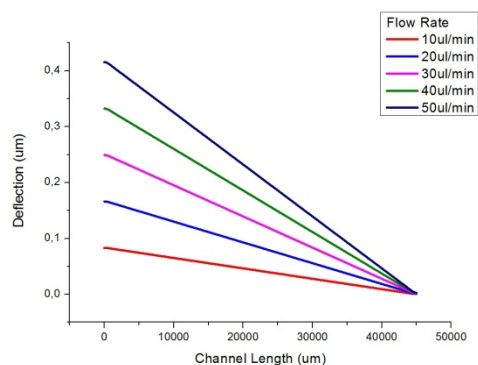
Προσομοιώσεις Παραμόρφωσης Μεμβράνης

Συνολικό Πάχος Μεμβράνης – κόλλας 60μm

Κάθετη Μετατόπιση (Deflection)

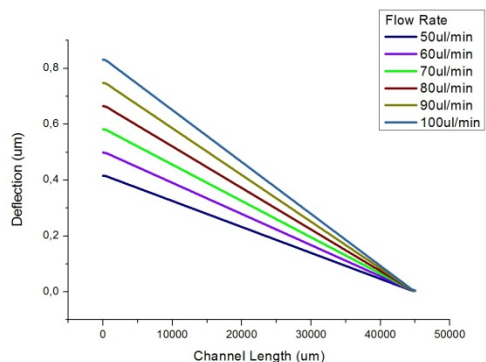


(α)

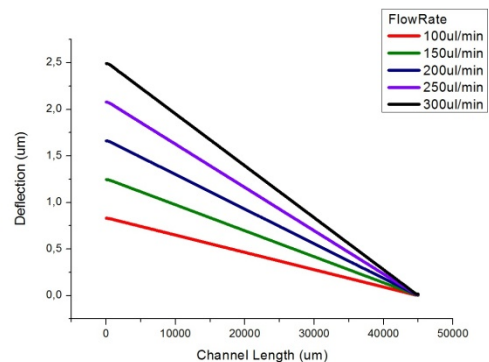


(β)

Εικόνα Β.1. Διαγράμματα κάθετης μετατόπισης της μεμβράνης για τιμές ροής: (α) 5 – 10 – 20 μl/min, (β) 10 – 20 – 30 – 40 – 50 μl/min.

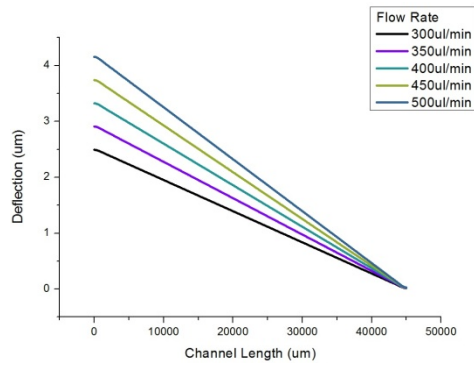


(α)

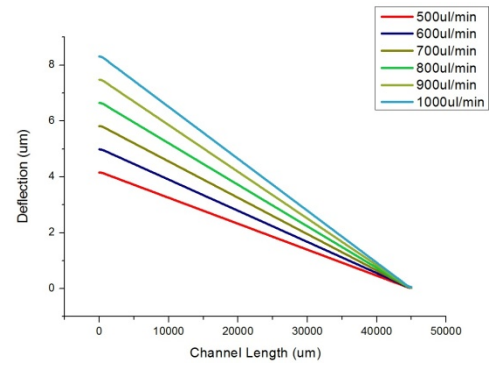


(β)

Εικόνα Β.2. Διαγράμματα κάθετης μετατόπισης της μεμβράνης για τιμές ροής: (α) 50 – 60 – 70 – 80 – 90 – 100 μl/min, (β) 100 – 150 – 200 – 250 – 300 μl/min.

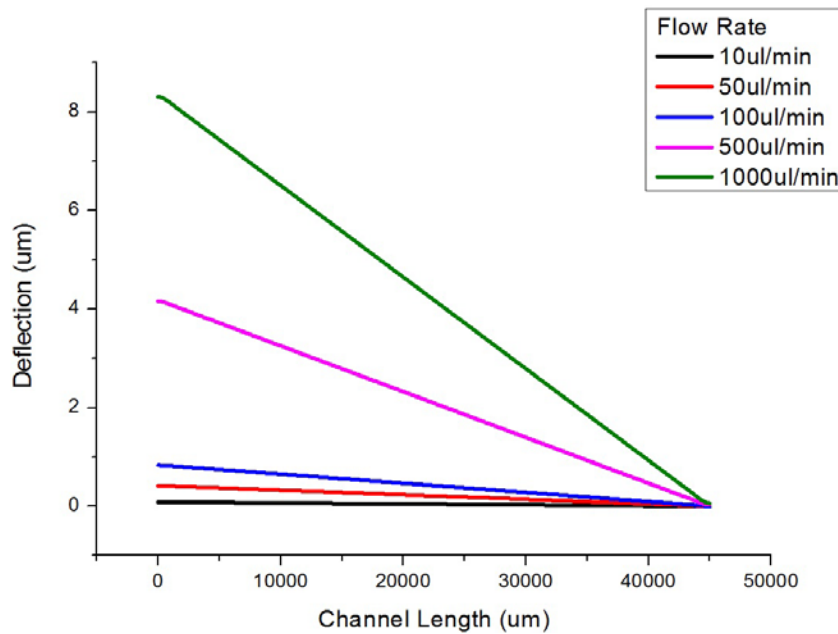


(α)



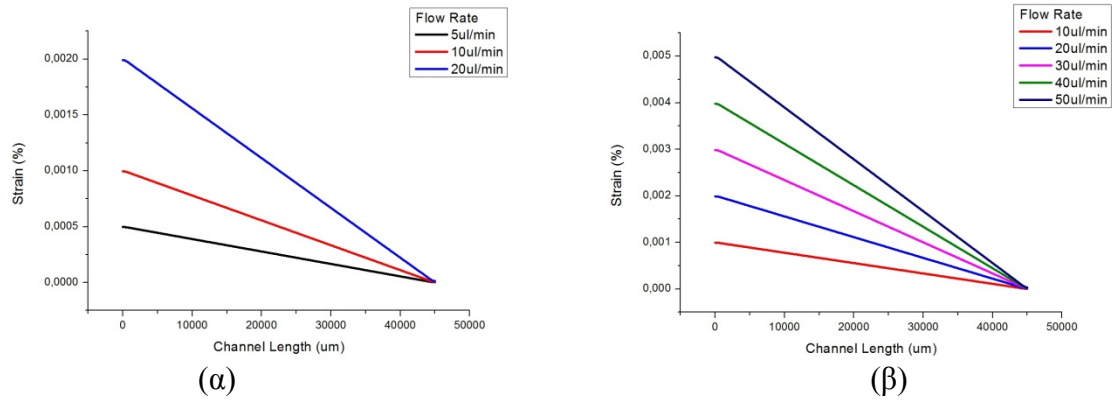
(β)

Εικόνα Β.3. Διαγράμματα κάθετης μετατόπισης της μεμβράνης για τιμές ροής: (α) 300 – 350 – 400 – 450 – 500 μl/min, (β) 500 – 600 – 700 – 800 – 900 – 1000 μl/min.

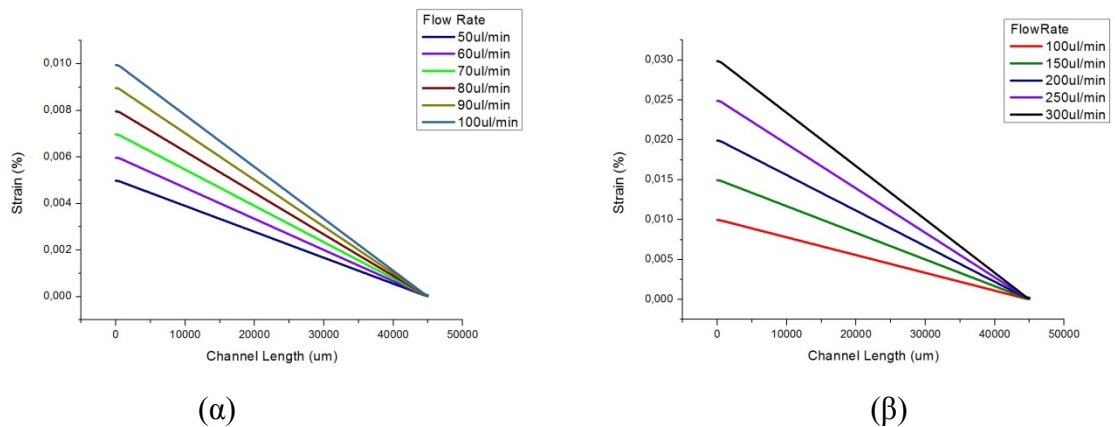


Εικόνα Β.4. Ενδεικτικό διάγραμμα κάθετης μετατόπισης της μεμβράνης για τιμές ροής 10 – 50 – 100 – 500 – 1000 μl/min.

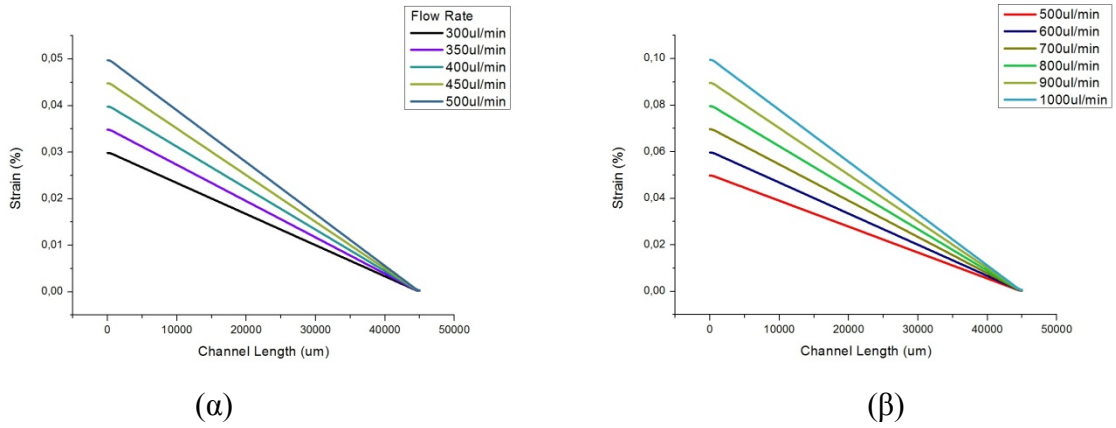
Παραμόρφωση (επί τοις εκατό – strain%)



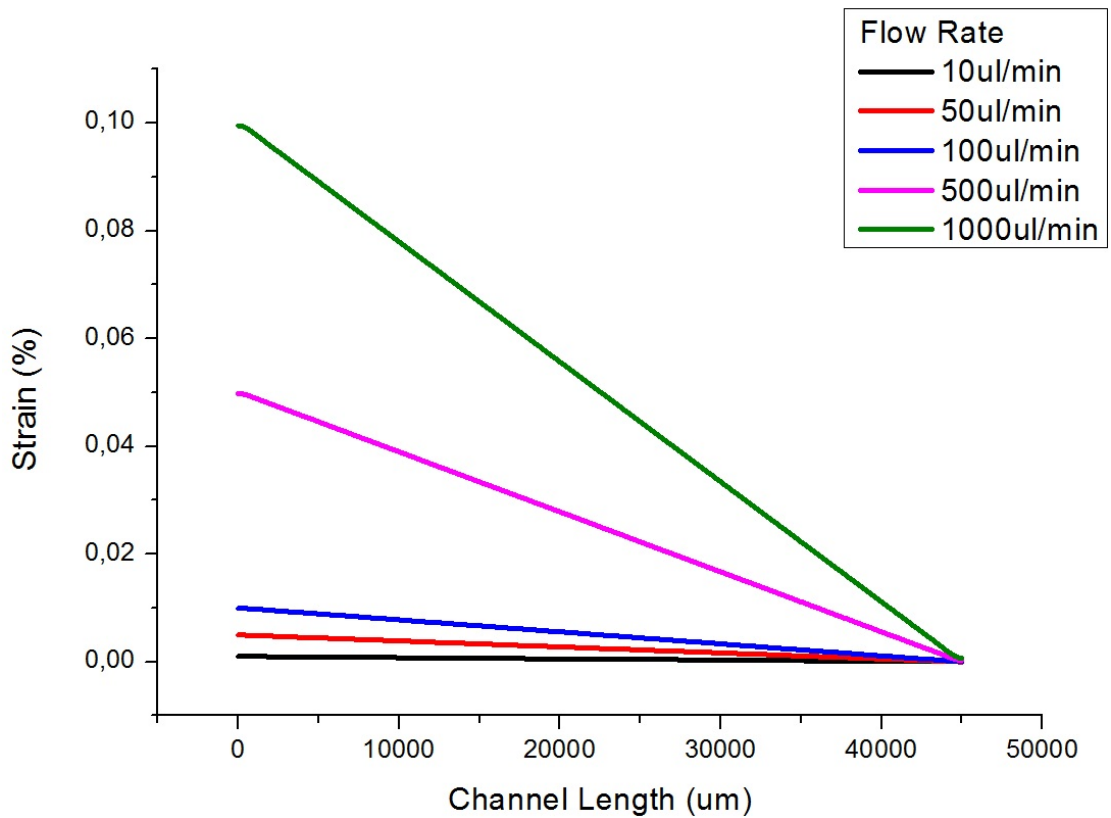
Εικόνα Β.5. Διαγράμματα ποσοστιαίας παραμόρφωσης της μεμβράνης για τιμές ροής: (α) 5 – 10 – 20μl/min, (β) 10 – 20 – 30 – 40 – 50μl/min.



Εικόνα Β.6. Διαγράμματα ποσοστιαίας παραμόρφωσης της μεμβράνης για τιμές ροής: (α) 50 – 60 – 70 – 80 – 90 – 100μl/min, (β) 100 – 150 – 200 – 250 – 300μl/min.



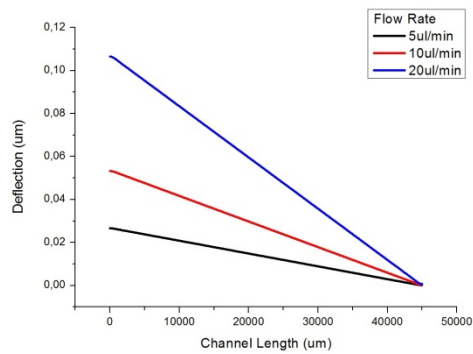
Εικόνα Β.7. Διαγράμματα ποσοστιαίας παραμόρφωσης της μεμβράνης για τιμές ροής: (α) 300 – 350 – 400 – 450 – 500μl/min, (β) 500 – 600 – 700 – 800 – 900 – 1000μl/min.



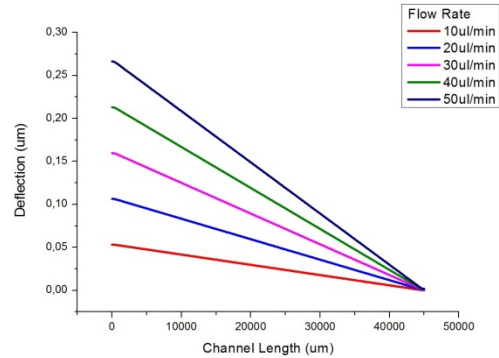
Εικόνα Β.8. Ενδεικτικό διάγραμμα ποσοστιαίας παραμόρφωσης της μεμβράνης για τιμές ροής 10 – 50 – 100 – 500 – 1000μl/min.

Συνολικό Πάχος Μεμβράνης – κόλλας 70μm

Κάθετη Μετατόπιση (Deflection)

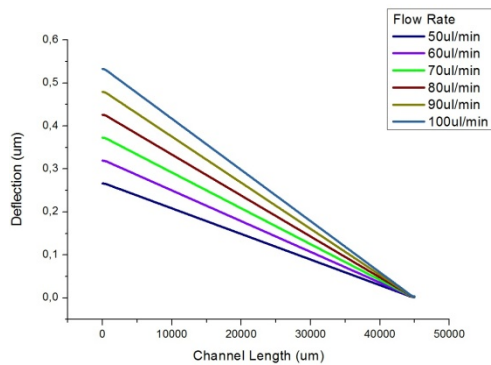


(α)

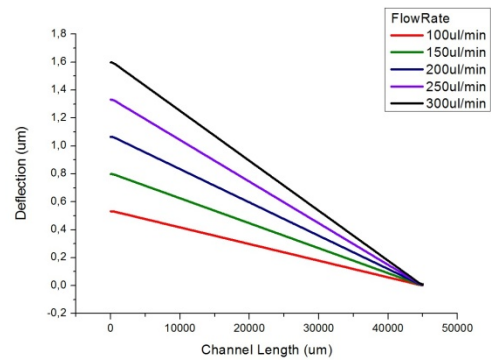


(β)

Εικόνα Β.9. Διαγράμματα κάθετης μετατόπισης της μεμβράνης για τιμές ροής: (α) 5 – 10 – 20 μl/min, (β) 10 – 20 – 30 – 40 – 50 μl/min.

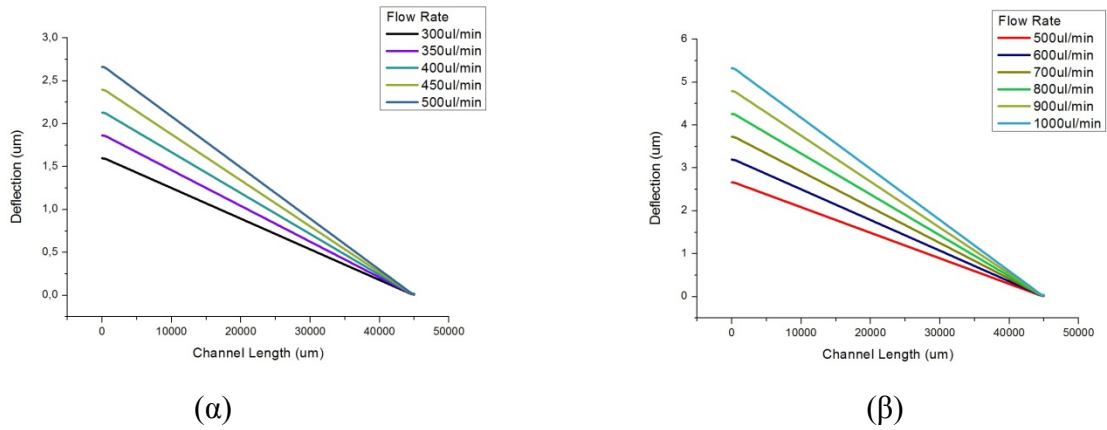


(α)

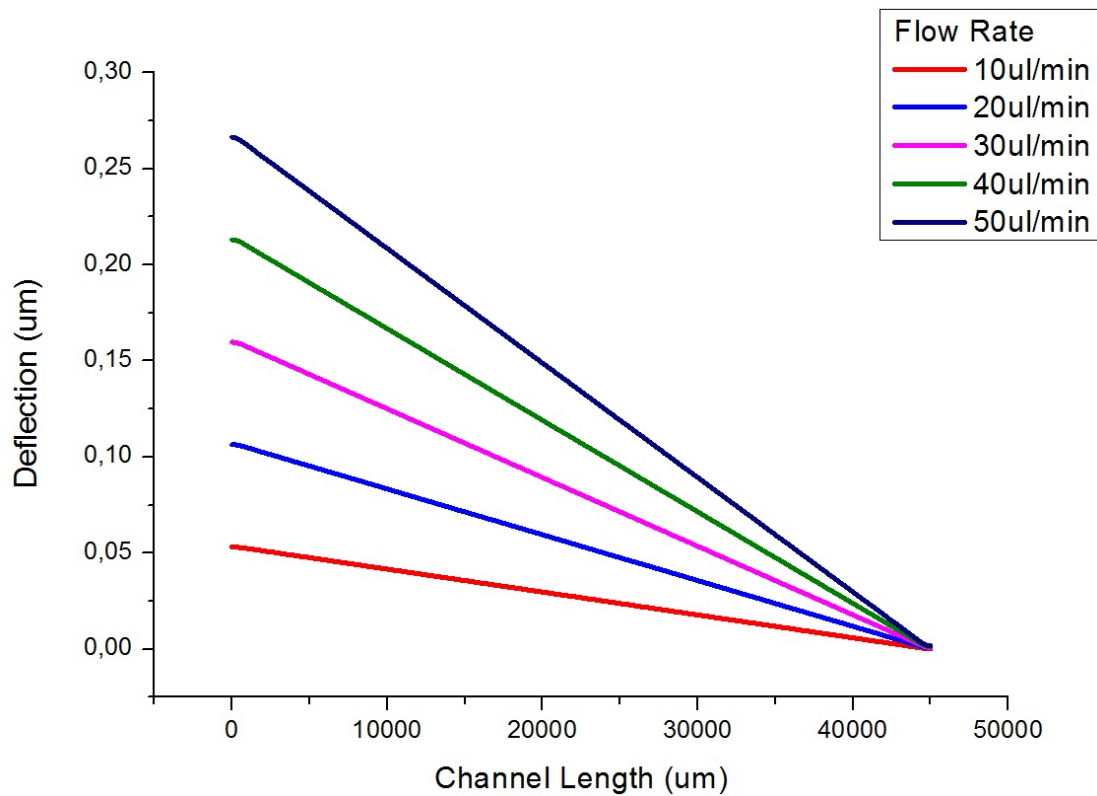


(β)

Εικόνα Β.10. Διαγράμματα κάθετης μετατόπισης της μεμβράνης για τιμές ροής: (α) 50 – 60 – 70 – 80 – 90 – 100 μl/min, (β) 100 – 150 – 200 – 250 – 300 μl/min.

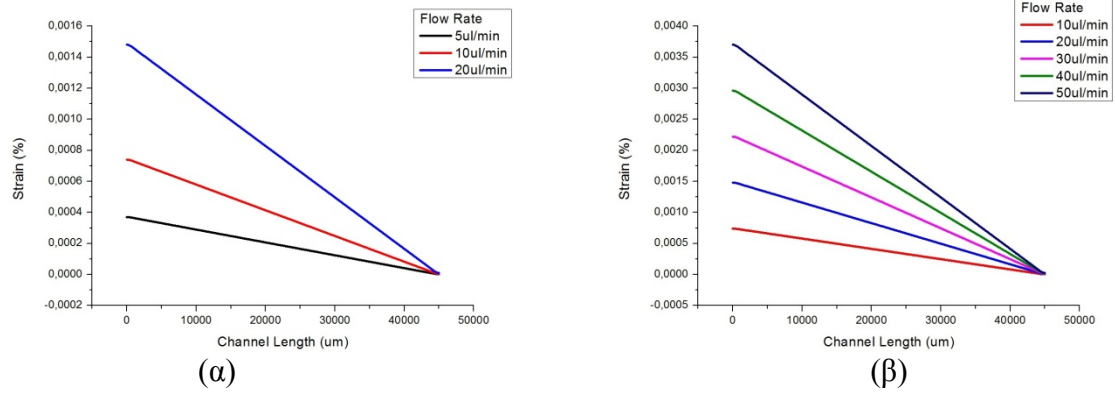


Εικόνα Β.11. Διαγράμματα κάθετης μετατόπισης της μεμβράνης για τιμές ροής: (α) 300 – 350 – 400 – 450 – 500μl/min, (β) 500 – 600 – 700 – 800 – 900 – 1000μl/min.

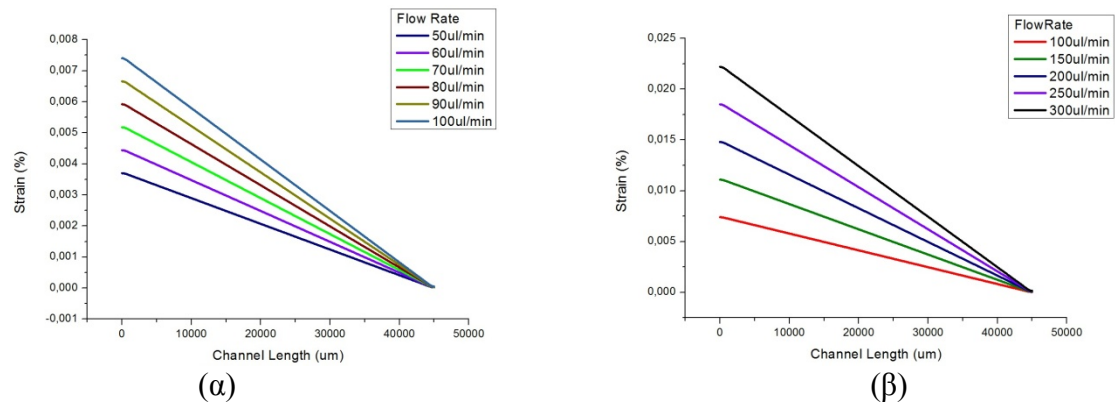


Εικόνα Β.12. Ενδεικτικό διάγραμμα κάθετης μετατόπισης της μεμβράνης για τιμές ροής 10 – 50 – 100 – 500 – 1000μl/min.

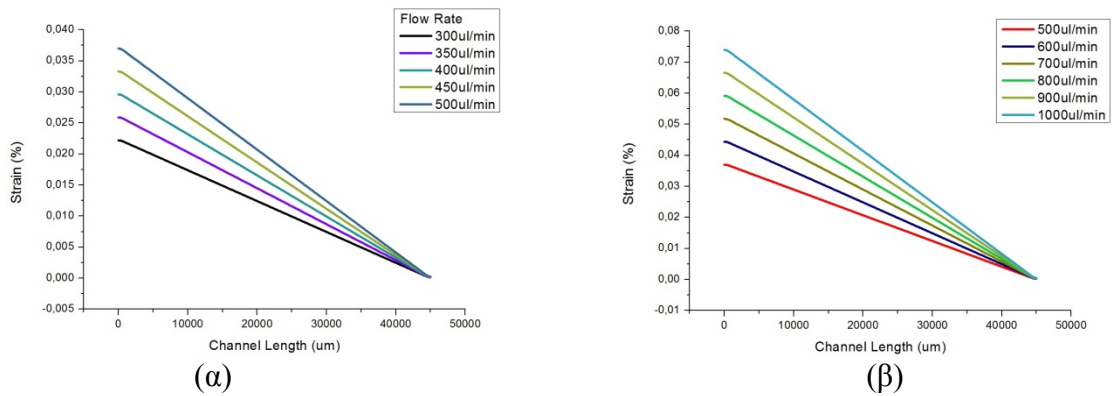
Παραμόρφωση (επί τοις εκατό – strain%)



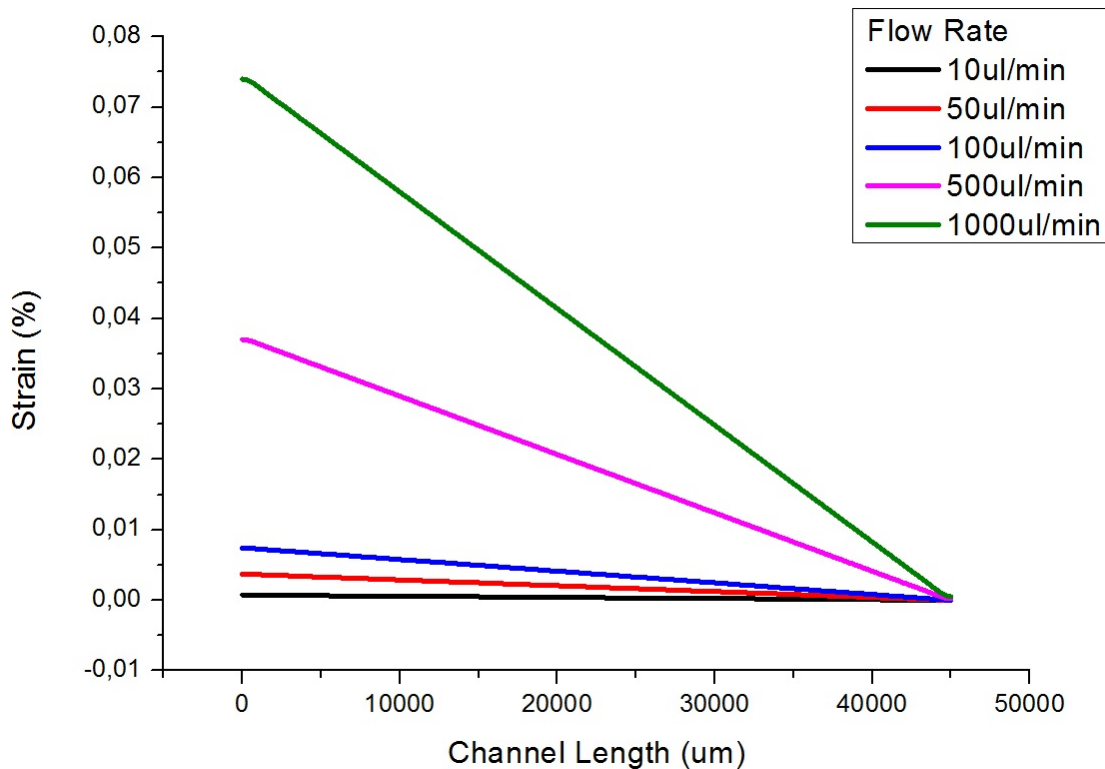
Εικόνα Β.13. Διαγράμματα ποσοστιαίας παραμόρφωσης της μεμβράνης για τιμές ροής: (α) 5 – 10 – 20μl/min, (β) 10 – 20 – 30 – 40 – 50μl/min.



Εικόνα Β.14. Διαγράμματα ποσοστιαίας παραμόρφωσης της μεμβράνης για τιμές ροής: (α) 50 – 60 – 70 – 80 – 90 – 100μl/min, (β) 100 – 150 – 200 – 250 – 300μl/min.



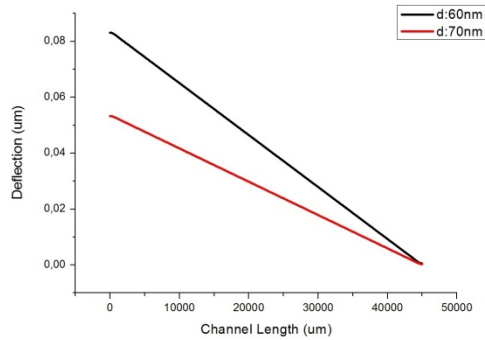
Εικόνα Β.15. Διαγράμματα ποσοστιαίας παραμόρφωσης της μεμβράνης για τιμές ροής: (α) 300 – 350 – 400 – 450 – 500μl/min, (β) 500 – 600 – 700 – 800 – 900 – 1000μl/min.



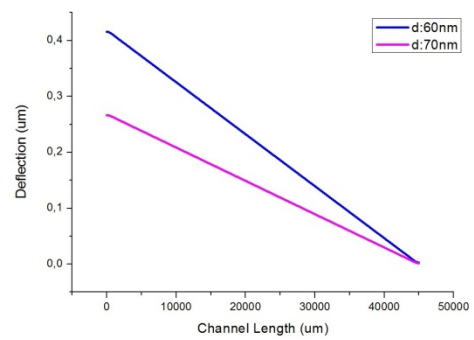
Εικόνα Β.16. Ενδεικτικό διάγραμμα ποσοστιαίας παραμόρφωσης της μεμβράνης για τιμές ροής 10 – 50 – 100 – 500 – 1000μl/min.

Συγκριτικά διαγράμματα για πάχη 60 και 70 μm

Ροές 10 και 100 $\mu\text{l}/\text{min}$

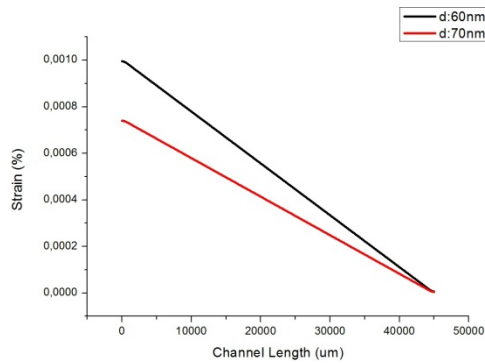


(α)

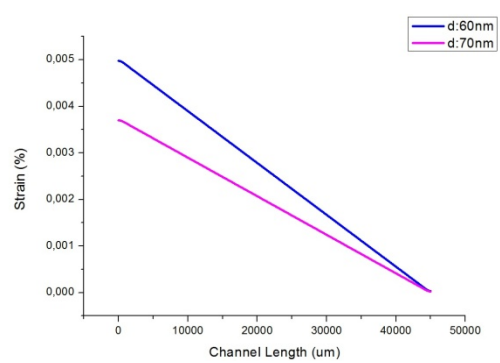


(β)

Εικόνα Β.17. Διαγράμματα κάθετης μετατόπισης της μεμβράνης με πάχος 60 και 70 μm για ροές: (α) 10 $\mu\text{l}/\text{min}$, (β) 50 $\mu\text{l}/\text{min}$.



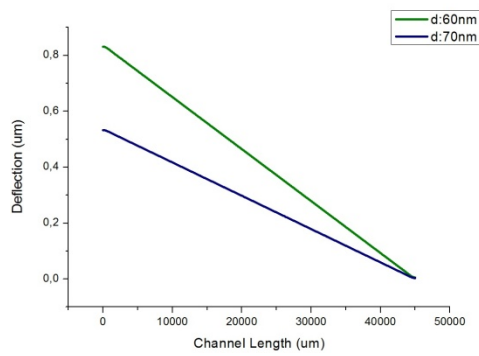
(α)



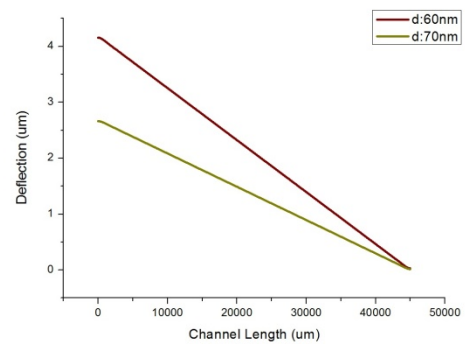
(β)

Εικόνα Β.18. Διαγράμματα ποσοστιαίας παραμόρφωσης της μεμβράνης με πάχος 60 και 70 μm για ροές: (α) 10 $\mu\text{l}/\text{min}$, (β) 50 $\mu\text{l}/\text{min}$.

Ροές 100 και 500 $\mu\text{l}/\text{min}$

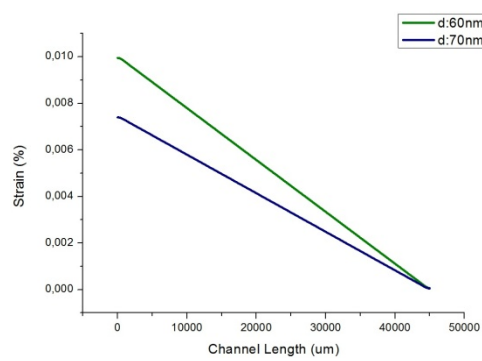


(α)

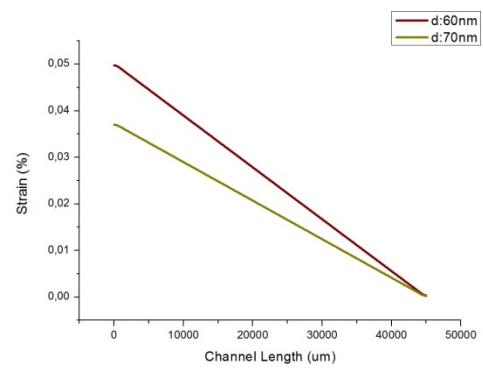


(β)

Εικόνα Β.19. Διαγράμματα κάθετης μετατόπισης της μεμβράνης με πάχος 60 και 70 μm για ροές: (α) 100 $\mu\text{l}/\text{min}$, (β) 500 $\mu\text{l}/\text{min}$.



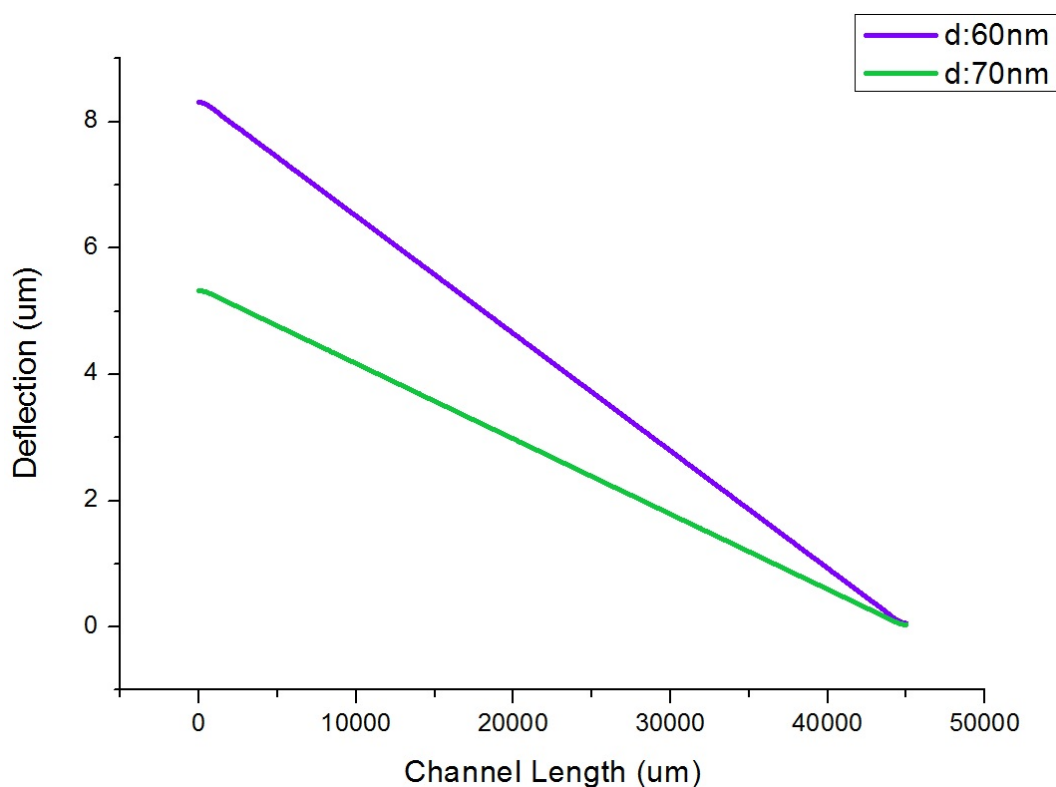
α)



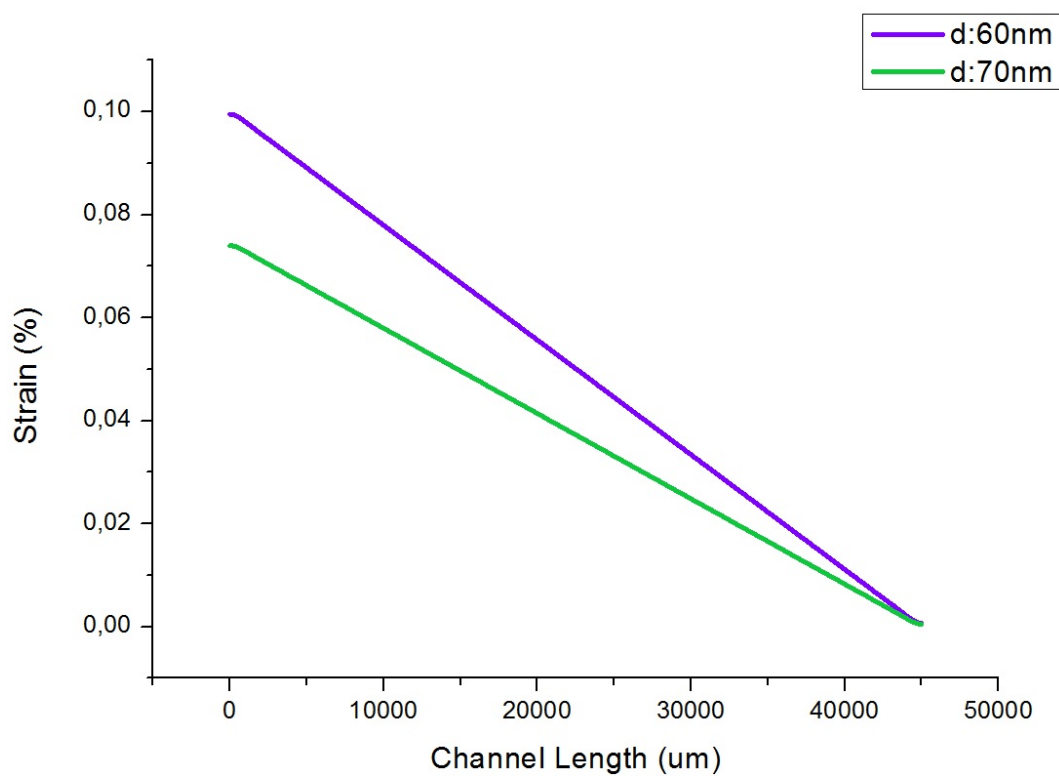
(β)

Εικόνα Β.20. Διαγράμματα ποσοστιαίας παραμόρφωσης της μεμβράνης με πάχος 60 και 70 μm για ροές: (α) 100 $\mu\text{l}/\text{min}$, (β) 500 $\mu\text{l}/\text{min}$.

1000μl/min



Εικόνα Β.21. Διάγραμμα κάθετης μετατόπισης της μεμβράνης με πάχος 60 και 70 μm για ροή 100μl/min.



Εικόνα Β.22. Διάγραμμα ποσοστιαίας παραμόρφωσης της μεμβράνης με πάχος 60 και 70 μm για ροή 1000μl/min.

