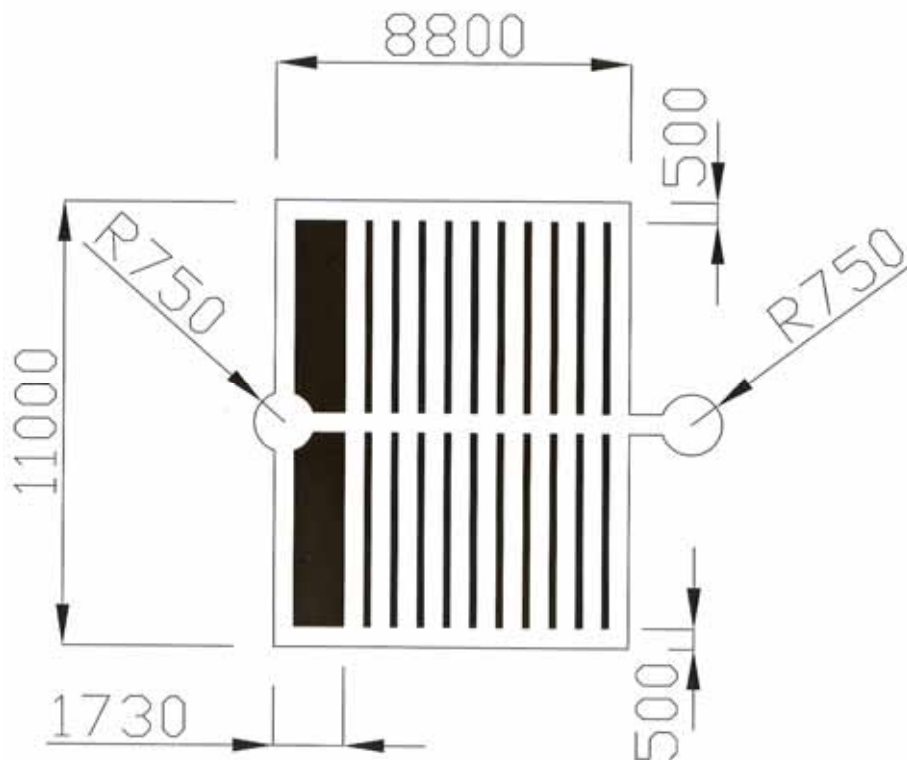




**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΑΕΡΙΟΥ ΣΕ**  
**ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΜΙΚΡΟΑΓΩΓΩΝ**



**ΚΑΠΕΤΑΝΑΚΗΣ ΓΙΩΡΓΟΣ**  
**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΜΑΘΙΟΥΛΑΚΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ**  
**ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

**ΑΘΗΝΑ**  
**2008**

**« Ο Έρωτας, η εργασία και η γνώση είναι οι αστείρευτες πηγές της  
ζωής. Αυτές που πρέπει να την κυβερνούν »**  
BILALHEAM PAIX

Η παρούσα εργασία αφιερώνεται στους γονείς μου,  
τον Γιάννη και την Μαρία.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη .....	4
Abstract.....	5
Εισαγωγή.....	6

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ Α : ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ

A.1 Μοριακά μεγέθη.....	7
A.2 Ο αριθμός Knudsen.....	8
A.3 Οι περιοχές της ροής.....	9
A.4 Πειραματική θεμελίωση.....	10
A.5 Δυναμική ομοιότητα.....	13
A.6 Συστήματα μεικτής ροής	
A.7 Η συνάρτηση κατανομής.....	14
A.8 Κινηματικές εξισώσεις και μέθοδοι επίλυσης τους.....	17
A.8.1 Αριθμητική επίλυση της εξίσωσης Boltzmann.....	18
A.8.2 Η μέθοδος άμεσης προσομοίωσης Monte Carlo (DSMC)....	20
A.9 Συναφείς εργασίες	
A.9.1 Παλαιότερες.....	22
A.9.2 Πιο σύγχρονες.....	23

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ Β : Η ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

B.1 Η « φιλοσοφία ».....	37
B.2 Η μορφή της διάταξης.....	38

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ Γ : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Γ.1 Αναλυτική παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων.....	46
Γ.2 Συγκεντρωτικά και συγκριτικά αποτελέσματα.....	83
Γ.3 Συμπεράσματα.....	96

### ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

#### Παράρτημα 1<sup>ο</sup> : Το Αργό ( Ar )

1.1 Η ιστορία.....	98
1.2 Τα χαρακτηριστικά	
1.3 Ύπαρξη – Ανίχνευση	
1.4 Εφαρμογές.....	99
1.5 Οι χημικές του ενώσεις.....	100
1.6 Επιδράσεις στην υγεία	
1.7 Επιδράσεις στο περιβάλλον	

**Παράρτημα 2<sup>ο</sup> : Ανισοτροπική εγχάραξη δομών πυριτίου με πλάσμα φθορανθράκων**

2.1 Εισαγωγή στο πλάσμα.....	101
2.2 Μικρομηχανική πυριτίου.....	103
2.3 Λιθογραφία.....	105
2.4 Εγχάραξη.....	106
2.5 Περιγραφή της διεργασίας Bosch.....	109

**Παράρτημα 3<sup>ο</sup> : Αντλίες κενού**

3.1 Γενικά.....	111
3.2 Βασικές κατηγορίες	
3.3 Αρχές λειτουργίας	
3.4 Μερικές αντλίες κενού του 19 <sup>ου</sup> αιώνα.....	112
3.5 Τύποι αντλιών.....	113
3.5.1 Μηχανικές αντλίες	
3.5.2 Αντλίες με ατμούς.....	116
3.5.3 Αντλίες ρόφησης.....	118
3.5.4 Κρυαντλίες.....	119

**Παράρτημα 4<sup>ο</sup> : Αισθητήρες κενού**

4.1 Γενικά.....	120
4.2 Τύποι αισθητήρων κενού	
4.2.1 Μηχανικά μανόμετρα	
4.2.2 Μανόμετρα με υγρό.....	122
4.2.3 Μανόμετρα ιξώδους.....	123
4.2.4 Μανόμετρα θερμικής αγωγιμότητας	
4.2.5 Μανόμετρα με ιονισμό.....	125
4.2.6 Μανόμετρα με ραδιενεργό πηγή.....	127

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....**128

## **Περίληψη:**

### **« Πειραματική μελέτη της ροής αερίου σε διατάξεις μικροαγωγών »**

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μια πειραματική διερεύνηση της ροής αραιωμένου ρευστού. Το αέριο που χρησιμοποιούμε είναι το Αργό, η ροή του οποίου γίνεται σε μια κατάλληλα διαμορφωμένη διάταξη ώστε οι μετρούμενες τιμές πίεσης να είναι ιδιαίτερα χαμηλές (της τάξης των mbars). Πιο συγκεκριμένα, οι μικροαγωγοί έχουν χαρακτηί σε τρεις διαφορετικές πλάκες πυριτίου, με τη μέθοδο της λιθογραφίας. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν το πλάτος των καναλιών (από 250 μέχρι 500μm), ο αριθμός των καναλιών (από 22 μέχρι 36) και η διαφορά πίεσης μεταξύ των μεταλλικών δεξαμενών (στην είσοδο και την έξοδο των αγωγών). Σε όλες τις περιπτώσεις το βάθος των αγωγών παρέμεινε σταθερό στα 30 μm και το μήκος τους στα 4750 μm. Οι μακροσκοπικές ιδιότητες της ροής (η παροχή μάζας και η μέση ταχύτητα της ροής) υπολογίζονται από τις μετρήσεις που λαμβάνονται από τους αισθητήρες πίεσης και θερμοκρασίας. Κατόπιν, οι υπολογισμένες αυτές ποσότητες συγκρίνονται με τα αποτελέσματα που δίνουν κάποια αναλυτικά μοντέλα προσομοίωσης της ροής.

## **Abstract:**

### **« Experimental flow study of rarefied gases in microtubes »**

An experimental investigation of rarefied gaseous flow is presented in this study. Argon is the gas that was used in an appropriate experimental setup, so as low absolute pressures were obtained (of the order of a few mbars), within a number of microtubes. More specifically, the microtubes were etched on three different silicon pieces using lithography. The examined parameters were the width of the tubes (250 to 500  $\mu\text{m}$ ), the number of the tubes (22 up to 36) and the pressure difference between two metallic tanks (at the inlet and exit of the tubes, respectively). For all cases the depth of the tubes was fixed and equal to 30 $\mu\text{m}$  and their length 4750 $\mu\text{m}$ . The macroscopic quantities of the flow (mass flow rate and mean flow speed) were calculated from the pressure measurements of the two tanks and their temperature. Finally, these quantities were compared with the results that an analytical slip-flow model provided.

## Εισαγωγή

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών υπήρξε ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τους μηχανισμούς μικρορευστομηχανικής, σε διάφορα ερευνητικά πεδία όπως στην κατασκευή επιστημονικών οργάνων (αισθητήρες ροής), σε ιατρικές εφαρμογές κ.α. Παρά το γεγονός ότι σύνθετα μικροσυστήματα έχουν ήδη κατασκευαστεί, οι βασικές αρχές της ρευστομηχανικής δεν είναι πλήρως κατανοητές.

Ροές σε μικροσκοπική κλίμακα φαίνεται ότι δεν υπακούουν στις θεωρίες που ισχύουν για τις αντίστοιχες σε μακροσκοπική κλίμακα. Για παράδειγμα, το χαρακτηριστικό μήκος μικροαγωγών είναι τάξης μεγέθους μικρών, ενώ η μέση ελεύθερη διαδρομή των μορίων του αέρα είναι περίπου 70nm σε ατμοσφαιρικές συνθήκες. Σε αυτή την περίπτωση, η συνοριακή συνθήκη μη ολίσθησης που χρησιμοποιείται ευρέως στη ρευστομηχανική μακροσκοπικής κλίμακας, δεν έχει ισχύ στις διεπιφάνειες ρευστού-στερεού.

Η συμπιεστότητα είναι ένα επιπλέον χαρακτηριστικό των ροών μέσα σε μικροαγωγούς. Σε μακροσκοπική κλίμακα, μπορούμε να καθορίσουμε μονοσήμαντα, αν η συνεχής ροή είναι συμπιεστή ή ασυμπιέστη. Αν ο τοπικός αριθμός Mach είναι μικρότερος από 0,3 τότε η ροή μπορεί να θεωρηθεί ασυμπιέστη, καθώς οι μεταβολές της πίεσης συνδέονται, κατά βάση, με την ταχύτητα της ροής και τις αδρανειακές δυνάμεις. Παρόλα αυτά, το κριτήριο αυτό αποτελεί μόνο αναγκαία συνθήκη για την μη συμπιεστότητα. Ιδιαίτερα στους μικροαγωγούς, ο αριθμός Mach μπορεί να είναι πολύ μικρότερος του 0,3, ενώ η ροή να παρουσιάζει συμπεριφορά συμπιεστής.

Παρότι έχουν δημοσιευτεί διάφορες προσομοιώσεις και πειράματα σε μικροαγωγούς, υπάρχουν μόνο λίγες αναφορές για τη διανομή της πίεσης κατά μήκος του αγωγού, λόγω έλλειψης μετρητικών οργάνων υψηλής ακρίβειας. Για το λόγο αυτό, τα περισσότερα πειραματικά δεδομένα περιορίζονται στην μέτρηση πίεσης εισόδου/εξόδου και της παροχής, παρόλο που η διανομή πίεσης κατά μήκος του αγωγού είναι η σημαντικότερη πληροφορία για την κατανόηση του μηχανισμού της ροής σε μικροσκοπική κλίμακα.

Η παρούσα εργασία χωρίζεται σε τρία κύρια μέρη:

**Στο πρώτο** παρατίθενται συνοπτικά κάποια στοιχεία θεωρίας, προκειμένου να οριστούν και να γίνουν κατανοητές βασικές έννοιες και μέθοδοι που θα χρησιμοποιηθούν παρακάτω.

**Στο δεύτερο** παρουσιάζεται με λεπτομέρειες η δομή της πειραματικής διάταξης και τα συστατικά της μέρη.

**Στο τρίτο** παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα του κάθε πειράματος και κατόπιν συγκρίνονται με τη σχετική θεωρία, προκειμένου να βγούν τα κατάλληλα συμπεράσματα.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ Α: Στοιχεία Θεωρίας

## A.1 Μοριακά μεγέθη

Το γεγονός ότι ο όγκος που καταλαμβάνουν τα μόρια ενός mol αερίου σε δοσμένες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης καθώς και ο αριθμός τους, γνωστος ως αριθμός **Avogadro**  $6.02252 \cdot 10^{23}$  είναι σταθεροι και ανεξάρτητοι από τη σύνθεση του αερίου, μας οδηγεί στο νόμο του ιδανικού αερίου:

$$P = n \cdot k_B \cdot T \quad (\text{A.1})$$

όπου  $P$  είναι η πίεση,  $T$  η θερμοκρασία,  $n$  η αριθμητική πυκνότητα (σε πίεση ατμοσφαιρική και θερμοκρασία  $0^\circ\text{C}$ ,  $n=2.69 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}$ ) και  $k_B$  η σταθερά Boltzmann ( $k_B=1.3805 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ ).

Gas	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Dynamic Viscosity [kg/(ms)]	Thermal Con- ductivity [W/(mK)]	Thermal Diffusivity [m <sup>2</sup> /s]	Specific Heat [J/(kgK)]	Mean Free Path [m]
Air	1.293	1.85E-5	0.0261	2.01E-5	1004.5	6.111E-8
N2	1.251	1.80E-5	0.0260	2.00E-5	1038.3	6.044E-8
CO2	1.965	1.50E-5	0.0166	1.00E-5	845.7	4.019E-8
O2	1.429	2.07E-5	0.0267	2.04E-5	916.9	6.503E-8
He	0.179	1.99E-5	0.150	1.60E-4	5233.5	17.651E-8
Argon	1.783	2.29E-5	0.0177	1.93E-5	515.0	6.441E-8

σχήμα 1: θερμοφυσικές ιδιότητες τυπικών αερίων που χρησιμοποιούνται σε μικρο-εφαρμογές, για ατμοσφαιρικές συνθήκες (298K και 1atm)

Υποθέτοντας πως όλα τα μόρια είναι κατανομημένα ομοιόμορφα, μπορούμε να ορίσουμε μια **μέση μοριακή απόσταση**  $\delta$  ως:

$$\delta \propto n^{-1/3} \quad (\text{A.2})$$

με  $\delta=3.3 \cdot 10^{-9} \text{ m}$  για κανονικές συνθήκες.

Η **μέση μοριακή διάμετρος**  $d$  για τα τυπικά αέρια, βασισμένη στον μετρημένο συντελεστή τριβής και τη θεωρία των Chapman-Enskog για μόρια σφαιρικού σχήματος, είναι της τάξεως των  $10^{-10} \text{ m}$ . Για τον αέρα σε κανονικές συνθήκες είναι  $d=3.7 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ .

Συγκρίνοντας τη μέση μοριακή απόσταση  $\delta$  και τη μέση μοριακή διάμετρο  $d$ , παρατηρούμε ότι η μέση μοριακή απόσταση είναι μια τάξη με μεγέθους μεγαλύτερη



από την μέση μοριακή διάμετρο. Αυτό μας οδηγεί στην υπόθεση του αραιού αερίου, όπου  $d/d \gg 1$ . Στο αραιό αέριο, οι διμοριακές συγκρούσεις είναι συνηθέστερες των ταυτόχρονων πολλαπλών συγκρούσεων μεταξύ μορίων, φαινόμενο πολύ συχνότερο στα συνεκτικά αέρια. Μέσω αυτών των συγκρούσεων συντελείται μεταφορά ορμής και ενέργειας, μέχρι να επιτευχθεί η θερμοδυναμική ισορροπία. Γι' αυτό οι χρονικές και χωρικές κλίμακες που σχετίζονται με αυτές τις διαμοριακές συγκρούσεις, αποτελούν σημαντικές παραμέτρους για πολλές εφαρμογές σ' αυτό το πεδίο.

Η απόσταση που διανύεται από ένα μόριο μεταξύ δυο διαδοχικών συγκρούσεων, ορίζεται ως **μέση ελεύθερη διαδρομή**  $\lambda$  και η τιμή της δίδεται από τη σχέση :

$$\lambda = (2^{1/2} \cdot \pi \cdot d^2 \cdot n)^{-1} \quad (\text{A.3})$$

Για τον αέρα σε κανονικές συνθήκες είναι  $\lambda = 6.5 \cdot 10^{-8} \text{ m}$ .

Η ταχύτητα με την οποία κινούνται τα μόρια του αερίου είναι ανάλογη με την ταχύτητα του ήχου. Ως **μέση τετραγωνική μοριακή ταχύτητα** ορίζεται :

$$\bar{c} = \sqrt{\frac{3 \cdot P}{\rho}} = \sqrt{3 \cdot R \cdot T} \quad (\text{A.4})$$

όπου R η ειδική σταθερά του αερίου.

Για τον αέρα υπό κανονικές συνθήκες η μέση τετραγωνική μοριακή ταχύτητα υπολογίζεται σε 486m/s, τιμή τέσσερις ή πέντε τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από τις συνήθεις ταχύτητες της ροής σε μικροκλίμακες.

Όσον αφορά την χρονική κλίμακα, μπορούμε να υπολογίσουμε μια μέση τιμή, ως λόγο της μέσης ελεύθερης διαδρομής  $\lambda$  προς τη μέση τετραγωνική μοριακή ταχύτητα  $c$ . Για τον αέρα σε κανονικές συνθήκες υπολογίζεται σε  $t_c = 10^{-10} \text{ sec}$ .

## A.2 Ο αριθμός knudsen

Διάφορες μοριακές αλληλεπιδράσεις είναι σημαντικό στις τεχνολογικές εφαρμογές να συνοψίζονται σε μακροσκοπικές ιδιότητες βασισμένες στο σενάριο του συνεχούς μέσου, όπως η πυκνότητα, η θερμοκρασία, η ταχύτητα. Είναι επίσης σημαντικό να προσδιορίζονται, κάθε φορά, και τα όρια της αξιοπιστίας αυτής της υπόθεσης. Απλούστερα, προκύπτουν τα παρακάτω ερωτήματα :

1. πόσο πρέπει να είναι το μέγεθος του δείγματος, ώστε να μπορούν να προσδιοριστούν σε αυτό τέτοιες μακροσκοπικές ιδιότητες ;
2. σε ποιά κλίμακα οι στατιστικές διακυμάνσεις θα καθίστανται σημαντικές;

Προκύπτει ότι σε ένα δείγμα που περιέχει 10000 μόρια μπορούν να προσδιοριστούν οι μέσες τιμές των μακροσκοπικών ιδιοτήτων με στατιστικό σφάλμα 1%. Για τον αέρα υπό κανονικές συνθήκες, το ελάχιστο δείγμα που θα έδινε αποτελέσματα με τη δεδομένη ακρίβεια θα είχε όγκο περίπου  $3.7 \cdot 10^{-22} \text{ m}^3$ .

Μια αδιάστατη παράμετρος «κλειδί» για τις μικρο-ροές αερίων είναι ο **αριθμός Knudsen** και ορίζεται ως ο λόγος της μέσης ελεύθερης διαδρομής προς την χαρακτηριστική διάσταση της γεωμετρίας, την διάσταση δηλαδή κατά την οποία

μπορούν να συντελεσθούν μεγάλες διακυμάνσεις των μακροσκοπικών ιδιοτήτων. Ο αριθμός Knudsen σχετίζεται με τους αριθμούς Reynolds και Mach ως εξής :

$$Kn \equiv \frac{\lambda}{L} = \sqrt{\frac{\gamma \cdot \pi}{2}} \cdot \frac{M}{Re} \quad (A.5)$$

Οι τιμές των μακροσκοπικών μεγεθών για ροές με  $Kn > 1$ , είναι δύσκολο να προσδιοριστούν σε σύνθετες γεωμετρίες, που εκτείνονται και στις τρεις διαστάσεις του χώρου, Παρόλα αυτά, καταμήκος μικροκαναλιών με μεγάλη αναλογία πλάτους προς ύψος (aspect ratio), μπορεί να χαραχθεί το προφίλ ταχύτητας και από αυτό να υπολογιστούν οι αντίστοιχες μακροσκοπικές ποσότητες.

### A.3 Οι περιοχές της ροής

Καθώς ο αριθμός Knudsen αυξάνει, τα φαινόμενα αραιοποίησης γίνονται σημαντικότερα και μεγέθη όπως η πτώση πίεσης, η διατμητικές τάσεις, η θερμική συναγωγή και η παροχή μάζας, δεν είναι δυνατόν να προβλεφθούν από τα μοντέλα μεταφοράς μάζας και θερμότητας που βασίζονται πάνω στην υπόθεση του συνεχούς μέσου. Απ' την άλλη, τα υπολογιστικά μοντέλα που βασίζονται στην κινητική θεωρία των αερίων, είναι κατάλληλα μόνο για ροές με πολύ υψηλό αριθμό Knudsen, που αντιστοιχούν σχεδόν σε συνθήκες κενού.

Το μοντέλο που περιγράφει κάθε φορά με καταλληλότερο τρόπο τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας και θερμότητας, εξαρτάται από το μέγεθος του αριθμού Knudsen. Μια οριοθέτηση των διαφορετικών περιοχών της ροής, μπορεί να γίνει ως εξής :

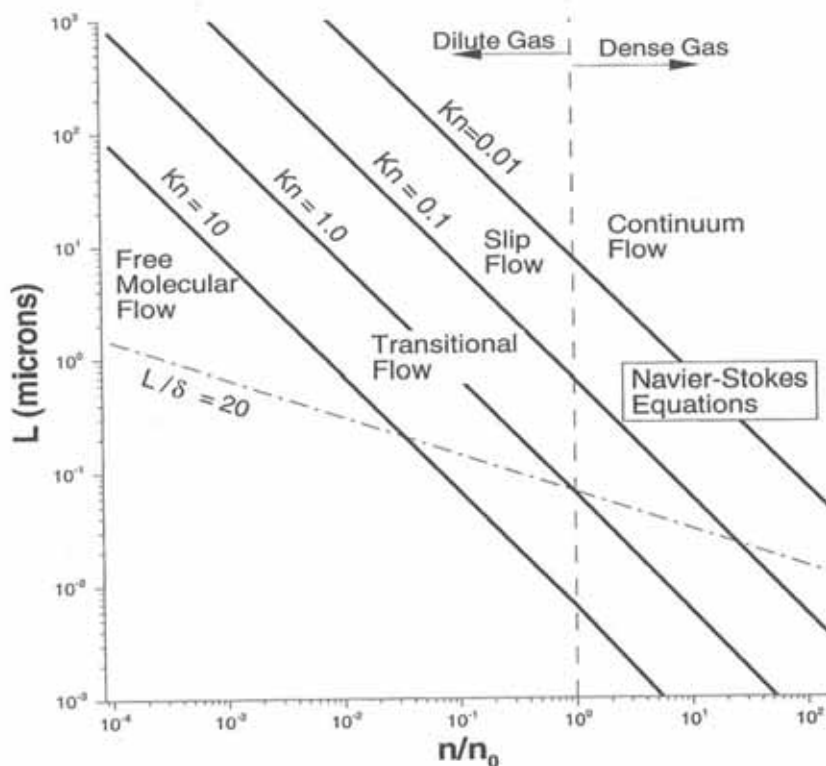
- για  $Kn \leq 10^{-2}$  , το ρευστό μπορεί να θεωρηθεί συνεχές
- για  $Kn \geq 10$  , η ροή θεωρείται ελεύθερη μοριακή.

Στην περιοχή του αριθμού Knudsen μεταξύ των τιμών  $10^{-2}$  και 10, το ρευστό δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ούτε ως πλήρως συνεχές, ούτε ότι βρίσκεται στην ελεύθερη μοριακή περιοχή. Έτσι, η περιοχή αυτή μπορεί να διαχωριστεί περαιτέρω σε :

- περιοχή, όπου ισχύει η συνθήκη ολίσθησης, για  $10^{-2} < Kn < 0.1$
- περιοχή μετάβασης (στην ελεύθερη μοριακή ροή), για  $0.1 < Kn < 10$ .

Οι παραπάνω διαχωρισμοί έγιναν βάσει εμπειρικών δεδομένων, γι' αυτό τα όρια μεταξύ των διαφορετικών περιοχών εξαρτώνται συχνά από τη συγκεκριμένη γεωμετρία.

Στο παρακάτω σχήμα, οι διαφορετικές περιοχές του ρευστού χωροθετούνται συναρτήσει της χαρακτηριστικής διαμέτρου  $L$  και της πυκνότητας. Η διακεκομμένη γραμμή  $L/\delta=20$  αντιστοιχεί στην αναλογία της χαρακτηριστικής διαμέτρου  $L$  προς τη μέση μοριακή απόσταση, για την οποία οι στατιστικές διακυμάνσεις υπολογίζονται στο 1%. Κάτω από αυτή, οι στατιστικές διακυμάνσεις δεν μας επιτρέπουν να προσδιορίσουμε τα μακροσκοπικά μεγέθη με ικανοποιητική ακρίβεια.



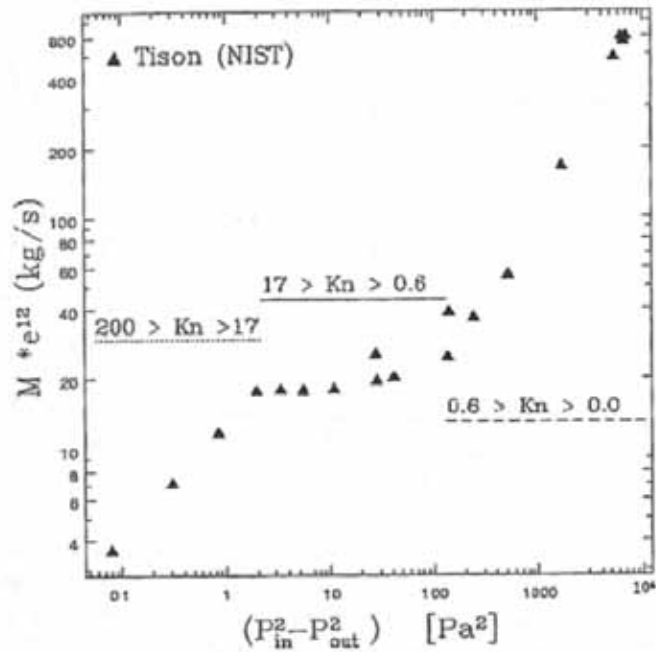
σχήμα 2: οι περιοχές της ροής στο διάγραμμα χαρακτηριστικής διαμέτρου-αριθμητικής πυκνότητας

#### A.4 Πειραματική θεμελίωση

Ο **S.Tison** με μια σειρά πειραμάτων που πραγματοποίησε στο National Institute of Standards (NIST), επιβεβαιώνει τους παραπάνω θεωρητικούς προσδιορισμούς και ταξινομήσεις.

Στο πείραμα χρησιμοποιήθηκε ένας αγωγός διαμέτρου  $2a=2\text{mm}$  και μήκους  $L=200\text{mm}$ , σε συνθήκες πολύ χαμηλής πίεσης. Οι πιέσεις εισόδου και εξόδου μεταβάλλονταν, προκαλώντας αντίστοιχη μεταβολή της τιμής του αριθμού Knudsen από 0 έως 200.

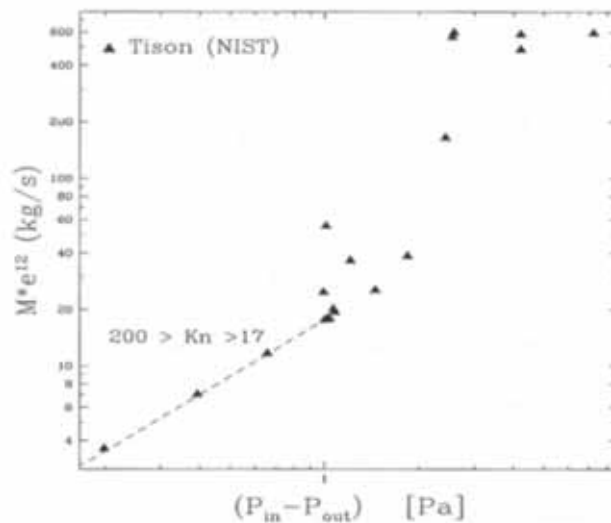
Η καταγραφή των πειραματικών αποτελεσμάτων σε ένα λογαριθμικό διάγραμμα απεικονίζει ξεκάθαρα την ύπαρξη τριών περιοχών στη ροή, παρότι οι τιμές που αντιστοιχούν στα όρια των περιοχών είναι κατ' άτι διαφορετικές απ' αυτές που ορίσαμε στην προηγούμενη παράγραφο.(βλ. σχήμα 2)



σχήμα 3: οι περιοχές της ροής στο διάγραμμα παροχής μάζας- διαφοράς τετραγώνων πίεσης

Πιο αναλυτικά: η περιοχή της ροής συνεχούς μέσου με ολίσθηση στα τοιχώματα του αγωγού εκτείνεται μέχρι την τιμή  $Kn=0.6$ , ενώ η μεταβατική μέχρι  $Kn=17$ . Στο φάσμα τιμών  $17 < Kn < 200$ , εκτείνεται η περιοχή της ελεύθερης μοριακής ροής.

Η μορφή του διαγράμματος επίσης υποδεικνύει μια μη γραμμική πτώση πίεσης μέσα στον αγωγό. Η κλιμάκωση της παροχής μάζας που παρουσιάζεται σε σχέση με τη διαφορά των τετραγώνων των πιέσεων, είναι χαρακτηριστική για συμπιεστές ροές χαμηλού αριθμού Reynolds. Εάν αναπαραστήσουμε σε διάγραμμα την παροχή μάζας συναρτήσει της διαφοράς πίεσης εξόδου-εισόδου, μοντέλο χαρακτηριστικότερο για ασυμπιεστή ροή σε αγωγό, θα παρατηρήσουμε ότι δεν υπάρχει καμία συγκεκριμένη συσχέτιση ή αλληλουχία των σημείων, εκτός από την περιοχή της ελεύθερης μοριακής ροής, όπου η πτώση πίεσης είναι γραμμική. (βλ. σχήμα 3)



σχήμα 4: οι περιοχές της ροής στο διάγραμμα παροχής μάζας- διαφοράς πίεσης

Το συμπέρασμα αυτό επαληθεύτηκε και σε πειράματα που πραγματοποίησε ο **Srekanth** σε αγωγούς διαμέτρου 2in σε χαμηλή πίεση.

Συστηματικά πειράματα που έγιναν στο πανεπιστήμιο της Pennsylvania έδειξαν ότι οι ροές μέσα σε μικροκανάλια παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις από την συμπεριφορά του συνεχούς μέσου. Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται ο λόγος του αριθμού Poiseuille, όπως έχει μετρηθεί πειραματικά, προς τον αριθμό Poiseuille, όπως έχει προσεγγιστεί θεωρητικά:

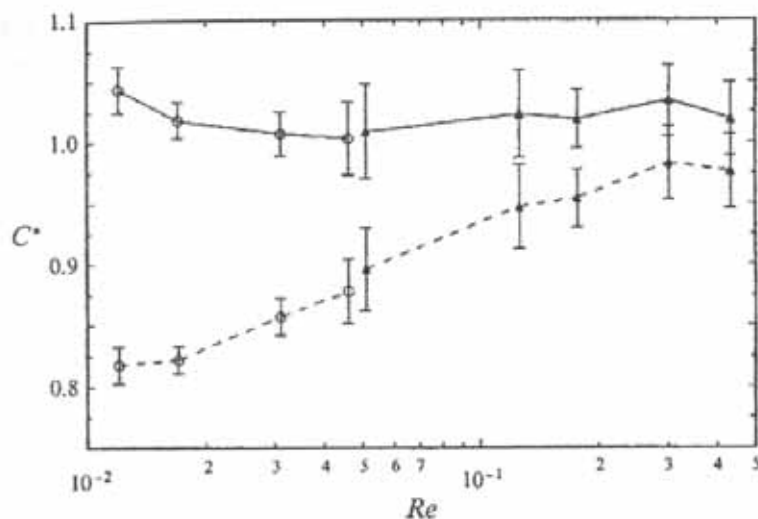
$$C^* = \frac{(Po)_{exp}}{(Po)_{th}} \quad (A.6)$$

Ο αριθμός Poiseuille ορίζεται:

$$Po = C_f \cdot Re \quad (A.7)$$

όπου  $C_f$  ένας συντελεστής τριβής και  $Re$  ο αριθμός Reynolds.

Για ροή μέσα σε αγωγό κυκλικής διατομής, η θεωρητική τιμή του αριθμού Poiseuille είναι  $(Po)_{th} = 64$ , ενώ για διδιάστατα κανάλια είναι  $(Po)_{th} = 96$ .



σχήμα 5: ο λόγος  $C^*$  συναρτήσει του αριθμού Reynolds

Για το πείραμα χρησιμοποιήθηκε κανάλι βάθους 0,51μm. Η πίεση εισόδου κυμάνθηκε από 1.1MPa ως 3.5MPa, ενώ η πίεση εξόδου ήταν ατμοσφαιρική. Ο αριθμός Mach διατηρήθηκε κάτω από 0.02 και ο αριθμός Knudsen μεταξύ 0.004 και 0.373.

*Ένα ενδιαφέρον συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι το φαινόμενο ολίσθησης του ρευστού πάνω στο τοίχωμα του αγωγού γίνεται εντονότερο σε χαμηλούς αριθμούς Reynolds, γεγονός πάντως αναμενόμενο, αφού ο αριθμός Knudsen έχει οριστεί ως αντιστρόφως ανάλογος του αριθμού Mach.*

## **A.5 Δυναμική ομοιότητα**

Σε πολλές εφαρμογές της ρευστομηχανικής, μπορούμε να αναδείξουμε μια αντιστοιχία ανάμεσα σε διαφορετικές γεωμετρίες και δυναμικές συνθήκες, βασιζόμενοι στην υπόθεση της δυναμικής ομοιότητας. Με αυτόν τον τρόπο έχουμε την δυνατότητα να προσδιορίσουμε την συμπεριφορά ενός ρευστομηχανικού συστήματος, πειραματιζόμενοι σε ένα άλλης γεωμετρικής κλίμακας μοντέλο, κάτω από όμοιες συνθήκες, που χαρακτηρίζονται από ένα πλήθος αδιάστατων παραμέτρων, όπως οι αριθμοί Reynolds, Mach, Prandtl και Knudsen.

Υπό το πρίσμα της δυναμικής ομοιότητας, εξετάζουμε την αντιστοιχία μεταξύ των αεριοποιημένων ροών πολύ χαμηλής πίεσης και των ροών μέσα σε μικροκανάλια. Η εγκυρότητα της αντιστοιχίας εξαρτάται από τα φαινόμενα που οφείλονται στην επιφάνεια των τοιχωμάτων, αλλά και τις υφιστάμενες στατιστικές διακυμάνσεις.

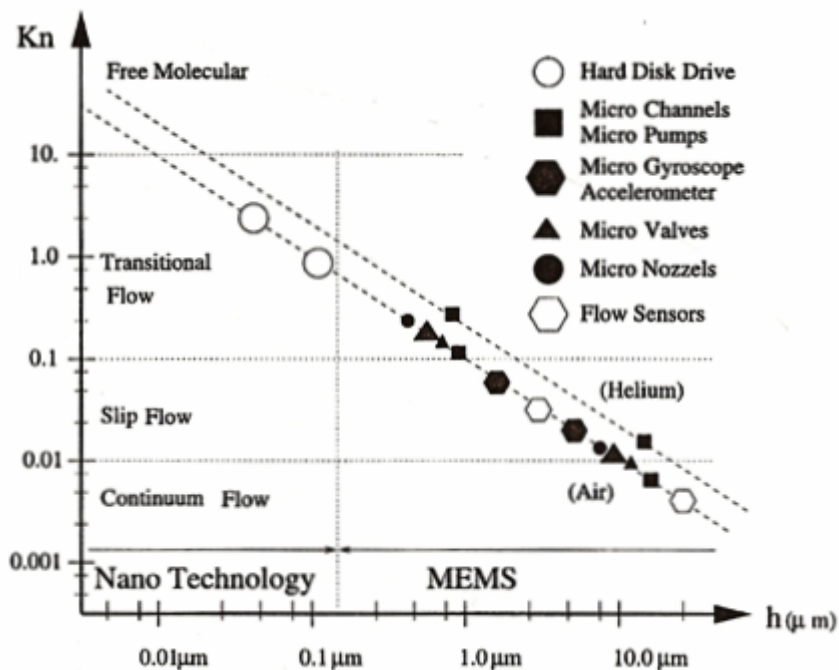
Παραδείγματος χάρη: για ατμοσφαιρικές συνθήκες, η τιμή του αριθμού  $Kn=1$  επιτυγχάνεται για μέγεθος καναλιού περί τα 65nm. Για μικρότερες διατομές, που αντιστοιχούν σε μεγαλύτερους Knudsen, οι μακροσκοπικές ιδιότητες του ρευστού δεν μπορούν να προσδιοριστούν. Παρόλα αυτά, σε χαμηλότερες πιέσεις, για παράδειγμα στα 100Pa, το όριο της 1% ποσοστιαίας στατιστικής διακύμανσης αντιστοιχεί σε χαρακτηριστική διάσταση  $L=0.65\mu\text{m}$ , ενώ η τιμή του αριθμού  $Kn=1$  επιτυγχάνεται στην χαρακτηριστική διάσταση των 65nm, δύο τάξεις μεγέθους, δηλαδή μεγαλύτερη. Έτσι, οι μακροσκοπικές ιδιότητες του ρευστού μπορούν να προσδιοριστούν χωρίς σημαντικές στατιστικές αποκλίσεις.

Παρακάτω θα δούμε τους τρόπους, με τους οποίους μπορεί να γίνει αυτό.

## **A.6 Συστήματα μεικτής ροής**

Η χαρακτηριστική διάσταση που διέπει τη ροή ενέργειας και ορμής μεταξύ των μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων (MEMS) και του περιβάλλοντός τους είναι τυπικά της τάξεως μικρών. Τα MEMS συχνά λειτουργούν σε περιβάλλον αερίων με πρότυπες συνθήκες, όπου η μέση μοριακή ελεύθερη διαδρομή είναι γύρω στα 70nm. Ως εκ τούτου, σε ατμοσφαιρικές συνθήκες η αναλογία ελεύθερης διαδρομής και χαρακτηριστικής διάστασης μπορεί να είναι αξιόλογη και τα δυναμικά μεγέθη των MEMS να εμφανίσουν φαινόμενα ασυνέχειας.

Η μέση ελεύθερη διαδρομή για τον αέρα, η οποία για ατμοσφαιρικές συνθήκες είναι περίπου 65 nm είναι ανάλογη της χαρακτηριστικής γεωμετρικής κλίμακας, άρα οι μικροσκοπικοί παράγοντες είναι σημαντικοί. Η απόκλιση του αερίου από την κατάσταση συνέχειας μπορεί να μετρηθεί μέσω του αριθμού Knudsen ( $kn$ ). Για μικροκινητήρα, χρησιμοποιώντας χαρακτηριστική διάσταση  $L=3\mu\text{m}$  (το κενό ανάμεσα στο ρότορα και τη βάση) και θεωρώντας πως οι συνθήκες λειτουργίας είναι οι ατμοσφαιρικές, παίρνουμε την τιμή  $kn=0.022$ . Για μεγαλύτερη ολίσθηση ο αριθμός Knudsen είναι  $kn=1.3$ . Η λειτουργία τυπικών MEMS σε πρότυπες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα για συνεχή ροή, ροή με ολίσθηση και μεταβατική ροή.



σχήμα 6: ο αριθμός Knudsen(kn) συναρτήσει της χαρακτηριστικής διάστασης(h) και του είδους της ροής (συνεχής,ροή ολίσθησης,μεταβατική,ελεύθερη μοριακή ) για τυπικά MEMS και εφαρμογές νανοτεχνολογίας, σε ατμοσφαιρικές συνθήκες.

## A.7 Η συνάρτηση κατανομής

Τα μόρια ενός μονοατομικού αερίου μπορούν να περιγραφούν από το διάνυσμα θέσης  $\mathbf{r}$  στο χώρο και της ταχύτητας τους  $\xi$ . Εάν θεωρήσουμε έναν στοιχειώδη όγκο  $d^3\mathbf{r}$  στο φυσικό χώρο τότε σε καρτεσιανές συντεταγμένες θα ισχύει ότι:

$$d^3\mathbf{r} = dx dy dz \quad (A.8)$$

Ο συγκεκριμένος όγκος έχει επιλεγεί ώστε να περιέχει το σημείο  $\mathbf{r}$ . Παρόμοια ένας στοιχειώδης όγκος στο χώρο των μοριακών ταχυτήτων θα συμβολίζεται με:

$$d^3\xi = d\xi_x d\xi_y d\xi_z \quad (A.9)$$

και θα βρίσκεται γύρω από την ταχύτητα  $\xi$ .

Ας θεωρήσουμε ένα απλό αέριο, το οποίο αποτελείται από μόρια ίδιας μάζας  $m$ . Δεδομένου ότι ο αριθμός των μορίων ανά μονάδα όγκου είναι αισθητά μεγάλος (περίπου  $3 \times 10^{25}$  μόρια/ $m^3$  σε κανονικές συνθήκες), είναι δυνατόν να εφαρμοστεί μια στατιστική περιγραφή, η οποία θα βασίζεται στην κατά μέσο όρο συμπεριφορά ενός μεγάλου αριθμού μορίων. Μια τέτοια περιγραφή αποτελεί σαφώς πιο απλή διαδικασία απ' ότι η μεμονωμένη περιγραφή κάθε μορίου ξεχωριστά. Η υπόθεση αυτή μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι χρησιμοποιούμε ένα στοιχειώδη όγκο ελέγχου  $d^3\mathbf{r}$ , του οποίου οι διαστάσεις είναι αρκετά μικρές (περίπου  $10^{-15} m^3$ ) σε σχέση με τις διαστάσεις του φυσικού χώρου αλλά αρκετά μεγάλες ώστε να περιέχουν ένα επαρκή

αριθμό μορίων (περίπου  $3 \times 10^{10}$  μόρια), που να επιτρέπει την στατιστική περιγραφή τους [Ferziger, 1972].

Οι μακροσκοπικές ποσότητες στην ρευστοδυναμική εκφράζονται ως ροπές της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας  $f(\mathbf{r}, \boldsymbol{\xi}, t)$ , η οποία εμπεριέχει όλη την πληροφορία τόσο για την θέση των μορίων όσο και για την ταχύτητά τους. Η συνάρτηση κατανομής ορίζεται έτσι ώστε η ποσότητα  $f(\mathbf{r}, \boldsymbol{\xi}, t) d^3 \boldsymbol{\xi} d^3 \mathbf{r}$  να αντιπροσωπεύει τον αναμενόμενο αριθμό των μορίων στον φασικό όγκο  $d^3 \mathbf{r} d^3 \boldsymbol{\xi}$ , δηλαδή τον αναμενόμενο αριθμό των μορίων τα οποία στην χρονική στιγμή  $t$ , βρίσκονται στο στοιχειώδη όγκο  $d^3 \mathbf{r}$  γύρω από την θέση  $\mathbf{r}$  με ταχύτητες στον όγκο  $d^3 \boldsymbol{\xi}$  γύρω από το διάνυσμα  $\boldsymbol{\xi}$ .

Γνωρίζοντας την συνάρτηση κατανομής εύκολα μπορούν να προκύψουν οι μακροσκοπικές ποσότητες του αερίου. Η πιο απλή μακροσκοπική ιδιότητα είναι η αριθμητική πυκνότητα  $n(\mathbf{r}, t)$ , η οποία ορίζεται ως ο αριθμός των μορίων ανά μονάδα όγκου που βρίσκεται στην θέση  $\mathbf{r}$  την χρονική στιγμή  $t$ . Επομένως η ποσότητα  $n(\mathbf{r}, t) d^3 \mathbf{r}$  είναι ο συνολικός όγκος των σωματιδίων στο  $d^3 \mathbf{r}$ , δηλαδή

$$n(\mathbf{r}, t) = \int f(\mathbf{r}, \boldsymbol{\xi}, t) d^3 \boldsymbol{\xi} \quad (\text{A.10})$$

Η μαζική πυκνότητα του αερίου, του οποίου τα μόρια έχουν μάζα  $m$ , θα δίνεται από την σχέση:

$$\rho(\mathbf{r}, t) = m \cdot n(\mathbf{r}, t). \quad (\text{A.11})$$

Ένα μόριο με ταχύτητα  $\boldsymbol{\xi}$  έχει ορμή  $m\boldsymbol{\xi}$ . Αφού ο αριθμός των σωματιδίων στον όγκο  $d^3 \mathbf{r}$  με ταχύτητες στο  $d^3 \boldsymbol{\xi}$  γύρω από το  $\boldsymbol{\xi}$  είναι  $f(\mathbf{r}, \boldsymbol{\xi}, t) d^3 \boldsymbol{\xi} d^3 \mathbf{r}$  την χρονική στιγμή  $t$ , η ολική ορμή των σωματιδίων θα δίνεται από την σχέση  $m \boldsymbol{\xi} f(\mathbf{r}, \boldsymbol{\xi}, t) d^3 \boldsymbol{\xi} d^3 \mathbf{r}$ . Επομένως η καθαρή ορμή στο  $d^3 \mathbf{r}$  θα είναι:

$$d^3 \mathbf{r} \int m \cdot \boldsymbol{\xi} \cdot f(\mathbf{r}, \boldsymbol{\xi}, t) d^3 \boldsymbol{\xi}. \quad (\text{A.12})$$

Χρησιμοποιώντας ότι η συνολική μάζα στον όγκο  $d^3 \mathbf{r}$  είναι  $\rho(\mathbf{r}, t) d^3 \mathbf{r}$  τότε η υδροδυναμική ταχύτητα δίνεται από την σχέση:

$$\mathbf{u}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{\rho(\mathbf{r}, t)} \int m \boldsymbol{\xi} f(\mathbf{r}, \boldsymbol{\xi}, t) d^3 \boldsymbol{\xi} = \frac{1}{n(\mathbf{r}, t)} \int \boldsymbol{\xi} f(\mathbf{r}, \boldsymbol{\xi}, t) d^3 \boldsymbol{\xi} \quad (\text{A.13})$$

Ορίζουμε  $\boldsymbol{\zeta} = \boldsymbol{\xi} - \mathbf{u}$  την σχετική ταχύτητα (peculiar velocity) του αερίου ως προς την υδροδυναμική ταχύτητα του. Τότε η κινητική ενέργεια ενός σωματιδίου γράφεται:

$$\frac{1}{2} m \cdot \boldsymbol{\xi}^2 = \frac{1}{2} m (\boldsymbol{\zeta} + \mathbf{u})^2 = \frac{1}{2} m \cdot \boldsymbol{\zeta}^2 + m \cdot \boldsymbol{\zeta} \cdot \mathbf{u} + \frac{1}{2} m \cdot \mathbf{u}^2 \quad (\text{A.14})$$



Από την παραπάνω σχέση ο όρος  $\frac{1}{2}m \cdot u^2$  σχετίζεται με την κινητική ενέργεια του αερίου ενώ ο όρος  $\frac{1}{2}m \cdot \zeta^2$  σχετίζεται με την εσωτερική ενέργεια του, για την οποία εύκολα προκύπτει ότι η ολική ενέργεια ισούται με:

$$e(\mathbf{r}, t)\rho(\mathbf{r}, t)d^3\mathbf{r} = \frac{1}{2}m\zeta^2 f(\mathbf{r}, \xi, t)d^3\mathbf{r} \quad (\text{A.15})$$

και ολοκληρώνοντας προκύπτει η έκφραση για την εσωτερική ενέργεια:

$$e(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{\rho(\mathbf{r}, t)} \int \frac{1}{2}m\zeta^2 f(\mathbf{r}, \xi, t)d^3\xi. \quad (\text{A.16})$$

Ο όρος  $m\zeta \cdot \mathbf{u}$  στην έκφραση της κινητικής ενέργειας δεν έχει κάποια συνεισφορά και κατά την ολοκλήρωση ως προς  $\xi$  (ή  $\zeta$ ) μηδενίζεται αφού η μέση σχετική ταχύτητα είναι μηδέν.

Στην κινητική θεωρία η θερμοκρασία του αερίου εκφράζεται συναρτήσει της εσωτερικής ενέργεια σύμφωνα με την σχέση:

$$\rho e = \frac{3}{2}nk_B T = \frac{1}{2}m \int \zeta^2 f(\mathbf{r}, \xi, t)d^3\xi \quad (\text{A.17})$$

ή

$$T = \frac{m}{3nk_B} \int \zeta^2 f(\mathbf{r}, \xi, t)d^3\xi. \quad (\text{A.18})$$

Εκτός από τις μακροσκοπικές ποσότητες υπάρχουν και ποσότητες που εκφράζονται ανυσματικά όπως η ροή μάζας, η ροή ορμής και η ροή θερμότητας. Όλες αυτές οι ανυσματικές ποσότητες συνδέονται με την συνάρτηση κατανομής σύμφωνα με την σχέση:

$$\Phi = \int \varphi \zeta f(\mathbf{r}, \xi, t)d^3\xi \quad (\text{A.19})$$

η οποία εκφράζει το τυχαίο άνυσμα ροής  $\Phi$  της αντίστοιχης ποσότητας  $\varphi$ .

Συγκεκριμένα τα ανύσματα ροής της μάζας, της ορμής και της κινητικής ενέργειας προκύπτουν εάν θέσουμε την κατάλληλη ποσότητα  $\varphi$  στην παραπάνω σχέση. Δηλαδή,

i. Αν  $\varphi(\zeta) = m$  τότε :

$$\Phi(\mathbf{r}, t) = m \int \zeta f(\mathbf{r}, \xi, t)d^3\xi = 0 \quad (\text{A.20})$$

Δηλαδή το διάνυσμα της ροή μάζας για ένα απλό αέριο είναι μηδέν.

ii. Αν  $\varphi(\zeta) = m\zeta_a$  τότε:

$$\Phi(\mathbf{r}, t) = m \int \zeta_a \cdot \zeta f(\mathbf{r}, \xi, t) d^3 \xi \quad (\text{A.21})$$

Η σχέση αυτή μας δίνει το διάνυσμα της ροής που σχετίζεται με την μεταφορά ορμής σε κάθε μία από τις τρεις διευθύνσεις. Ο ταυιστής της ροής ορμής, ο οποίος είναι συμμετρικός και 2<sup>ης</sup> τάξης αποτελείται από 9 συνιστώσες δίνεται από την σχέση:

$$P_{ij}(\mathbf{r}, t) = m \int \zeta_i \cdot \zeta_j f(\mathbf{r}, \xi, t) d^3 \xi \quad (\text{A.22})$$

Τα μη διαγώνια στοιχεία του συγκεκριμένου ταυιστή είναι οι διατμητικές τάσεις, ενώ τα διαγώνια οι ορθές τάσεις. Η υδροστατική πίεση ορίζεται ως ο μέσος όρος του ίχνους του ταυιστή ορμής, δηλαδή

$$P = \frac{1}{2} (P_{xx} + P_{yy} + P_{zz}) = \frac{1}{3} nm \int (\zeta_x^2 + \zeta_y^2 + \zeta_z^2) f(\mathbf{r}, \xi, t) d^3 \xi = nk_B T \quad (\text{A.23})$$

Από τα παραπάνω έχουμε την γνωστή καταστατική εξίσωση των τέλειων αερίων

$$P(\mathbf{r}, t) = n(\mathbf{r}, t) k_B T(\mathbf{r}, t) = \frac{N}{V} k_B T = \frac{b}{V} RT. \quad (\text{A.24})$$

όπου  $R$  η παγκόσμια σταθερά,  $N$  ο αριθμός των μορίων και  $b$  ο αριθμός των γραμμομορίων. Η καταστατική εξίσωση δεν ισχύει για αέρια σε υψηλή πίεση.

iii. Τέλος αν  $\varphi(\zeta) = \frac{1}{2} m \zeta^2$  τότε:

$$\mathbf{q}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{2} m \int \zeta^2 \zeta f(\mathbf{r}, \xi, t) d^3 \xi \quad (\text{A.25})$$

Η σχέση αυτή μας δίνει το άνυσμα της ροή θερμότητας.

## A.8 Κινητικές εξισώσεις και μέθοδοι επίλυσής τους

Ενώ στην κλασσική ρευστοδυναμική η συμπεριφορά των ρευστών μπορεί να περιγραφεί με τις γνωστές μας εξισώσεις Navier-Stokes, δε μπορεί να συμβεί το ίδιο και στην μικρορευστοδυναμική. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όσο μικρότερες είναι οι διαστάσεις της ροής, τόσο η υπόθεση της θερμοδυναμικής ισορροπίας καθίσταται μη ρεαλιστική, ενώ η υπόθεση της μη ολίσθησης στο στερεό τοίχωμα, ως οριακή συνθήκη, παύει να ισχύει.

Έτσι, για συστήματα σχετικά κοντά στην θερμοδυναμική ισορροπία μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι εξισώσεις Navier-Stokes με διαφοροποίηση των οριακών συνθηκών, ενώ για μικρότερες διαστάσεις είναι απαραίτητη η υιοθέτηση μεσοσκοπικών μεθοδολογιών που βασίζονται στη στατιστική προσέγγιση της συμπεριφοράς της ύλης. Τέτοιες είναι η μέθοδος Monte-Carlo, καθώς και η επίλυση της εξίσωσης Boltzmann στην κλασσική ή στη γραμμικοποιημένη μορφή της.

### A.8.1 Αριθμητική επίλυση της εξίσωσης Boltzmann

Η επίλυση της εξίσωσης Boltzmann έχει σαν κυριότερα πλεονεκτήματα την ευρύτητα εφαρμογής (μπορεί να εφαρμοστεί τόσο για συνεχή μέσα, όσο και για ελεύθερη μοριακή κίνηση), την πολύ καλή φυσική θεμελίωσή της και τη δυνατότητα ανάκτησης μεγάλης ποσότητας πληροφορίας εφόσον μπορούν να υπολογιστούν όλες οι μακροσκοπικές ποσότητες. Βασικό μειονέκτημα αποτελεί η σημαντική μαθηματική πολυπλοκότητά της, η οποία, όμως, περιορίζεται σημαντικά με τη χρησιμοποίηση μοντέλων προσέγγισης του όρου των σωματιδιακών συγκρούσεων που περιλαμβάνει η εξίσωση.

Με βάση την επίλυση της γραμμικοποιημένης εξίσωσης Boltzmann έχει αντιμετωπιστεί πλήθος προβλημάτων που αφορά εσωτερικές και εξωτερικές ροές. Ειδικότερα, όσον αφορά ροές ενός συστατικού εντός αγωγών, έχουν αντιμετωπιστεί με επιτυχία ροές μεταξύ παραλλήλων πλακών υπό την επίδραση κλίσης πίεσης και θερμοκρασίας, μεταξύ κινούμενων πλακών καθώς και εντός κυλινδρικών και ορθογωνικών αγωγών. Αντίθετα, η διερεύνηση ροών μίγμάτων παραμένει σχετικά περιορισμένη και μόλις τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια προσπάθεια για τη συστηματική μελέτη τους με την επίλυση προβλημάτων όπως αυτά της ροής μεταξύ πλακών, αλλά και εντός κυλινδρικών και ορθογωνικών αγωγών με πολύ μεγάλο μήκος.

Κατά τη μοντελοποίηση προβλημάτων με την κινητική θεωρία, βασική επιδίωξη είναι ο υπολογισμός της άγνωστης συνάρτησης κατανομής  $f(\mathbf{r}, \xi, t)$ . Η συνάρτηση προκύπτει από την επίλυση της εξίσωσης Boltzmann:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \xi \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}} + X \frac{\partial f}{\partial \xi} = Q(f, f^*) \quad (\text{A.26})$$

όπου  $X$  η ανηγμένη συνισταμένη των εξωτερικών δυνάμεων, ενώ ο όρος των σωματιδιακών συγκρούσεων συμβολίζεται με  $Q(f, f^*)$ .

Εφόσον προσδιοριστεί η συνάρτηση κατανομής  $f(\mathbf{r}, \xi, t)$ , τότε, όπως περιγράψαμε σε προηγούμενη παράγραφο, μπορούν να υπολογιστούν όλες οι μακροσκοπικές ποσότητες συναρτήσει αυτής.

Το δυσχερέστερο σημείο στην επίλυση της εξίσωσης Boltzmann είναι η περιγραφή των σωματιδιακών συγκρούσεων. Ο συνηθέστερος τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος είναι η αντικατάσταση του όρου  $Q(f, f^*)$  από κάποιο προσεγγιστικό μοντέλο. Τα ευρύτερα χρησιμοποιούμενα μοντέλα όταν επιλύονται ροές ενός συστατικού είναι το μοντέλο BGK και το μοντέλο S. Όταν αντιμετωπίζονται ροές που αφορούν μίγματα αερίων, τότε το απλούστερο μοντέλο είναι αυτό του Hamel.

Όταν η ταχύτητα του ροϊκού πεδίου είναι κατά πολύ μικρότερη από την ταχύτητα του ήχου, όπως συμβαίνει σχεδόν πάντα σε μικροροϊκές διατάξεις, λόγω των πολύ μικρών διαστάσεων, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί η γραμμικοποιημένη εξίσωση Boltzmann. Στην περίπτωση αυτή η άγνωστη μεταβλητή είναι πλέον η  $h$ , που συνδέεται με την  $f$  μέσω της σχέσης:

$$f(\mathbf{r}, \xi, t) = f_{abs}^M [1 + h(\mathbf{r}, \xi, t)] \quad (\text{A.27})$$

όπου  $f_{abs}^M$  η απόλυτη κατανομή ισορροπίας.

Αντίστοιχα γραμμικοποιείται και ο όρος των συγκρούσεων. Επιπλέον τα διάφορα μεγέθη μπορούν να αδιαστατοποιηθούν. Έτσι, στην περίπτωση των μοντέλων BGK και S (και θεωρώντας ότι δεν υπάρχουν εξωτερικές δυνάμεις) η γραμμικοποιημένη εξίσωση Boltzmann παίρνει την μορφή:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \mathbf{c} \cdot \frac{\partial h}{\partial \mathbf{x}} = \delta \cdot \left[ \rho + 2\mathbf{c} \cdot \mathbf{u} + \tau \left( c^2 - \frac{3}{2} \right) - h \right] \quad (\text{A.28})$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \mathbf{c} \cdot \frac{\partial h}{\partial \mathbf{x}} = \delta \cdot \left[ \rho + 2\mathbf{c} \cdot \mathbf{u} + \tau \left( c^2 - \frac{3}{2} \right) + \frac{4}{15} \mathbf{c} \cdot \mathbf{q} \left( c^2 - \frac{5}{2} \right) - h \right] \quad (\text{A.29})$$

και

αντίστοιχα, ενώ με ανάλογο τρόπο εξάγεται και η εξίσωση του μοντέλου Hamel για μίγματα αερίων. Η παράμετρος  $\delta$  ονομάζεται παράμετρος αραιοποίησης και ορίζεται:

$$\delta = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \frac{H}{\lambda} \quad (\text{A.30})$$

Στην περίπτωση της γραμμικοποιημένης εξίσωσης Boltzmann μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα επιπλέον μοντέλο για τον όρο των συγκρούσεων, το οποίο έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματικό, με κόστος όμως την αυξημένη πολυπλοκότητα, το μοντέλο McCormack.

Σε εργασίες που δημοσιεύτηκαν στο πεδίο αυτό, προτάθηκαν διαφορετικοί τρόποι αριθμητικής επίλυσης των μοντέλων αυτών, προσέγγισης του όρου των συγκρούσεων  $Q(f, f^*)$ , αρκετοί από τους οποίους συνέκλιναν εντυπωσιακά ως προς τα αποτελέσματα που έδωσαν.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές της αδιάστατης παροχής  $G_{*p}^{th}$ , η οποία ορίζεται από την σχέση:

$$G_{*p}^{th} = \frac{\dot{M} \cdot u_0}{\pi \cdot r^3 \cdot \frac{\Delta P}{L}} \quad (\text{A.31})$$

όπου  $\dot{M}$  η παροχή μάζας του ρευστού,  $u_0 = \sqrt{2 \cdot R \cdot T_0}$  η πλέον πιθανή μοριακή ταχύτητα στη θερμοκρασία αναφοράς  $T_0$ ,  $r$  και  $L$  η ακτίνα και το μήκος του αγωγού αντίστοιχα,

συναρτήσει της παραμέτρου αραιοποίησης  $\delta$  που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\delta = \frac{r \cdot P}{\mu \cdot u_0} \quad (\text{A.32})$$

όπου  $\mu$  το δυναμικό ιξώδες του ρευστού στη θερμοκρασία αναφοράς  $T_0$ .

$\delta$	$G_{*P}^{th}$			$\delta$	$G_{*P}^{th}$		
	a	b	c		a	b	c
0.0	1.5045	1.5045	...	1.5	...	...	1.5512
0.0001	1.5026	...	...	1.6	1.5753	1.5956	...
0.001	...	...	1.4845	1.8	1.6171	1.6373	...
0.002	1.4962	...	...	2.0	1.6608	1.6799	1.6573
0.004	1.4902	...	...	3.0	1.8850	1.9014	1.8795
0.006	1.4852	...	...	4.0	2.1188	2.1315	...
0.008	1.4808	...	...	5.0	2.3578	2.3666	2.3472
0.01	1.4768	1.4800	1.4704	6.0	2.5999	2.6049	...
0.02	1.4608	1.4636	...	7.0	2.8440	2.8455	2.8282
0.04	1.4391	1.4418	...	8.0	3.0894	3.0878	...
0.08	1.4131	1.4168	...	9.0	3.3355	3.3314	...
0.1	1.4043	1.4101	1.4039	10.0	3.5821	3.5749	3.5623
0.2	1.3820	1.3911	1.3812	20.0	6.0411	6.0492	...
0.3	1.3767	1.3876	1.3756	30.0	8.5333	8.5392	...
0.4	1.3796	1.3920	1.3782	40.0	11.0295	11.036	...
0.5	...	...	1.3857	50.0	13.5269	13.459	...
0.6	1.3982	1.4130	1.3963	60.0	16.0254	...	...
0.8	1.4261	1.4425	1.4238	70.0	18.5244	...	...
1.0	1.4594	1.4758	1.4567	80.0	21.0234	...	...
1.2	1.4959	1.5158	...	90.0	23.5219	...	...
1.4	1.5348	1.5550	...	100.0	26.0214	...	...

πίνακας 1: η αδιαστατοποιημένη παροχή  $G_{*P}^{th}$  συναρτήσει της παραμέτρου αραιοποίησης  $\delta$

Οι τιμές της παροχής  $G_{*P}^{th}$  που αναγράφονται στην στήλη a είναι αυτές που υπολόγισαν οι Cercignani και Sernagiotto χρησιμοποιώντας το μοντέλο BGK, στη στήλη b αυτές που υπολόγισε ο Shapiro, χρησιμοποιώντας το μοντέλο S, και στη στήλη c αυτές που υπολόγισαν οι Loyalka και Hamoodi με το μοντέλο BE.

### A.8.2 Η μέθοδος άμεσης προσομοίωσης Monte Carlo (DSMC)

Υπό κανονικές συνθήκες, σε έναν όγκο  $10\ \mu m \times 10\ \mu m \times 10\ \mu m$  περιέχονται περίπου  $10^{10}$  μόρια. Μια μοριοκεντρική προσομοίωση, που να μπορεί να υπολογίζει την κίνηση και τις αλληλεπιδράσεις όλων των μορίων δεν είναι εφικτή.

Η μέθοδος DSMC, που επινόησε και ανέπτυξε ο G.Bird το 1994, επιστρατεύει μερικές εκατοντάδες χιλιάδες 'προσομοιωμένα' μόρια που μιμούνται, αλλά όχι επακριβώς την κίνηση των πραγματικών μορίων. Η λογική της βασίζεται στην διάτμηση της κίνησης των μορίων και των διαμοριακών συγκρούσεων με επιλογή ενός χρονικού βήματος μικρότερου από το μέσο χρόνο σύγκρουσης (το χρονικό διάστημα μεταξύ δυο διαδοχικών συγκρούσεων) και καταγραφή της εξέλιξης της διαδικασίας στο χώρο και το χρόνο. Για την ακριβέστερη προσομοίωση ο χώρος διακριτοποιείται σε πεπερασμένα στοιχεία (κελιά), μεγέθους ανάλογου με τη μέση ελεύθερη διαδρομή  $\lambda$  (μια τυπική τιμή της χωρικής διάτμησης είναι  $\Delta x_c \approx \lambda/3$ ).

Οι χωρικές και χρονικές μέσες τιμές των μοριακών μεγεθών παρουσιάζονται ως μακροσκοπικές τιμές των μεγεθών στο κέντρο των κελιών.

Η μέθοδος DSMC συνίσταται στα εξής τέσσερα βασικά βήματα (όπως φαίνεται και σχηματικά παρακάτω):

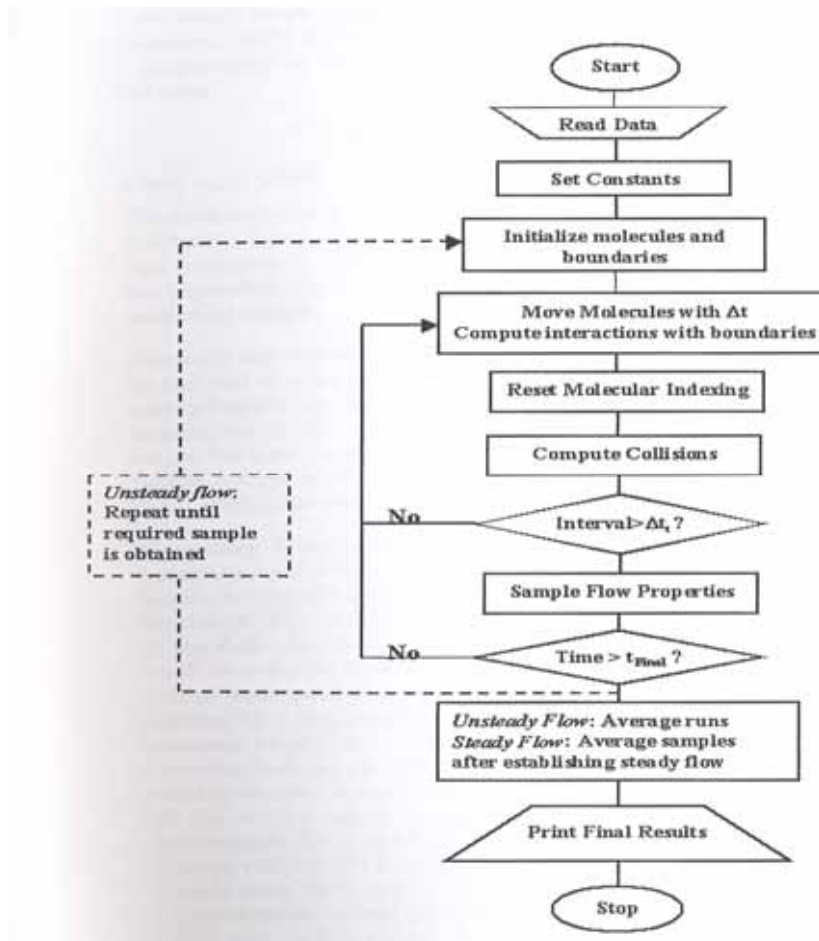
- κίνηση των μορίων
- καταχώρηση των μορίων
- προσομοίωση των συγκρούσεων
- δειγματοληψία των μακροσκοπικών ιδιοτήτων του πεδίου ροής

**Το πρώτο βήμα** προσδιορίζει την κίνηση των ‘προσομοιωμένων’ μορίων στη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος  $\Delta t < \Delta t_c$ . Καθώς τα μόρια θα έχουν διασπαρθεί στο χώρο, κάποια από αυτά θα έχουν συγκρουστεί με το στερεό τοίχωμα, ενώ κάποια άλλα θα έχουν διαφύγει από τον όγκο αναφοράς. Έτσι, εφαρμόζοντας τις οριακές συνθήκες, προσδιορίζονται οι μακροσκοπικές ιδιότητες του ρευστού πάνω στο στερεό όριο. Αυτό γίνεται, μοντελοποιώντας τις μοριακές αλληλεπιδράσεις στο τοίχωμα, εφαρμόζοντας την αρχή διατήρησης της ορμής και ενέργειας σε μεμονωμένα μόρια.

**Το δεύτερο βήμα** απαιτεί την καταχώρηση των σωματιδίων που, κατά τη διάρκεια του πρώτου σταδίου, μετακινήθηκαν σε ένα άλλο κελί. Καταγράφονται οι θέσεις τους στα νέα κελιά και αξιοποιούνται ως δεδομένα για τον ακριβή προσδιορισμό των διαμοριακών συγκρούσεων και του πεδίου ροής. Αυτό είναι το κρισιμότερο στάδιο του αλγορίθμου.

**Το τρίτο βήμα** είναι η προσομοίωση των συγκρούσεων μέσω μιας στοχαστικής διαδικασίας. Καθώς μόνο ένα μικρό μέρος του συνόλου των μορίων έχουν προσομοιωθεί, και οι διαδικασίες κίνησης και σύγκρουσης είναι αποσυζευγμένες, η εισαγωγή μιας στοχαστικής συνθήκης είναι απαραίτητη.

**Τέταρτο βήμα** υπολογίζονται οι μακροσκοπικές ιδιότητες της ροής, που παρουσιάζονται ως τιμές των αντίστοιχων μεγεθών στο μέσο κάθε κελιού. Για μη μόνιμες ροές, οι μακροσκοπικές τιμές μπορούν να υπολογιστούν σαν μέσος όρος των χρονικά ανεξάρτητων τιμών στα εν λόγω σημεία.



σχήμα 2: το λογικό διάγραμμα του αλγορίθμου DSMC

## A.9 Συναφείς εργασίες

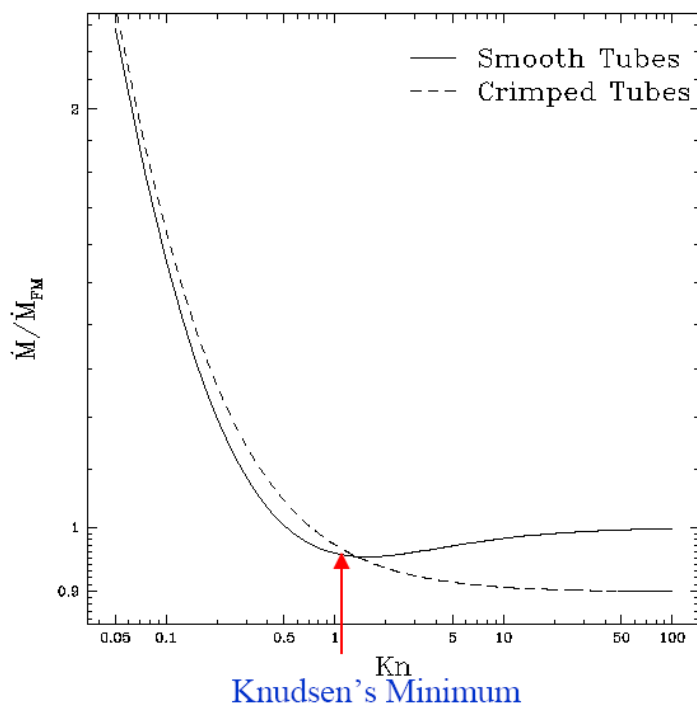
### A.9.1 Παλαιότερες

- **Poiseuille-1846**

Δημοσιεύει την πρώτη ερευνητική εργασία που αφορά ροές μέσα σε αγωγούς με διάμετρο από 30 ως 150μm. Τα πειράματά του, που γίνονται αποκλειστικά με υγρά, οδηγούν στις, μέχρι σήμερα, ευρέως γνωστές σχέσεις μεταξύ παροχής, πτώσης πίεσης και διαστάσεων του αγωγού.

- **Knudsen-1910**

Μελετά την ροή αερίου μέσα σε τριχοειδής αγωγούς, στην περιοχή της μεταβατικής και ελεύθερης μοριακής ροής. Με τα πειράματα αυτά δείχνει ότι η παροχή όγκου του ρευστού, αδιαστατοποιημένη με την διαφορά πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου,  $Q/(P_i - P_o)$  παρουσιάζει ελάχιστο για  $Kn=1$ . Η συμπεριφορά αυτή του ρευστού έμεινε γνωστή ως παράδοξο του Knudsen ή ελάχιστο του Knudsen.



σχήμα 1: Η παροχή μάζας αδιαστατοποιημένη με τις αντίστοιχες τιμές της για την ελεύθερη μοριακή ροή. Παρατηρούμε ότι για τραχείς αγωγούς δεν παρουσιάζεται ελάχιστο.

- **Gaede-1913**

Πραγματοποίησε το πρώτο πείραμα ροής μέσα σε μικροκανάλι, που κατασκεύασε χρησιμοποιώντας δυο παράλληλες πλάκες σε απόσταση 4 $\mu$ m. Παρατήρησε ότι η παροχή μάζας του υδρογόνου μειώνεται στο 50% της τιμής της για ελεύθερη μοριακή ροή περνώντας από ένα ελάχιστο, και πριν να αρχίσει να αυξάνεται πάλι (βλέπε σχ.1). Παρότι το ελάχιστο του Knudsen παρουσιάζεται σε λείους αγωγούς, οι τραχείς αγωγοί δεν παρουσιάζουν αντίστοιχη συμπεριφορά. Απ' αυτό συμπεραίνουμε ότι τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του αγωγού έχουν καθοριστικό ρόλο στη ροή στην περιοχή της μεταβατικής και ελεύθερης μοριακής ροής.

### A.9.2 Πιο σύγχρονες

Η ραγδαία αύξηση των τεχνολογικών εφαρμογών σε μικρομηχανικά και μικροηλεκτρονικά συστήματα, πυροδότησαν μια σειρά από πειραματικές μελέτες στα τέλη της δεκαετίας του '80 και καθ' όλη τη διάρκεια της δεκαετίας του '90.

- **Pfahler-1991**

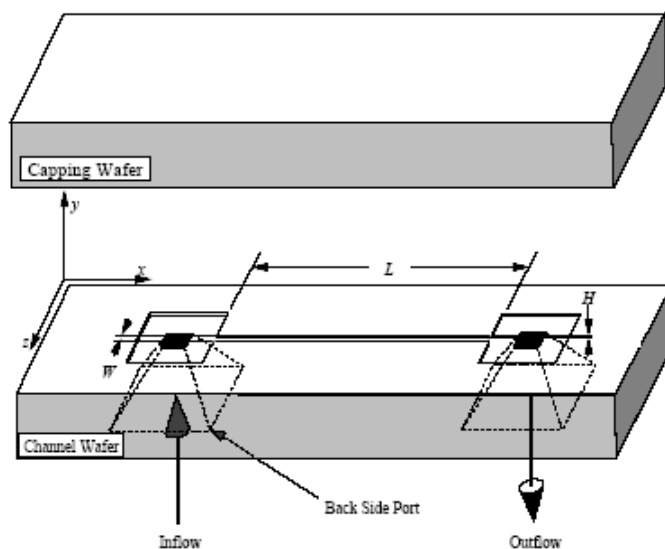
Το πρώτο κατεργασμένο μικροκανάλι, με υδραυλική διάμετρο  $D_H=8\mu$ m και μήκος 11mm, αναφέρεται σε εργασία του Pfahler το 1991. Μέσα σ' αυτό επετεύχθη ροή αερίου με  $0.50 \leq Re \leq 20$  και  $0.001 \leq Kn \leq 0.363$ . Ο αριθμός Mach στην είσοδο του καναλιού είναι πολύ μικρός, στη έξοδο, όμως, φθάνει κατά περιπτώσεις και τιμή  $M=0.7$ . Οι μειωμένες τριβές που αναφέρονται στην διεπιφάνεια ρευστού-αγωγού,



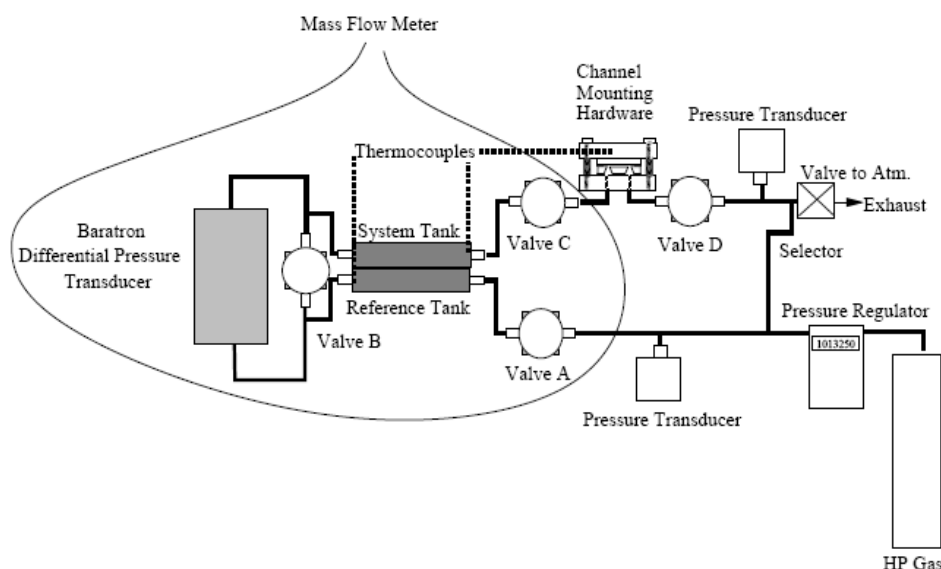
λόγω του φαινομένου ολίσθησης της ροής, επιβεβαιώνονται κι από άλλες πειραματικές μελέτες (Liu 1993, Pong 1994, Arkilic 1994), που χρησιμοποιούν μάλιστα διαφορετικές τεχνικές διαμόρφωσης του μικροκαναλιού.

- **Breuer και Arkilic- 1993**

Με πειραματικά δεδομένα υψηλής ακρίβειας, που αξιοποιήθηκαν και για την επιβεβαίωση μοντέλων προσομοίωσης μικροροών, τροφοδότησαν την έρευνα οι Breuer και Arkilic, το 1993, χρησιμοποιώντας ένα μικροκανάλι με μήκος  $L=7.5\text{mm}$ , πλάτος  $W=52.25\mu\text{m}$  και ύψος  $H=1.33\mu\text{m}$  (μια σχηματική του αναπαράσταση φαίνεται στο σχήμα 2). Ενδεδλεχής εξέταση του στο μικροσκόπιο έδειξε ότι το ύψος του ήταν ομοιόμορφο και η τραχύτητα της επιφάνειας του μικρότερη από 65nm.



σχήμα 2: σχεδιάγραμμα του καναλιού που χρησιμοποίησαν οι Breuer και Arkilic



σχήμα 3:σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης

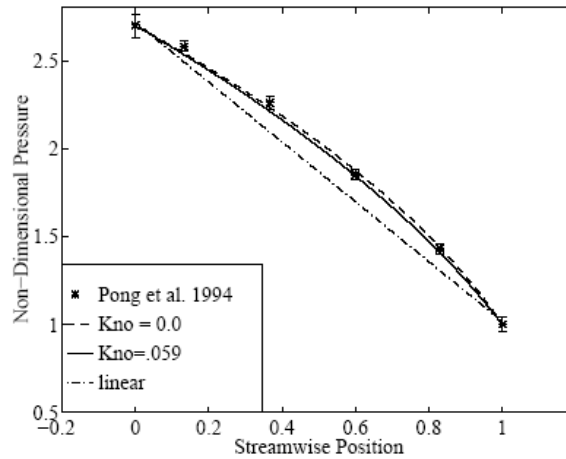
Στον παρακάτω πίνακα καταγράφονται οι συνθήκες κάτω από τις οποίες πραγματοποιήθηκε το πείραμα:

Παράμετροι ροής	Εύρος τιμών
Πίεση εξόδου	100.8 kPa
Λόγος πίεσης	1.2 – 2.5
Θερμοκρασία	314 K
Αριθμός Mach στη έξοδο	$(0.5 - 4) \times 10^{-4}$
Αριθμός Knudsen στη έξοδο	0.165
Αριθμός Reynolds	$(0.5 - 4) \times 10^{-3}$

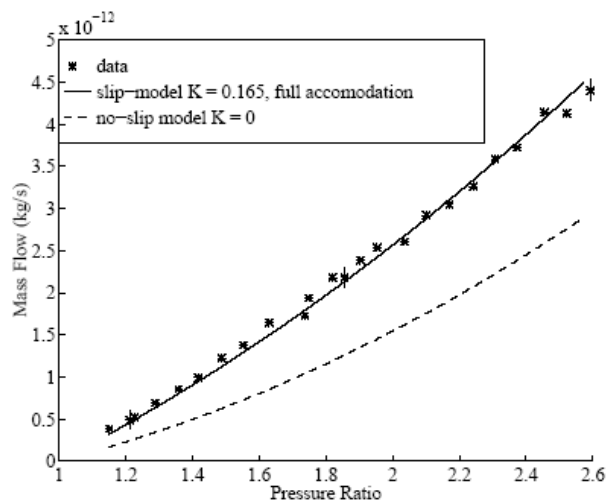
Το ρευστό που χρησιμοποιήθηκε ήταν Ήλιο.

Οι πειραματικές μετρήσεις της παροχής μάζας του ρευστού για διάφορες τιμές του λόγου πίεσης εισόδου προς την πίεση εξόδου και η διανομή της πίεσης κατά μήκος του καναλιού αξιοποιήθηκε προκειμένου να επιβεβαιώσει ένα αναλυτικό μοντέλο, που προέκυψε από την εισαγωγή μιας συνοριακής συνθήκης ολίσθησης πρώτης τάξης στις εξισώσεις Navier-Stokes, για να εκτιμά τα μεγέθη αυτά σε αέριες ροές, ελαφρά αεριοποιημένες (μικροί αριθμοί Knudsen) μέσα σε μικροκανάλια.

Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται ξεκάθαρα πως τα πειραματικά δεδομένα προσαρμόζονται καλύτερα στις θεωρητικές εκτιμήσεις που δίνει το αναλυτικό αυτό μοντέλο, και σε αντίθεση με τις εκτιμήσεις που προκύπτουν από την υπόθεση του συνεχούς μέσου χωρίς ολίσθηση, **καταδεικνύοντας πως ροές με αυτά τα χαρακτηριστικά μέσα σε μικροκανάλια εμφανίζουν φαινόμενα ασυνέχειας και συμπίεστικότητας.**



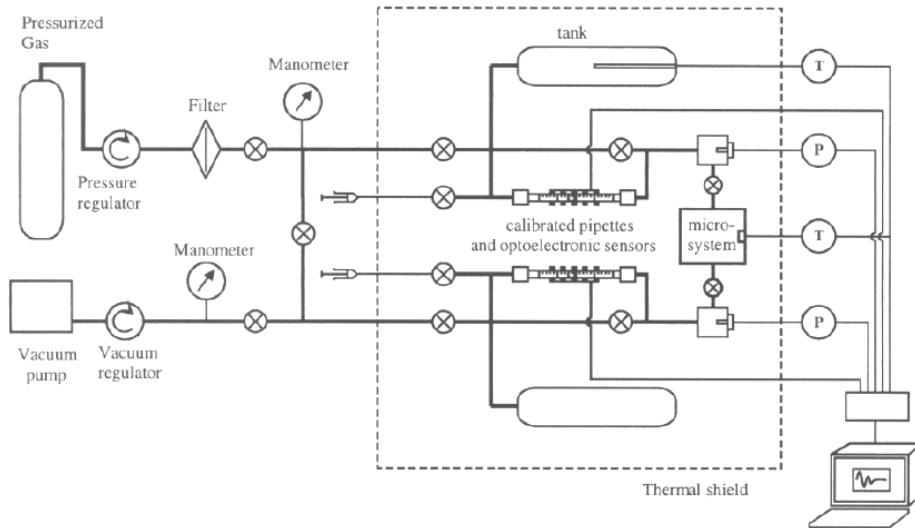
σχήμα 4: η διανομή της πίεσης κατά μήκος του αγωγού



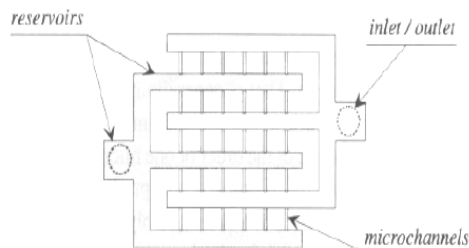
σχήμα 5: η παροχή μάζας του ρευστού συναρτήσει του λόγου πίεσης

- **Colin, Lalonde και Caen**

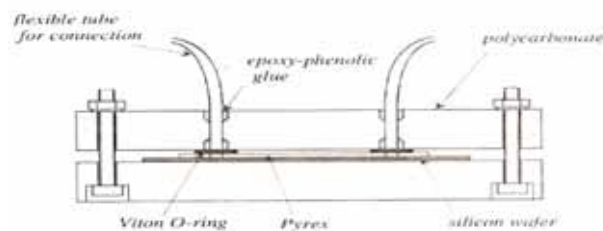
Ένα αναλυτικό μοντέλο ροής αερίου σε μικροκανάλι, με τη χρήση, αυτή τη φορά, οριακής συνθήκης δεύτερης τάξης, προτάθηκε από τους Colin, Lalonde και Caen. Από την πειραματική διάταξη που στήθηκε στο Εθνικό Ινστιτούτο Επιστημονικών Εφαρμογών της Τουλούζης (βλέπε σχήμα 6), ελήφθησαν μετρήσεις για τη ροή Ηλίου και Αζώτου μέσα σε μικροκανάλι ορθογωνικής διατομής, με βάθος από 4.5 ως 0.5μm και λόγο διαστάσεων (βάθος προς πλάτος) από 1 ως 9%.



σχήμα 6: η πειραματική διάταξη των Colin, Lalonde, Caen



σχήμα 7: η διαμόρφωση των μικροκαναλιών(κατοψη)

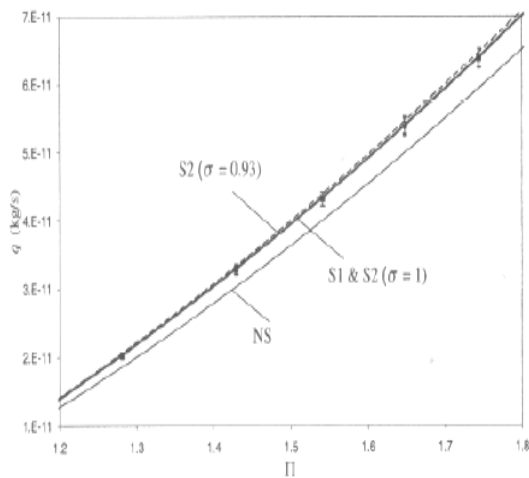


σχήμα 8: μπροστινή όψη μικροκαναλιών

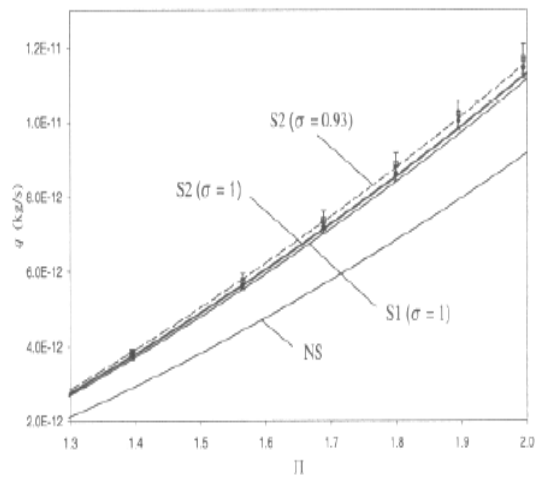
Τα μικροκανάλια έχουν χαρακτηί με τη μέθοδο DRIE (Deep Reactive Ion Etching) σε λεπτά δισκία πυριτίου. Πολλά πανομοιότυπα μικροκανάλια έχουν τοποθετηθεί παράλληλα ,έτσι ώστε να μπορέσουμε να πετύχουμε επαρκή παροχή και να τη μετρήσουμε με καλή ακρίβεια.( βλέπε σχήμα 8 )

Στα παρακάτω διαγράμματα δίδονται οι καμπύλες της παροχής μάζας  $q$  συναρτήσει του λόγου πίεσης  $\Pi$  (πίεση εισόδου προς πίεση εξόδου) όπως προκύπτουν από το μοντέλο ροής με συνθήκη ολίσθησης πρώτης τάξης (S1), δεύτερης τάξης (S2) καθώς και με συνθήκη μη ολίσθησης (NS), σε διάφορες περιοχές του αριθμού Knudsen

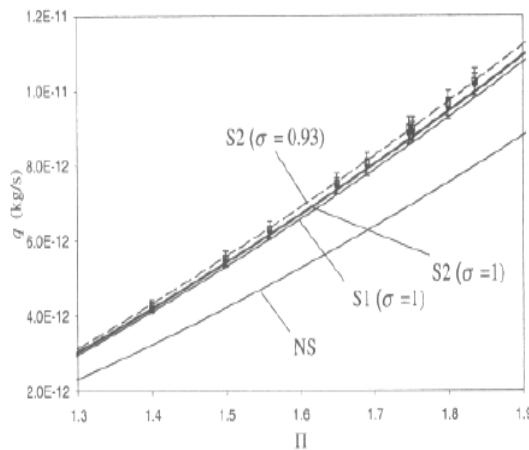
► Μικροκανάλι βάθους  $H = 1.88\mu\text{m}$



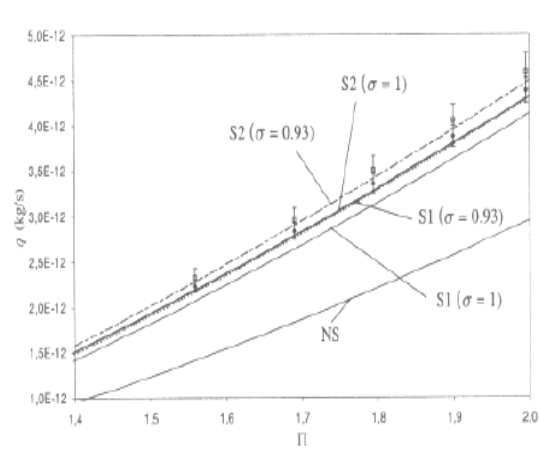
Άζωτο,  $0.01 \leq Kn \leq 0.017$



Άζωτο,  $0.027 \leq Kn \leq 0.053$

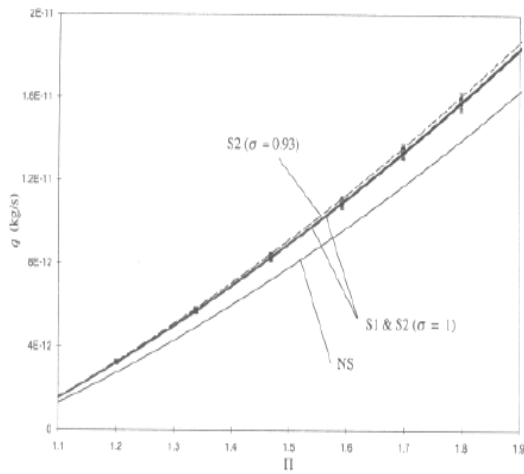


Ήλιο,  $0.029 \leq Kn \leq 0.053$

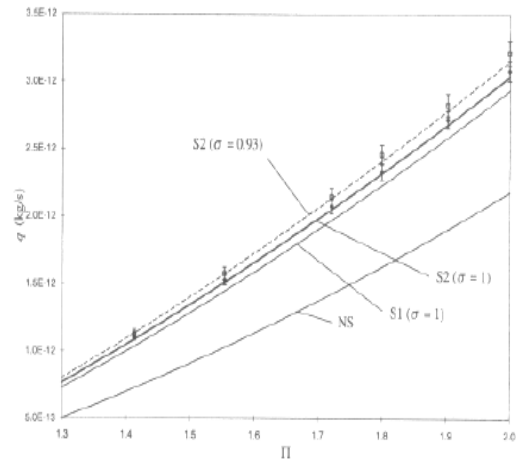


Ήλιο,  $0.05 \leq Kn \leq 0.1$

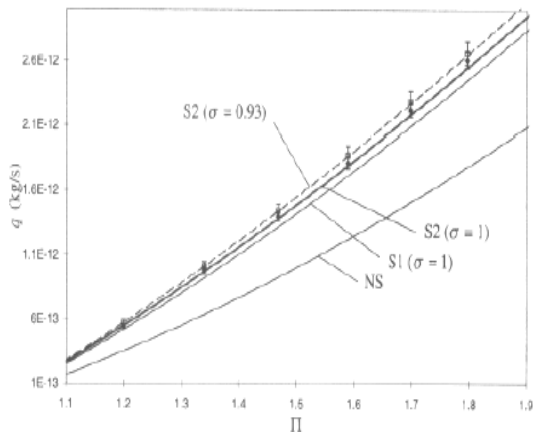
► Μικροκανάλι βάθους  $H = 1.16\mu\text{m}$



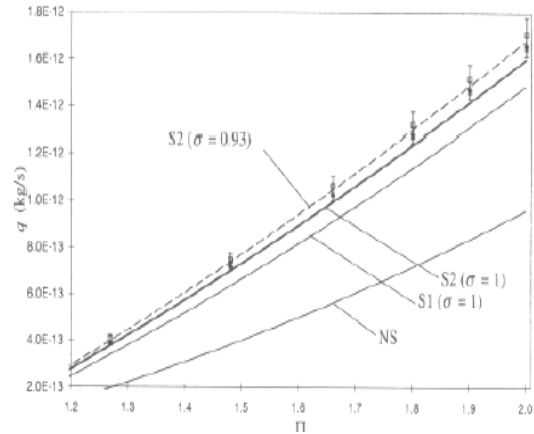
Άζωτο,  $0.016 \leq Kn \leq 0.03$



Άζωτο,  $0.04 \leq Kn \leq 0.09$



Ήλιο,  $0.05 \leq Kn \leq 0.09$



Ήλιο,  $0.1 \leq Kn \leq 0.22$

Από τις μετρήσεις αυτές προέκυψε ότι **το μοντέλο αυτό είναι ιδιαίτερος αξιόπιστο για αέριες ροές που χαρακτηρίζονται από  $Kn \geq 0.25$ , περιοχή στην οποία το μοντέλο με την οριακή συνθήκη πρώτης τάξης χάνει την αξιοπιστία του (το μοντέλο αυτό δίνει ακριβείς εκτιμήσεις για την περιοχή μέχρι  $Kn=0.05$ ).**

Τέλος, παρατηρήθηκε πως η βέλτιστη τιμή του συντελεστή προσαρμογής (accommodation coefficient) είναι  $\sigma=0.93$ , κοινός για το Ήλιο και το Άζωτο.

- **Harley, Huang, Bau, Zemel - 1994**

Μια θεωρητική και πειραματική έρευνα πάνω στη ροή συμπιεστού αερίου, χαμηλού αριθμού Reynolds και υψηλού, υποηχητικού Mach, παρουσίασαν το 1994 οι J.Harley, Y.Huang, H.Bau και J.Zemel.

Οι πειραματικές μετρήσεις που πήραν, χρησιμοποιώντας μικροκανάλια διαμορφωμένα πάνω σε δισκία πυριτίου με μήκος  $10^4 \mu\text{m}$ , πλάτος  $100 \mu\text{m}$  και βάθος από 0.5 ως  $20 \mu\text{m}$ , βρίσκουν σύμφωνες τις θεωρητικές εκτιμήσεις που δίνει το αναλυτικό μοντέλο πρώτης τάξης με συνθήκη ολίσθησης, για ροή που θεωρείτε ισοθερμοκρασιακή, τοπικά πλήρως ανεπτυγμένη. Ο αριθμός Knudsen κυμαίνεται από 0,001 έως 0,4.

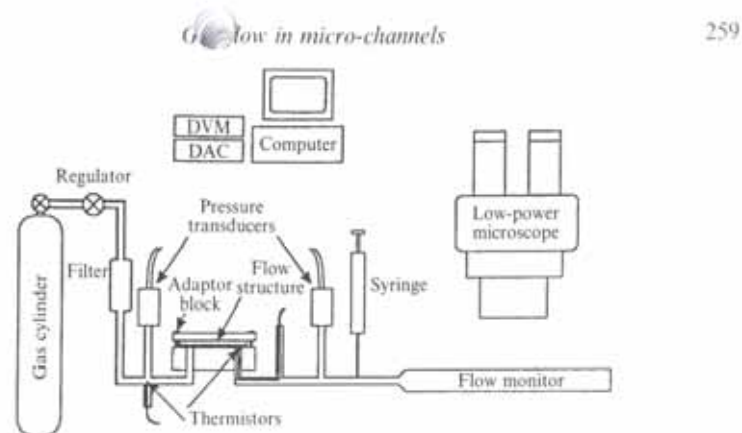


FIGURE 1. The experimental apparatus.

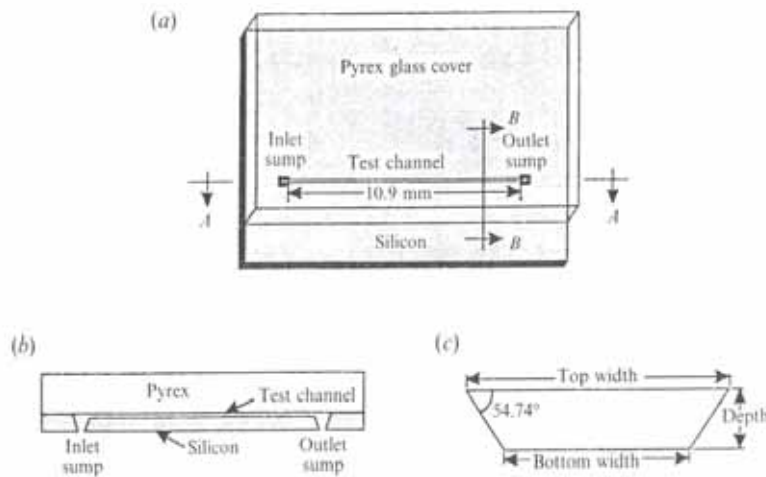


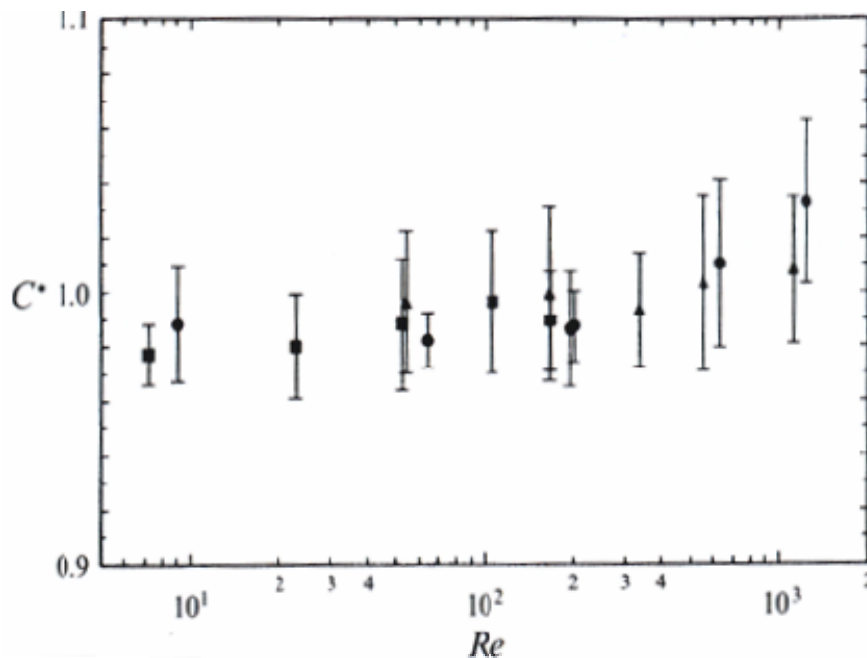
FIGURE 2. Views of a test channel microfabricated on a silicon wafer. (a) Top view. (b) Cross-section A-A. (c) Cross-section B-B.

σχήμα 9: η πειραματική διάταξη των Harley, Huang, Bau και Zemel και όψεις του μικροκαναλιού πάνω στο δίσκο πυριτίου

Channel	Top width (μm)	Bottom width (μm)	Depth (μm)	Hydraulic diameter (μm)	Length × 10 <sup>3</sup> (μm)	Theoretical C. (Shah & London 1978)	Gases tested
JH6	96.6	96.9	0.51	1.01	10.9	95.13	N <sub>2</sub> , He
V3	105.7	99.2	2.73	5.24	11.03	90.90	N <sub>2</sub>
JP9	95.4	85.8	4.66	8.68	10.9	88.51	N <sub>2</sub> , He
JH10	102.5	93.8	4.78	8.97	10.9	89.24	N <sub>2</sub>
JH21	100.5	85.2	8.33	14.85	11.05	82.91	N <sub>2</sub> , He, Ar
JH13	94.4	80.0	11.04	19.18	10.18	79.95	N <sub>2</sub> , He, Ar
VJ27	99.3	75.5	15.98	26.03	11.08	74.10	N <sub>2</sub> , He, Ar
JH5	246.8	220.3	19.79	35.91	10.18	84.94	N <sub>2</sub> , He, Ar

Πίνακας 1: Τα χαρακτηριστικά των μικροκαναλιών που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα

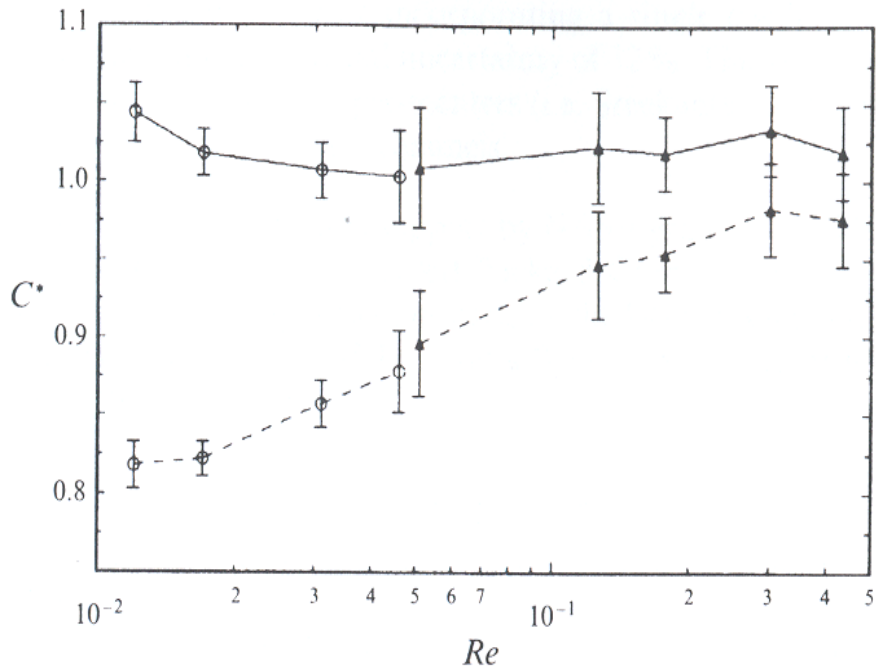
Στα παρακάτω διαγράμματα, τα αποτελέσματα του πειράματος παρουσιάζονται υπό τη μορφή του λόγου  $C^*$ . Έχουμε  $C^*=1$ , όταν ο πειραματικά μετρούμενος συντελεστής τριβής  $f$  ταυτίζεται με τη θεωρητική εκτίμησή του.



σχήμα 10: ο λόγος  $C^*$  συναρτήσει του αριθμού Reynolds για ● Άζωτο, ■ Ήλιο, ▲ Αργό

Στο σχήμα 10 παρουσιάζονται οι τιμές του λόγου  $C^*$  συναρτήσει του αριθμού Reynolds για κανάλι βάθους 11.04μm, με την πίεση στην είσοδο του να κυμαίνεται από 0.2 ως 2.1MPa, ενώ στην έξοδό του να διατηρείται στην ατμοσφαιρική στάθμη. Η θεωρητική τιμή του αριθμού Poiseuille υπολογίζεται, με βάση την συνθήκη μη ολίσθησης στο στερεό όριο ( $Kn=0$ ).



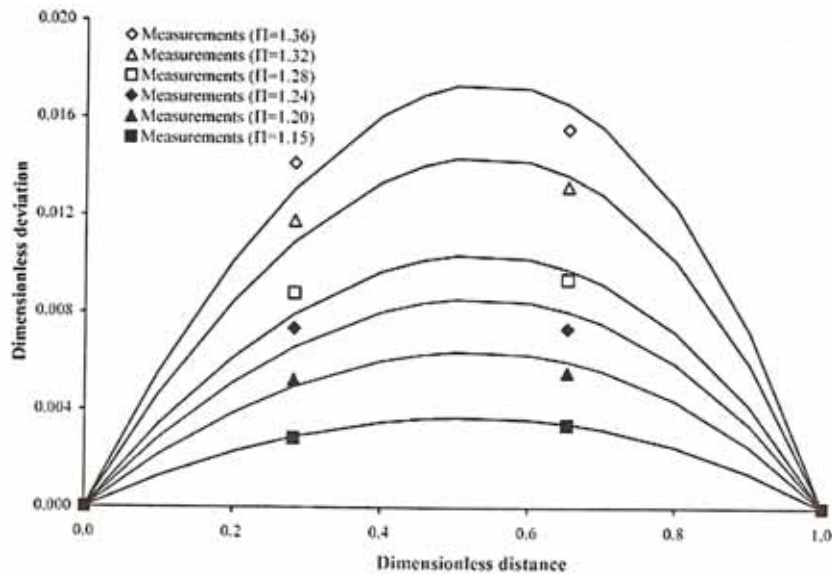


σχήμα 11: ο λόγος  $C^*$  συναρτήσει του αριθμού Reynolds για ▲ Άζωτο, ○ Ήλιο

Στο σχήμα 11 παρουσιάζονται οι τιμές του λόγου  $C^*$  συναρτήσει του αριθμού Reynolds για κανάλι βάρους  $0.51\mu\text{m}$ , με την πίεση στην είσοδο του να κυμαίνεται από 1.1 ως 3.4MPa, ενώ στην έξοδό του να διατηρείται στην ατμοσφαιρική στάθμη. Η διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στις τιμές του  $C^*$  υπολογισμένες βάσει της υπόθεσης μη ολίσθησης, ενώ η συνεχής γραμμή αντιστοιχεί στο μοντέλο με οριακή συνθήκη ολίσθησης.

**Η εμφανής απόκλιση που παρουσιάζει το υπολογιστικό μοντέλο μη ολίσθησης για χαμηλές τιμές του αριθμού Reynolds, μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι το φαινόμενο ολίσθησης είναι ιδιαίτερος έντονο στην περιοχή αυτή, όπου η ροή χαρακτηρίζεται μεταβατική ( $0.004 \leq Kn \leq 0.373$ ).**

Ο **Zhao(2003)** παρουσίασε μετρήσεις πίεσης χρησιμοποιώντας κανάλια παρόμοια με τα παραπάνω, αλλά για μεγαλύτερο εύρος λόγων πίεσης. Πήρε κατανομές πίεσης κάνοντας δύο πειράματα για κάθε λόγο πίεσης, αλλάζοντας την κατεύθυνση της ροής σε κάθε πείραμα. Συνδυάζοντας τις πιέσεις και από τα δύο πειράματα, είναι δυνατόν να εξαλείψουμε τις απώλειες πίεσης τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο των αγωγών, και οι οποίες μπορεί να είναι σημαντικές για μεγάλους λόγους πίεσης. Οι λόγοι πίεσης διαφέρουν των πειραματικών λιγότερο του 3,84%. Από το παρακάτω σχήμα βλέπουμε πως η γραμμική κατανομή αυξάνεται όσο αυάνεται ο λόγος πίεσης, υποδηλώνοντας πως η επόδραση της συμπιεστότητας γίνεται πιο έντονη για μεγάλους λόγους πίεσης.



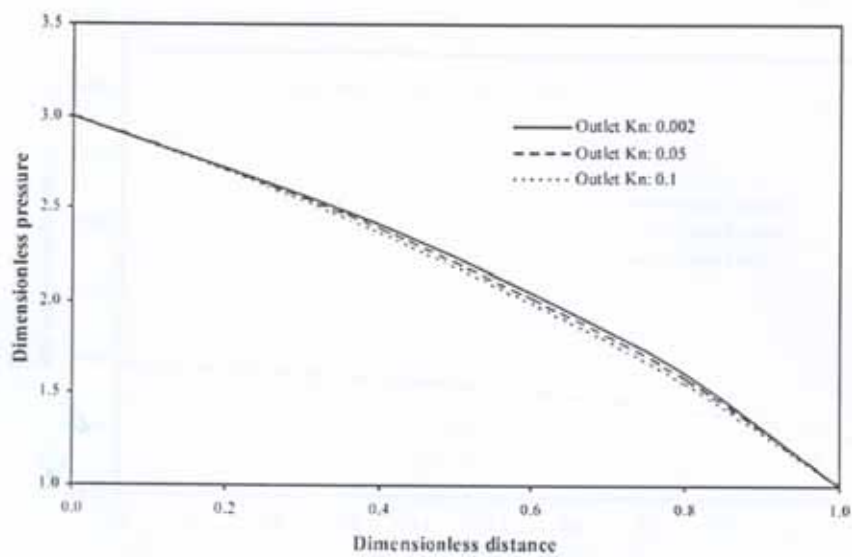
σχήμα 12: η απόκλιση των μετρήσεων πίεσης από τη γραμμική διανομή, σε συνάρτηση της αδιάστατης απόστασης κατά μήκος του καναλιού με τους λόγους πίεσης βασισμένους στη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων.

- **J.Jang και S.T.Wereley - 2004**

Σε μια εργασία τους παρουσίασαν τα αναλυτικά αποτελέσματα σχετικά με τη διανομή πίεσης σε ευθύγραμμο μικροαγωγό στην περιοχή της ροής με ολίσθηση, που είχαν αναπαράξει μέσω ενός υπολογιστικού μοντέλου. Η ροή σ' αυτό θεωρήθηκε μόνιμη, διδιάστατη και ισοθερμοκρασιακή, ενώ χρησιμοποιήθηκε οριακή συνθήκη ολίσθησης πρώτης τάξης στο στερεό τοίχωμα. Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στον εντοπισμό της θέσης της μέγιστης απόκλισης από τη γραμμική διανομή πίεσης.

Κατόπιν, τα αποτελέσματα αυτά συγκρίθηκαν με πειραματικές μετρήσεις τις πίεσης κατά μήκος ενός αντίστοιχου αγωγού, αποκαλύπτοντας μια εξαιρετική συνάφεια των δύο προσεγγίσεων.

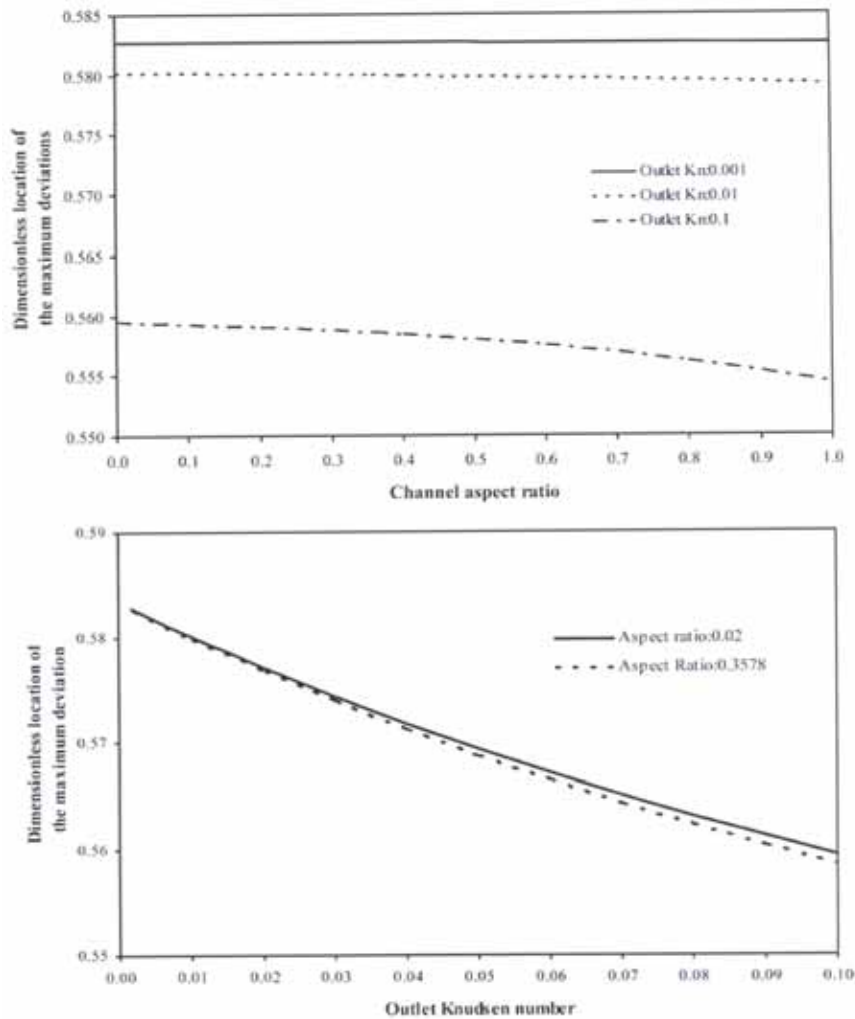
Στο σχήμα 12 παρουσιάζεται η θεωρητική διανομή της πίεσης κατά μήκος αγωγού με λόγο διαστάσεων 0.36 και λόγο πίεσης 3.0, για διάφορες τιμές του αριθμού Knudsen.



σχήμα 13: θεωρητική διανομή της πίεσης κατά μήκος αγωγού με λόγο διαστάσεων 0.36 και λόγο πίεσης 3.0

Η διανομή της πίεσης είναι εμφανώς μη γραμμική σε όλες τις περιπτώσεις. Όσο ο αριθμός Knudsen αυξάνει, η απόκλιση από τη γραμμικότητα ελαττώνεται. Η συμπεριφορά αυτή επιβεβαιώνεται και με τη χρήση της μεθόδου εξομοίωσης Monte Carlo.

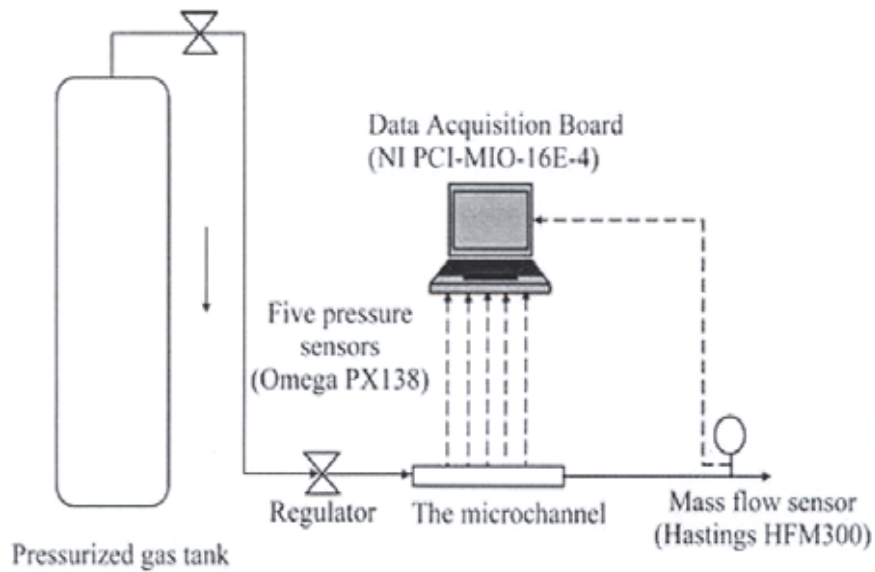
Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η θέση (αδιάστατη) της μέγιστης απόκλισης από τη γραμμική διανομή, συναρτήσει του λόγου διαστάσεων του καναλιού και του αριθμού Knudsen.



σχήμα 14: η θέση της μέγιστης απόκλισης από τη γραμμική διανομή, συναρτήσει του λόγου διαστάσεων του καναλιού και συναρτήσει του αριθμού Knudsen.

Όσο ο αριθμός Knudsen αυξάνει ή ο λόγος διαστάσεων του καναλιού αυξάνει, η θέση της μέγιστης απόκλισης πλησιάζει στην τιμή 0.5. Αυτό είναι συνεπές με το γεγονός ότι η απόσταση της θέσης μέγιστης απόκλισης ελαττώνεται καθώς η αραιοποίηση εντείνεται, ενώ ο βαθμός αραιοποίησης αυξάνεται όταν ο λόγος διαστάσεων του καναλιού τείνει στη μονάδα. Η συνεισφορά του λόγου διαστάσεων στη διαμόρφωση της θέσης του μεγίστου είναι περί το 1%, του δε αριθμού Knudsen περί το 3%.

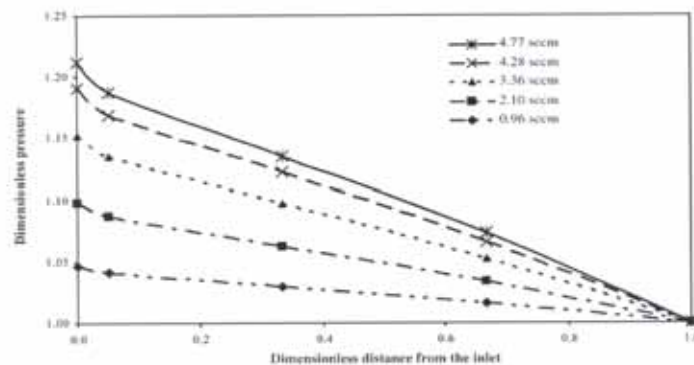
Παρακάτω φαίνεται σχηματικά η πειραματική διάταξη, με τη βοήθεια της οποίας ελήφθησαν οι μετρήσεις και οι συνθήκες κάτω από τις οποίες εκτελέστηκε το πείραμα.



σχήμα 15: η πειραματική διάταξη

Παράμετροι	Εύρος τιμών
Πίεση περιβάλλοντος	98.650Pa
Μέση ελεύθερη διαδρομή (στην έξοδο)	67.61nm
Αριθμός Knudsen (στην έξοδο)	0.00180
ερμοκρασία	296 K
Μοριακή μάζα	28.96 g/mol
Αριθμός Mach (στην έξοδο)	0.0013 – 0.0611
Αριθμός Reynolds	1.2 – 54.7
Μοριακή διάμετρος	0.3716nm

Στο σχήμα 15 παρουσιάζεται η πειραματικά μετρημένη διανομή της πίεσης καθ' όλο το μήκος μικροκαναλιού ορθογωνικής διατομής για διαφορετικές τιμές της παροχής μάζας. Η απότομη πτώση που εμφανίζεται στην αρχή του πειράματος, αποδίδεται στο μεταβατικό φαινόμενο στην είσοδο του καναλιού. Από τη μορφή των καμπυλών παρατηρούμε μια ελαφρά απόκλιση από τη γραμμική συμπεριφορά.



σχήμα 16: η πειραματικά μετρημένη διανομή της πίεσης κατά μήκος μικροκαναλιού

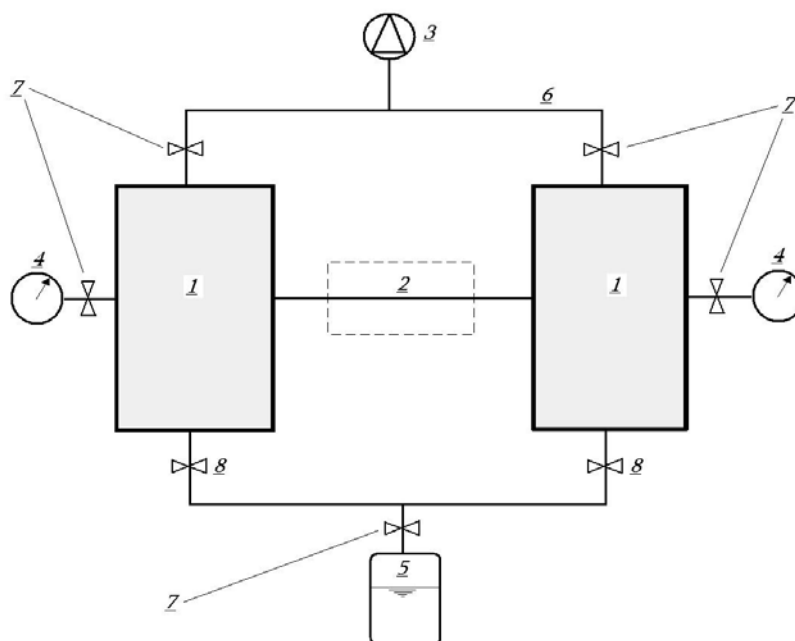
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ Β : Η πειραματική διάταξη

### Β.1. Η «φιλοσοφία»

Ο σκοπός της πειραματικής διαδικασίας που διεξάγεται σε αυτή την εργασία είναι να προσδιορίσει και να περιγράψει με πειραματικά δεδομένα τα χαρακτηριστικά της ροής ενός αερίου κατα μήκος μικροαγωγών που έχουν χαρακτηριστεί πάνω σε πλάκα πυριτίου (βλ. παρακάτω).

Έτσι, η γενική «φιλοσοφία» της διάταξης ήταν να κατασκευαστούν δυο δεξαμενές αερίου, οι οποίες θα συνδέονται με την πλάκα πυριτίου. Διατηρώντας τις δεξαμενές σε διαφορετική στάθμη πίεσης, μπορούμε να εξαναγκάσουμε το αέριο να κινηθεί, διαμέσου των αγωγών, από τη δεξαμενή υψηλής πίεσης προς αυτή της χαμηλής. Καθότι επιθυμούμε να διατηρήσουμε την πίεση σε χαμηλά επίπεδα (πολύ χαμηλότερα από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες) και στις δύο δεξαμενές, ώστε να έχουμε μετρήσεις για το μεγαλύτερο δυνατό μέρος του φάσματος ‘αεριοποίησης’ του ρευστού (μεγάλους αριθμούς Knudsen), χρησιμοποιήσαμε μια αντλία κενού στην έξοδο των δεξαμενών για να δημιουργήσουμε υποπίεση. Με ρυθμιστικές βαλβίδες ελέγξαμε την παροχή ρευστού στην είσοδο της κάθε δεξαμενής, ώστε να επιτύχουμε το επιθυμητό επίπεδο πίεσης. Σε καθεμιά απ’ αυτές συνδέθηκε αισθητήρας πίεσης, για να μετρά κάθε στιγμή την υφιστάμενη πίεση.

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα σχηματικό διάγραμμα της διάταξης :



- 1.) δεξαμενές αερίου
- 2.) πλάκα πυριτίου(μικροαγωγοί)
- 3.) αντλία κενού
- 4.) αισθητήρες κενού
- 5.) φιάλη αργού
- 6.) σωληνώσεις
- 7.) βαλβίδες on-off
- 8.) βαλβίδες ρύθμισης παροχής

## B.2. Η μορφή της διάταξης

Η πειραματική μας διάταξη έχει τη μορφή που φαίνεται στην εικόνα 1. Στη θέση του κόκκινου μικροαγωγού υπάρχει η πλάκα πυριτίου στην οποία έχουν εγχαρακτεί καταλλήλως τα μικροκανάλια ( βλ. παράρτημα 3 ).



εικόνα 1 : η πειραματική διάταξη

Στην εικόνα 1 φαίνονται καθαρά :

Στο κέντρο, οι δυο δεξαμενές (πάνω στο βάθρο), που συνδέονται με τον μικροαγωγό (κόκκινο σωληνάκι).

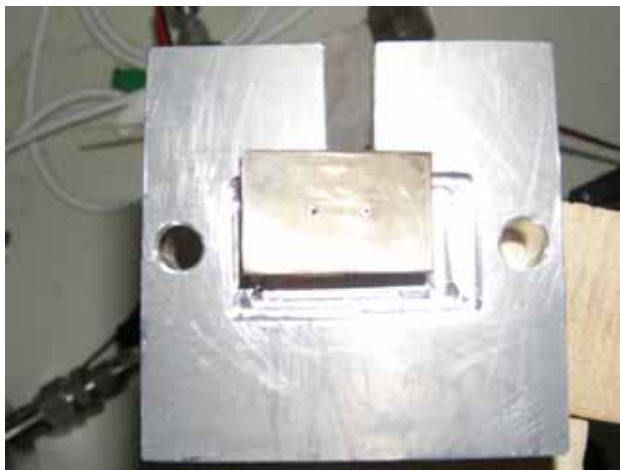
Αριστερά και δεξιά, οι δύο αισθητήρες πίεσης συνδέονται με μια δεξαμενή ο καθένας. Μεταξύ δεξαμενής και αισθητήρα παρεμβάλλεται βάννα on/off, που απομονώνει το όργανο, προκειμένου να το προστατέψει από έκθεση σε υπερπίεσεις που μπορεί να του προκαλέσουν ζημιά. Τα καλώδια στο πίσω μέρος των αισθητήρων, τους τροφοδοτούν με ρεύμα και τους συνδέουν με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή, μέσω του οποίου λαμβάνουμε τις μετρήσεις.

Στο κάτω μέρος, οι μεταλλικές σωληνώσεις που φαίνονται, συνδέουν τις δύο δεξαμενές με τη φιάλη του αερίου. Στην είσοδο κάθε δεξαμενής έχει τοποθετηθεί περιστροφική βαλβίδα για την ρύθμιση της παροχής του ρευστού σ' αυτή.

Στο επάνω μέρος, οι μεταλλικές σωληνώσεις οδηγούν στην αντλία κενού, με δυο βάνες on/off, που την απομονώνουν κατά περίπτωση από τις δεξαμενές.

Στην περίπτωση μας κατασκευάστηκε ειδική μεταλλική βάση στις διαστάσεις της ορθογωνικής πλάκας πυριτίου με δύο μικρές οπές (βλ. εικόνα 2) προκειμένου το αέριο από τις σωληνώσεις να περάσει στα μικροκανάλια μέσω άλλων δύο οπών στα άκρα της πλάκας πυριτίου. Στην εγκατάσταση αυτή διαπιστώθηκαν προβλήματα καθώς αποδείχτηκε ιδιαίτερα δύσκολο με το χέρι οι οπές της μεταλλικής βάσης να συμπέσουν με τις οπές της πλάκας έτσι ώστε να μην έχουμε απώλειες. Για το λόγο αυτό κρίθηκε αναγκαία η δημιουργία μεταλλικής μάσκας (βλ.εικόνα 2) η οποία έχει

«σκαφτεί» στο εσωτερικό της με τέτοιο τρόπο ώστε η μεταλλική βάση και η πλάκα πυριτίου να πέφτουν ακριβώς η μία πάνω στην άλλη χωρίς να έχουν τη δυνατότητα να κινηθούν, αφού ένα άλλο μεταλλικό κομμάτι με τη βοήθεια δύο σπειρωμάτων και περικοχλίων έρχεται και «κουμπώνει» πάνω στη μάσκα (βλ. εικόνα3 ). Έτσι μας δίνεται η δυνατότητα να συσφίξουμε και να χαλαρώσουμε όσο θέλουμε εμείς, προκειμένου να πετύχουμε ικανοποιητικές απώλειες και δυνατή ροή του αερίου από τη μιά οπή της πλάκας πυριτίου στην άλλη.



εικόνα 2 : το κάτω μέρος της μεταλλικής μάσκας και στο κέντρο η μεταλλική βάση με τις δύο μικρές οπές



εικόνα 3 : το επάνω μέρος της μεταλλικής μάσκας το οποίο θα έρθει και θα «κουμπώσει» με το κάτω, με τη βοήθεια των δύο σπειρωμάτων.

Παρακάτω, δίδονται τα βασικά χαρακτηριστικά και μεγέθη για κάθε ένα συστατικό στοιχείο της πειραματικής διάταξης.

1.Οι δεξαμενές του αερίου:

- είναι κατασκευασμένες από ανοξείδωτο χαλυβδοσωλήνα
- έχουν πάχος τοιχώματος : 0.5cm
- έχουν εσωτερικό όγκο (χωρητικότητα) : 35ml





εικόνα 4: οι δεξαμενές του αερίου

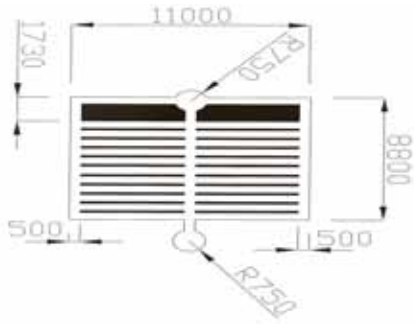
## 2. Χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές πλάκες πυριτίου



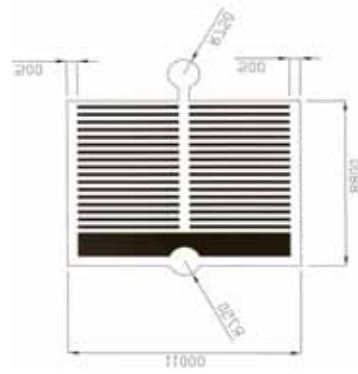
εικόνα 5 : οι δύο πλάκες πυριτίου σε φωτογραφία

Στην πρώτη πλάκα ( σχ.1 ) εγχαρακτήθηκαν 22 μικροκανάλια ορθογωνικής διατομής με μήκος  $L=4750\mu\text{m}$ , πλάτος  $W=500\mu\text{m}$  και βάθος  $H=30\mu\text{m}$ .

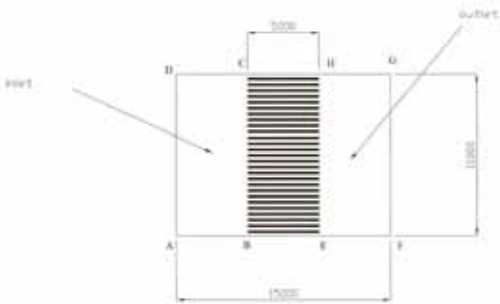
Στην δεύτερη πλάκα ( σχ.2 ) εγχαρακτήθηκαν 36 μικροκανάλια ορθογωνικής διατομής με μήκος  $L=4750\mu\text{m}$ , πλάτος  $W=250\mu\text{m}$  και βάθος  $H=30\mu\text{m}$ . Στην τρίτη πλάκα τα μικροκανάλια έχουν την ίδια γεωμετρία με αυτά της δεύτερης, αλλά αλλάζει ο τρόπος εισαγωγής του ρευστού. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3, η εισαγωγή και εξαγωγή του ρευστού γίνεται από το πλάι, ενώ έχει αυξηθεί αρκετά το εμβαδόν των πλαϊνών διαδρόμων του ρευστού. Με τον τρόπο αυτό θέλουμε να είμαστε πιο σίγουροι πως το ρευστό θα περάσει από όλα τα χαραγμένα κανάλια της πλάκας. Όπως διακρίνουμε και στις φωτογραφίες οι πλάκες πυριτίου προστατεύονται και από τις δύο πλευρές τους με φύλλα Plexiglas με τη βοήθεια μίας ταινίας διπλής όψης. **Η τεχνοτροπία αυτή, όπως θα δούμε και παρακάτω, πιθανόν να επηρεάζει αρνητικά τα αποτελέσματά μας, αφού είναι σχετικά εύκολο να αναρροφήσει η πλάκα την ταινία.**



σχήμα 1



σχήμα 2



σχήμα 3

Όπως φαίνεται και στα τρία παραπάνω σχήματα, τα μικροκανάλια είναι χαραγμένα παράλληλα έτσι να πετύχουμε όσο το δυνατόν μικρότερες πιέσεις.

### 3. Οι αισθητήρες πίεσης:

> Leybold Cerevac Transmitter CTR90

-χωρητικού τύπου

-με εύρος μετρήσεων: 0.01 – 100Torr

-με ακρίβεια μέτρησης: 0.2% της μετρούμενης τιμής

-με μέγιστη υφιστάμενη πίεση : 2000Torr

-σήμα εξόδου: 0 – 10V, γραμμικό

-τάση τροφοδοσίας:  $\pm 15V$  ή  $\pm 24V$  DC

-βάρος: 0,24 kg

-της εταιρείας Leybold

-χώρα κατασκευής: Γερμανία



εικόνα 6: Leybold Cerevac Transmitter CTR90

- >MKS Baratron 622A
- χωρητικού τύπου
- με εύρος μετρήσεων: 0 – 20Torr
- με ακρίβεια μέτρησης : 0.15% της μετρούμενης τιμής
- μέγιστη υφιστάμενη πίεση: 310 kPa
- σήμα εξόδου: 0 – 10V, γραμμικό
- τάση τροφοδοσίας:  $\pm 15V$  DC
- της εταιρείας MKS
- χώρα κατασκευής: Η.Π.Α.



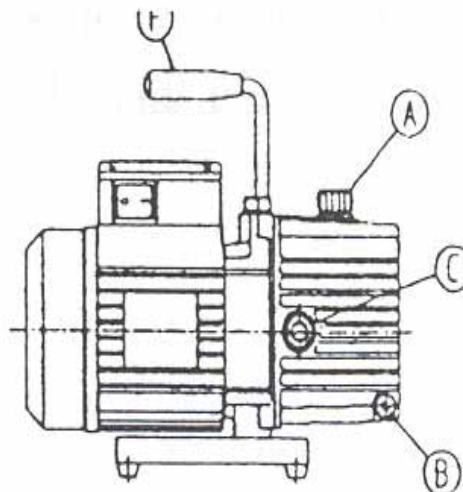
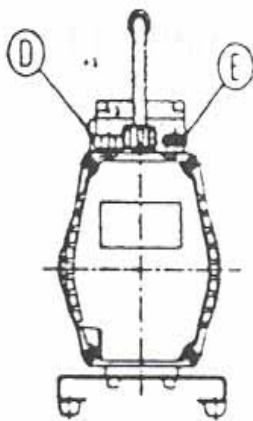
εικόνα 7: MKS Baratron 622A



εικόνα 8: το τροφοδοτικό των δύο αισθητήρων πίεσης

4. Η αντλία κενού που χρησιμοποιήθηκε :

- είναι περιστροφικού τύπου (μονοβάθμιος ακτινικός συμπιεστής)
- της εταιρείας General Europe Vacuum (GEV)
- μοντέλο 3GP-1
- ονομαστική πίεση (σύμφωνα με τις προδιαγραφές) : 10Pa
- πραγματική πίεση (σε συνθήκες λειτουργίας) : 60Pa
- ονομαστική παροχή : 3.0 m<sup>3</sup>/h
- ισχύς κινητήρα: ¼ HP
- τάση τροφοδοσίας: 220V / 50Hz
  - λίπανση: 220ml λαδιού
  - διαστάσεις: 290 x 110 x 240 mm
  - καθαρό βάρος: 7.2 kg



Καθότι με τη χρήση μεταλλικών σωληνώσεων και δεξαμενών εγκυμονούσε ο κίνδυνος εμφάνισης του φαινομένου ‘outgassing’ που θα αποσταθεροποιούσε ενδεχομένως το επίπεδο της πίεσης μέσα στη διάταξη, υπονομεύοντας έτσι την εγκυρότητα των μετρήσεων, προτιμήθηκε αντί του αέρα, ως μέσο πραγματοποίησης του πειράματος, το Αργό, το οποίο είναι μακράν πιο αδρανές από τον ατμοσφαιρικό αέρα κι έτσι ελαχιστοποιείται το ενδεχόμενο αλληλεπίδρασής του με τις μεταλλικές επιφάνειες που έρχεται σε επαφή. Το προμηθευτήκαμε σε υγρή μορφή, υπό πίεση 200bar, μέσα σε μεταλλική φιάλη.

**Προσοχή:** Οποιαδήποτε φιάλη με συμπιεσμένο αέριο σε τόσο μεγάλη πίεση θα πρέπει να προσδένεται γερά σε ακλόνητο σημείο του χώρου (εργαστηρίου), καθότι μια ενδεχόμενη διαρροή μπορεί να του προσδώσει τεράστια κινητική ενέργεια, μετατρέποντάς το ουσιαστικά σε ‘πύραυλο’.



εικόνα 9 : η φιάλη με το Αργό

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ Γ : Πειραματικά αποτελέσματα

Οι πειραματικές μας μετρήσεις αφορούν τρεις διαφορετικές πλάκες πυριτίου. Στην πρώτη πλάκα το πλάτος της ορθογωνικής διατομής των καναλιών είναι στα 500μm ενώ στη δεύτερη μειώνεται στο μισό αφήνοντας τα υπόλοιπα γεωμετρικά χαρακτηριστικά ίδια, έχοντας αυξησει τον αριθμό των παράλληλων αγωγών από 27 σε 36 κανάλια. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των 22 καναλιών της τρίτης πλάκας είναι ακριβώς ίδια με αυτά της δεύτερης, μόνο που όπως είδαμε παραπάνω, έχει αλλάξει ο τρόπος εισαγωγής του αερίου.

Με  $P_{leyb}$  ονομάζουμε τη διαφορά πίεσης που μετράμε κατα την εισαγωγή του αερίου από το μανόμετρο LEYBOLD, ενώ αντίστοιχα η  $P_{mks}$  αναφέρεται στην πίεση που μετρά το μανόμετρο MKS κατα την έξοδο. Κύριο μέλημά μας είναι να πάρουμε ένα ικανοποιητικό εύρος μετρήσεων για την πίεση εισόδου, ξεκινώντας περίπου από τα 90 Torr και ρίχνωντάς την κοντά στο 1 Torr. Την πίεση στην έξοδο προσπαθούμε να την κρατήσουμε σε σχετικά σταθερά χαμηλά επίπεδα.

Η παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων, για λόγους βέλτιστης ταξινόμησης, θα ακολουθήσει την παρακάτω διάρθρωση:

**Στο πρώτο μέρος** θα γίνει αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων κάθε πειράματος ξεχωριστά (δηλ. για συγκεκριμένη πλάκα καναλιών και συγκεκριμένη αρχική διαφορά πίεσης μεταξύ των δεξαμενών). Βασικά μακροσκοπικά μεγέθη, όπως η πίεση εισόδου και εξόδου, η παροχή μάζας, η ταχύτητα του ρευστού στο μικροκάνάλι καθώς και η σταθερά  $Re$  του ρευστού, θα παρασταθούν συναρτήσει του χρόνου και της διαφοράς πίεσης  $DP$  μεταξύ των δεξαμενών.

**Στο δεύτερο μέρος** θα παρουσιαστούν κάποια συγκεντρωτικά διαγράμματα καθώς και κάποια συγκριτικά διαγράμματα της πειραματικής παροχής μάζας και της θεωρητικής για κάθε πλάκα καναλιών.

**Τέλος**, θα εξαχθούν τα όποια δυνατά συμπεράσματα.

## Γ.1 Αναλυτική παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων

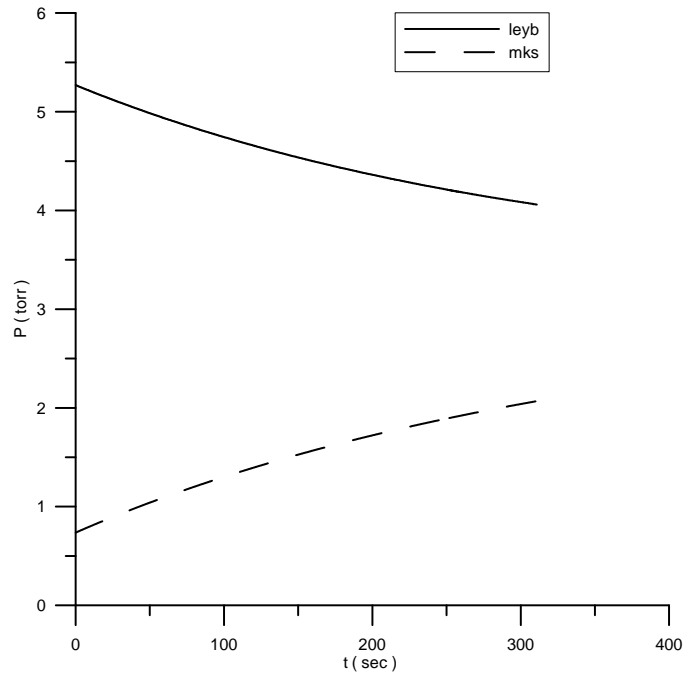
► Πλάκα μικροαγωγών μήκους  $L=4750\mu\text{m}$ , πλάτους  $W=500\mu\text{m}$  και βάθους  $H=30\mu\text{m}$ . Αριθμός καναλιών  $N=22$

Ακολουθεί ο πίνακας όλων των πειραματικών μετρήσεων πίεσης που πάρθηκαν στην περίπτωση αυτή:

Μέτρηση	$P_{\text{leyb}}$ (torr)	$P_{\text{mks}}$ (torr)	$Kn$
Test 1	5,27	0,73	1,067
Test 2	7,44	1,06	0,753176
Test 3	8,52	1,16	0,661364
Test 4	13	1,06	0,455334
Test 5	17,71	2,04	0,324152
Test 6	20,59	1,98	0,283651
Test 7	25,07	2,53	0,231957
Test 8	29,99	2,65	0,19614
Test 9	34,40	3,36	0,169544
Test 10	37,52	3,94	0,154414
Test 11	44,21	3,41	0,134439
Test 12	50,64	6,47	0,112099
Test 13	55,44	5,50	0,105054
Test 14	57,80	8,60	0,096416
Test 15	61,10	8,39	0,092128
Test 16	64,89	10,45	0,084975
Test 17	74,58	7,08	0,078398
Test 18	80,93	9,61	0,070709
Test 19	89,93	9,93	0,06411

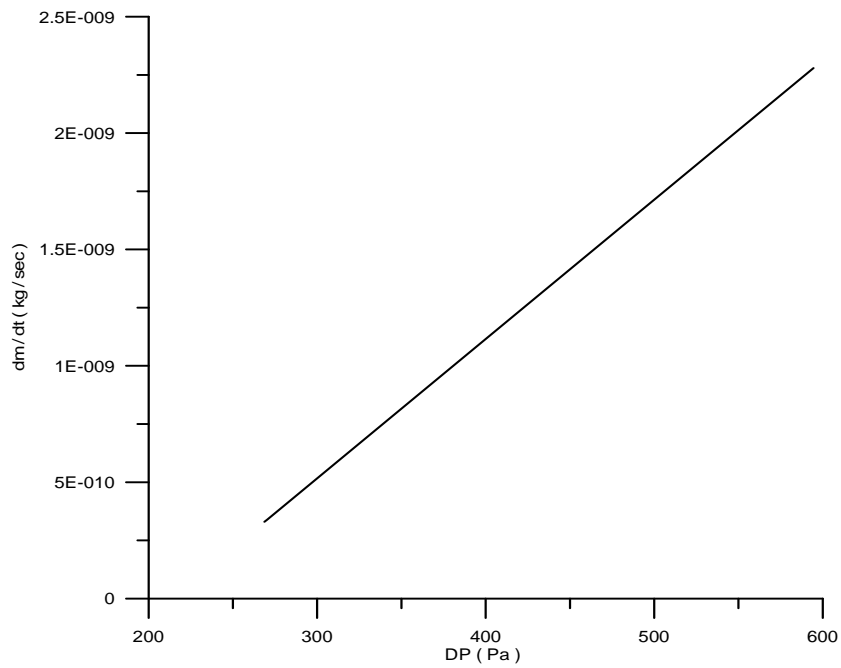
Πίνακας 1

Όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα, αυτό που μας ενδιαφέρει και προσπαθούμε να πετύχουμε είναι η σταδιακή αύξηση της πίεσης στην είσοδο της μάσκας ( $P_{\text{leyb}}$ ), με την πίεση εξόδου ( $P_{\text{mks}}$ ) να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα (κάτω των 10 torr). Για λόγους εξοικονόμησης χώρου, δε θα γίνει παρουσίαση των γραφικών παραστάσεων όλων των παραπάνω μετρήσεων.



σχήμα 1

Όπως περιμέναμε και φαίνεται και στο σχήμα 1, η πίεση εισόδου μειώνεται καθώς μεταβάλλεται ο χρόνος σε αντίθεση με την πίεση στην έξοδο



σχήμα 2



Από το σχήμα 2 προκύπτει πως η παροχή μάζας  $\dot{m}$  συσχετίζεται γραμμικά με τη διαφορά πίεσης DP, μεταξύ εισόδου και εξόδου.

Η διεργασία που έχουμε ακολουθήσει για την εύρεση της DP σε κάθε περίπτωση είναι η εξής:

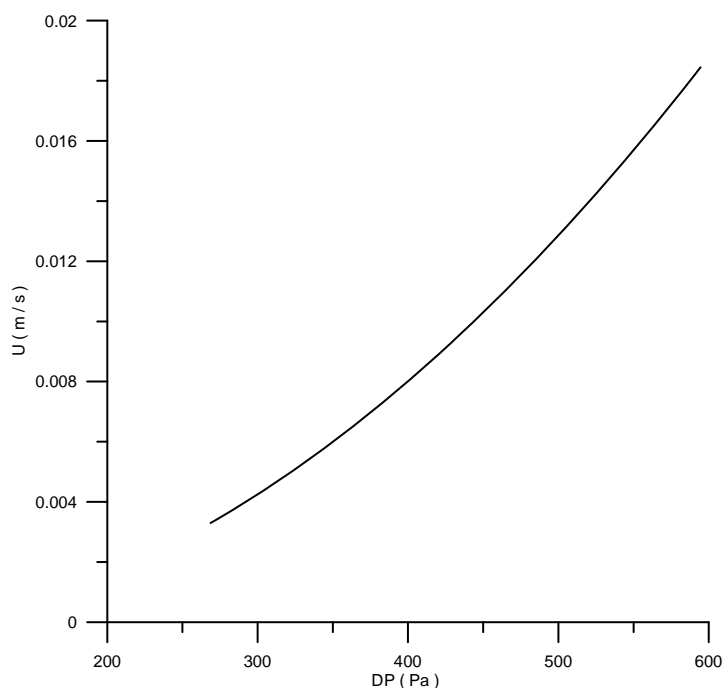
**Για τις συνθήκες εισόδου:** για κάθε πείραμα χωρίζουμε τη μεταβολή της πίεσης εισόδου ( $P_{leyb}$ ) σε ίσα χρονικά διαστήματα. Κάθε διάστημα μας ορίζεται από δύο ακραία σημεία, έστω  $P_{leyb1}$  και  $P_{leyb2}$ . Βρίσκουμε τη μέση τιμή τους:

$$P_{lm} = \frac{P_{leyb1} + P_{leyb2}}{2}$$

**Για τις συνθήκες εξόδου:** με τον ίδιο τρόπο και για αντίστοιχα διαστήματα με τα παραπάνω θα έχουμε:

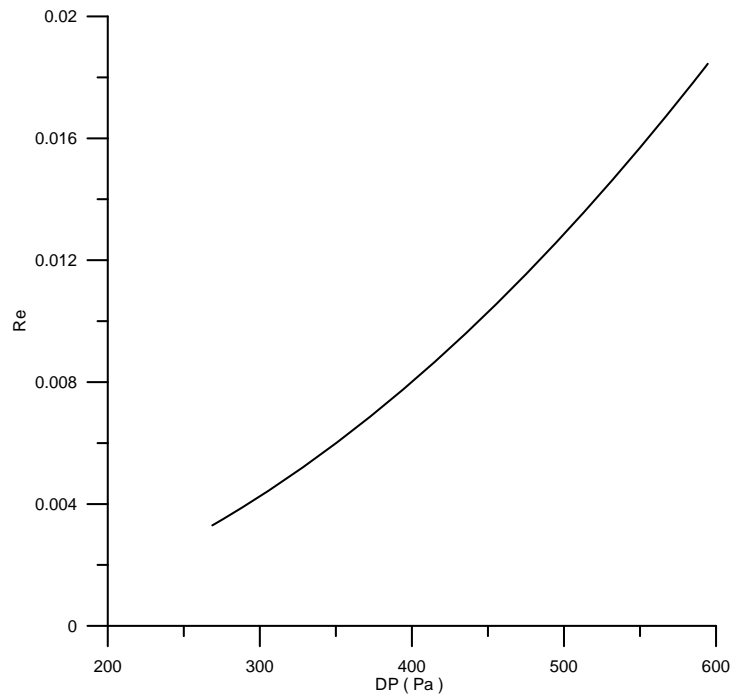
$$P_{mm} = \frac{P_{mks1} + P_{mks2}}{2}$$

Έτσι το DP προκύπτει ως η διαφορά:  $DP = P_{lm} - P_{mm}$



σχήμα 3

Η παροχή μάζας με την ταχύτητα σχετίζονται με τη σχέση  $\dot{m} = \frac{P}{R \cdot T} u \cdot A$  στην οποία  $P = P_m = \frac{P_{lm} + P_{mm}}{2}$ , με τα  $P_{lm}$  και  $P_{mm}$ , όπως ορίστηκαν παραπάνω,  $A$  είναι το εμβαδόν της ορθογωνικής διατομής, η θερμοκρασία είναι σταθερή  $T=293K$  και η σταθερά  $R=208 \frac{m^2}{s^2k}$ . Έτσι, γνωρίζοντας την παροχή μάζας και λύνοντας ως προς την ταχύτητα, έχουμε τη μεταβολή της με το DP ( σχήμα 3 ).



σχήμα 4

Ο αριθμός Re, η γραφική παράσταση του οποίου συναρτήσει του DP φαίνεται παραπάνω, προκύπτει από τη σχέση:

$$Re = \frac{u \cdot \rho \cdot D_h}{\mu}$$

στον οποίο με  $u$  συμβολίζεται η ταχύτητα του ρευστού,  $\rho$  είναι η πυκνότητα του ρευστού και με βάση όσα έχουν προηγηθεί ισχύει:

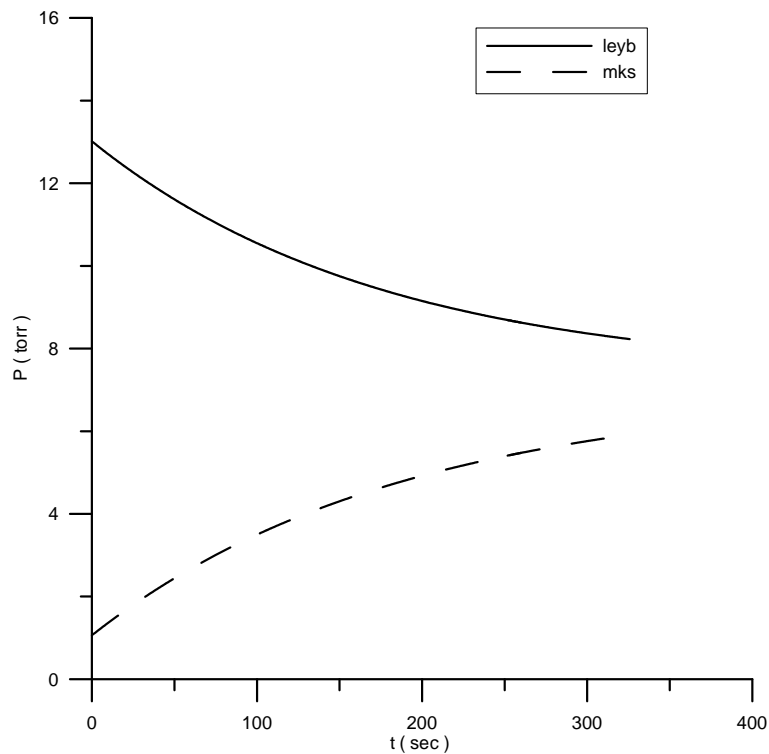
$$\rho = \rho_m = \frac{P_m}{R \cdot T}$$

με  $\mu$  συμβολίζεται η δυναμική συνεκτικότητα του αργού για το οποίο ισχύει  $\mu=2,242 \cdot 10^{-5}$ , ενώ για την υδραυλική διατομή  $D_h$  ισχύει ο τύπος

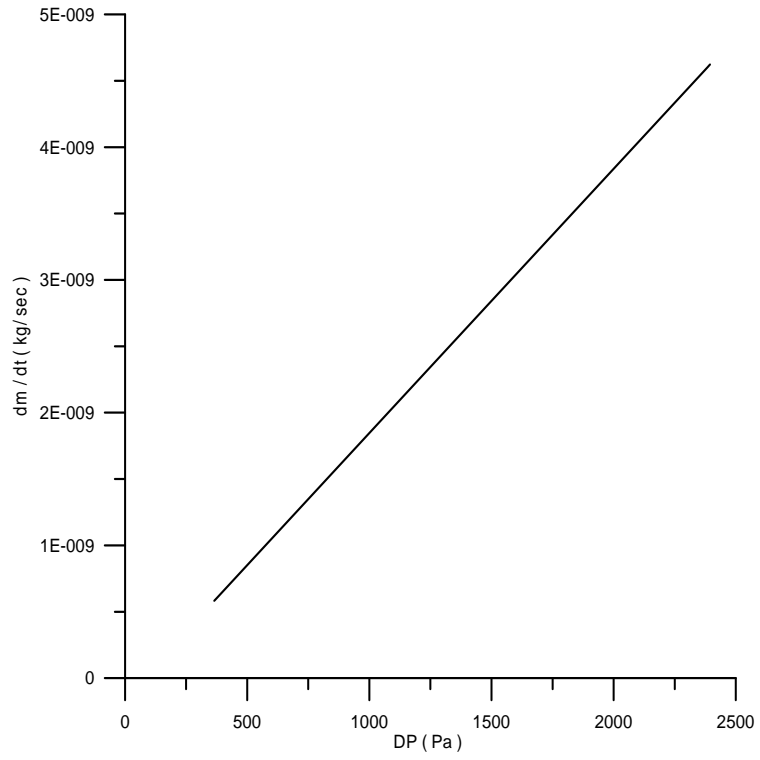
$$D_h = \frac{4A}{S}, \text{ με } A \text{ το εμβαδόν της ορθογωνικής διατομής και } S \text{ την περίμετρό της.}$$

<b>Test 4</b>	<b><math>P_{levb}=13 \text{ torr}</math></b>	<b><math>P_{mks}=1,06 \text{ torr}</math></b>
---------------	--	---

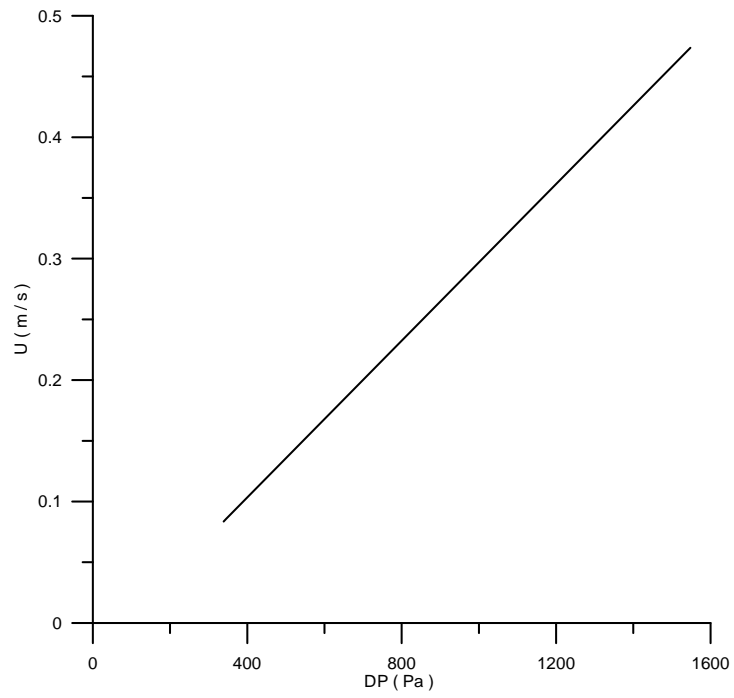
Τα αποτελέσματα στις παρακάτω περιπτώσεις παρουσιάζονται συνοπτικότερα, καθότι ως σχόλια ισχύουν όσα ελέχθησαν στο προηγούμενο πειράμα.



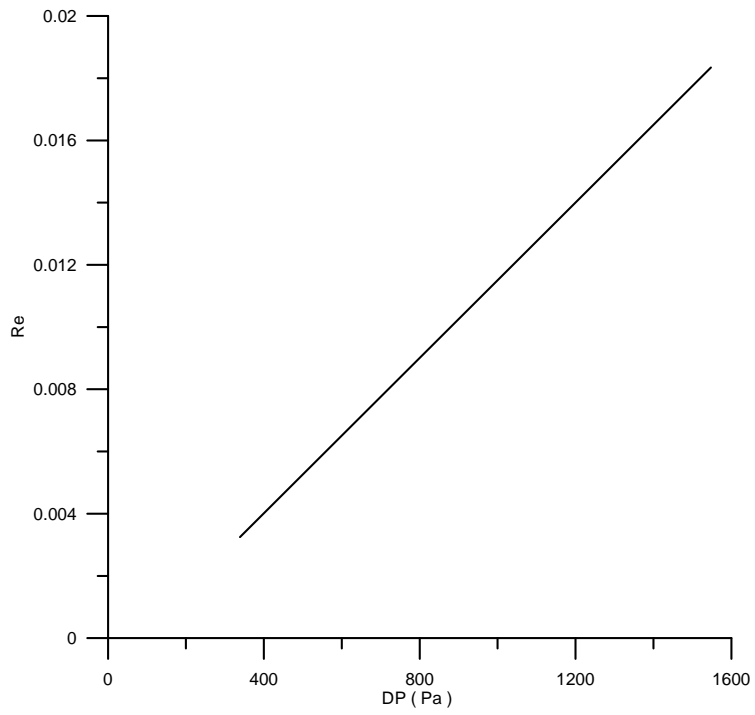
σχήμα 5



σχήμα 6

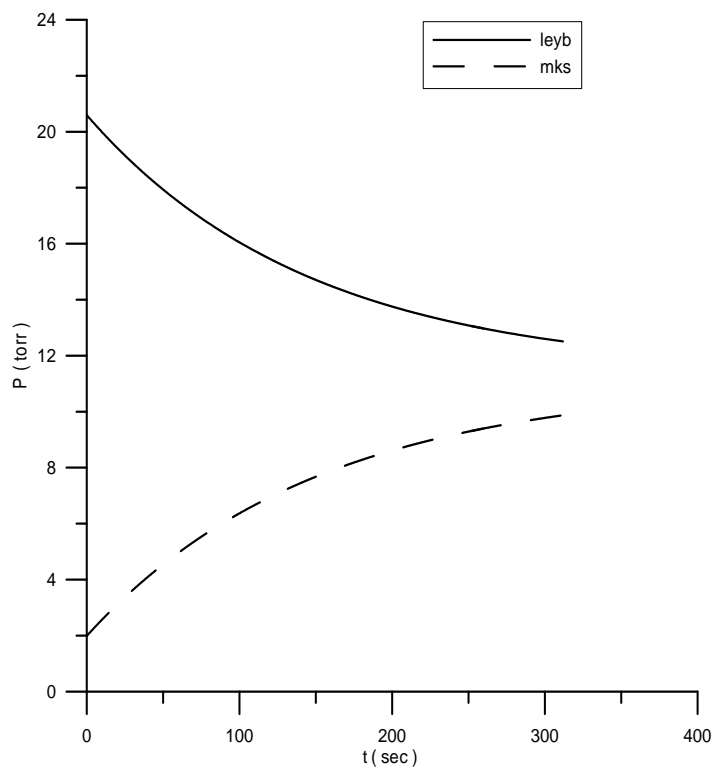


σχήμα 7

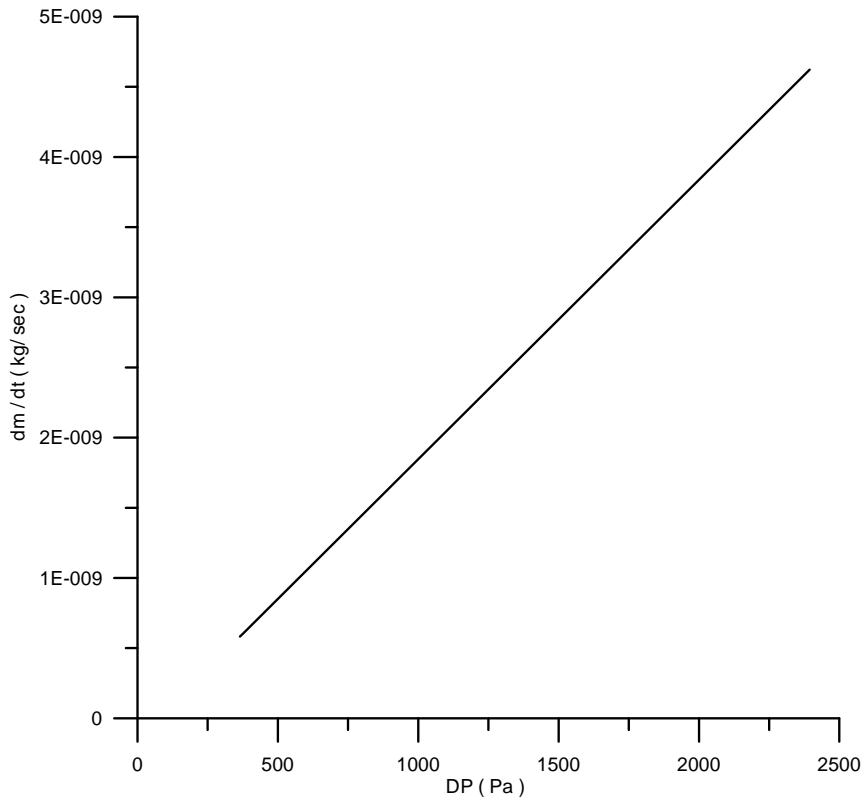


σχήμα 8

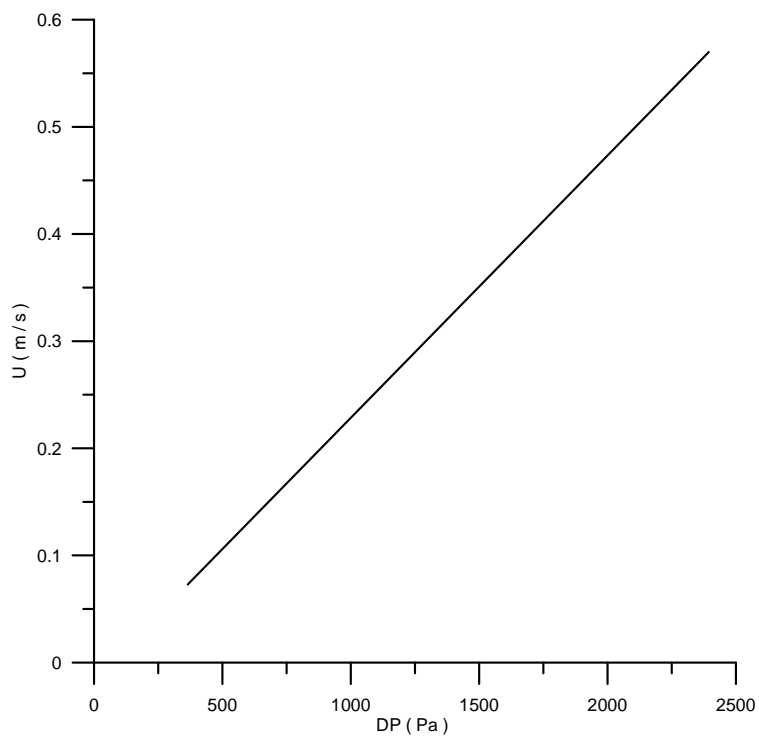
<b>Test 6</b>	<b><math>P_{leyb}=20,59 \text{ torr}</math></b>	<b><math>P_{mks}=1,98 \text{ torr}</math></b>
---------------	---	---



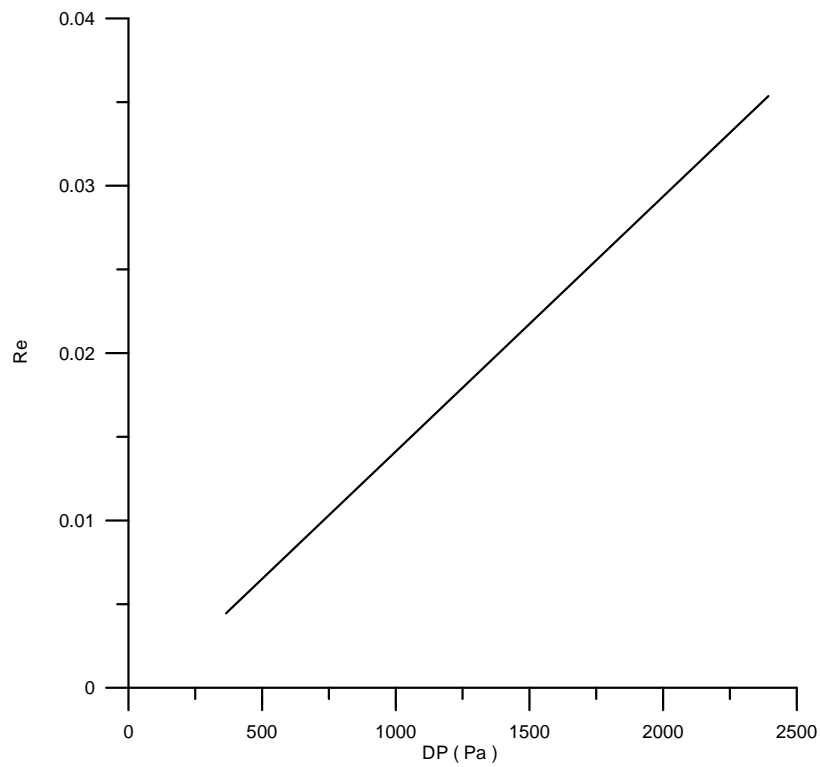
σχήμα 9



σχήμα 10



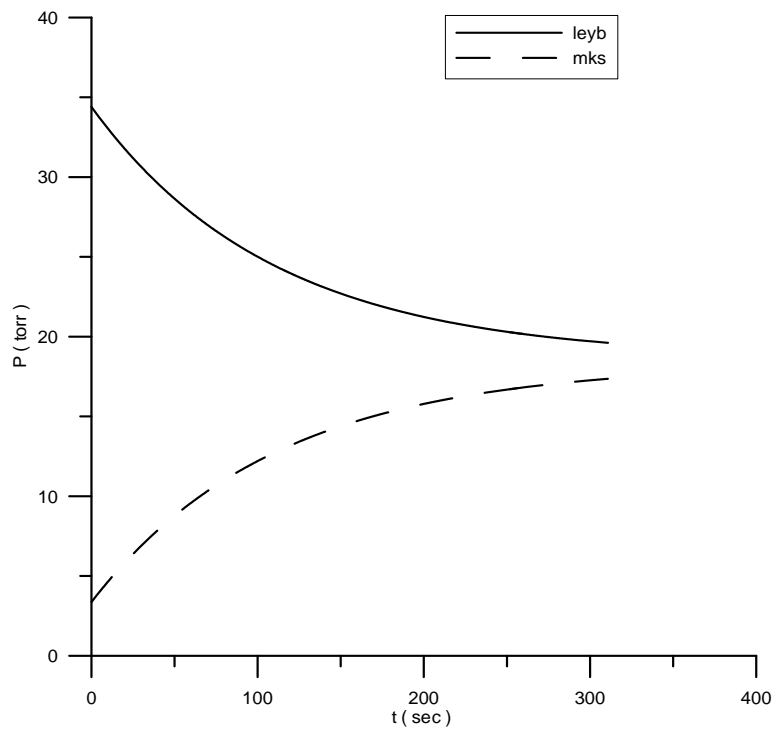
σχήμα 11



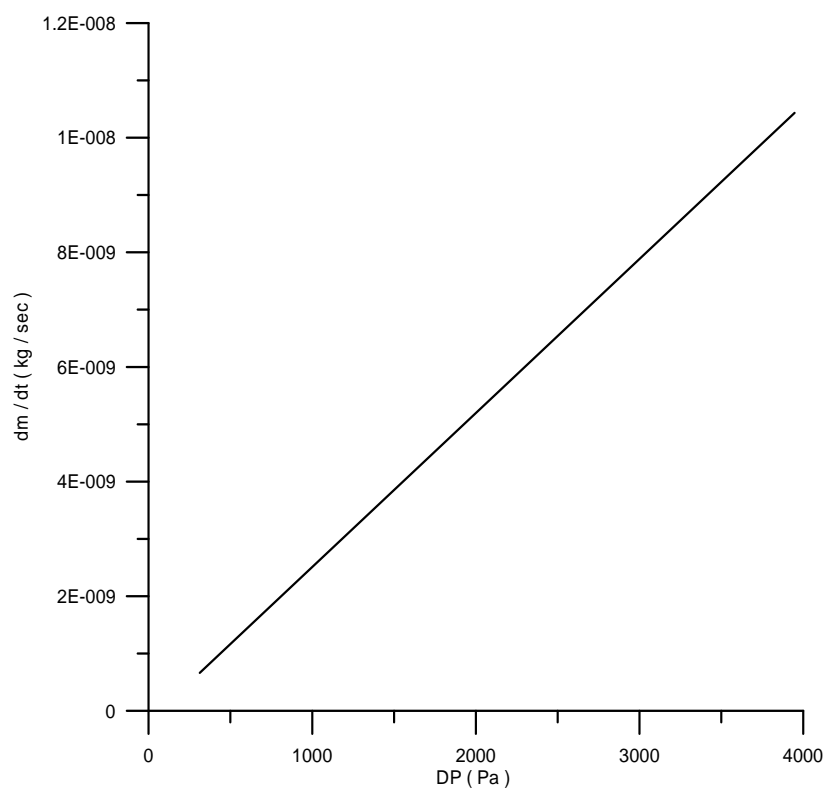
σχήμα 12

Όπως παρατηρούμε και σε αυτό το πείραμα, οι τιμές του αριθμού Re είναι χαμηλές.

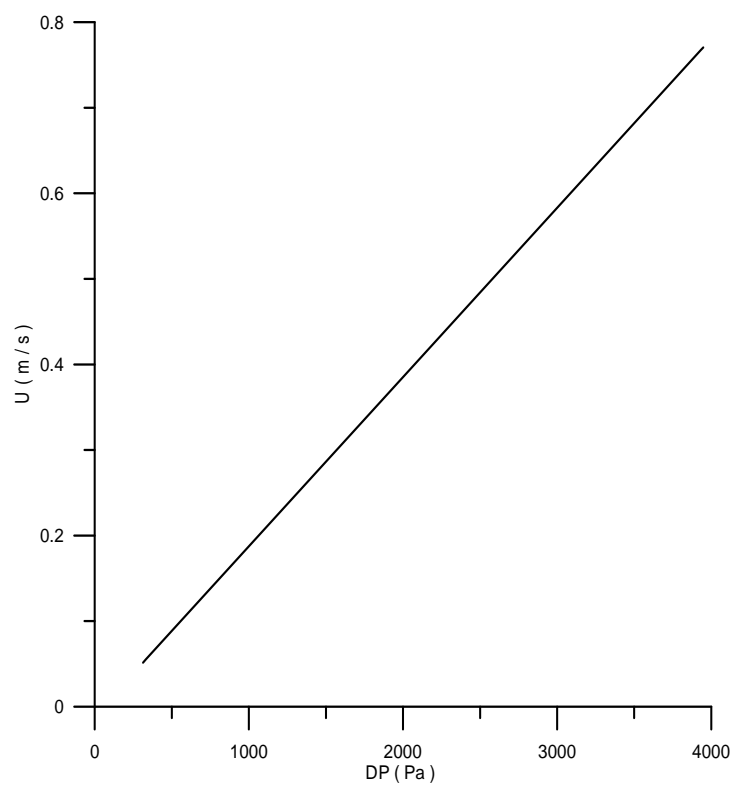
<b>Test 9</b>	<b><math>P_{leyb}=34,40 \text{ torr}</math></b>	<b><math>P_{mks}=3,36 \text{ torr}</math></b>
---------------	---	---



σχήμα 13

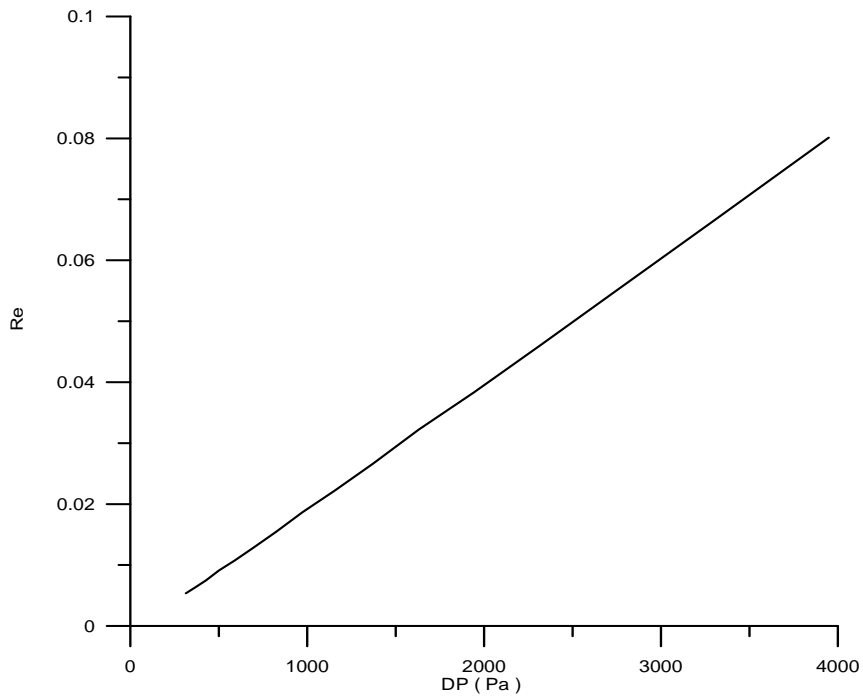


σχήμα 14



σχήμα 15



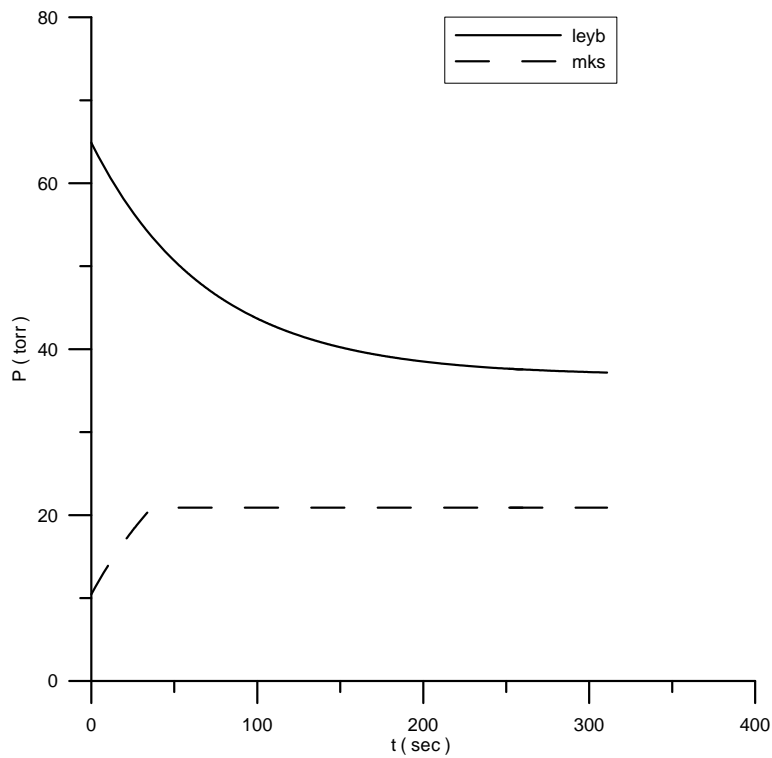


σχήμα 16

**Test 16**

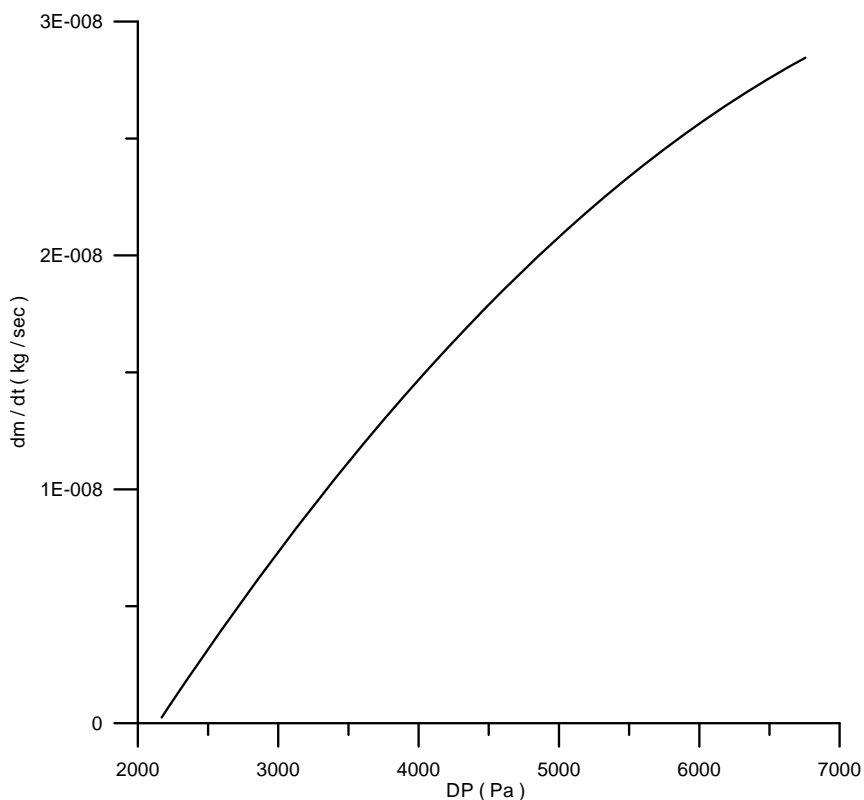
**$P_{leyb}=64,89 \text{ torr}$**

**$P_{leyb}=10,45 \text{ torr}$**



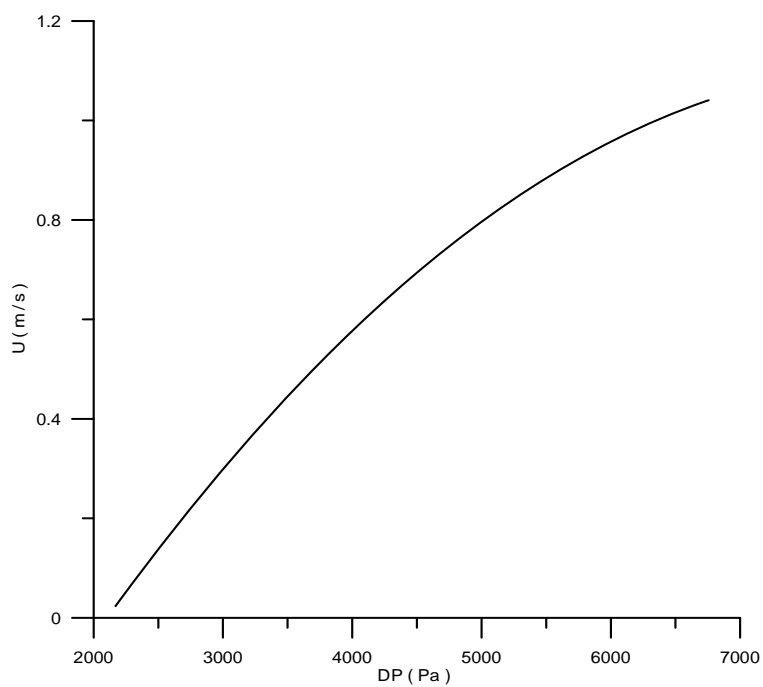
σχήμα 17

Όπως φαίνεται στο σχήμα 17, η πίεση εξόδου καθώς αυξάνει σταθεροποιείται στα 20 Torr, καθώς το μανόμετρο MKS δε δύναται να μετρήσει υψηλότερες πιέσεις.



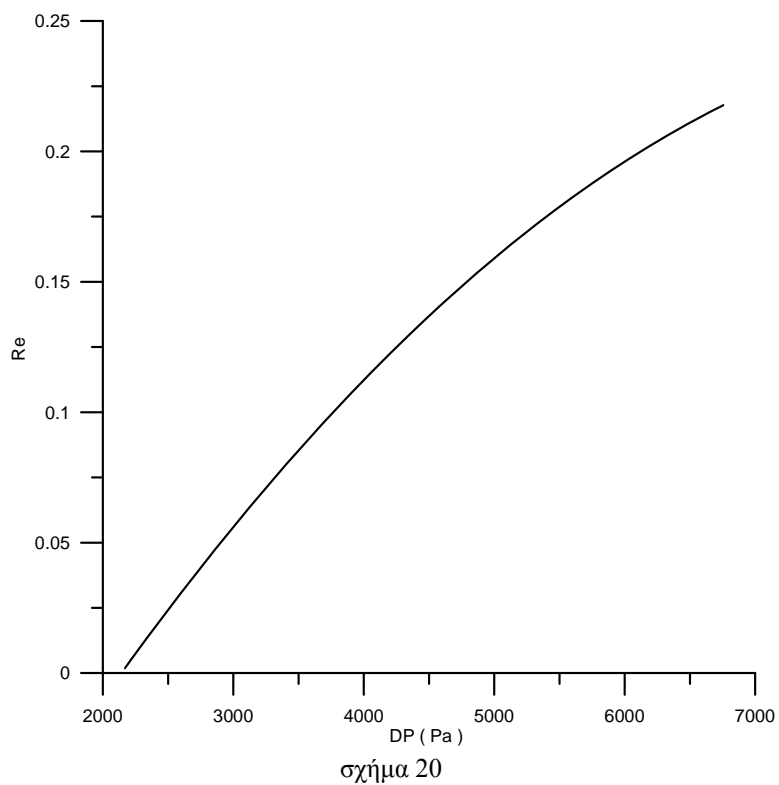
σχήμα 18

Στο παραπάνω σχήμα παρατηρούμε πως για σχετικά μεγάλα DP, η σχέση της παροχής μάζας με τη διαφορά πίεσης δεν είναι γραμμική.

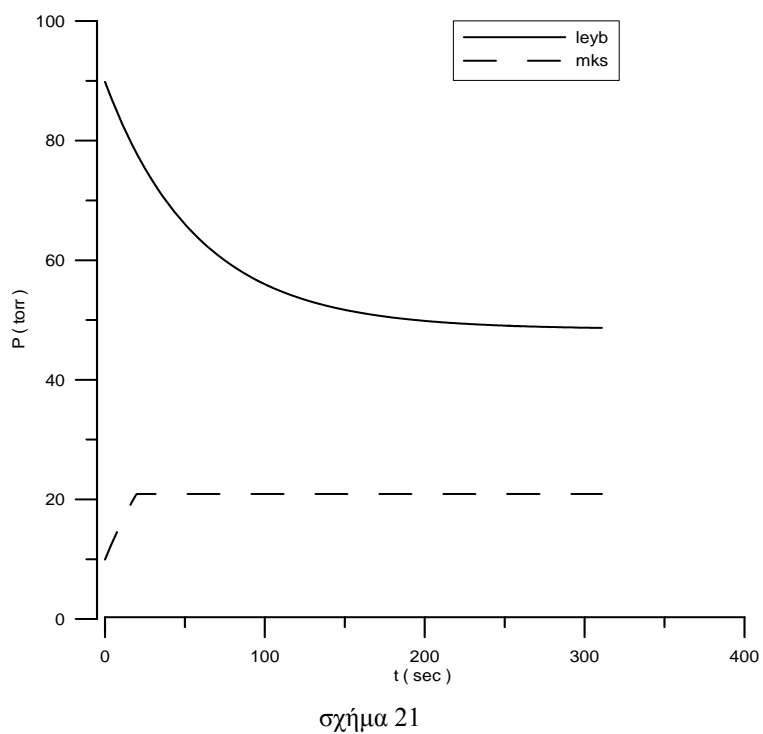


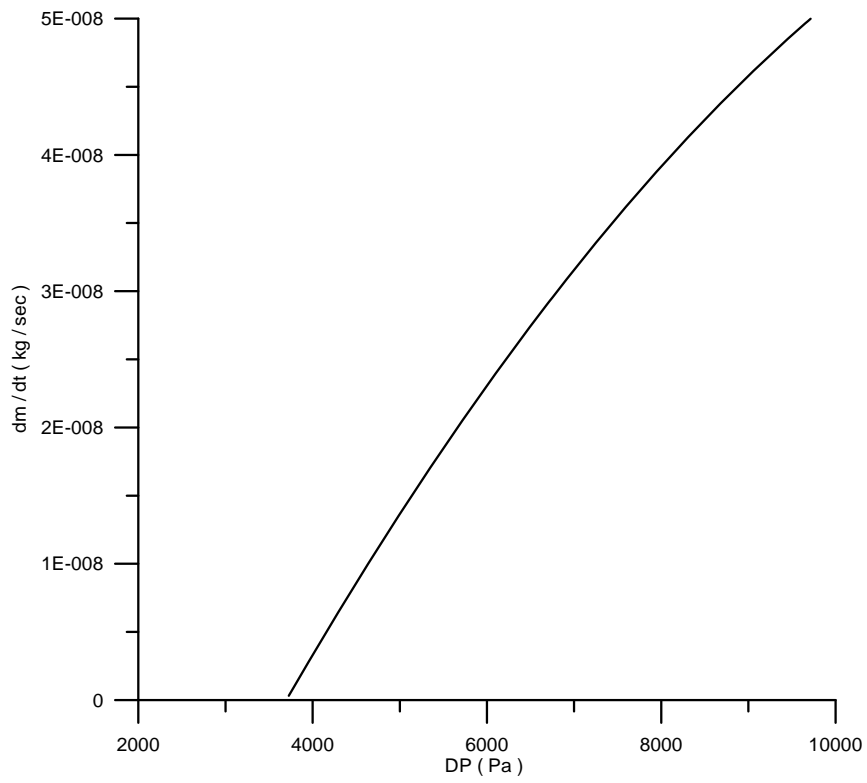
σχήμα 19

Όπως αναμένονταν, όμοια συμπεριφορά με την παροχή μάζας παρουσιάζουν η ταχύτητα  $U$  του ρευστού και ο αριθμός  $Re$ .

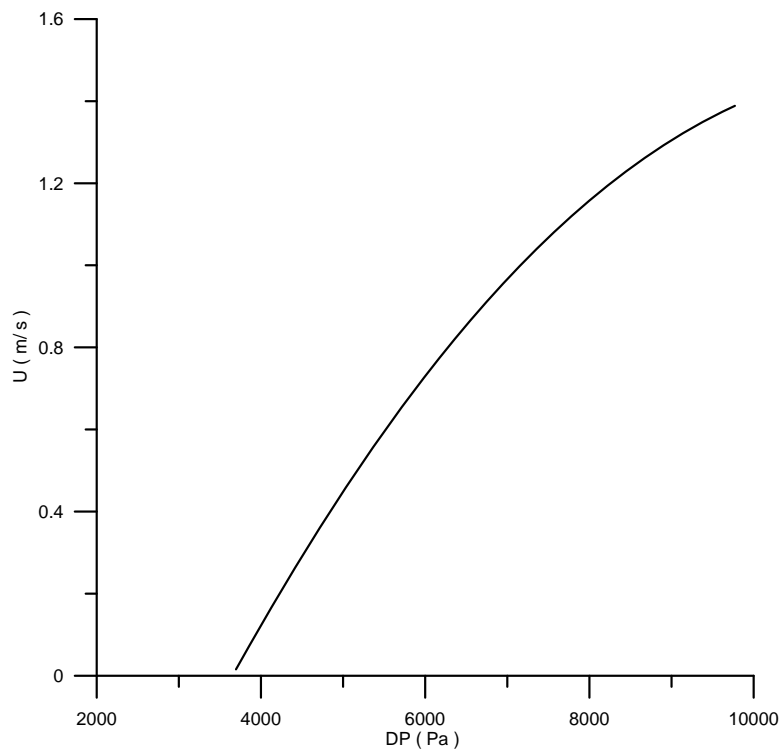


<b>Test 19</b>	<b><math>P_{levb}=89,93</math> torr</b>	<b><math>P_{mks}=9,93</math> torr</b>
----------------	---	---------------------------------------

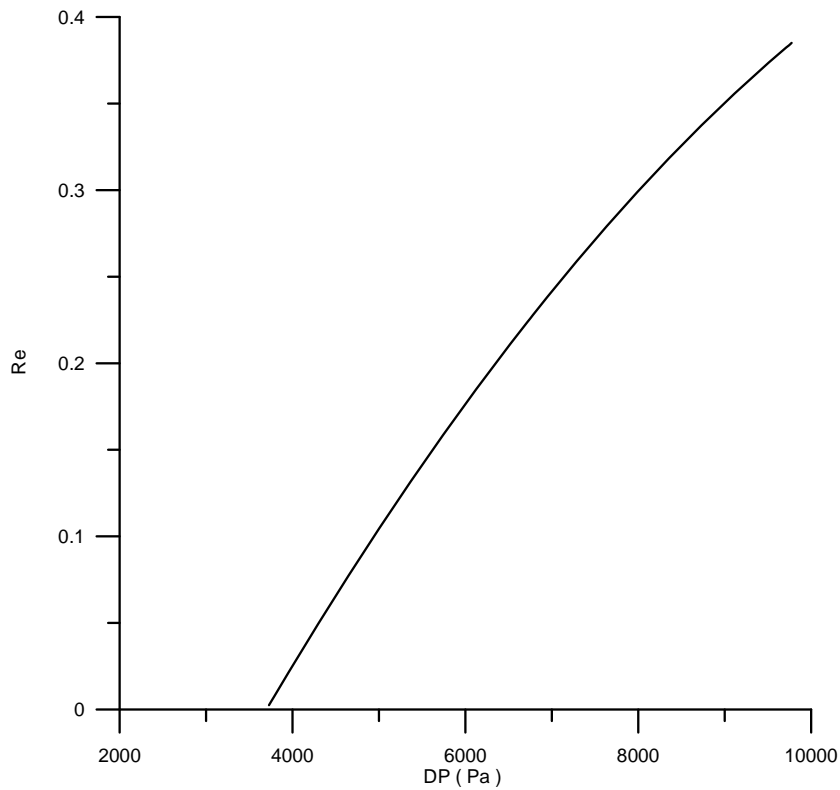




σχήμα 22



σχήμα 23



σχήμα 24

Η επιλογή των παραπάνω πειραμάτων ήταν τέτοια ώστε να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από όλο το εύρος των μετρήσεων πίεσης ( χαμηλές, μεσαίες και υψηλές τιμές ), προκειμένου να διεξαχθούν όσο το δυνατό πιο ασφαλή συμπεράσματα.

Παρατηρούμε ότι η σχέση τόσο της παροχής μάζας, όσο και της ταχύτητας και του αριθμού Re, με τη διαφορά πίεσης στα άκρα της μάσκας είναι γραμμική για μικρές και μεσαίες τιμές της πίεσης εισόδου, κάτι που φαίνεται να διαταράσσεται για τις υψηλές τιμές πίεσης.

Ακριβώς με την ίδια μεθοδολογία συνεχίζουμε και για τις επόμενες δύο πλάκες παράλληλων μικροαγωγών.

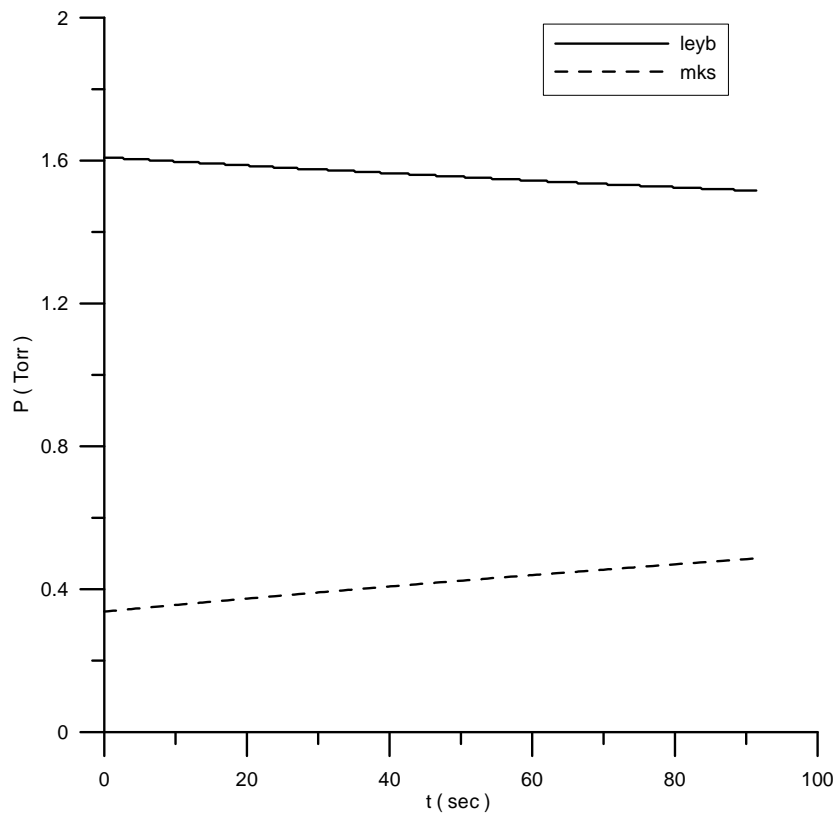
► Πλάκα μικροαγωγών μήκους  $L=4750\mu\text{m}$ , πλάτους  $W=250\mu\text{m}$  και βάθους  $H=30\mu\text{m}$ . Αριθμός καναλιών  $N=36$

Οι μετρήσεις που πήραμε στην περίπτωση αυτή φαίνονται στον παρακάτω πίνακα, καθώς και οι αριθμοί Knudsen κάθε πειράματος:

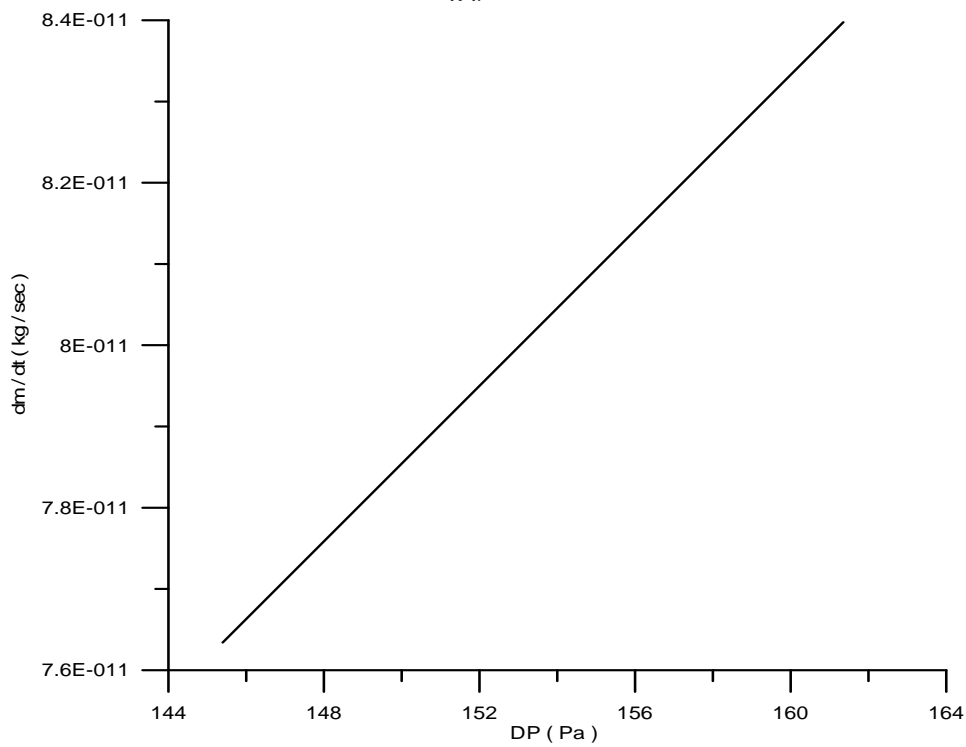
Μετρηση	$P_{\text{leyb}}$ (torr)	$P_{\text{mks}}$ (torr)	Kn
Test 1	1,608	0,3376	3,290502
Test 2	1,740	0,3024	3,134548
Test 3	2,036	0,3224	2,714552
Test 4	2,628	0,3688	2,136279
Test 5	1,888	0,3344	2,88067
Test 6	3,868	0,3961	1,501372
Test 7	6,996	0,4800	0,85634
Test 8	9,104	0,6424	0,656858
Test 9	11,88	0,6368	0,511473
Test 10	16,6	0,9848	0,364064
Test 11	20,16	3,563	0,269865
Test 12	21,66	3,114	0,258416
Test 13	24,25	1,111	0,252435
Test 14	28,99	4,265	0,192512
Test 15	32,91	1,814	0,184368
Test 16	38,12	2,131	0,159052
Test 17	45,09	7,734	0,121195
Test 18	50,68	4,326	0,116387
Test 19	60,9	6,017	0,095671
Test 20	65,37	3,022	0,093607
Test 21	69,62	8,557	0,081891
Test 22	73,42	8,504	0,078146
Test 23	77,26	8,262	0,074858
Test 24	80,56	8,488	0,071894
Test 25	80,66	10,25	0,070421

Πίνακας 2

Όπως φαίνεται και στον πίνακα δύο, στην περίπτωση αυτή καταφέραμε να ρίξουμε την πίεση εισόδου σε πιο χαμηλά επίπεδα ( κοντά στο 1 torr ). Έχει γίνει και πάλι η κατάλληλη επιλογή πειραμάτων.

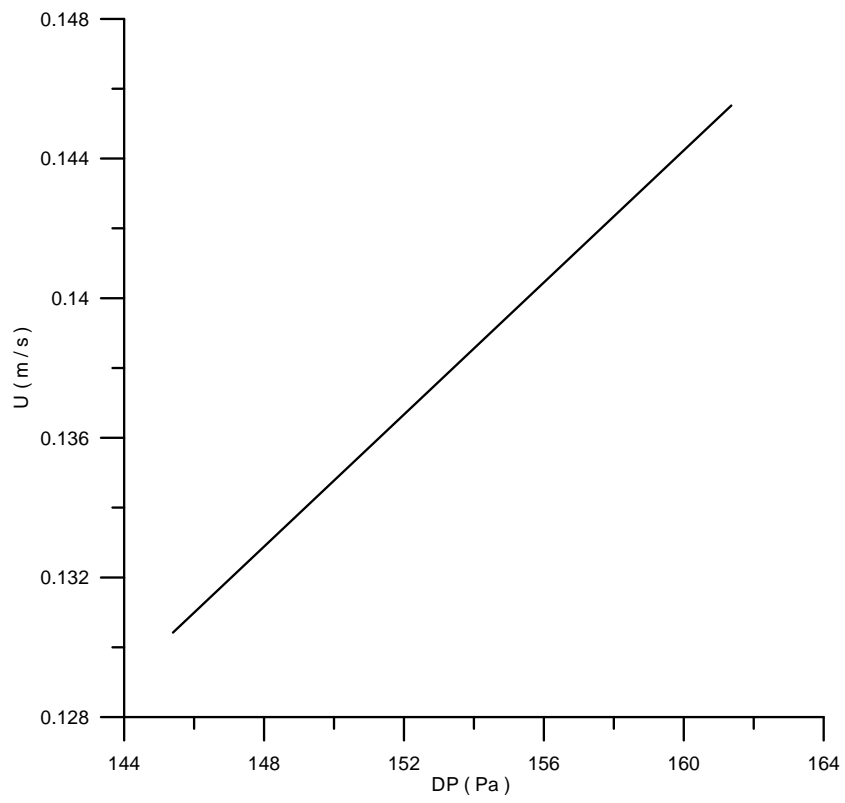


σχήμα 25

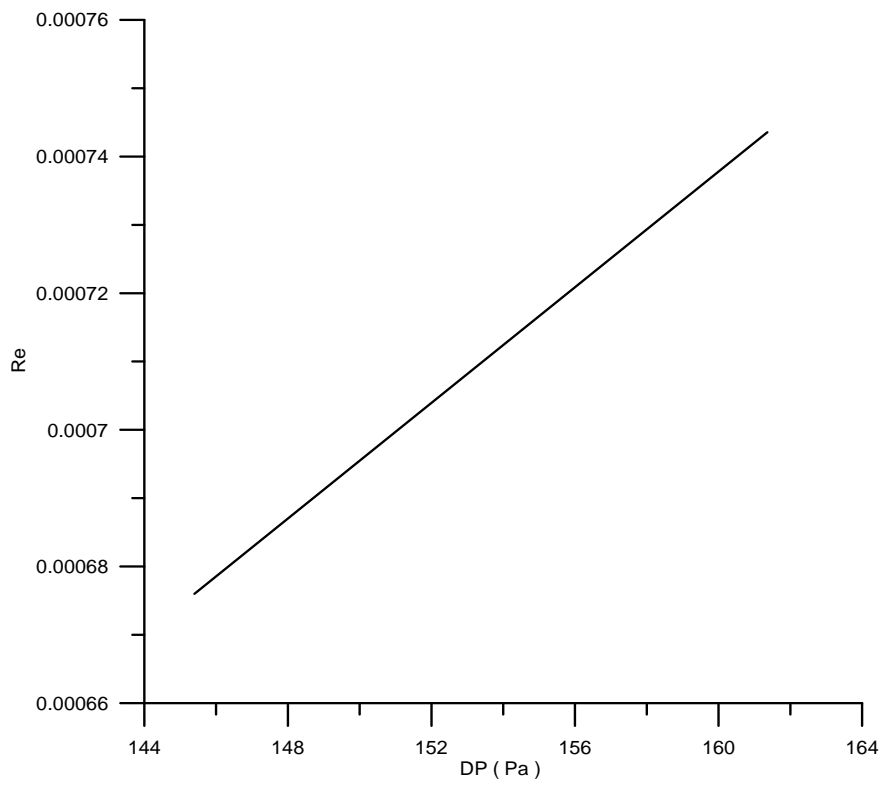


σχήμα 26

Τα σχόλια μας δε διαφέρουν καθόλου από αυτά του προηγούμενου πειράματος.

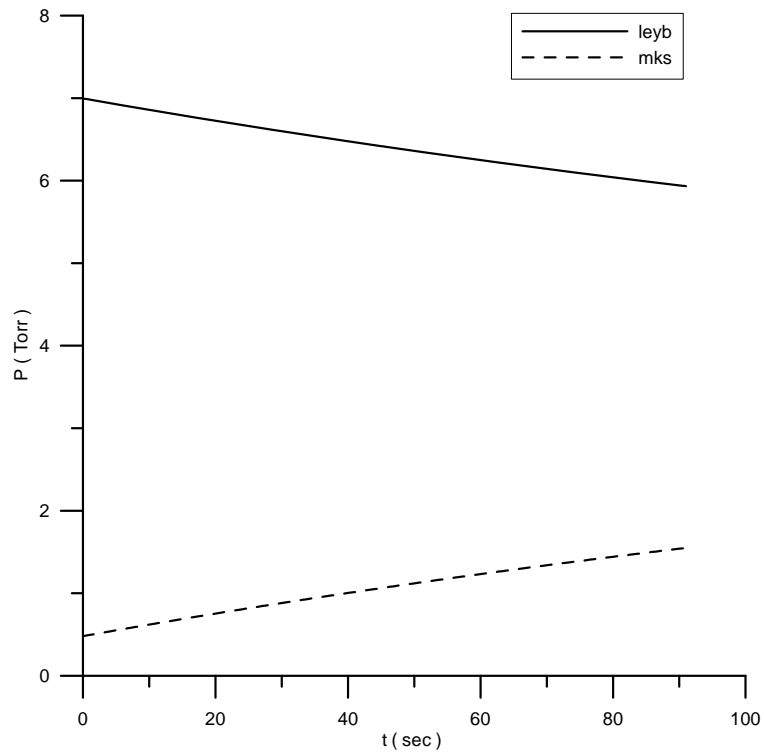


σχήμα 27

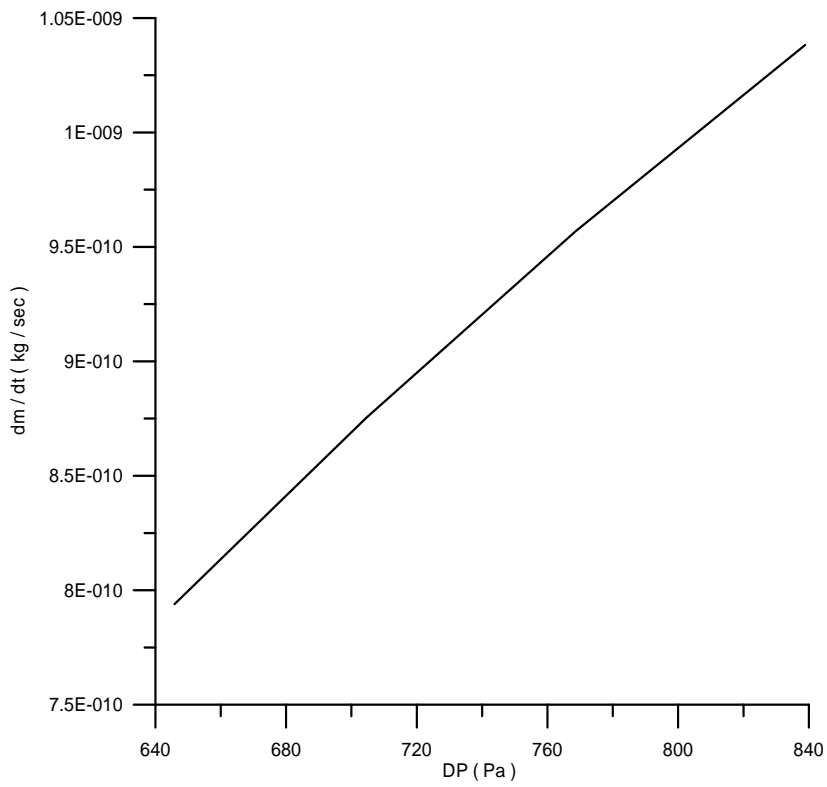


σχήμα 28

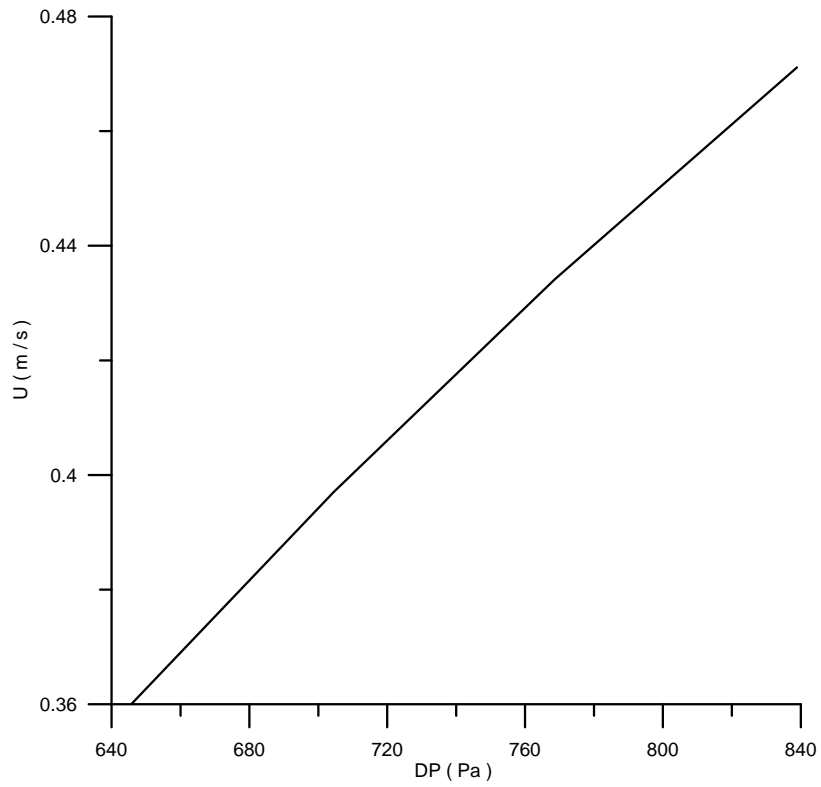




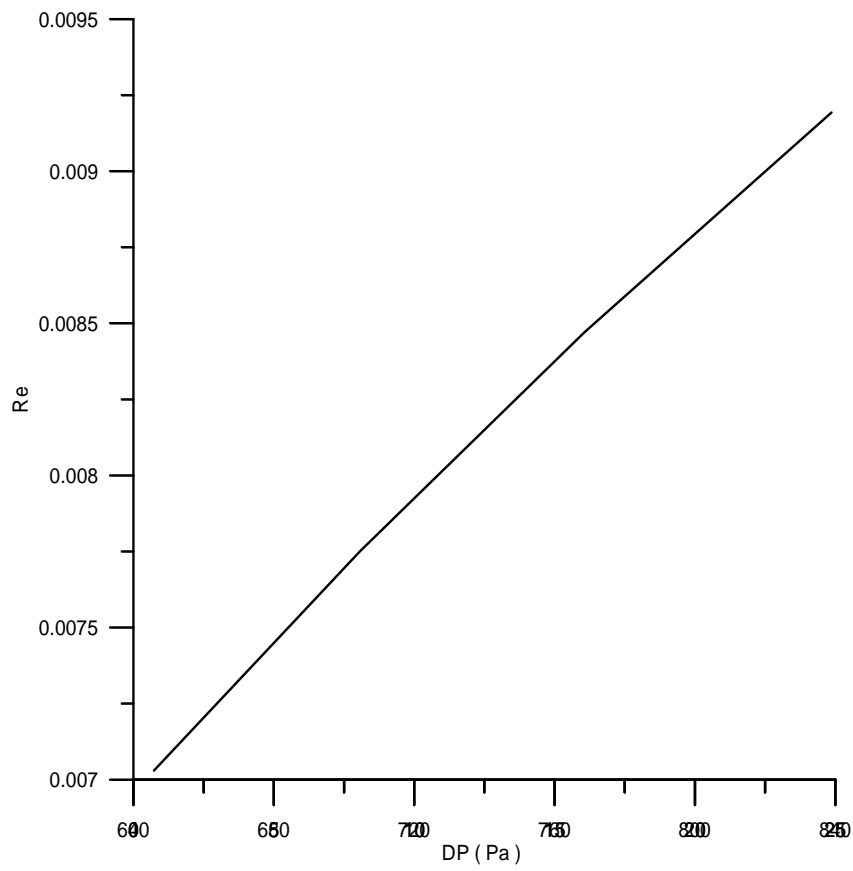
σχήμα 29



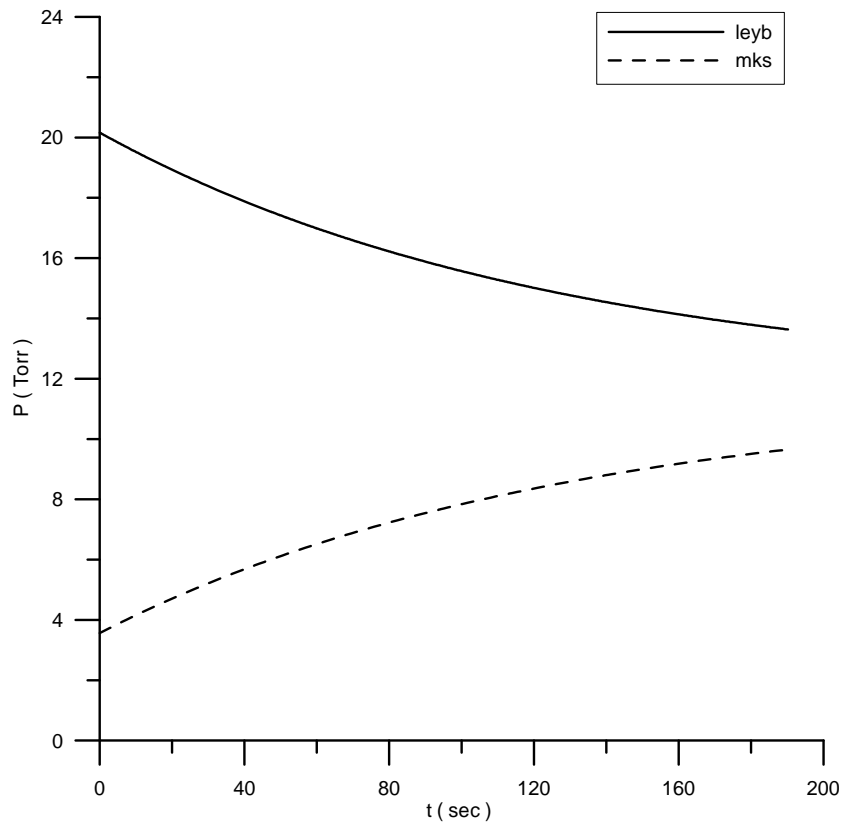
σχήμα 30



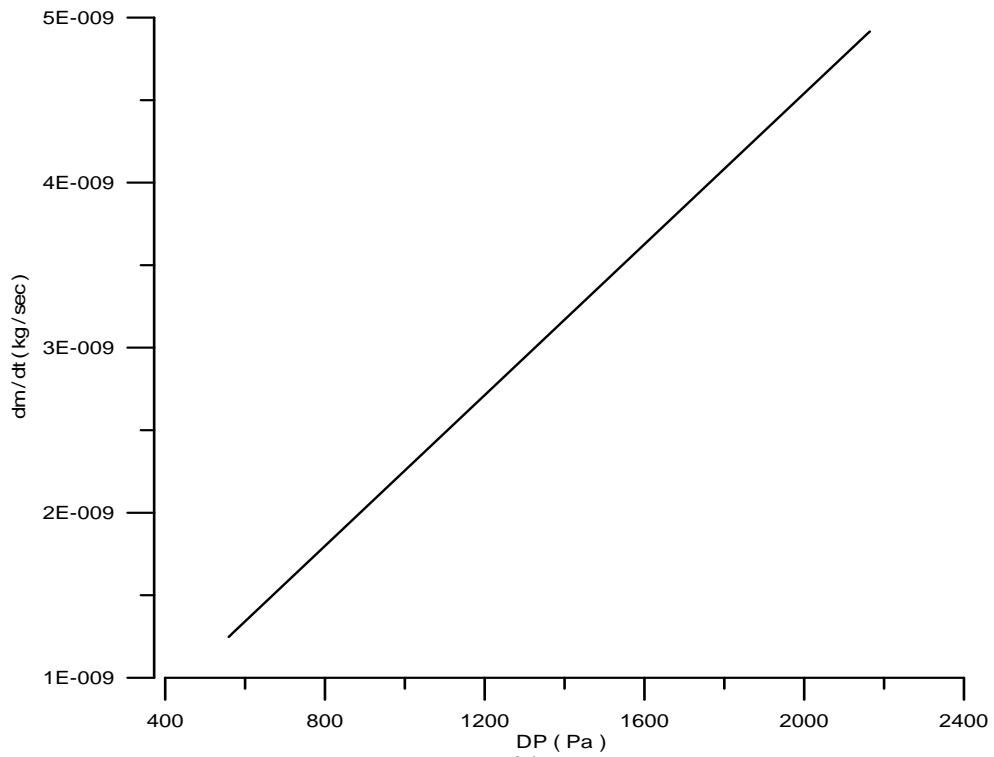
σχήμα 31



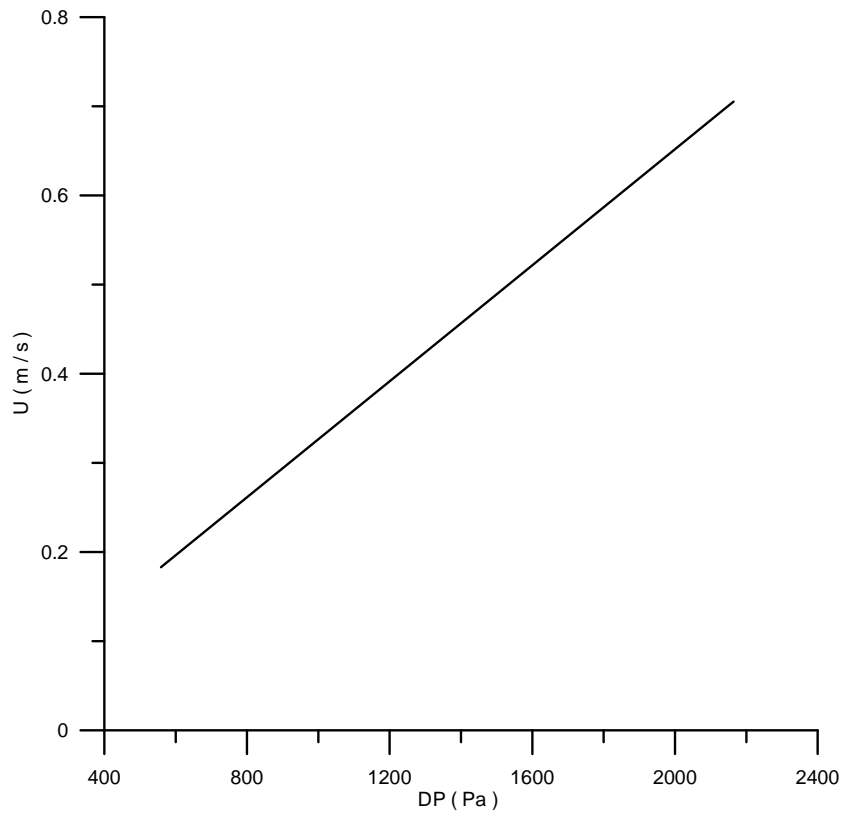
σχήμα 32



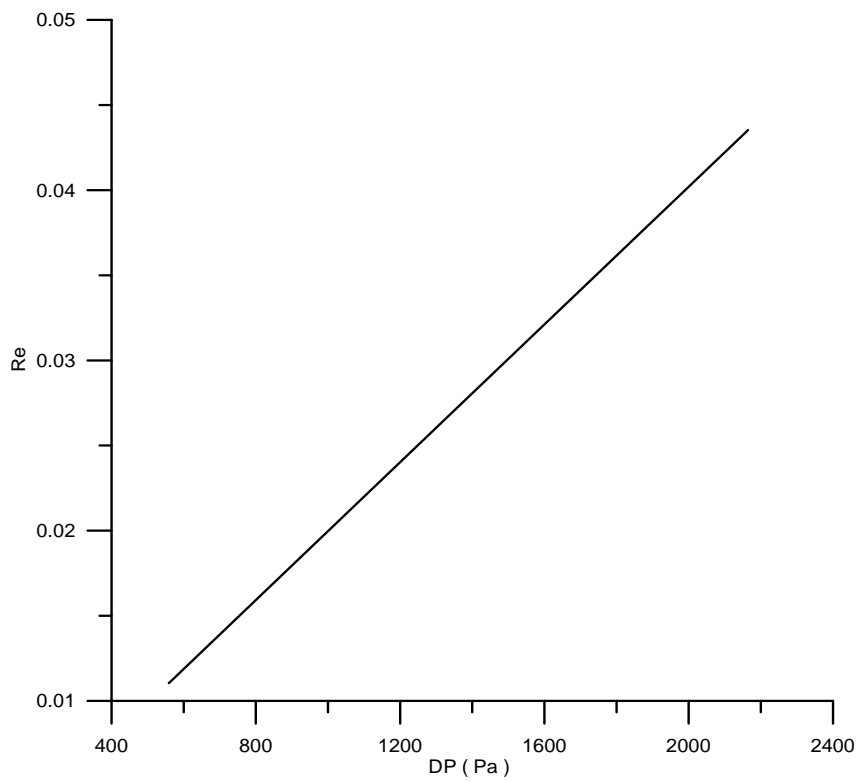
σχήμα 33



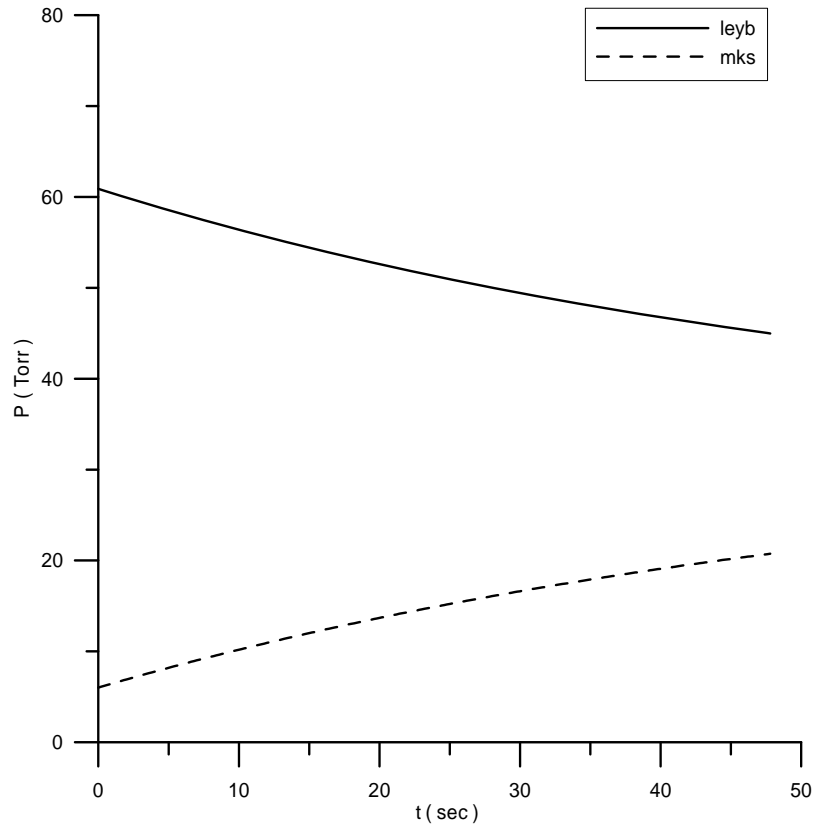
σχήμα 34



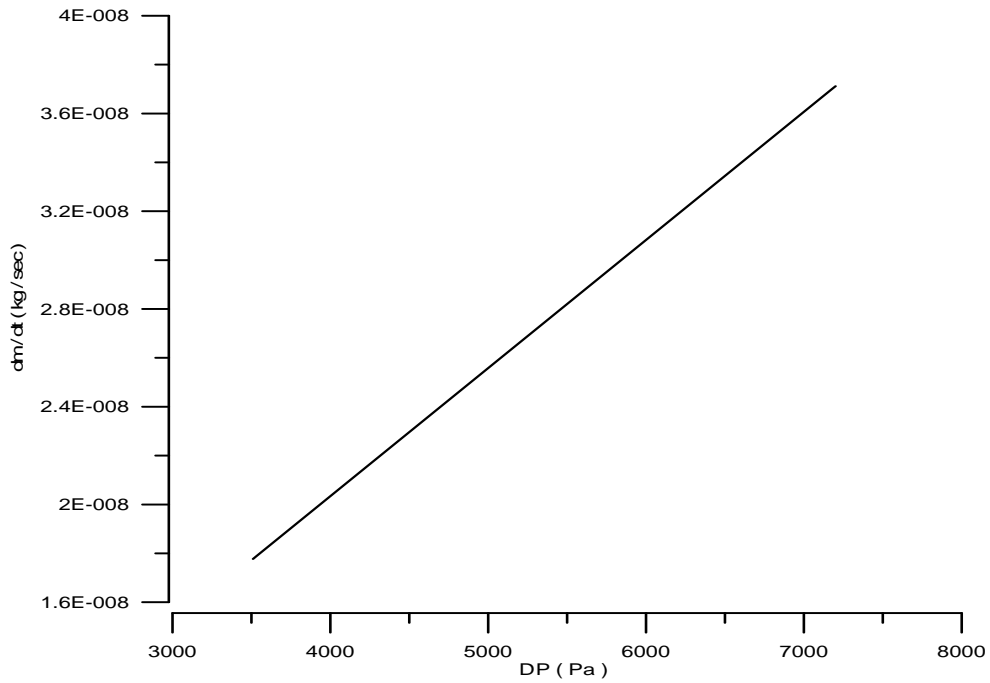
σχήμα 35



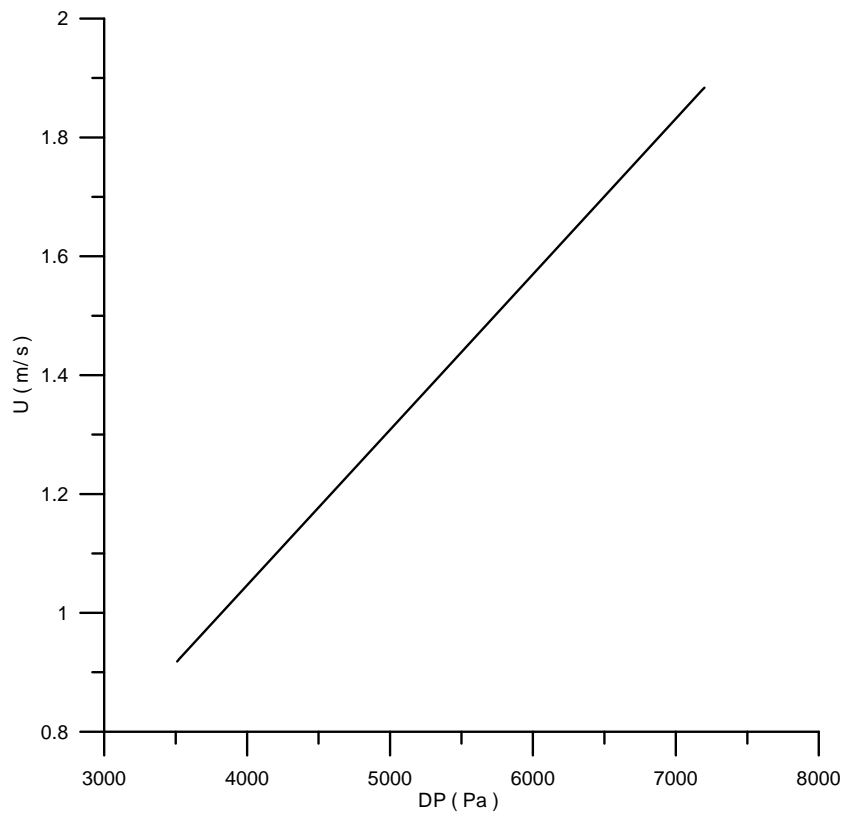
σχήμα 36



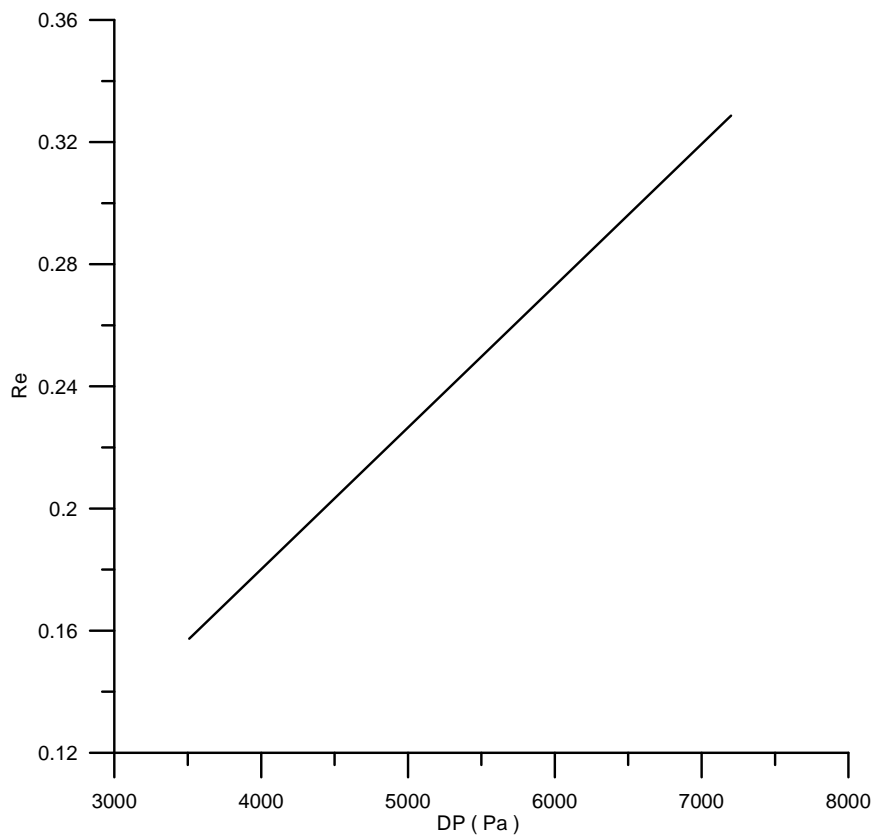
σχήμα 37



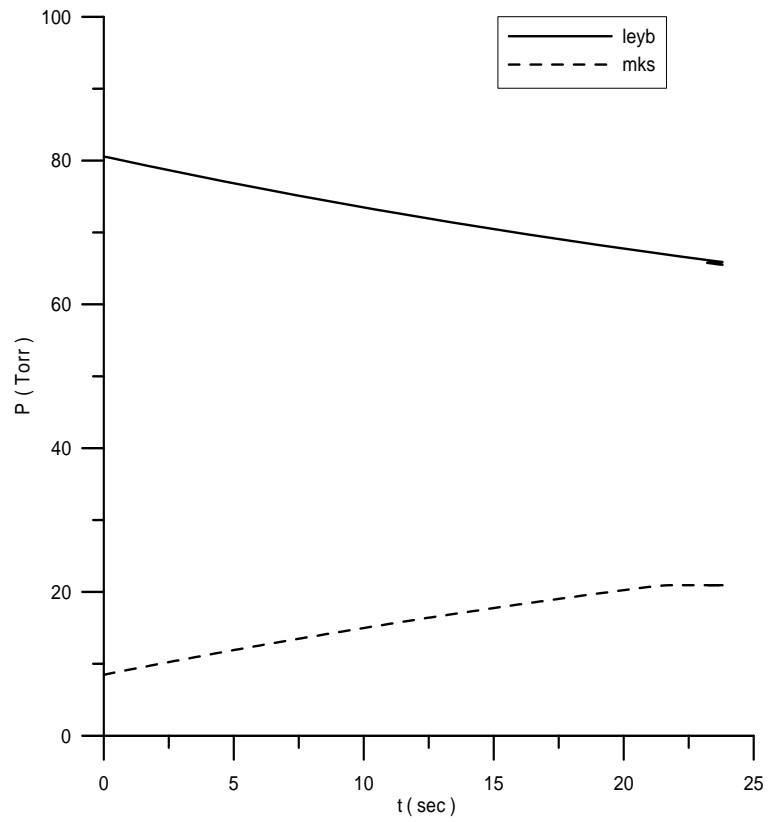
σχήμα 38



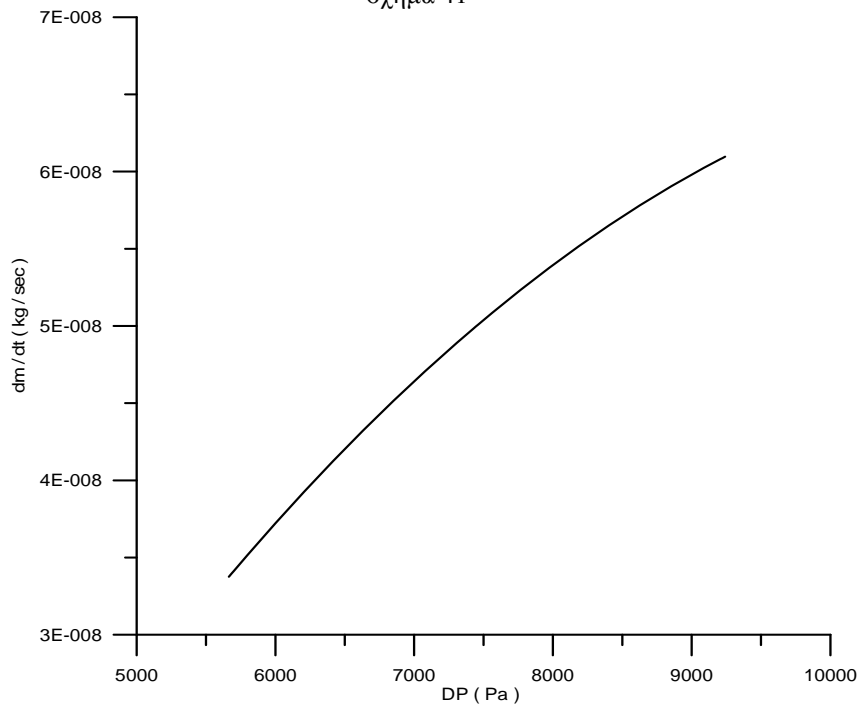
σχήμα 39



σχήμα 40

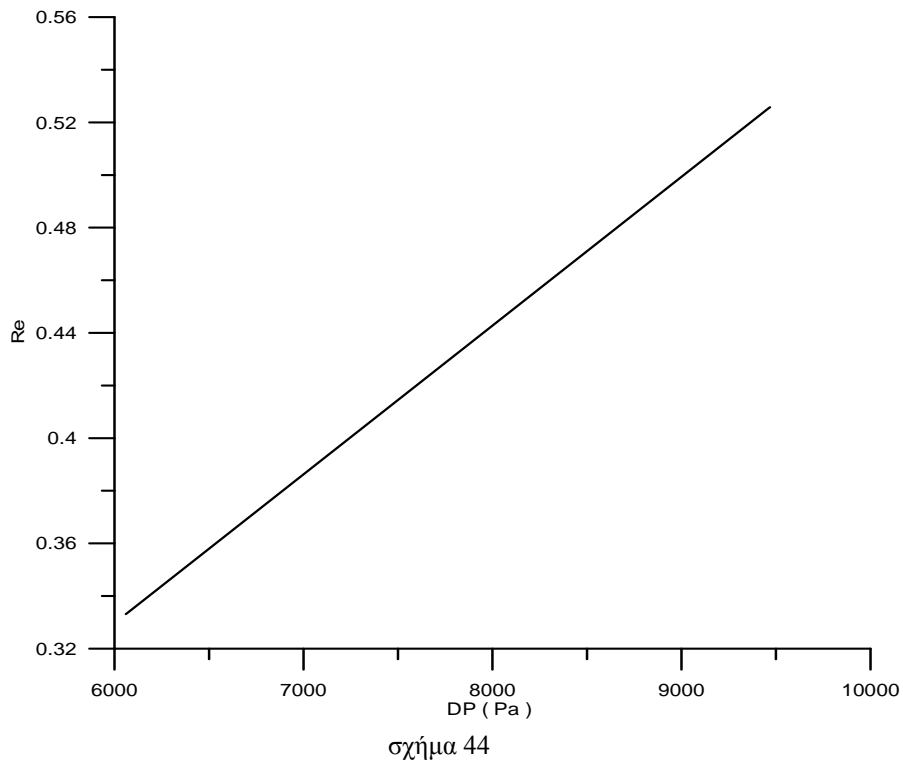
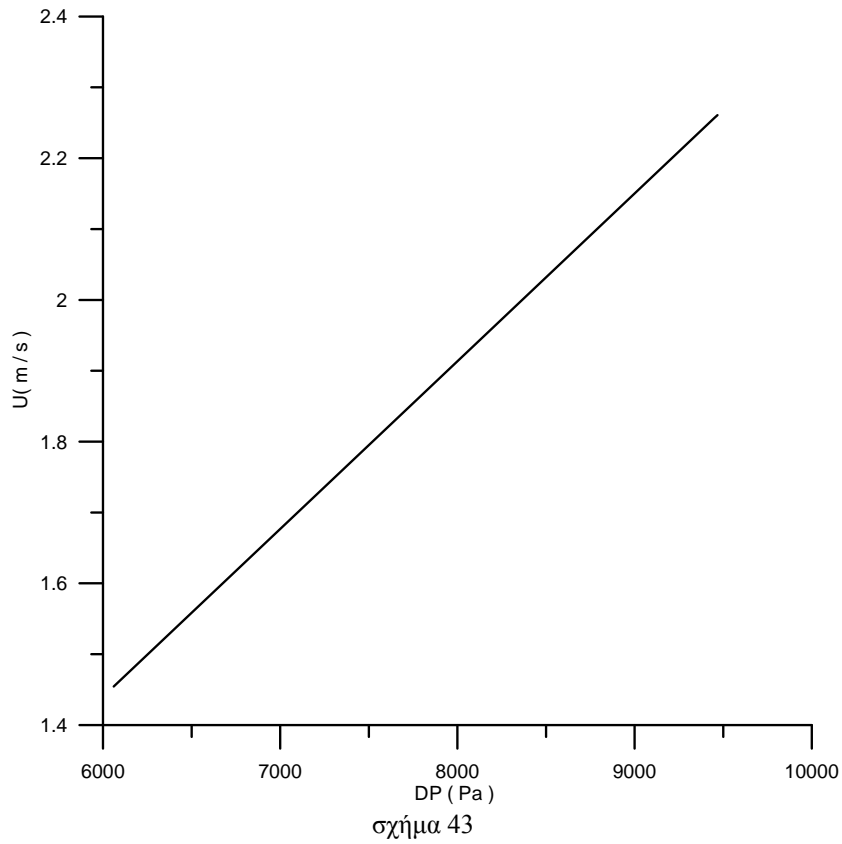


σχήμα 41



σχήμα 42

Όπως και στο προηγούμενο πείραμα, παρατηρούμε στο σχήμα 42 πως στις υψηλές πιέσεις χάνεται σε κάποιο βαθμό η γραμμική σχέση της παροχής με τη διαφορά πίεσης, κάτι που δεν ισχύει για την ταχύτητα και τον  $Re$ .





► Πλάκα μικροαγωγών μήκους  $L=4750\mu\text{m}$ , πλάτους  $W=250\mu\text{m}$  και βάθους  $H=30\mu\text{m}$ . Αριθμός καναλιών  $N=27$

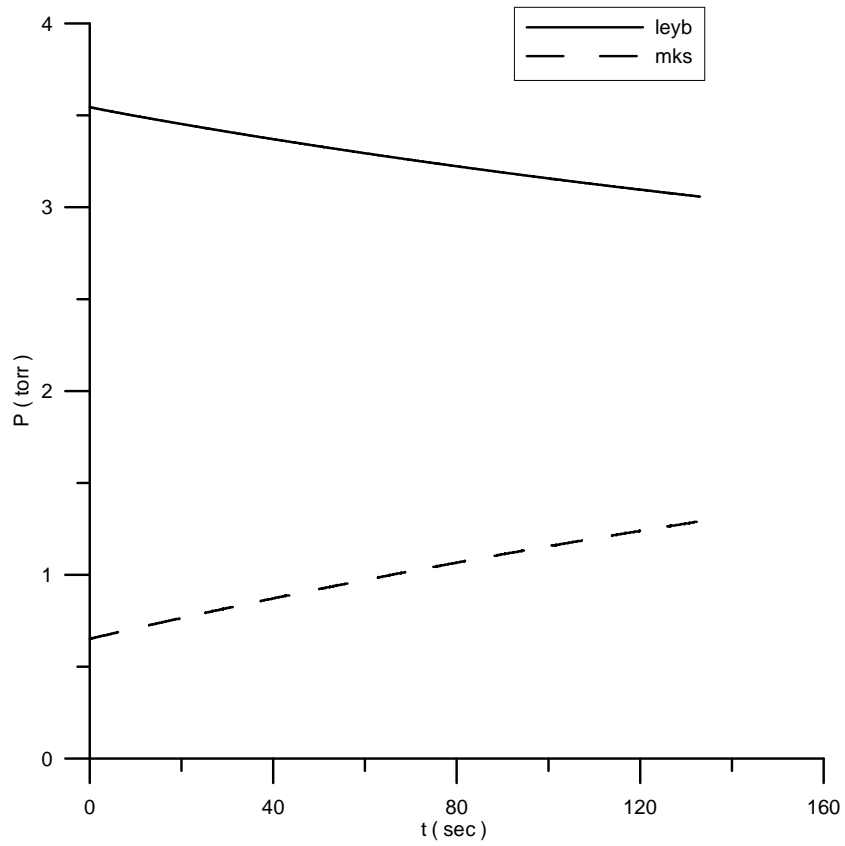
Στην συγκεκριμένη περίπτωση αλλάξαμε απλώς τον τρόπο εισαγωγής του ρευστού στους μικροαγωγούς ( βλ. παρ.Β.2 ) σε σχέση με το προηγούμενο πείραμα. Οι αναλυτικές μετρήσεις της διαφοράς πίεσης στα άκρα της πλάκας φαίνονται στον πίνακα 3.

Μέτρηση	$P_{\text{leyb}}$ (torr)	$P_{\text{mks}}$ (torr )	$Kn$
Test 1	3,545	0,652	1,525375
Test 2	6,202	0,708	0,926483
Test 3	8,207	0,84	0,707638
Test 4	10,71	0,948	0,549151
Test 5	14,88	0,5936	0,413737
Test 6	23,37	0,6112	0,266959
Test 7	33,55	1,004	0,185275
Test 8	42,88	2,126	0,142248
Test 9	43,35	2,18	0,140611
Test 10	50,18	2,144	0,122353
Test 11	57,15	2,767	0,106848
Test 12	60,27	4,119	0,099427
Test 13	70,12	4,509	0,085784
Test 14	70,60	4,194	0,085595
Test 15	78,81	7,85	0,073875
Test 16	82,46	1,805	0,075975
Test 17	84,07	4,23	0,072503
Test 18	84,51	4,468	0,07195
Test 19	95,71	7,508	0,062024

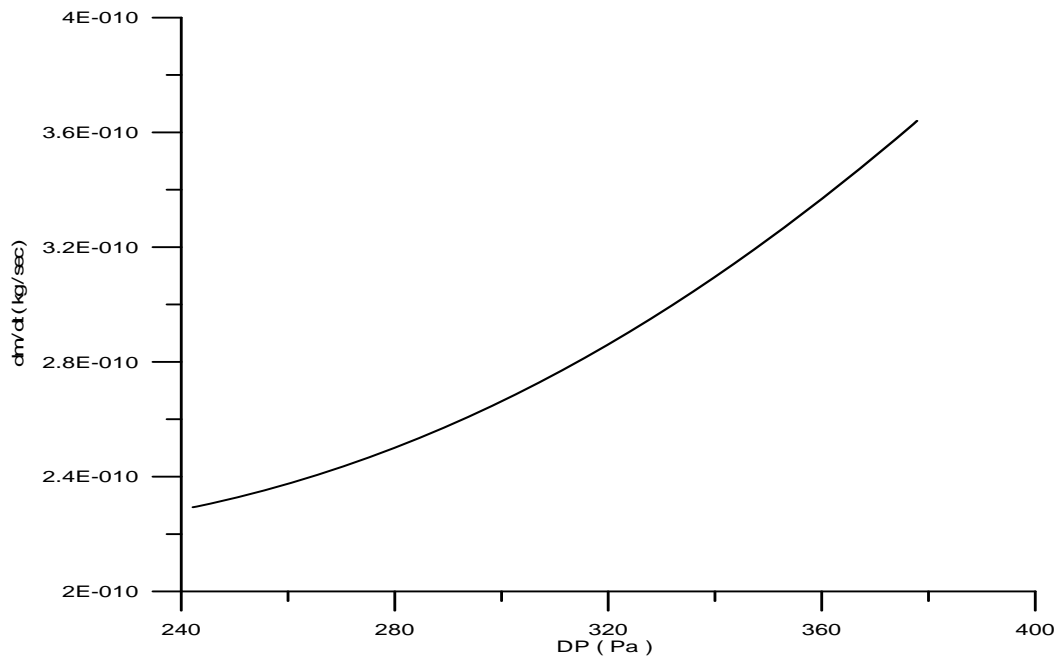
Πίνακας 3

Ακολουθείται η ίδια ακριβώς μεθοδολογία με τα προηγούμενα πειράματα.

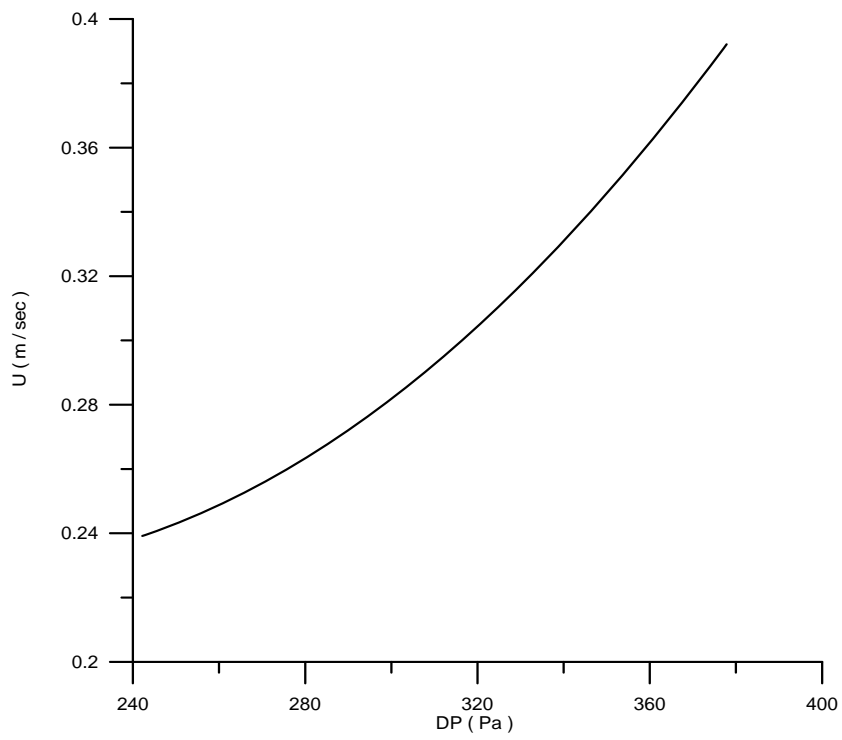
<b>Test 1</b>	<b><math>P_{leyb}=3.545</math> torr</b>	<b><math>P_{mks}=0,652</math> torr</b>
---------------	---	--



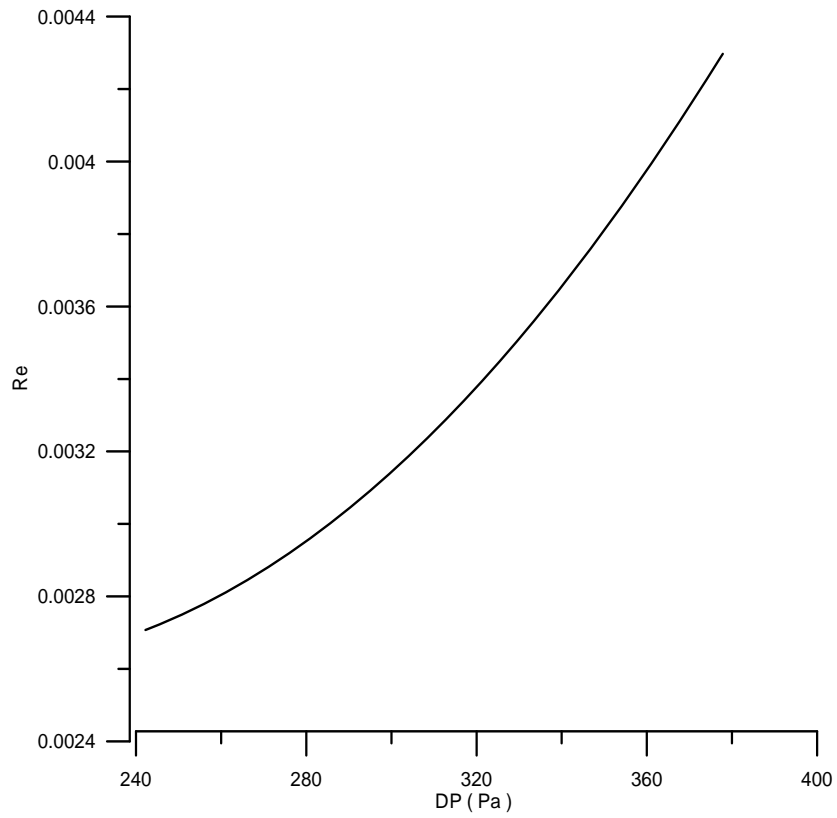
σχήμα 45



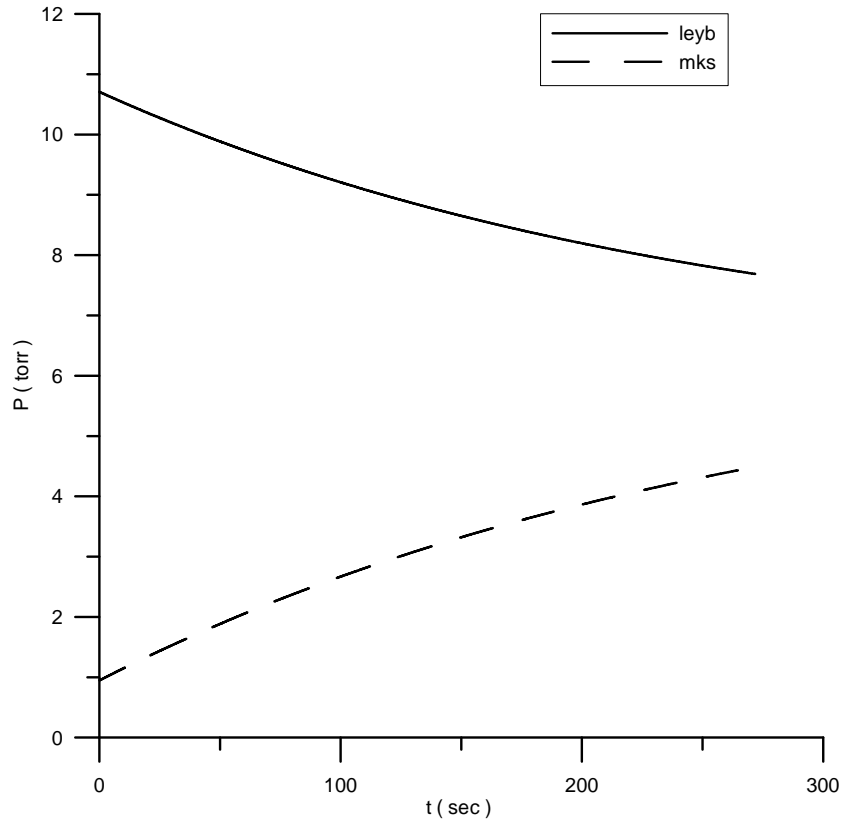
σχήμα 46



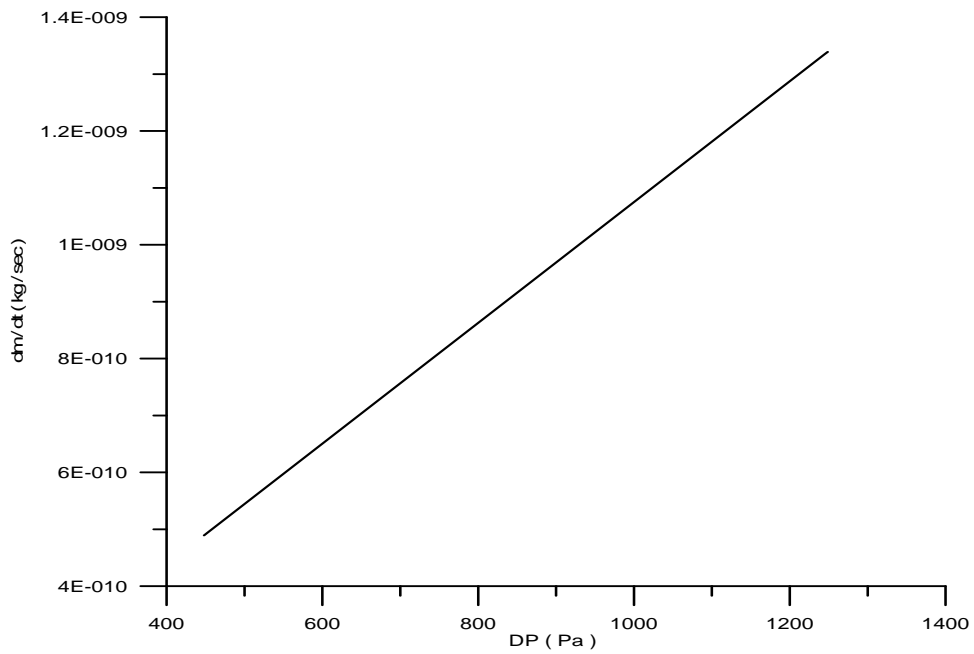
σχήμα 47



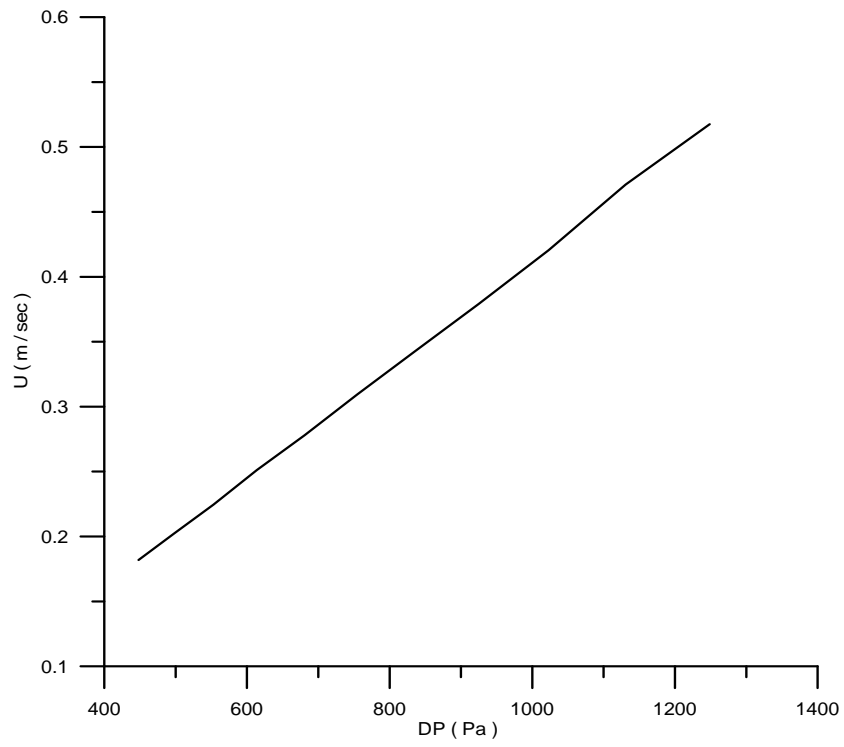
σχήμα 48



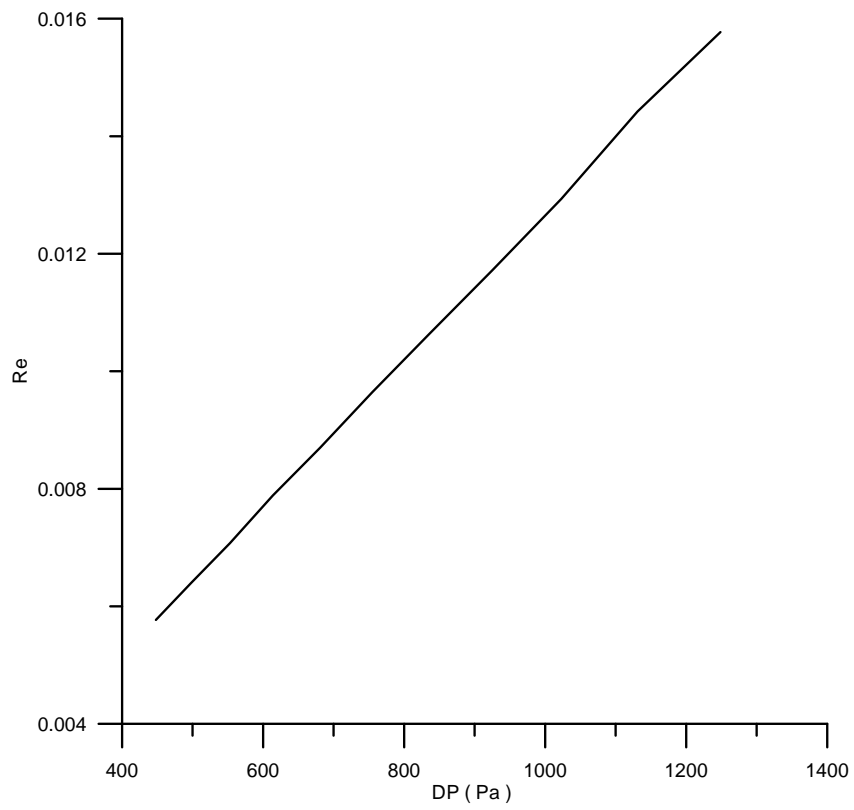
σχήμα 49



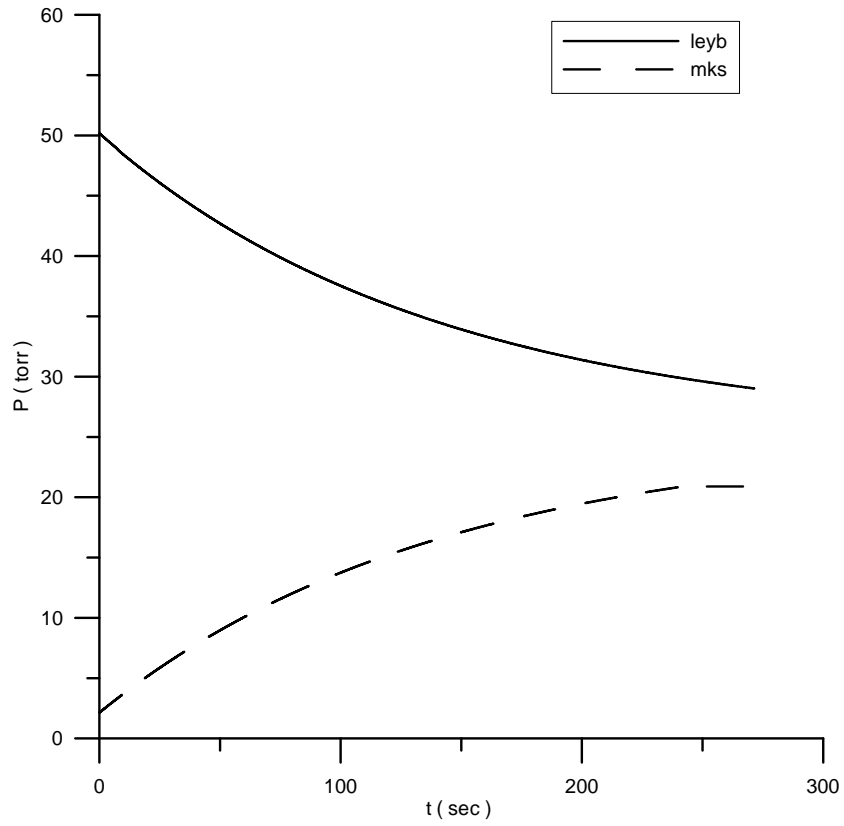
σχήμα 50



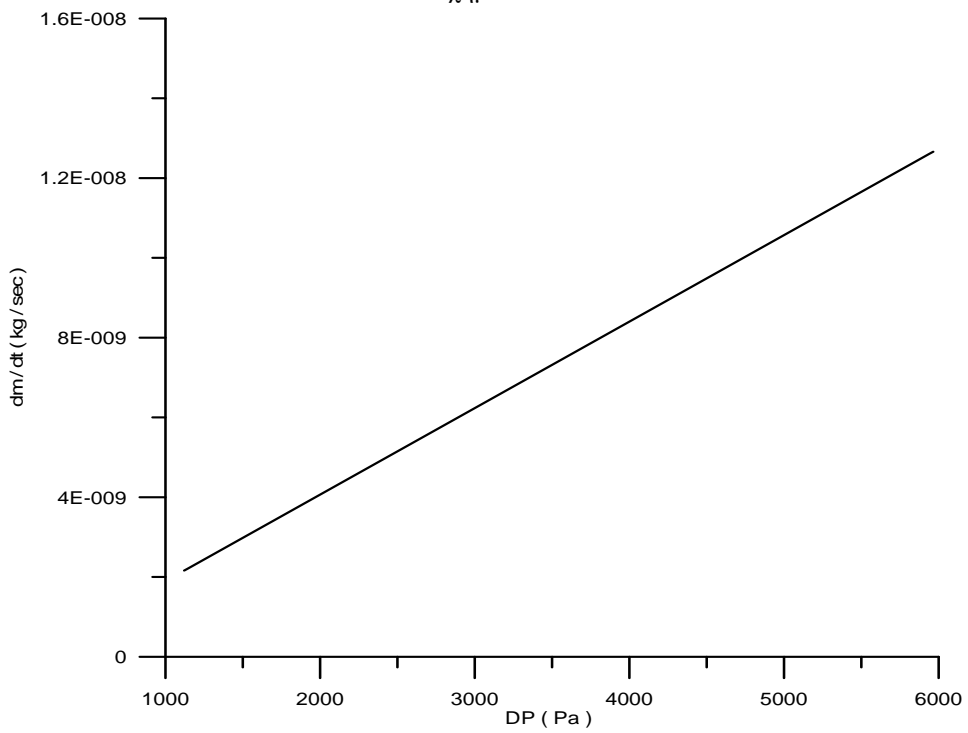
σχήμα 51



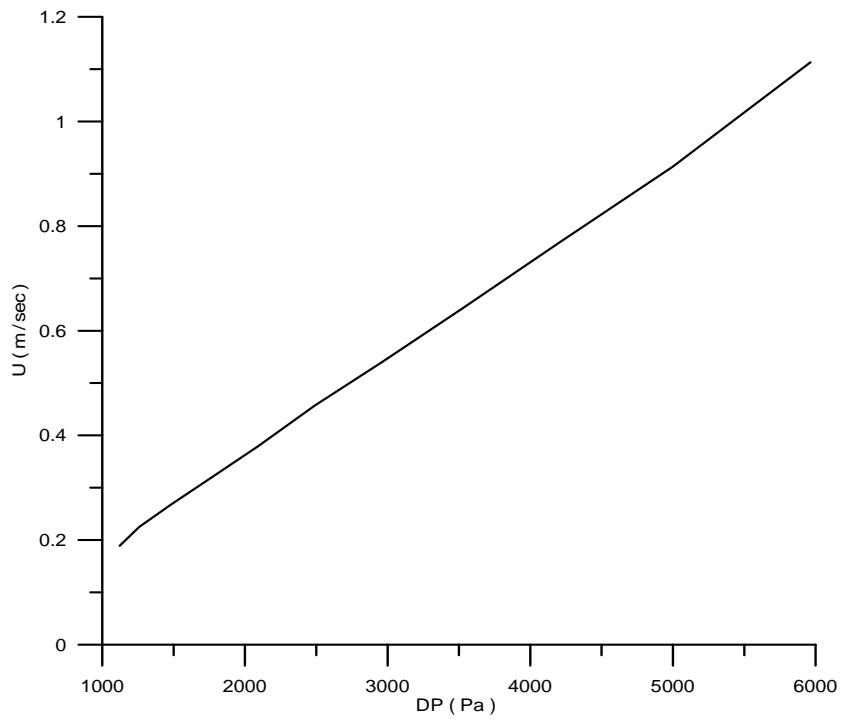
σχήμα 52



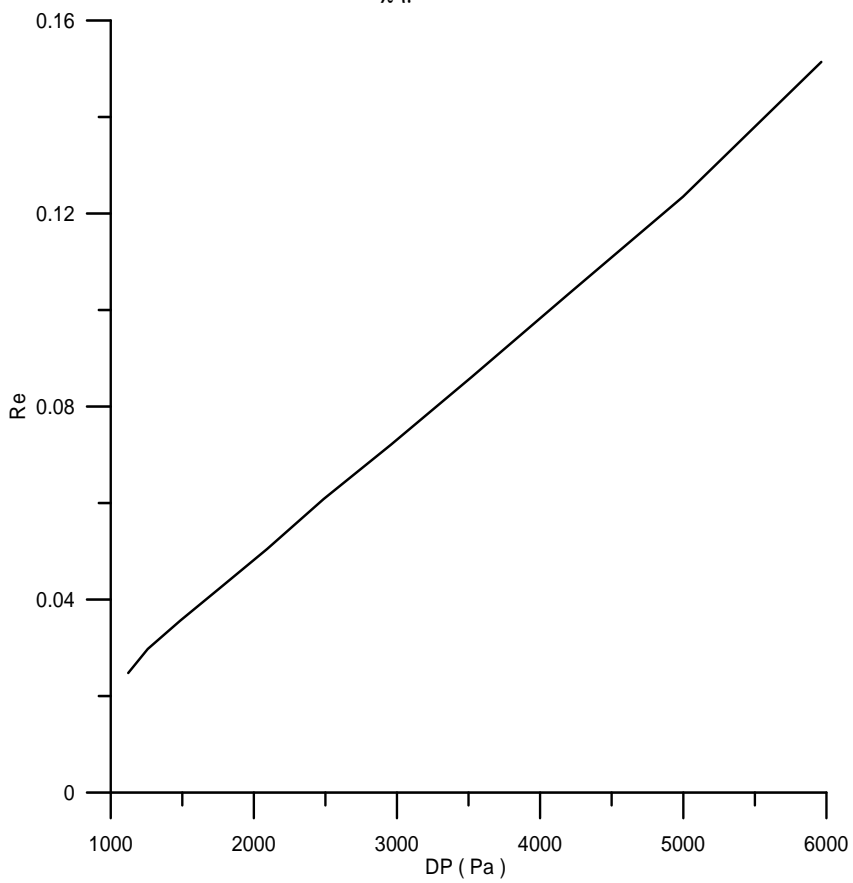
σχήμα 53



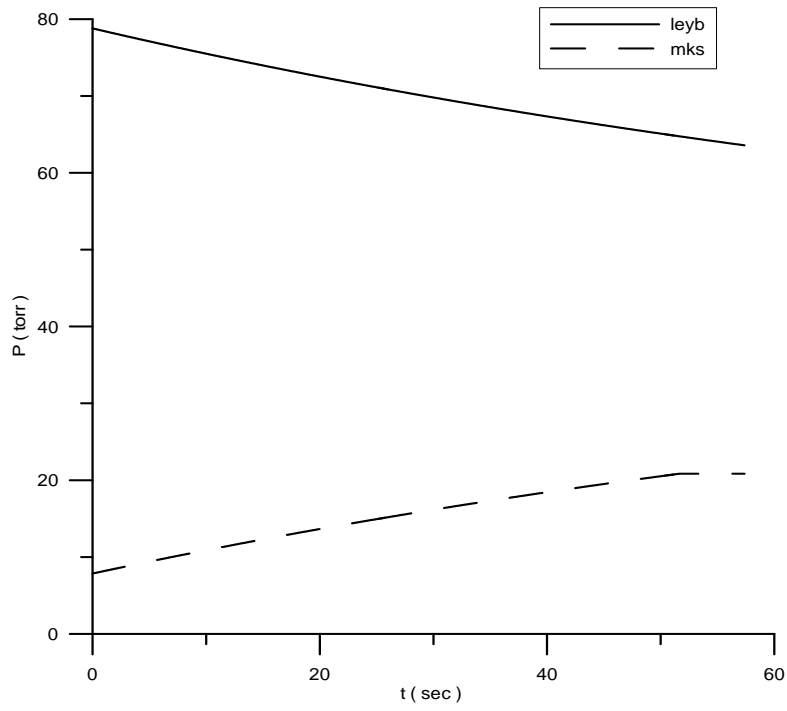
σχήμα 54



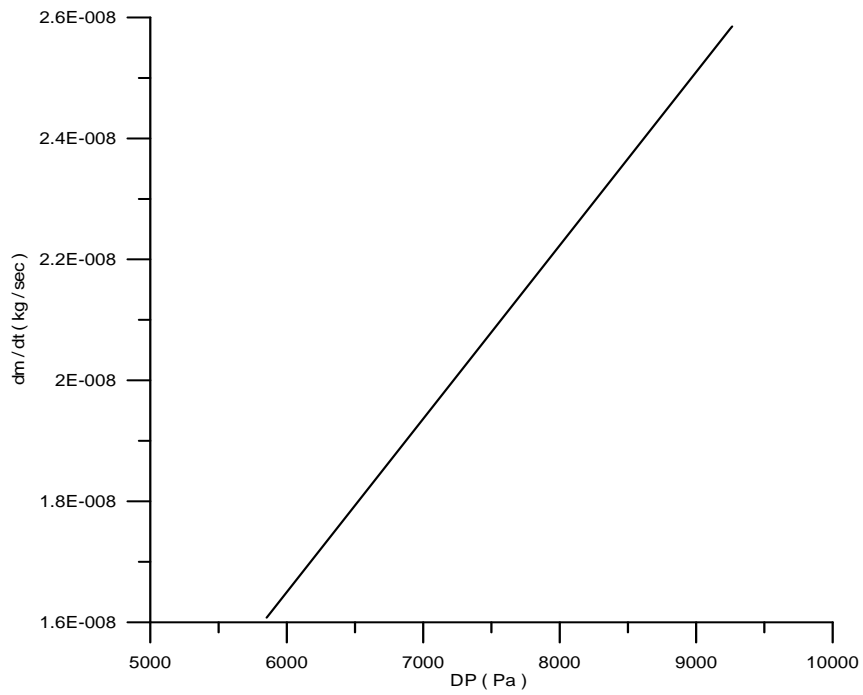
σχήμα 55



σχήμα 56

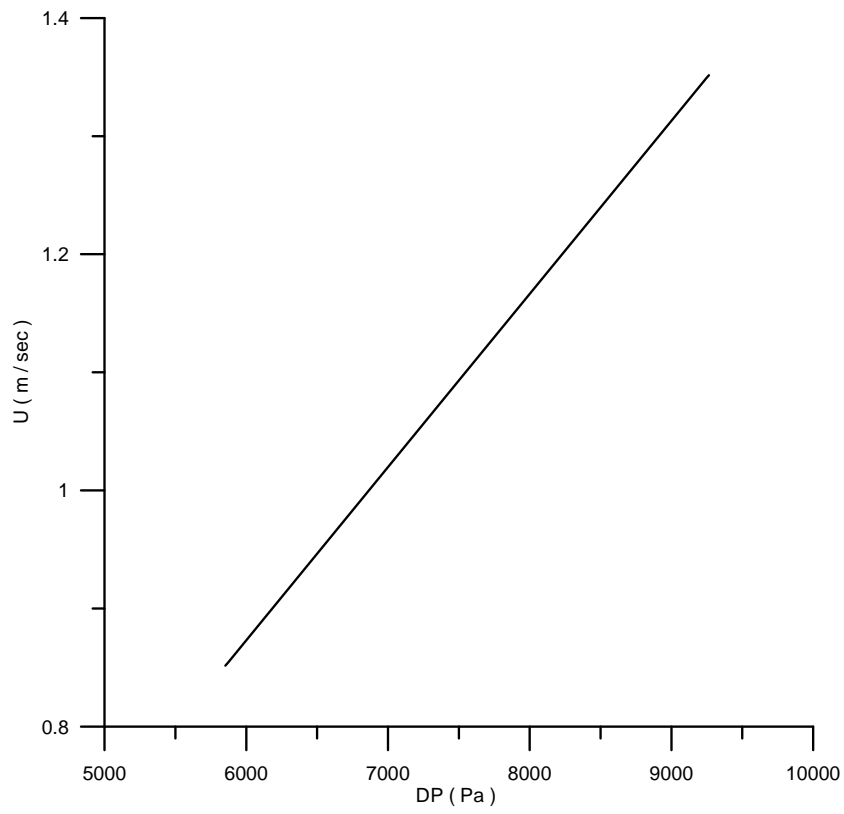


σχήμα 57

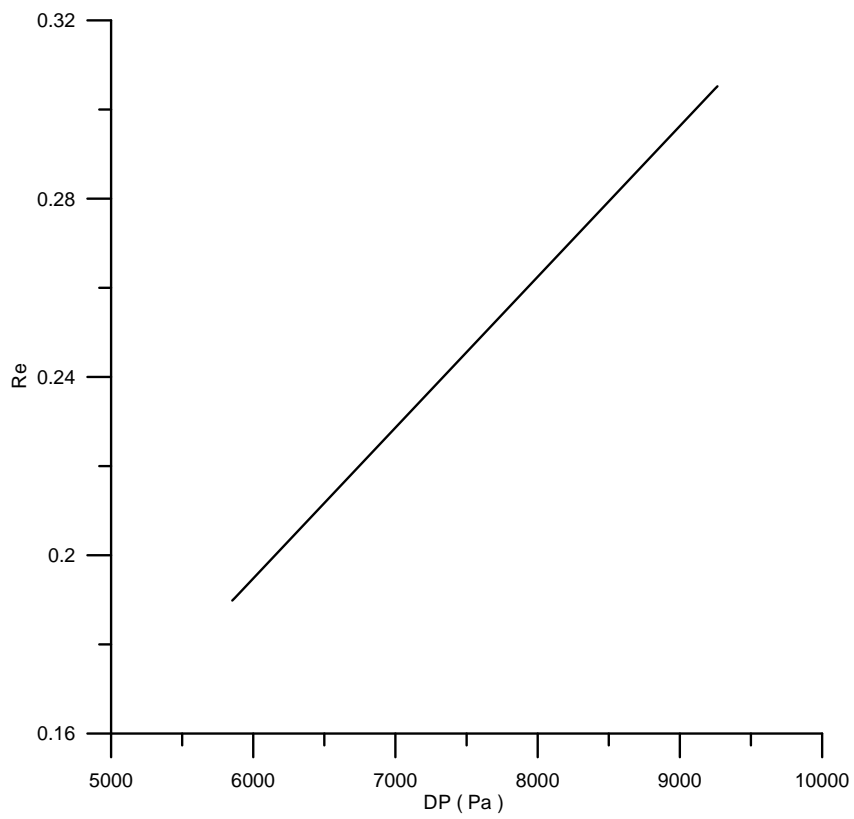


σχήμα 58

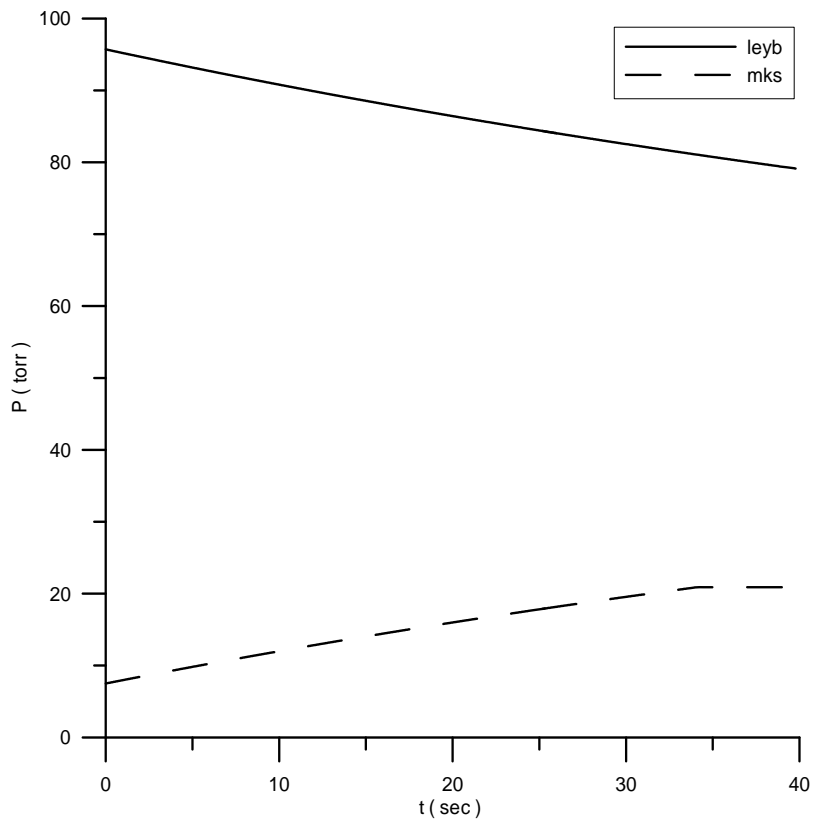




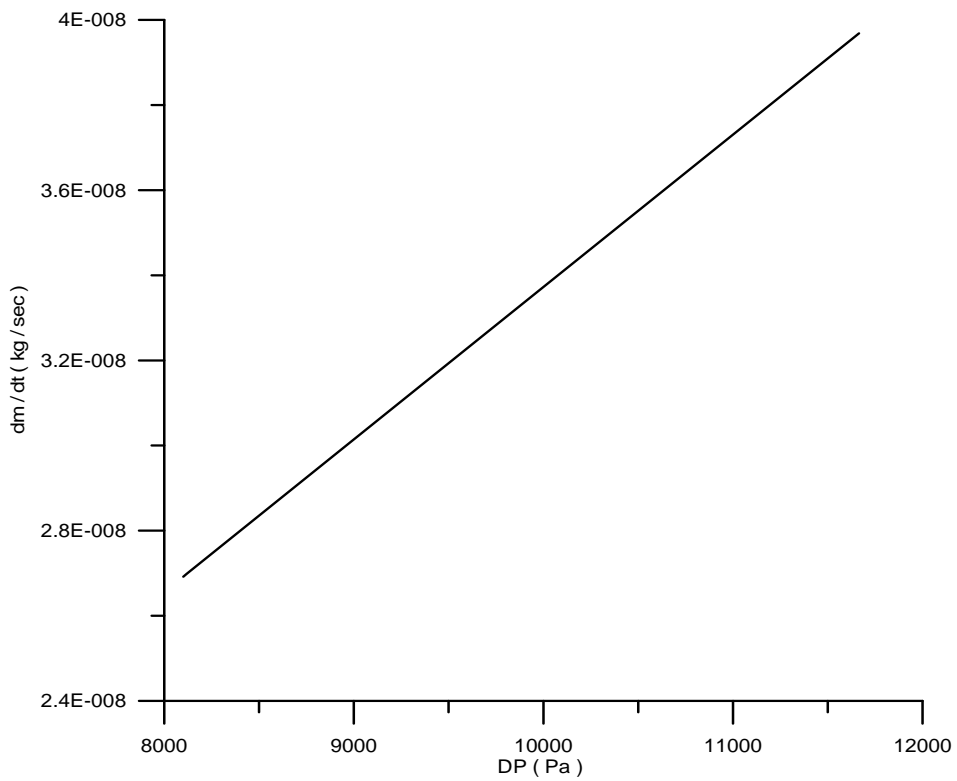
σχήμα 59



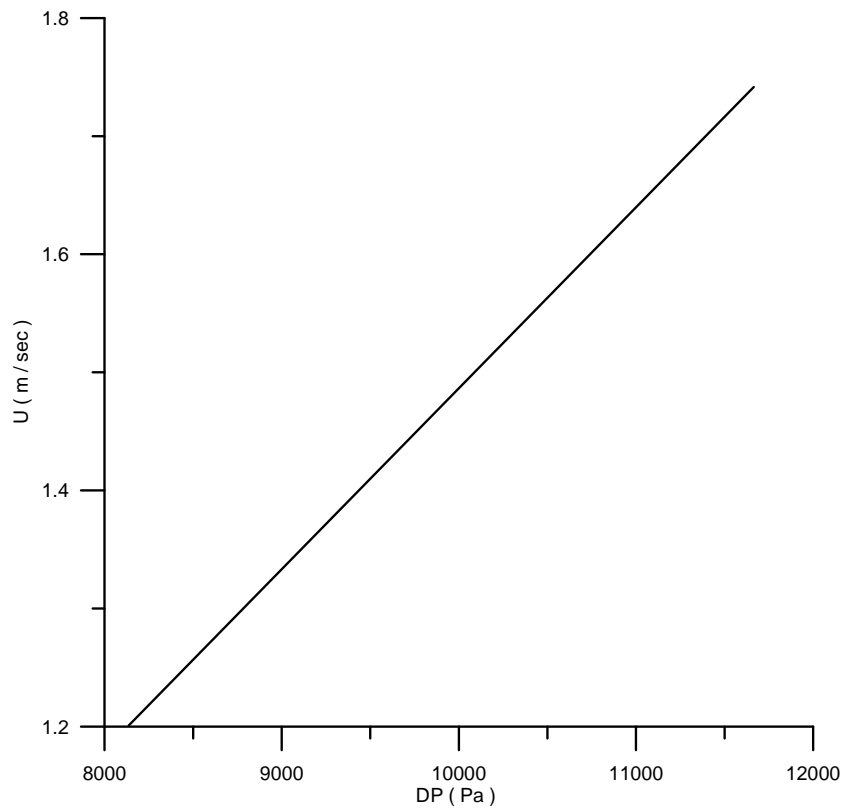
σχήμα 60



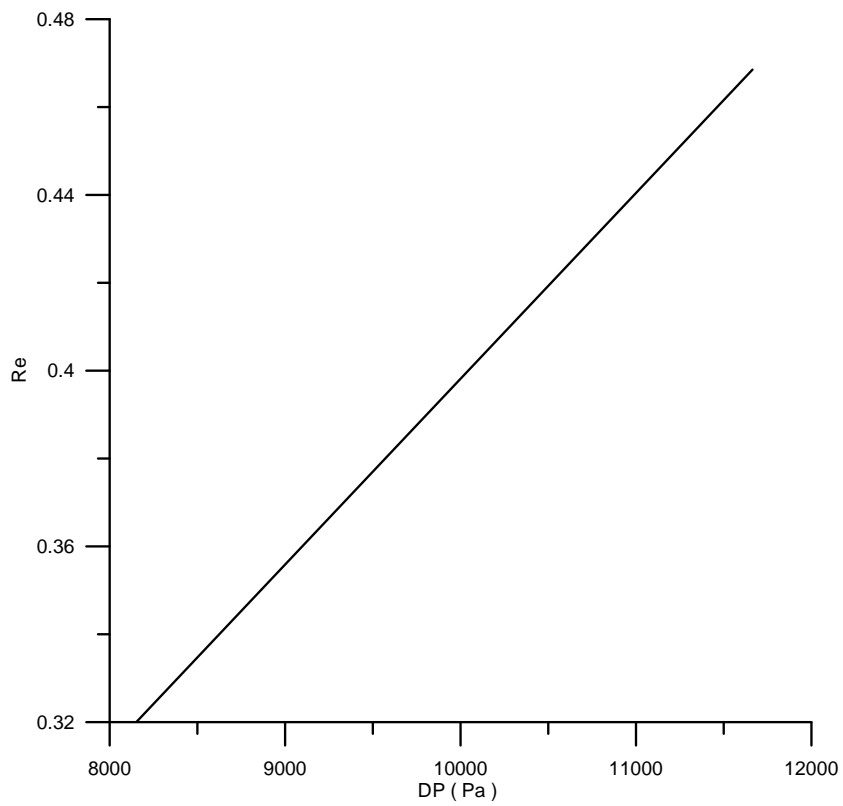
σχήμα 61



σχήμα 62



σχήμα 63



σχήμα 64

## Γ.2 Συγκεντρωτικά και συγκριτικά διαγράμματα

► Πλάκα μικροαγωγών μήκους  $L=4750\mu\text{m}$ , πλάτους  $W=500\mu\text{m}$  και βάθους  $H=30\mu\text{m}$ . Αριθμός καναλιών  $N=22$

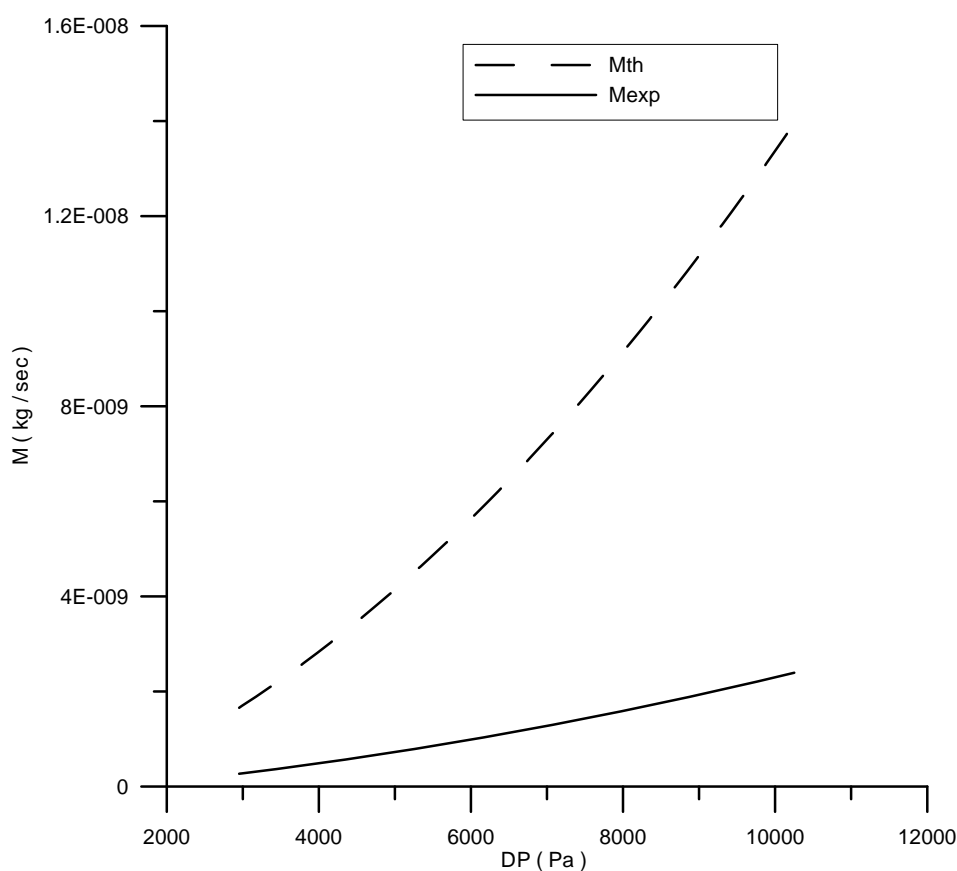
Στο σχήμα 1, με την διακεκομμένη γραμμή παρουσιάζονται οι τιμές της παροχής μάζας όπως αυτή υπολογίζεται αναλυτικά από με τη σχέση:

$$\dot{M} = G_{th} \cdot H \cdot W \cdot D_h \cdot \frac{(P_{leyb} - P_{mks})}{L \cdot u_0}$$

όπου η αδιάστατη παράμετρος  $G_{th}$  υπολογίζεται από πίνακες όπως την υπολόγισε ο **F.Sharipov** συναρτήσει της παραμέτρου αραιοποίησης  $\delta$ , που υπολογίζεται ως :

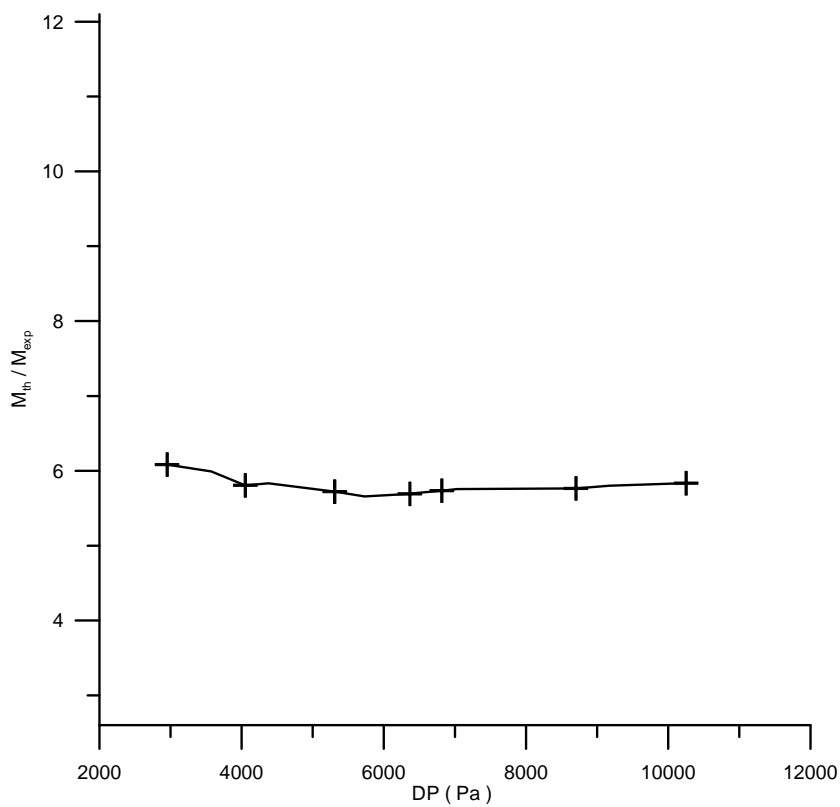
$$\delta = \frac{\delta_{leyb} + \delta_{mks}}{2}$$

$$\text{όπου: } \delta_{leyb} = \frac{D_h \cdot \bar{P}_{leyb}}{\mu \cdot u_0} \text{ και } \delta_{mks} = \frac{D_h \cdot \bar{P}_{mks}}{\mu \cdot u_0}$$



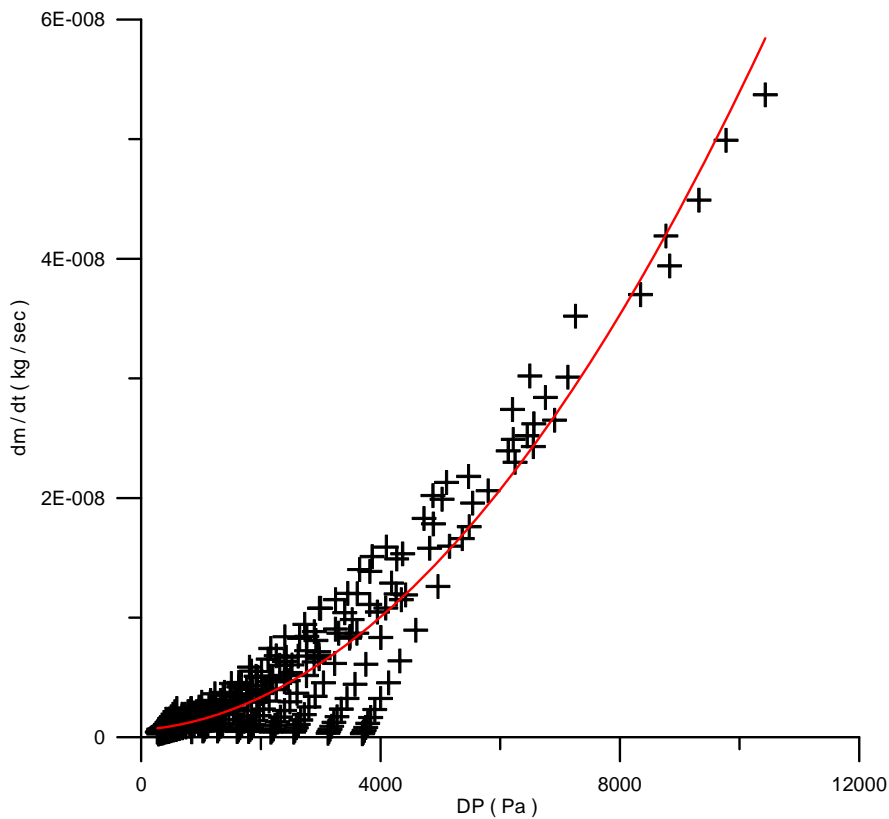
σχήμα 1

Όπως παρατηρούμε από το σχήμα 1, οι τιμές της μετρούμενης πειραματικής μάζας και της θεωρητικής, σύμφωνα με το μοντέλο του **F.Sharipov**, αποκλείουν όλο και πιο πολύ καθώς αυξάνεται η διαφορά πίεσης στα άκρα της πλάκας. Στο σχήμα 2 που ακολουθεί, παρατηρούμε πως η μετρούμενη παροχή μάζας είναι περίπου 6 φορές μικρότερη από τη θεωρητική της τιμή.



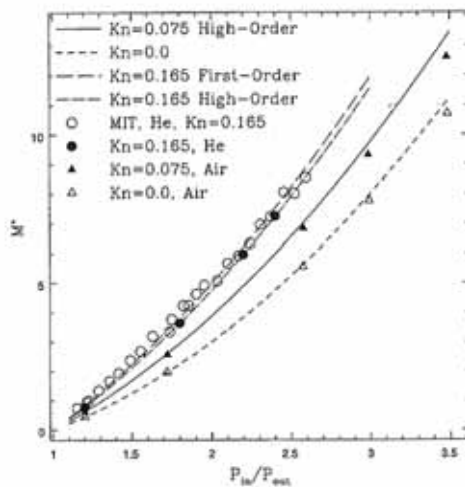
σχήμα 2

Το σχήμα 3, απεικονίζει ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα της παροχής μάζας όπως αυτή μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια και των 19 πειραμάτων που έγιναν στην πλάκα αυτή για ολόκληρο το εύρος DP του πειράματος.



σχήμα 3

Στο σχήμα αυτό φαίνεται η διασπορά των σημείων του πειράματος τα οποία ακολουθούν την καμπύλη του σχήματος ( κόκκινο χρώμα ). Πιο συγκεκριμένα έχουν παρθεί 340 σημεία συνολικά , περίπου 15 για κάθε πείραμα  $Av$  και η πυκνωση των σημείων είναι ιδιαίτερος έντονη στα χαμηλά DP, μπορούμε να παρατηρήσουμε τη γραμμική συμπεριφορά της παροχής μάζας σε κάθε ένα από τα 19 πειράματα κάτι που φάνηκε ξεκάθαρα στις γραφικές παραστάσεις του προηγούμενου κεφαλαίου. Η μορφή της κόκκινης καμπύλης μπορεί να δικαιολογηθεί από το παρακάτω θεωρητικό διάγραμμα ( MICROFLOWS, G.E.Karniadakis,A.Beskok, 2002)



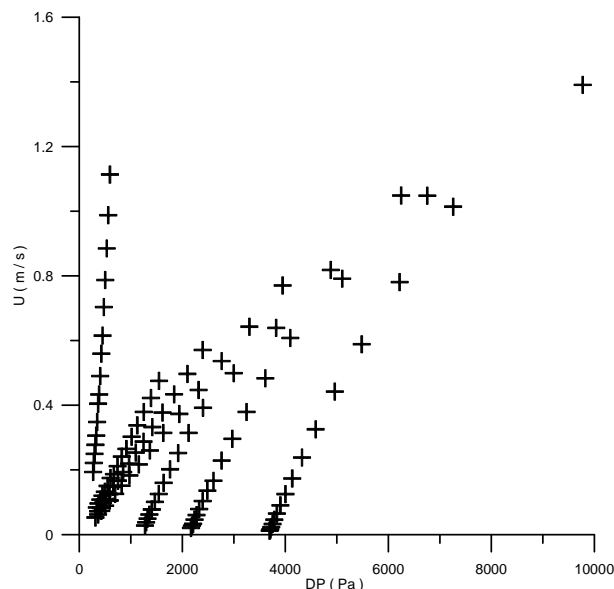
διάγραμμα 1

Το διάγραμμα αυτό αναφέρεται σε ροή ολίσθησης σε μικροαγωγούς, με το λόγο  $L/h \gg 1$  και για σταθερή θερμοκρασία, με  $L$  το μήκος του αγωγού και  $h$  το πάχος του. Στο διάγραμμα 1 παρατηρούμε πως η παροχή μάζας είναι ανάλογη του τετραγώνου του λόγου πίεσης, κάτι που εμείς θέλουμε να αποδείξουμε πως ισχύει και για τη διαφορά πίεσης  $DP$  που μας ενδιαφέρει. Εύκολα αποδεικνύεται αφαιρώντας από το τετράγωνο του λόγου πίεσης τη μονάδα, όπως φαίνεται στη συνέχεια :

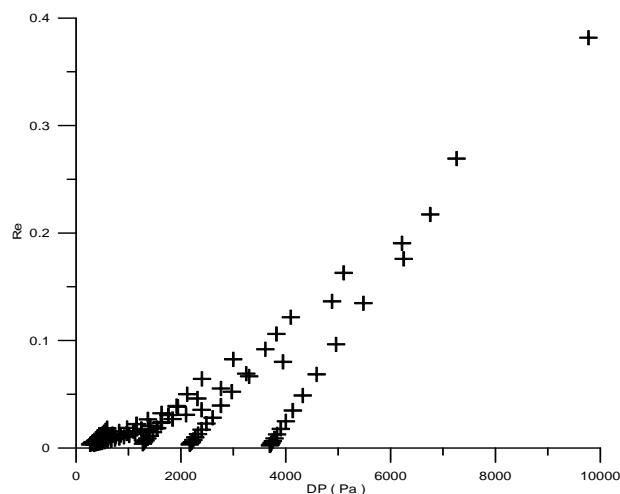
$$\left(\frac{P_{in}}{P_{out}}\right)^2 - 1 = \frac{P_{in}^2 - P_{out}^2}{P_{out}^2} = \frac{P_{in} + P_{out}}{P_{out}} \cdot \left(\frac{P_{in} - P_{out}}{P_{out}}\right) = \left(\frac{P_{in} + P_{out}}{P_{out}}\right) \cdot \frac{DP}{P_{out}}$$

όμως το άθροισμα  $(P_{in} + P_{out})$  παραμένει σταθερό με τη πάροδο του χρόνου.

Στη συνέχεια, για λόγους πληρότητας, παρατίθεται η διασπορά των σημείων που αφορά την ταχύτητα (σχήμα 4) και τον αριθμό  $Re$  (σχήμα 5), για το ένα τρίτο των πειραμάτων χωρίς να μας δίνεται η δυνατότητα για ασφαλή συμπεράσματα.



σχήμα 4



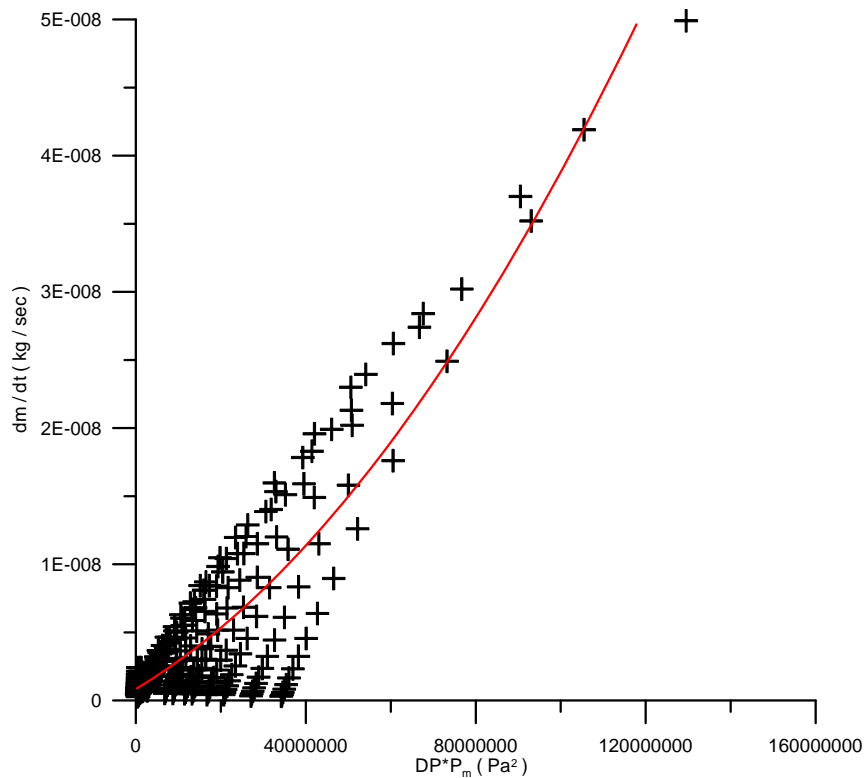
σχήμα 5

Το τελευταίο ενδιαφέρον διάγραμμα ( σχήμα 6 ), αφορά τη μεταβολή της παροχής μάζας με το γινόμενο  $DP \cdot P_m$ . Θυμίζουμε ότι

$$P_m = \frac{P_{leyb} + P_{mks}}{2} \quad \text{και} \quad DP = P_{leyb} - P_{mks}$$

άρα για το γινόμενο που μας ενδιαφέρει θα ισχύει :

$$DP \cdot P_m = \frac{(P_{leyb}^2 - P_{mks}^2)}{2}$$



σχήμα 6

Σύμφωνα με την παρακάτω θεωρητική σχέση (G.A.Karniadakis,A.Beskok, 2002) που ισχύει στην περίπτωση μας

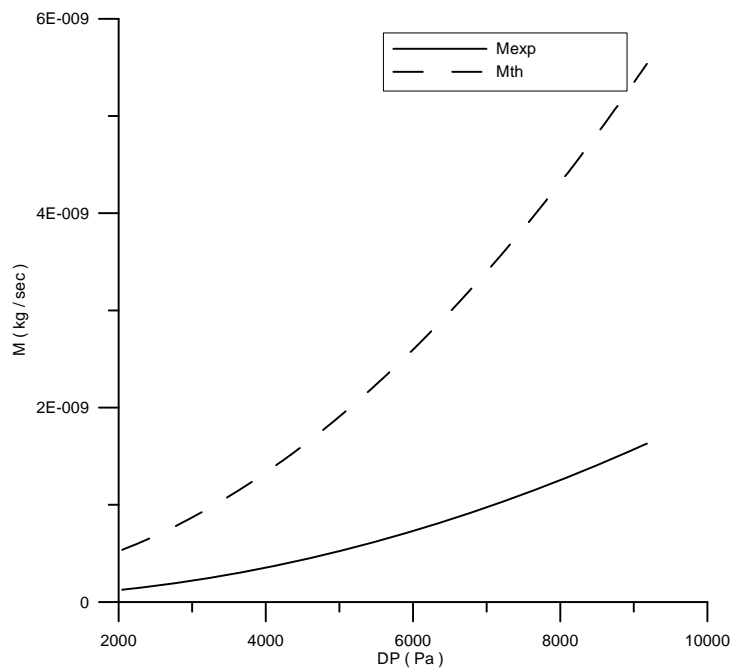
$$\dot{M} = \frac{h^3 \cdot P_{out}^2}{24 \cdot \mu \cdot R \cdot T \cdot L} \cdot (P_{out}^2 - P_{in}^2) \quad (\text{σχ.Γ.2.1})$$

η διασπορά των σημείων θα έπρεπε να είναι γραμμική, κάτι που δεν συμβαίνει με ιδιαίτερη ακρίβεια ( κόκκινη γραμμή,σχ.6 ) στο πείραμα αυτό.

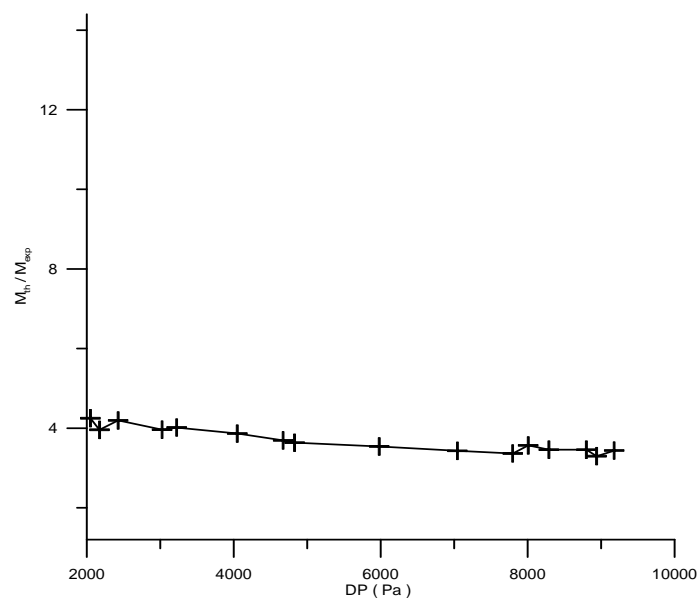


► Πλάκα μικροαγωγών μήκους  $L=4750\mu\text{m}$ , πλάτους  $W=250\mu\text{m}$  και βάθους  $H=30\mu\text{m}$ . Αριθμός καναλιών  $N=36$

Ακολουθούμε τη μεθοδολογία του προηγούμενου πειράματος, έτσι κάποια σχόλια που παραμένουν ίδια δεν επαναλαμβάνονται. Η μετρούμενη με την πειραματική παροχή μάζας σχετίζονται στο παρακάτω σχήμα :

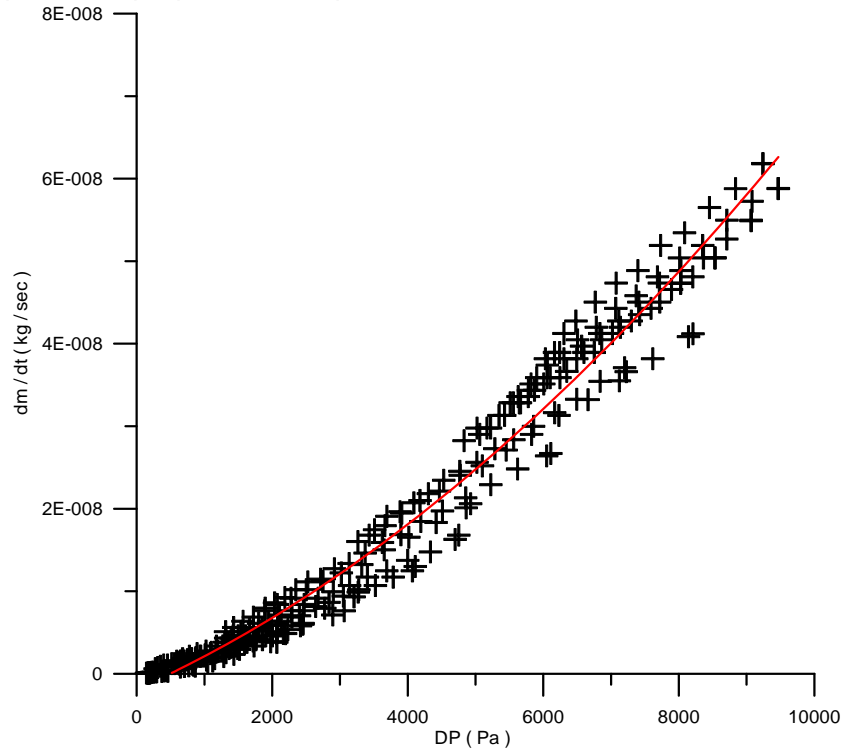


σχήμα 7



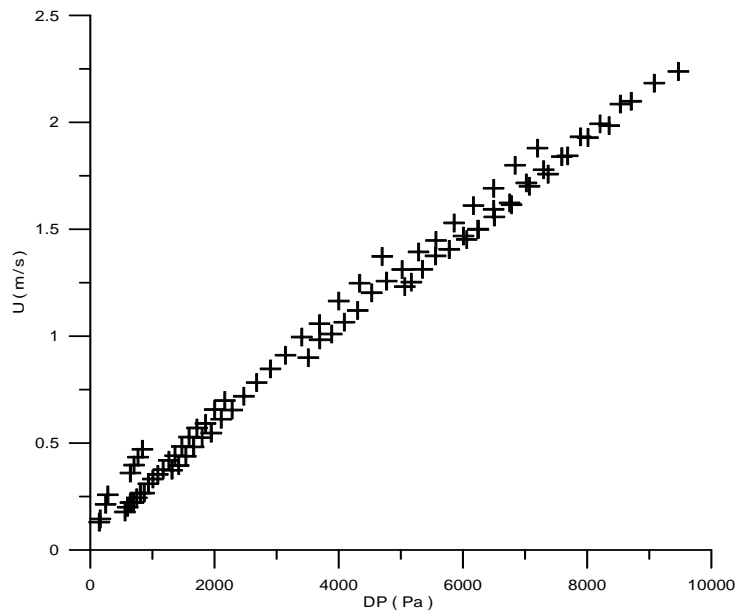
σχήμα 8

Ο λόγος των μαζών φαίνεται καλύτερος από το προηγούμενο πείραμα ( σχήμα 8 ) με την πειραματική παροχή μάζας να είναι 4 φορές μικρότερη από την θεωρητική, αντί για 6 που ήταν στο προηγούμενο πείραμα.

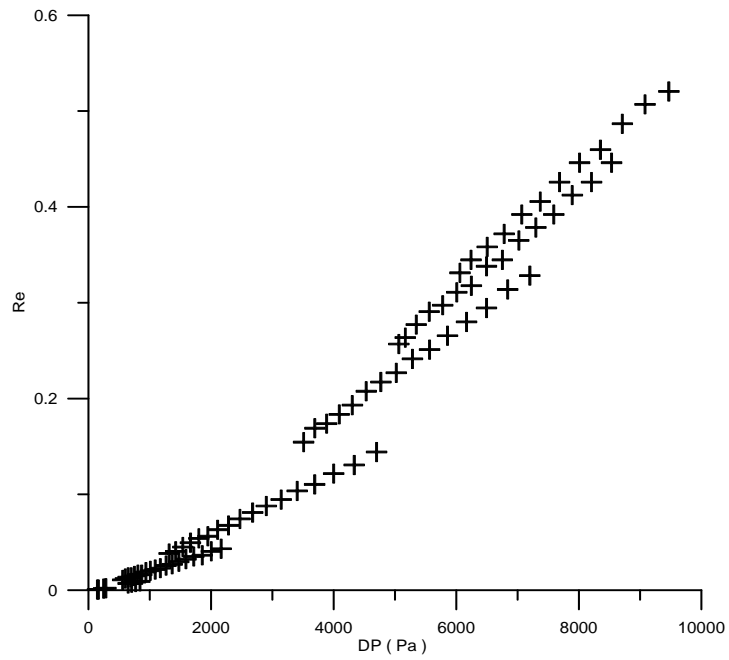


σχήμα 9

Η διασπορά της παροχής μάζας φαίνεται να ακολουθεί πιο συμβατή κατανομή με το θεωρητικό διάγραμμα ( βλ.διάγραμμα 1 ), σε σχέση με το προηγούμενο πείραμα. Η διασπορά της ταχύτητας και του αριθμού  $Re$  φαίνεται στα δύο επόμενα σχήματα

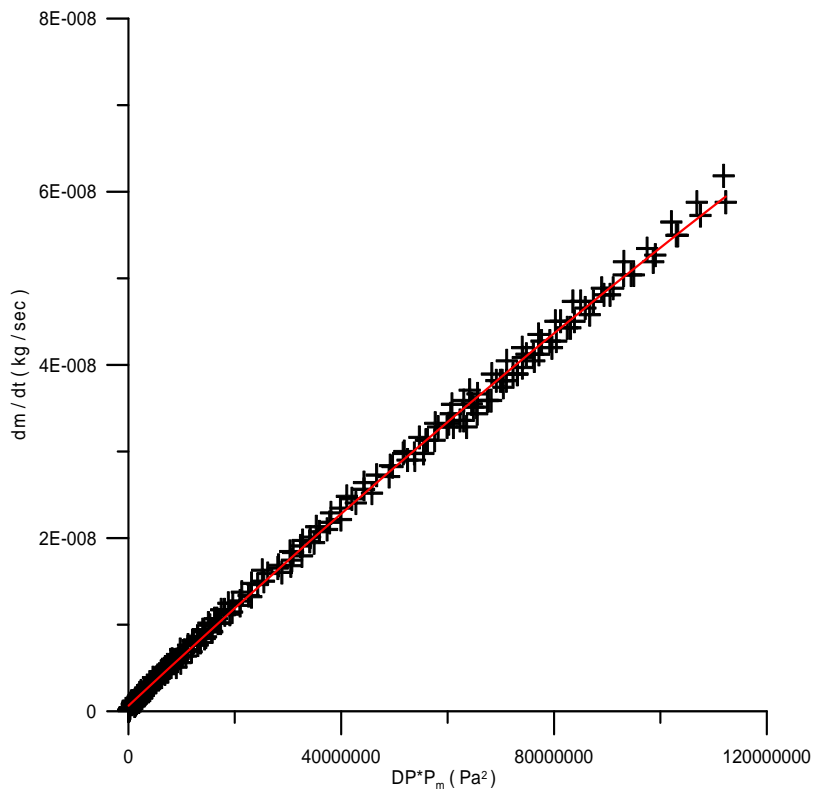


σχήμα 10



σχήμα 11

Τέλος, στο σχήμα 12, παρατηρούμε πως η διασπορά των σημείων είναι αρκετά πιο γραμμική από το προηγούμενο πείραμα, κάτι που συμφωνεί και με τη θεωρία ( βλ. Σχ. Γ.2.1 ).

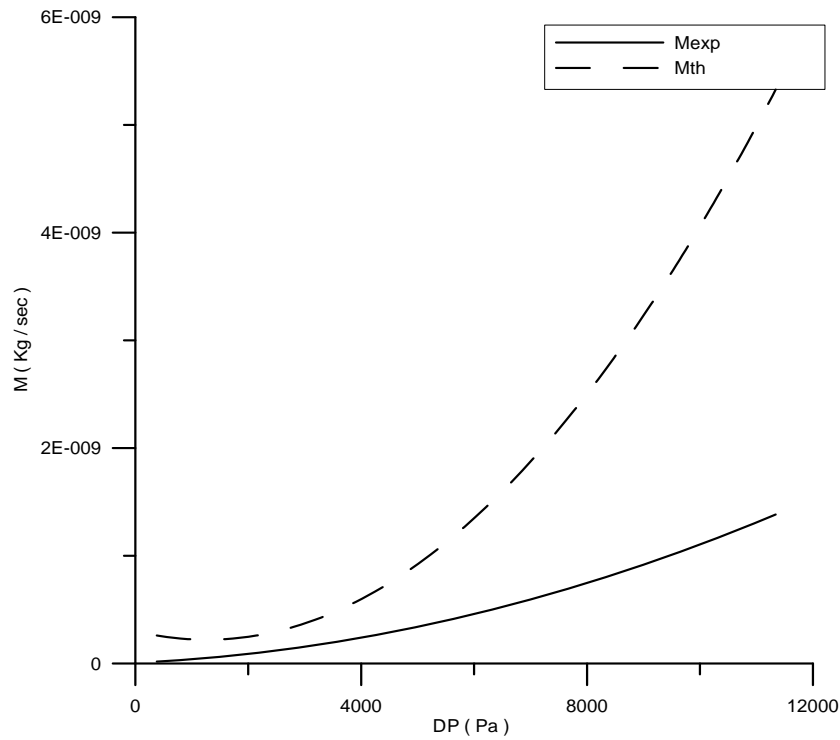


σχήμα 12

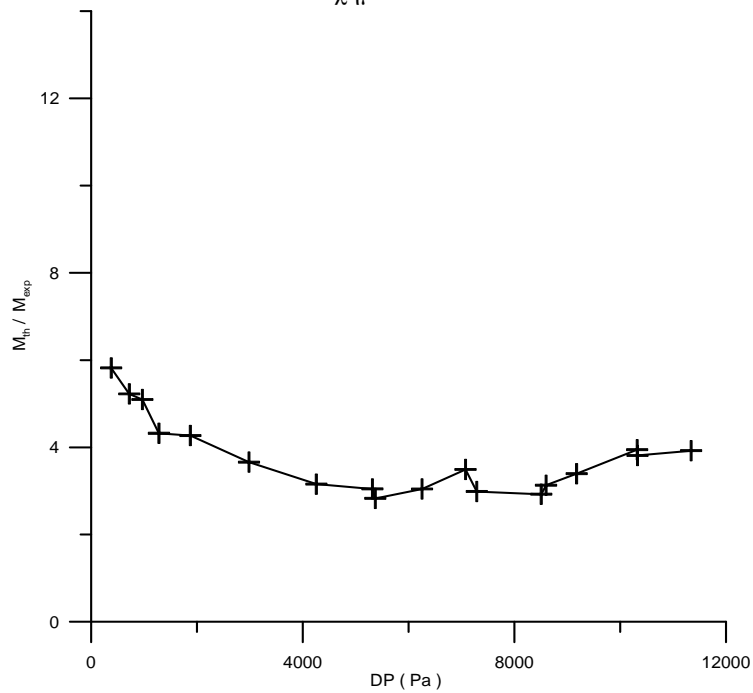
Θα μπορούσαμε να πούμε λοιπόν, πως το δεύτερο πείραμα στο οποίο υποδιπλασιάσαμε το πλάτος των μικροκαναλιών μας, προσεγγίζει καλύτερα της θεωρητικές τιμές. Μια πιθανή εξήγηση του φαινομένου αυτού είναι πως οι αγωγοί με το μεγαλύτερο πλάτος αναρροφούν πιο εύκολα την ταινία διπλής όψης μεταξύ της πλάκας πυριτίου και του προστατευτικού Plexiglas, κάτι που προφανώς επιδρά αρνητικά στις μετρήσεις και μας οδηγεί σε επισφαλή συμπεράσματα.

► Πλάκα μικροαγωγών μήκους  $L=4750\mu\text{m}$ , πλάτους  $W=250\mu\text{m}$  και βάθους  $H=30\mu\text{m}$ . Αριθμός καναλιών  $N=27$

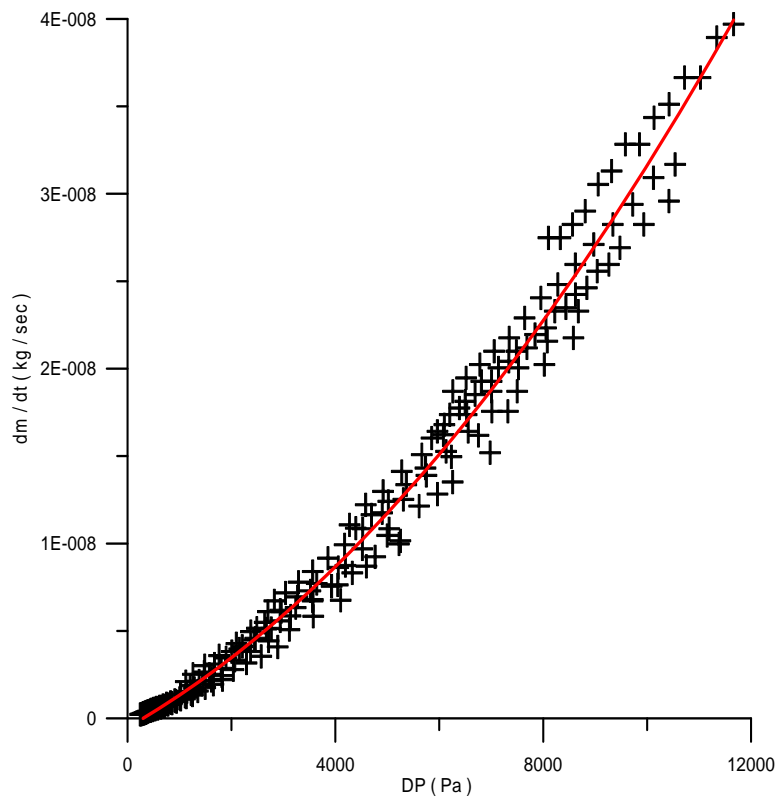
Όπως έχουμε ξαναφέρει, στο τελευταίο αυτό πείραμα αφήσαμε τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά στους μικροαγωγούς και απλά αλλάξαμε τον τρόπο εισαγωγής και εξαγωγής του ρευστού από τη μάσκα. Η διαδικασία είναι ακριβώς η ίδια με τα προηγούμενα πειράματα.



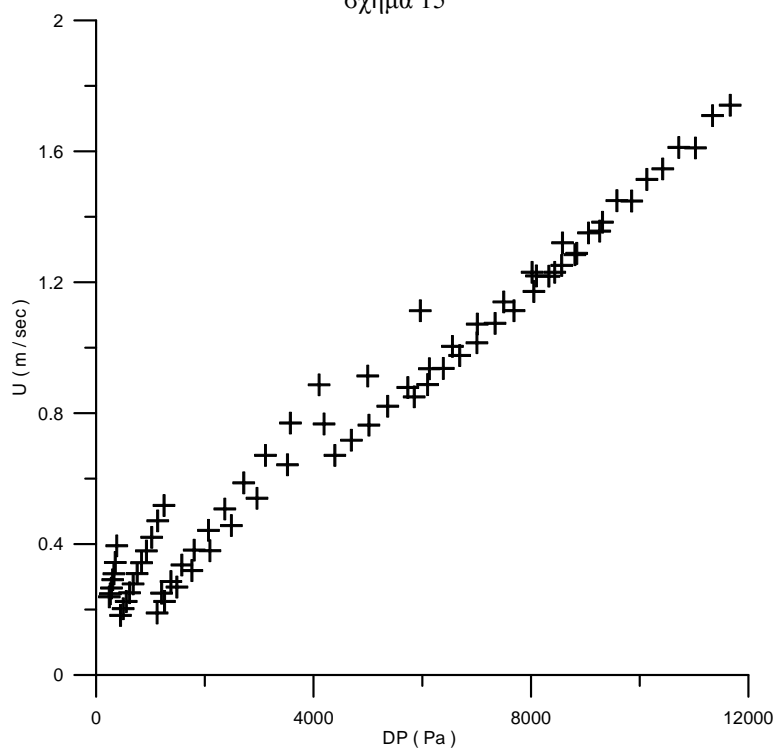
σχήμα 13



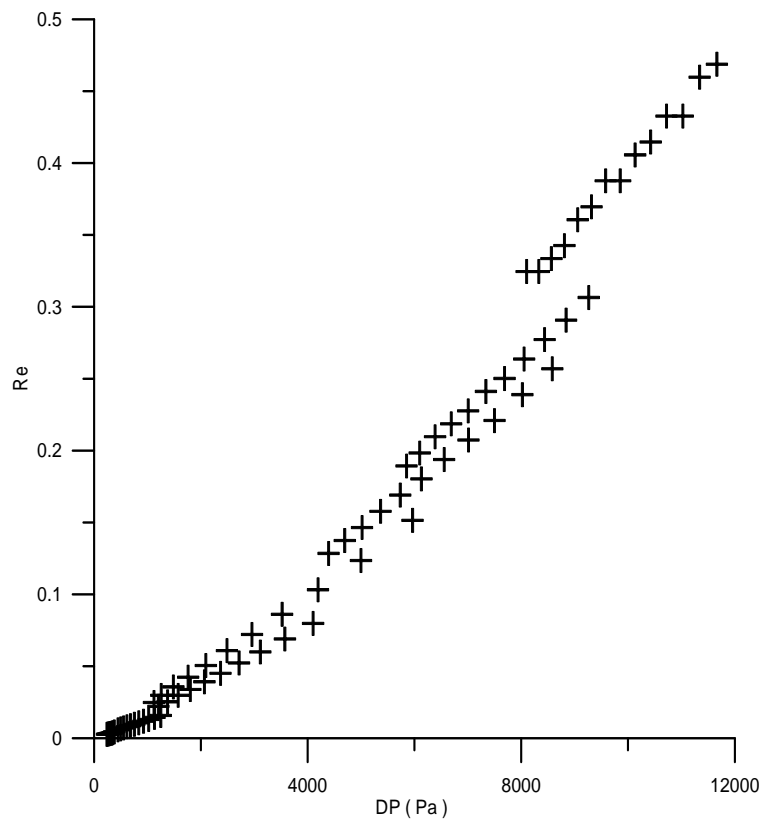
σχήμα 14



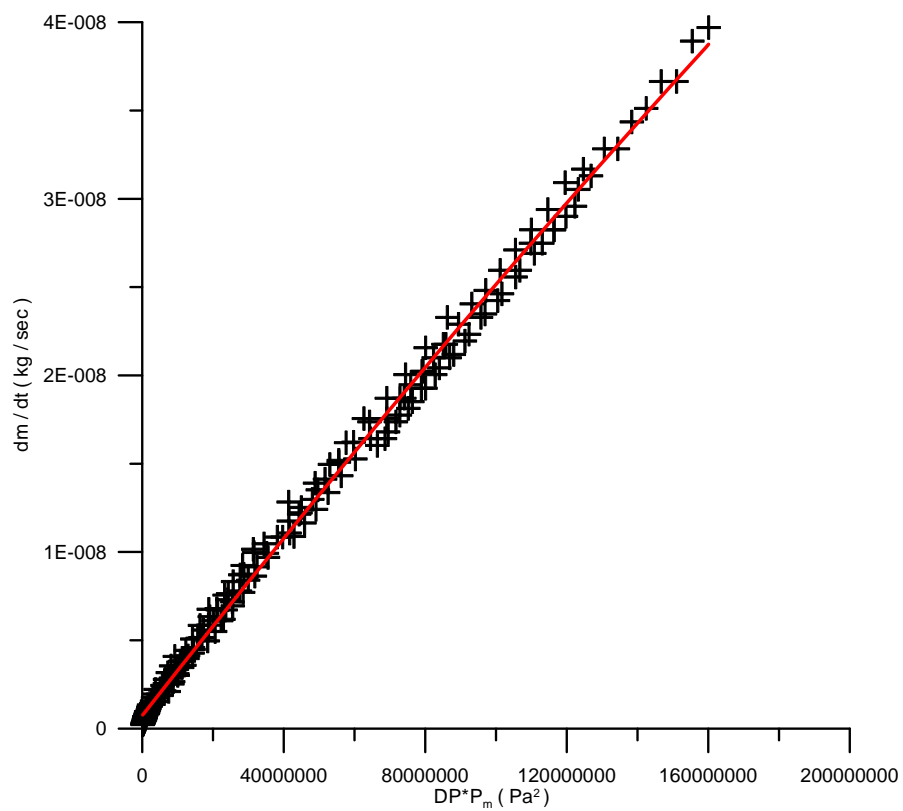
σχήμα 15



σχήμα 16



σχήμα 17



σχήμα 18

Τα σχόλια του πειράματος αυτού είναι ίδια με αυτά του προηγούμενου, καθώς η αλλαγή του τρόπου εισαγωγής και εξαγωγής του ρευστού, δεν φαίνεται να επηρέασε σημαντικά τα αποτελέσματά μας. Και εδώ παρατηρούμε πως ο λόγος των μαζών κυμαίνεται κοντά στο 4.

Αυτό το οποίο έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι πως σε σχετικό πείραμα που έγινε, προσπαθώντας να περάσουμε προπανάλη από την τελευταία μας πλάκα, (η προπανάλη έχει την ιδιότητα να ρέει από μόνη της στο πυρίτιο), διαπιστώσαμε πως περίπου το 1/4 των καναλιών είναι βουλωμένα (παρουσιάζεται σχετικό βίντεο), με την προπανάλη να μη μπορεί να περάσει από αυτά. Το γεγονός αυτό, μπορεί να μας δικαιολογήσει την απόκλιση της μετρούμενης παροχής μάζας και της θεωρητικής, όπως παρουσιάστηκε και στα τρία παραπάνω πειράματα.



### Γ.3 Συμπεράσματα

Από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:

Όσον αφορά στην πειραματική διάταξη:

► Πριν από κάθε πείραμα είναι αναγκαίο η αντλία κενού να αφηθεί να λειτουργήσει για εύλογο χρονικό διάστημα, ώστε να απομακρυνθούν από το εσωτερικό της πειραματικής συσκευής τυχόν υγρασία και αέρια προκαλούμενα από το φαινόμενο outgassing.

► Προκειμένου το ρευστό να περάσει από τις σωληνώσεις στους μικροαγωγούς της πλάκας πυριτίου, κρίθηκε απαραίτητη η δημιουργία κατάλληλης μεταλλικής μάσκας για την αποφυγή απωλειών και καλύτερη στεγανοποίηση της εγκατάστασης. Πριν από τη χρήση της μεταλλικής μάσκας, ένα μέρος του ρευστού φαίνεται πως διέφυγε, γεγονός που καθιστούσε αδύνατη τη διεξαγωγή του πειράματος.

► Η χρησιμοποίηση κόλλας διπλής όψης μεταξύ της πλάκας πυριτίου και του προστατευτικού Plexiglas, κρίνεται ακατάλληλη καθώς είναι δυνατή η αναρρόφηση της κατά τη διέλευση του αερίου.

Όσον αφορά στα σφάλματα των μετρήσεων:

► Υπολογίστηκαν οι εξής διαρροές:

- Για μέση τιμή πίεσης  $P_m=0,6 \text{ Torr}$ , η διαρροή ήταν  $0,1 \text{ mTorr/sec}$ .
  - Για μέση τιμή πίεσης  $P_m=18 \text{ Torr}$  και ρυθμό μείωσης της  $dp/dt=50 \text{ mTorr/sec}$ , η διαρροή ήταν  $0,3 \text{ mTorr/sec}$  ( $0,6\%$ ).
  - Για μέση τιμή της πίεσης  $P_m=40 \text{ Torr}$  και ρυθμό μείωσης της  $dp/dt=220 \text{ mTorr/sec}$ , η διαρροή ήταν  $0,1 \text{ mTorr/sec}$  ( $0,045\%$ ).
  - Για υψηλότερες τιμές της μέσης πίεσης, το ποσοστό της διαρροής ήταν ακόμη πιο χαμηλό.
- Το συνολικό σφάλμα των οργάνων μέτρησης της πίεσης, της θερμοκρασίας και του όγκου, υπολογίστηκε στο  $5,7\%$ .

Όσον αφορά στα πειραματικά αποτελέσματα:

► Το εύρος των τιμών των μετρούμενων μεγεθών είναι:

- Η **παροχή μάζας** ήταν της τάξης των  $10^{-11}$  έως  $10^{-8} \text{ Kg/sec}$ .
  - Η **διαφορά πίεσης** στα άκρα των αγωγών μετρήθηκε από  $85 \text{ Torr}$  έως  $1,5 \text{ Torr}$ .
  - Η **μέση τιμή της ταχύτητας** της ροής μετρήθηκε από  $2 \text{ m/sec}$  έως της τάξης των  $10^{-2} \text{ m/sec}$ .
  - Ο αριθμός **kn** κυμαίνεται από  $3,291$  έως  $0,062$ .
  - Ο αριθμός **Re** ήταν της τάξης του  $10^{-4}$  έως  $10^{-1}$ .
- Η παροχή μάζας, για μικρά εύρη της διαφοράς πίεσης εισόδου-εξόδου, συνδέεται με αυτή γραμμικά. Η γραμμικότητα αυτή φαίνεται να παρεκκλίνει στην πλάκα με πλάτος μικροαγωγών  $W=500\mu\text{m}$  και για υψηλές τιμές της διαφοράς πίεσης.
- Η παροχή μάζας, για ολόκληρο το εύρος της διαφοράς πίεσης εισόδου-εξόδου, φαίνεται πως προσομοιώνεται καλύτερα στις θεωρητικές καμπύλες στην περίπτωση

των μικροαγωγών πλάτους  $W=250\mu\text{m}$ , σε αντίθεση με τους μικροαγωγούς πλάτους  $W=500\mu\text{m}$ .

► Το ίδιο φαίνεται να συμβαίνει και για τη συσχέτιση του γινομένου  $DP \cdot P_m$  με τη διαφορά πίεσης  $DP$ , η οποία πρέπει να είναι γραμμική, σύμφωνα με τη θεωρία.

► Η πειραματική παροχή μάζας παρουσιάζει σχετικά μεγάλη απόκλιση από τη θεωρητική της τιμή, σύμφωνα με το μοντέλο του F.Sharipov. Στην πρώτη πλάκα με πλάτος μικροαγωγών  $W=500\mu\text{m}$  παρουσιάζεται περίπου 6 φορές μικρότερη της πειραματικής, ενώ στις άλλες δύο πλάκες με πλάτος μικροαγωγών  $W=250\mu\text{m}$  παρουσιάζεται 4 φορές μικρότερη.

► Από όλα τα παραπάνω, μπορούμε να συμπεράνουμε πως η πρώτη πλάκα, με τους μικροαγωγούς διπλάσιας διατομής, έχει χειρότερη συμπεριφορά από τις άλλες δύο και μας οδηγεί σε πιο επισφαλή συμπεράσματα. Μια πιθανή αιτιολόγηση του φαινομένου είναι πως οι μικροαγωγοί αυτοί είναι πιο εύκολο να αναρροφήσουν την κόλλα διπλής όψης που ενώνει την πλάκα πυριτίου με το προστατευτικό Plexiglas.

► Όπως διαπιστώνεται σε σχετικό βίντεο, η μεγάλη απόκλιση των πειραματικών τιμών παροχής μάζας από τις θεωρητικές τιμές, μπορεί να δικαιολογηθεί από το ότι περίπου το 1/4 των καναλιών της τρίτης πλάκας φάνηκαν βουλωμένα, στην προσπάθεια διέλευσης προπανόλης από αυτά.

► Η διαφορά στον τρόπο εισαγωγής του αερίου μεταξύ της δεύτερης και της τρίτης πλάκας, δεν επέφερε σημαντικές διαφορές στα αποτελέσματά μας.

## Παράρτημα 1<sup>ο</sup> : Το Αργό (Ar)

### 1.1 Η Ιστορία

Από τη ελληνική λέξη *argos*, που σημαίνει ανενεργός. Η παρουσία του στον αέρα έγινε υποθετική από τον Cavendish το 1785. Παρ'ολαυτα το 1894 ο Lord Rayleigh και ο Sir.W.Ramsey το αναγνώρισαν σαν στοιχείο. Το αργό επίσης ερευνήθηκε το 1882 ανεξάρτητα, από τους H.F Newall και W.N Hartley. Τόσο ο ένας όσο και ο άλλος παρατήρησαν καινούργιες γραμμές στο φάσμα του αέρα, χωρίς ωστόσο να εξακριβώσουν το στοιχείο που οφείλεται για αυτές τις γραμμές. Το αργό έγινε το πρώτο ευγενές αέριο που ανακαλύφθηκε. Το σύμβολο του ήταν μέχρι το 1957 το "A" και τώρα είναι το "Ar".

### 1.2 Τα χαρακτηριστικά

Το Αργό έχει περίπου την ίδια διαλυτότητα στο νερό με το οξυγόνο και είναι δύομιση φορές πιο διαλυτό στο νερό από το άζωτο. Αυτό το υψηλά αδιάσπαστο χημικό στοιχείο είναι άχρωμο, άοσμο, άγευστο και μη τοξικό, τόσο στην υγρή όσο και στην αέρια του μορφή. Το αργό είναι αδρανές στις περισσότερες συνθήκες και σχηματίζει μη μόνιμες σταθερές ενώσεις σε θερμοκρασία δωματίου.

Το αέριο αργό συμπυκνώνεται σε άχρωμο υγρό στους  $-185.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  και σε κρυσταλλικό στερεό στους  $-189.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Το αέριο δεν μπορεί να υγροποιηθεί μέσω συμπίεσης επάνω από μια κρίσιμη θερμοκρασία  $-122.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Στην κρίσιμη αυτή θερμοκρασία, η πίεση που απαιτείται για την υγροποίηση του αερίου είναι τουλάχιστον 48atm.

Ατομικός αριθμός : 18

Ατομικό βάρος : 39.948

Σημείο τήξης :  $-189.2\text{ }^{\circ}\text{C}$

Σημείο βρασμού :  $-185.7\text{ }^{\circ}\text{C}$

Πυκνότητα (1 Atm,  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) : 1.784 g/l

Σθένος : 0

Διάταξη ηλεκτρονίων : 2-8-8

### 1.3 Ύπαρξη – Ανίχνευση

Το αργό απαρτίζει το 0,934% του όγκου και το 1,29% της μάζας της γήινης ατμόσφαιρας. Απομονώνεται από τον αέρα με κρυογονική κλασματική απόσταξη, μια διαδικασία κατά την οποία παράγεται καθαρό άζωτο, οξυγόνο, νέον, κρυπτό και ξένο. Μια σημαντική μερίδα του επίγειου αργού έχει παραχθεί από το γήινο σχηματισμό, από την αποσύνθεση του σπάνιου ραδιενεργού ισότοπου κάλιο-40. Στη γη το αργό

εμφανίζεται σαν μίγμα τριών σταθερών ισοτόπων: αργό-36 (0,34%), αργό-38 (0,06%), και αργό-40 (99,60%). Η παραγωγή του ισοτόπου αργό-40 από την αποσύνθεση του ισοτόπου κάλιο-40 χρησιμοποιείται ως μέσο καθορισμού της γήινης ηλικίας. Το 1973 ανακαλύφθηκε πως ο πλανήτης Ερμής έχει ένα πολύ γλεπτό στρώμα ατμόσφαιρας, το 70% της οποίας αποτελείται από αργό ενώ από το ίδιο αέριο αποτελείται και το 1,6% της ατμόσφαιρας του πλανήτη Άρη.

## 1.4 Εφαρμογές

Υπάρχουν αρκετοί διαφορετικοί λόγοι για τους οποίους το αργό χρησιμοποιείται σε συγκεκριμένες εφαρμογές:

- Α) Ένα πολύ αδρανές αέριο απαιτείται, ειδικά όπου το δυατομικό άζωτο δεν είναι επαρκώς αδρανές
- Β) Απαιτείται χαμηλή θερμική αγωγιμότητα
- Γ) Χρειάζονται ηλεκτρονικές ιδιότητες (ιονισμός ή/και φάσμα εκπομπής ηλεκτρονίων)

Άλλα ευγενή αέρια πιθανώς να δούλευαν το ίδιο καλά με το αργό στις περισσότερες εφαρμογές, αλλά το αργό είναι κατα πολύ φθηνότερο. Αυτό συμβαίνει επειδή το αργό είναι ένα υποπροϊόν της παραγωγής υγρού οξυγόνου και υγρού αζώτου, η χρησιμοποίηση των οποίων είναι μεγάλη σε βιομηχανική κλίμακα. Τα άλλα ευγενή αέρια (εκτός από το ήλιο) παράγονται με τον ίδιο τρόπο αλλά το αργό είναι το πιο άφθονο, με την υψηλότερη συγκέντρωση στην ατμόσφαιρα. Ο όγκος των εφαρμογών του αργού απορρέει απλώς από το γεγονός ότι είναι αδρανές και σχετικά φθινό.

Το αργό χρησιμοποιείται:

- Ως αέριο σε λαμπτήρες πυρακτώσεως καθώς δεν αντιδρά με τα νήματα πυράκτωσης των λυχνιών, ακόμη και σε υψηλές θερμοκρασίες.
- Ως ένα αδρανές αέριο προφύλαξης σε πολλά είδη συγκόλλησης, συμπεριλαμβανομένου μεταλλική συγκόλληση με αδρανές αέριο και συγκόλληση με βολφράμιο.
- Για τη χρησιμοποίηση πλάσματος στην ICP φασματοσκόπηση.
- Ως ένα μη αντιδραστικό περιβάλλον στην επεξεργασία του τιτανίου και άλλων αντενεργών στοιχείων.
- Ως ένα προστατευτικό περιβάλλον για την παραγωγή πυριτίου και κρυστάλλων γερμανίου και για μερική πίεση σε θερμικούς κλιβάνους
- Για την συντήρηση και προστασία υλικών και διαφόρων μουσειακών ντοκουμέντων τα οποία είναι επιρρεπείς σε προοδευτική οξειδωση εξαιτίας του αέρα.

Ο επόμενος και πιο σημαντικός λόγος που χρησιμοποιούμε το αργό, είναι η χαμηλή του θερμική αγωγιμότητα. Χρησιμοποιείται για τη θερμική μόνωση «ενεργειακών» παραθύρων καθώς και σε αναπνευστικές συσκευές κατάδυσης. Επιπλέον, ακτίνες λέιζερ μπλε αργού χρησιμοποιούνται στην κρυο-χειρουργική για την ένωση αρτηριών και την καταστροφή καρκινικών όγκων.

## 1.5 Οι χημικές του ενώσεις

Πριν από το 1962, το αργό και τα άλλα ευγενή αέρια θεωρούνταν χημικά αδρανή και ανίκανα να σχηματίζουν ενώσεις. Ωστόσο ενώσεις των πιο βαριών ευγενών αερίων έχουν ήδη συνθεθεί. Τον αυγουστο του 2000, οι πρώτες χημικές ενώσεις αργού σχηματίστηκαν από ερευνητές του πανεπιστημίου του Ελσίνκι. Ακτινοβολώντας υπεριώδης ακτινοβολία σε παγωμένο αργό περιέχοντας μικρή ποσότητα φθοριούχου υδρογόνου, δημιουργήθηκε μια μετασταθής ένωση, το υδροφθορικό αργό (HArF) το οποίο είναι σταθερό σε θερμοκρασίες άνω των 40Kelvin (-233°C). Η ανακάλυψη του διφθορικού αργού ανακοινώθηκε το 2003, ωστόσο θεωρείται ακόμη ανεπίσημη.

## 1.6 Επιδράσεις στην υγεία

Το αργό είναι δυνατό να εισέλθει στο ανθρώπινο σώμα μέσω της εισπνοής προκαλώντας ζαλάδα, ναυτία ή πονοκέφαλο. Σε σοβαρότερες περιπτώσεις μπορεί να προκαλέσει απώλεια συνείδησης και επικείμενο θάνατο από ασφυξία, ο οποίος μάλιστα μπορεί να υπεισέλθει σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα εάν οι συγκεντρώσεις οξυγόνου στο χώρο είναι πολύ χαμηλές.

## 1.7 Επιδράσεις στο περιβάλλον

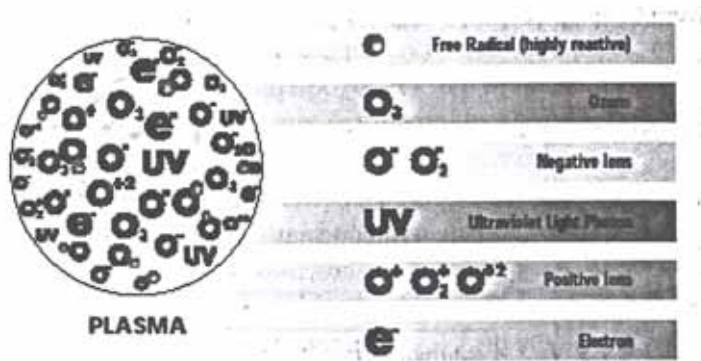
Καμιά οικολογική καταστροφή δεν έχει αποδειχθεί πως προκαλείται από το αργό και καμιά αρνητική περιβαλλοντική συνέπεια. Το αέριο αργό υπάρχει φυσικά στο περιβάλλον και διαλύεται ταχύτατα σε καλά αεριζόμενες περιοχές. Επιδράσεις του αργού στη χλωρίδα και στην πανίδα δεν είναι γνωστές, ενώ δεν θεωρείται πως βλάπτει τους υδροφόρους ορίζοντες.

## Παράρτημα 2<sup>ο</sup> : Ανισοτροπική εγχάραξη δομών πυριτίου με πλάσμα φθορανθράκων

### 2.1. Εισαγωγή στο πλάσμα

Ο όρος «πλάσμα» συνηθίζεται να αναφέρεται στην τέταρτη κατάσταση της ύλης, πέραν δηλαδή των τριών πρώτων, που μας είναι ήδη γνώστες : την στερεά, την υγρή και την αέρια. Παρότι βρίσκεται σε αφθονία στο σύμπαν, εμφανίζεται στη γη μόνο υπό ορισμένες συνθήκες.

Το πλάσμα δημιουργείται κατά την εφαρμογή υψηλής τάσης, συνήθως στην περιοχή των ραδιοσυχνοτήτων, μέσα σε ένα αέριο που βρίσκεται σε θάλαμο υπό κενό, με ηλεκτρική εκκένωση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μέσα στο θάλαμο ένα ηλεκτρικά ουδέτερο μίγμα από ηλεκτρόνια, ιόντα, φωτόνια, προϊόντα επανασύνδεσης και ουδέτερα (ελεύθερες ρίζες, άτομα) με την ταυτόχρονη εκπομπή λάμψης.



σχήμα 1: η σύνθεση του πλάσματος.

Από τα προϊόντα αυτά, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια είναι αυτά που ξεκινούν τη διαδικασία του πλάσματος, επειδή με την κινητική ενέργεια που αποκτούν και σε συνδυασμό με το γεγονός ότι είναι αρκετά ελαφρά, συγκρούονται συνεχώς με άλλα άτομα ή μόρια και αποκτούν μια υψηλή μέση ενέργεια πολλών eV, που αντιστοιχούν σε δεκάδες χιλιάδες βαθμούς πάνω από τη θερμοκρασία του αερίου, η οποία είναι συνήθως λίγο υψηλότερη από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Η υψηλή θερμοκρασία των ηλεκτρονίων επιτρέπει στις συγκρούσεις ηλεκτρονίων – μορίων να προκαλούν αντιδράσεις υψηλής θερμοκρασίας που δημιουργούν ελεύθερες ρίζες, ιόντα και άλλα ηλεκτρόνια λόγω ιονισμού μέσα στο χαμηλής θερμοκρασίας ουδέτερο αέριο. Για τη δημιουργία των ίδιων αντιδρώντων χωρίς πλάσμα, θα απαιτούντο θερμοκρασίες στην περιοχή μεταξύ  $10^3 - 10^4$  K, που θα κατέστρεφε τα οργανικά πολυμερή και πολλά ανόργανα φιλμ Η συνύπαρξη ενός ψυχρού αερίου και των θερμών ηλεκτρονίων, είναι αυτό που διαφοροποιεί τον αντιδραστήρα του πλάσματος από τη συμβατική θερμική διεργασία.

Πρέπει να σημειωθεί πως οι συγκρούσεις των σωματιδίων μέσα στο πλάσμα γίνονται από απόσταση. Το κάθε σωματίδιο έχει το δικό του ηλεκτρικό πεδίο και επηρεάζει

την κίνηση των μακρινών σωματιδίων και αυτή η συμπεριφορά είναι που δίνει στο πλάσμα τα μοναδικά του χαρακτηριστικά. Επειδή το κάθε σωματίδιο επηρεάζεται από τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία πολλών σωματιδίων, ο όρος που χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει την κινητική μέσα στο πλάσμα είναι 'συλλογική κίνηση'.

Ένας σημαντικός παράγοντας που χαρακτηρίζει το πλάσμα είναι το μήκος debye (debye length) που καθορίζει τα μέγεθος μιας περιοχής που προφυλάσσεται από το φορτίο χώρου (space charge) και μέσα στην οποία δεν μπορούν να επιδράσουν εξωτερικές ηλεκτρικές διαταραχές. Το μέγεθος του μήκους debye που προκύπτει καθορίζει πολλές ιδιότητες του πλάσματος που είναι σχετικές με τις διεργασίες μέσα στον αντιδραστήρα όπως για παράδειγμα το φράχτη δυναμικού (plasma (debye) sheath).

Παρόλο που αρχικά υπάρχουν ίσοι αριθμοί αρνητικών και θετικών φορτισμένων σωματιδίων σε ένα πλάσμα, η διάχυση ή φόρτιση στους τοίχους και η επανασύνδεση στις οριακές επιφάνειες του πλάσματος τείνουν να εξαντλήσουν το φορτίο στη γειτονική αέρια φάση, δημιουργώντας ένα λεπτό οριακό στρώμα που λέγεται φράχτης ηλεκτρονίων ή δυναμικού (sheath). Αυτό συμβαίνει γιατί τα ηλεκτρόνια είναι ελαφρά και έχουν υψηλή ενέργεια με αποτέλεσμα να διαχέονται πιο γρήγορα και να αφήνουν ένα πλεόνασμα θετικού φορτίου και ένα δυναμικό πλάσματος που είναι θετικό σε σχέση με τους τοίχους. Η περιοχή του κυρίως πλάσματος αποτελεί έναν αρκετά καλό αγωγό και η μεγαλύτερη πτώση δυναμικού εμφανίζεται κατά μήκος του φράχτη δυναμικού (sheath). Η τάση κατά μήκος του φράχτη δυναμικού κυμαίνεται από μερικά volts μέχρι χιλιάδες volts, γεγονός που εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους. Η διαφορά δυναμικού κατά μήκος του φράχτη δυναμικού είναι αυτή που επιταχύνει τα ιόντα και τα κάνει να προσκρούουν στις επιφάνειες και στους τοίχους.

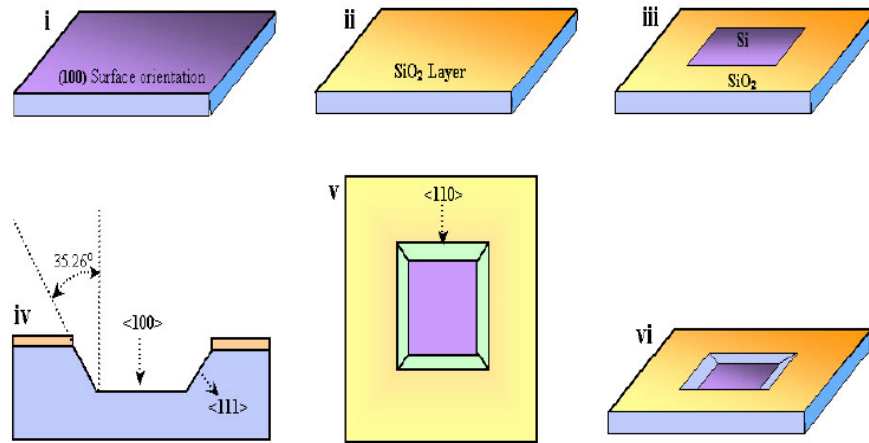
Η μείωση της πίεσης κάτω από τα  $\sim 0.05 - 0.1$  Torr έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του φράχτη δυναμικού και η τάση κατά μήκος του να αυξηθεί από μερικές δεκάδες volts σε εκατοντάδες ή περισσότερες. Συνεπώς σε αυτήν την περιοχή, καθώς η πίεση μειώνεται, το δυναμικό του πλάσματος αυξάνει, αυξάνοντας έτσι κατακόρυφα και την ιοντική ενέργεια βομβαρδισμού του υποστρώματος. Αυτά τα αποτελέσματα είναι συνέπεια του μεγαλύτερου μέσου μήκους ελεύθερης διαδρομής και του μειωμένου ρυθμού συγκρούσεων μεταξύ ηλεκτρονίων και μορίων. Δηλαδή προκειμένου να αυξηθεί η πιθανότητα ιονισμού για να διατηρηθεί το πλάσμα, παρόλο το μικρότερο ρυθμό συγκρούσεων, αυξάνει η ενέργεια των ηλεκτρονίων και το δυναμικό του πλάσματος.

Στο κυρίως σώμα του πλάσματος η πυκνότητα του πλάσματος είναι κανονικά από  $10^9 - 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ . Οι τιμές αυτές προκύπτουν από θεμελιακά όρια. Δηλαδή όταν η πυκνότητα των ηλεκτρονίων είναι κάτω από  $\sim 10^9 \text{ cm}^{-3}$  η ηλεκτροστατική δύναμη είναι αρκετά αδύναμη για να χωρίσει το φορτίο κατά μήκος μιας αρκετά μεγάλης απόστασης και η ουδετερότητα δεν διατηρείται πια, ενώ πυκνότητες πλάσματος πάνω από  $\sim 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  αντιστοιχούν σε υψηλά ρεύματα και σημαντική θέρμανση του αερίου. Η υψηλή αυτή θερμοκρασία μπορεί να είναι επιβλαβής στο υλικό του υποστρώματος και οδηγεί σε αστάθεια του πλάσματος και ανομοιομορφία.

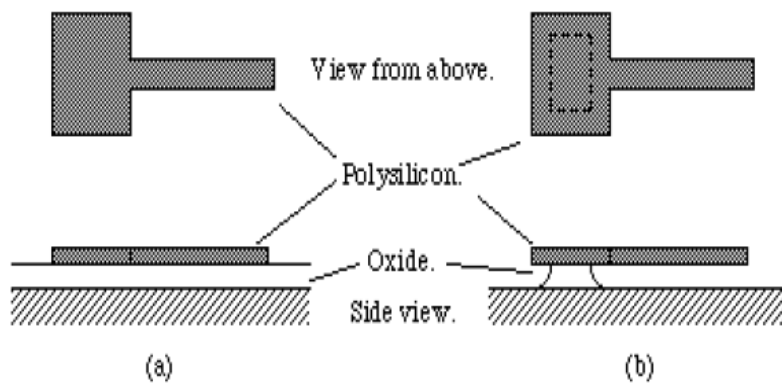
## 2.2 Μικρομηχανική Πυριτίου

Η τεχνολογία μικροσυστημάτων (micro systems technology-MST) αποτελεί σήμερα μία σημαντική και πολύ γρήγορα αναπτυσσόμενη τεχνολογία. Με τον όρο μικροσυστήματα ή αλλιώς μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα (microelectromechanical systems – MEMS) αναφερόμαστε σε τρισδιάστατες δομές και συσκευές με διαστάσεις της τάξης των μικρομέτρων. Ειδικότερα πρόκειται για συστήματα που συνδυάζουν μικροσκοπικά στοιχεία ανίχνευσης, επεξεργασίας ή/και ενεργοποίησης κατασκευασμένα πάνω σε υπόστρωμα πυριτίου με τεχνικές αντίστοιχες αυτών που εφαρμόζονται στην κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων ([www.mesnet.org/mems/what-is.html](http://www.mesnet.org/mems/what-is.html)). Η περισσότερο ανεπτυγμένη τεχνική κατασκευής μικροσυστημάτων είναι η μικρομηχανική πυριτίου και αυτό γιατί το πυρίτιο είναι το βασικό υλικό που χρησιμοποιείται ως υπόστρωμα στη μικροηλεκτρονική για την κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Το δυναμικό της τεχνολογίας αυτής ποικίλλει από συσκευές που βρίσκονται σήμερα σε σχεδόν όλα τα αυτοκίνητα (αισθητήρες πίεσης και επιταχυνσιόμετρα) μέχρι αισθητήρες για ροή, θερμοκρασία, δύναμη, θέση, μαγνητικά πεδία, χημικά, φως, υπέρυθη ακτινοβολία κλπ. Η μικρομηχανική πυριτίου μπορεί να διαχωριστεί σε μικρομηχανική όγκου και μικρομηχανική επιφανείας. Η μικρομηχανική όγκου γενικά αναφέρεται σε δομές που κατασκευάζονται με χρήση βαθιάς ανισοτροπικής εγχάραξης [Emo H. Klaassen et al. (1995)]. Σε αυτές τις συσκευές, ένα τμήμα του ίδιου του υποστρώματος είναι συνήθως ένα ενεργό μηχανικό στοιχείο της μικρομηχανικής συσκευής. Παραδείγματα συσκευών μικρομηχανικής όγκου είναι οι παραδοσιακοί αισθητήρες πίεσης και επιτάχυνσης καθώς και οι περισσότερες μικροαντλίες και μικροβαλβίδες. Το πάχος των συσκευών αυτών κυμαίνεται μεταξύ των 100 έως 600 μm. Χρησιμοποιείται επίσης ευρέως για τη δημιουργία μεμβρανών, δοκών, τρυπών και αυλακιών. Η διεργασία ξεκινάει με την εναπόθεση στο πυρίτιο ενός υλικού που δεν εγχάρασσεται (etch stop). Στη συνέχεια κάνουμε χρήση λιθογραφίας για να σχηματοποιήσουμε το υλικό αυτό και να επιτρέψουμε την απομάκρυνση των ανεπιθύμητων τμημάτων του. Τέλος εγχάρασσουμε το πυρίτιο είτε με υγρή είτε με ξηρή εγχάραξη. Η μικρομηχανική επιφανείας συνήθως αναφέρεται σε δομές που κατασκευάζονται με εναπόθεση ή ανάπτυξη λεπτών στρωμάτων φιλμ πάνω στην επιφάνεια του υποστρώματος πυριτίου [Emo H. Klaassen et al. (1995)]. Παραδείγματα συσκευών μικρομηχανικής επιφανείας είναι οι μικροκινητήρες, επιταχυνσιόμετρα βασισμένα σε πολυκρυσταλλικό πυρίτιο (polysilicon), μικροκαθρέφτες κ.ά. Σε αυτές τις συσκευές το υπόστρωμα λειτουργεί μόνο ως φορέας της μικρομηχανικής συσκευής. Το τυπικό πάχος τους είναι μερικά μικρόμετρα. Στη μικρομηχανική επιφανείας χρησιμοποιούμε δύο διαφορετικά υλικά, ένα δομικό υλικό (συνήθως πολυκρυσταλλικό πυρίτιο - polysilicon) και ένα sacrificial υλικό (συνήθως οξείδιο). Αυτά εναποτίθενται και μετά από ένα βήμα λιθογραφίας εγχάρασσονται με ξηρή εγχάραξη [W. Rangelow (2001)]. Στη συνέχεια το sacrificial υλικό εγχάρασσεται με υγρή εγχάραξη για να απελευθερώσει τη δομή. Στα Σχήματα 2 και 3 δίνεται ένα παράδειγμα μικρομηχανικής όγκου και ένα επιφανείας αντίστοιχα.





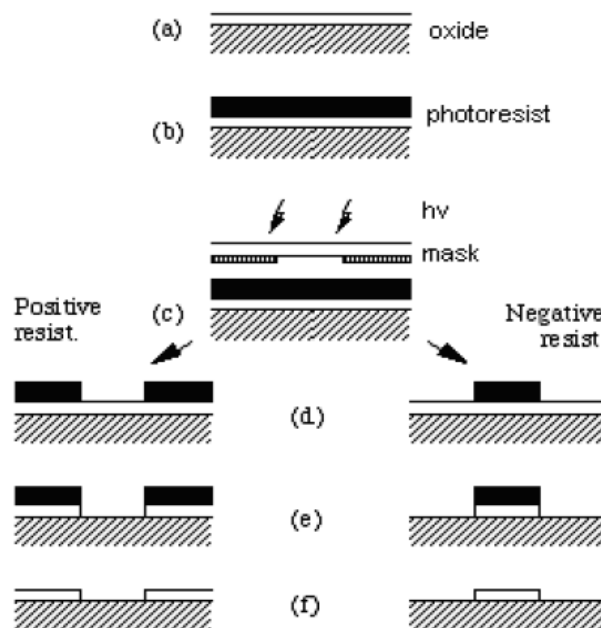
Σχήμα 2 : Μικρομηχανική όγκου : i. Δισκίδιο πυριτίου, ii. Οξείδωση για δημιουργία λεπτού στρώματος  $SiO_2$  πάχους  $0,5 \mu m$ , σχηματοποίηση επιφάνειας με λιθογραφία, iii. Επιλεκτική απομάκρυνση του οξειδίου και εγχάραξη της εκτεθειμένης επιφάνειας πυριτίου iv. Τελική δομή - πλάγια όψη, v. Κάτοψη, vi. Διαγώνια όψη ([www.dbanks.demon.co.uk/ueng/siliconum.html](http://www.dbanks.demon.co.uk/ueng/siliconum.html))



Σχήμα 3 : Μικρομηχανική επιφανείας : α) Εναπόθεση στρώματος οξειδίου, εναπόθεση στρώματος polysilicon και σχηματοποίηση με χρήση εγχάραξης σε δοκό με τμήμα πρόσδεσης, β) Υγρή εγχάραξη για απομάκρυνση του στρώματος οξειδίου κάτω από τη δοκό και απελευθέρωση αυτής. ([www.dbanks.demon.co.uk/ueng/siliconum.html](http://www.dbanks.demon.co.uk/ueng/siliconum.html))

## 2.3 Λιθογραφία

Η τεχνολογία των μικροσυστημάτων βασίζεται στη σχηματοποίηση υποστρωμάτων σε μεγάλο βάθος που γίνεται με τις διεργασίες της λιθογραφίας και της εγχάραξης. Αυτές επιτρέπουν τη μεταφορά του επιθυμητού σχήματος και την τελική κατασκευή των μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων. Η βασική λιθογραφική διαδικασία παρουσιάζεται στο Σχήμα 4. Το σχ. (a) δείχνει ένα λεπτό φιλμ οξειδίου ( $\text{SiO}_2$ ) πάνω σε υπόστρωμα πυριτίου που επιθυμούμε να σχηματοποιήσουμε. Πάνω σε αυτό επιστρώνουμε ένα φωτοευαίσθητο υλικό (photoresist), το οποίο σχηματίζει ένα λεπτό στρώμα στην επιφάνεια (σχ. b). Στη συνέχεια το φωτοευαίσθητο εκτίθεται επιλεκτικά σε φως μέσω μίας μάσκας η οποία περιέχει την πληροφορία της δομής που θέλουμε να κατασκευάσουμε (σχ. c). Το φωτοευαίσθητο που εκτίθεται στο φως υπόκειται σε χημικές αλλαγές. Τέλος το φωτοευαίσθητο εμφανίζεται σε κατάλληλο εμφανιστή (developer), κάτι που ολοκληρώνει τη μεταφορά του σχήματος από τη μάσκα στο φωτοευαίσθητο υλικό (σχ. d). Υπάρχουν δύο είδη photoresist, θετικού τύπου και αρνητικού τύπου. Στην περίπτωση του θετικού τύπου με την εμφάνιση απομακρύνονται οι περιοχές του photoresist που έχουν εκτεθεί στο φως, ενώ στην περίπτωση του αρνητικού τύπου συμβαίνει το αντίθετο. Ακολουθεί η απομάκρυνση του οξειδίου (εγχάραξη) στα σημεία που επιτρέπει το photoresist (σχ. e) και τέλος η απομάκρυνση του photoresist (σχ. f), που ολοκληρώνει τη μεταφορά του σχήματος από τη μάσκα στο φιλμ οξειδίου.

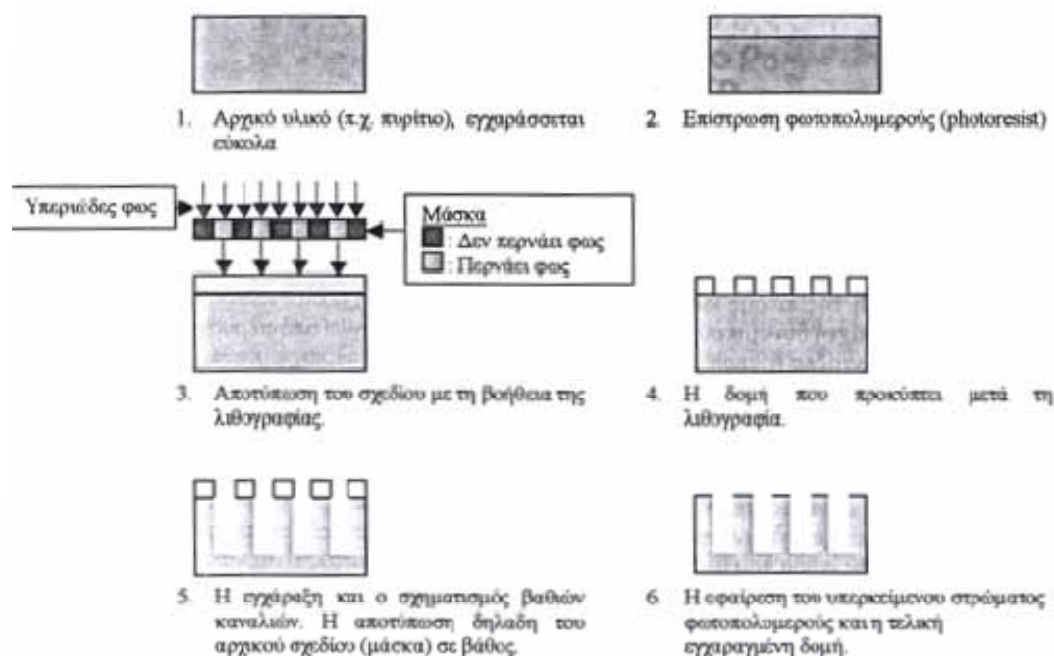


Σχ. 4 : Βασική λιθογραφική διαδικασία

## 2.4 Εγχάραξη

Η εγχάραξη αποτελεί το στάδιο κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων ή μικρομηχανικών διατάξεων κατά το οποίο αφαιρείται υλικό, είτε με χημικό τρόπο (υγρή εγχάραξη), είτε με πλάσμα αερίων (ξηρή εγχάραξη). Το υλικό που εγχαράσσεται, μπορεί να είναι οποιοδήποτε υλικό της μικροηλεκτρονικής, που μπορεί με κάποιο τρόπο να αντιδράσει με το πλάσμα και δημιουργώντας πτητικά προϊόντα, να αφαιρεθεί. Το πιο συνηθισμένο είναι το **πυρίτιο**.

Υλικά που μπορούν να δράσουν προστατευτικά ως προς το υλικό που θέλουμε να εγχαράξουμε, χρησιμοποιούνται ως «μάσκες». Οι μάσκες μας επιτρέπουν να εγχαράξουμε το υλικό επιλεκτικά σε συγκεκριμένες περιοχές, αφήνοντας το υπόλοιπο ανέπαφο και δημιουργώντας έτσι, απλά ή σύνθετα σχέδια (patterns), ανάλογα με τη μορφή που θέλουμε να υλοποιήσουμε. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η χρήση της εγχάραξης σαν τμήμα της διαδικασίας κατασκευής μιας μικροδομής.



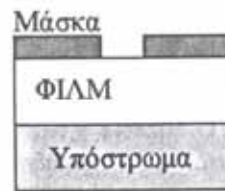
σχήμα 5: η διαδικασία λιθογραφίας και εγχάραξης.

Το πιο χαρακτηριστικό μέγεθος της εγχάραξης είναι η ποσότητα του υλικού που αφαιρείται συναρτήσει του χρόνου που πραγματοποιείται η εγχάραξη και ονομάζεται ρυθμός εγχάραξης. Η επιλεκτική εγχάραξη με τη χρήση μασκών στηρίζεται στο γεγονός ότι η μάσκα έχει πολύ μικρότερο ρυθμό εγχάραξης σε σχέση με το υλικό που βρίσκεται από κάτω της, με αποτέλεσμα να μένει πρακτικά αναλλοίωτη, ενώ το υλικό στις περιοχές που δεν καλύπτεται από τη μάσκα, εγχαράσσεται με γρήγορο ρυθμό. Ο λόγος του ρυθμού εγχάραξης του υλικού προς αυτόν της μασκας ονομάζεται επιλεκτικότητα.

Μια άλλη σημαντική παράμετρος είναι η απόδοση εγχάραξης, η οποία εκφράζει τον αριθμό των ατόμων της επιφανείας που αφαιρούνται ανά προσπίπτον ιόν του πλάσματος και ορίζεται σαν το λόγο του ρυθμού εγχάραξης προς τη ροή των ιόντων.

Ενώ η υγρή εγχάραξη πραγματοποιείται μέσα σε χημικά διαλύματα (π.χ. HF, KOH) και είναι κατά κύριο λόγο ισοτροπική, δηλαδή αφαιρείται η ίδια ποσότητα υλικού από όλες τις κατευθύνσεις, η ξηρή εγχάραξη πραγματοποιείται με τη χρήση πλάσματος και μπορεί να είναι τόσο **ισοτροπική** όσο και **ανισοτροπική**. Καθώς η ισοτροπική εγχάραξη εξελίσσεται και κατά την οριζόντια και κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, έχει το ανεπιθύμητο αποτέλεσμα να αφαιρείται και υλικό κάτω από τη μάσκα, φαινόμενο που οδηγεί σε απώλεια της ακρίβειας στις κρίσιμες διαστάσεις (undercutting). Αντίθετα, στην ανισοτροπική εγχάραξη το υλικό αφαιρείται μόνο στην κάθετη διεύθυνση, ενώ στην οριζόντια η εγχάραξη είναι αμελητέα κι έτσι προκύπτουν κάθετα προφίλ εγχάραξης.

Επιπλέον, η ξηρή εγχάραξη πλεονεκτεί έναντι της υγρής επειδή επιτρέπει τη χρήση αερίων που δεν είναι τοξικά, όπως το  $O_2$  και το  $CF_4$ , έχει ευέλικτες διαδικασίες από πλευράς συνθηκών και παραμέτρων που μπορούν να μεταβληθούν, εύκολη αποβολή απορριμμάτων και χρήση απλών αυτοματισμών στη διαδικασία της εγχάραξης.



Σχήμα 1.3α: Αρχικό δείγμα



Σχήμα 1.3β: Ανισοτροπική εγχάραξη



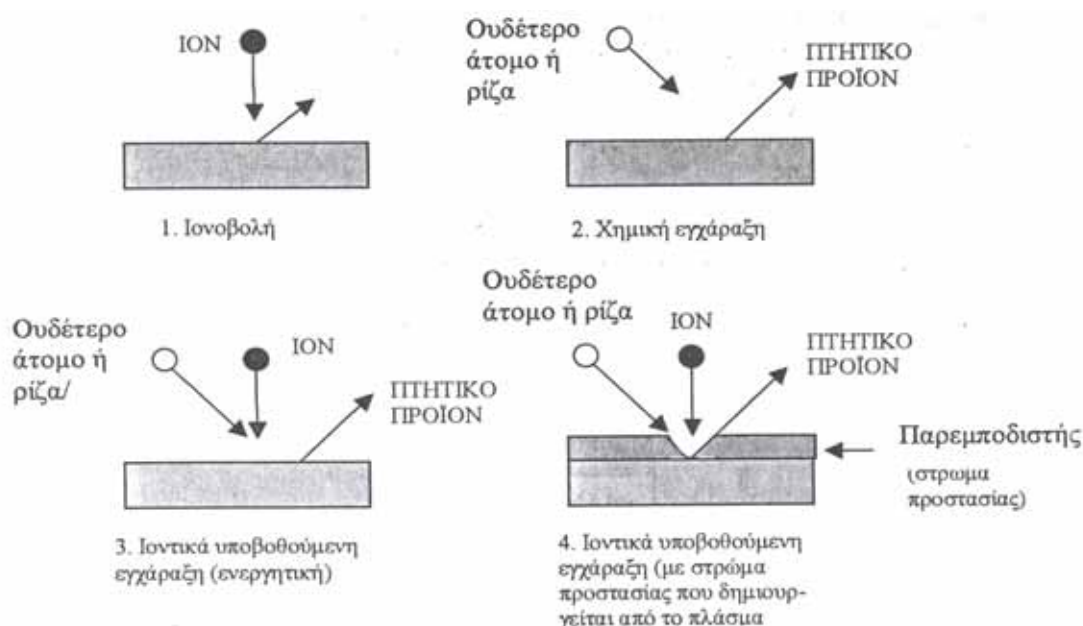
Σχήμα 1.3γ: Ισοτροπική εγχάραξη

σχήμα 6: ισοτροπική και ανισοτροπική εγχάραξη

Οι βασικοί μηχανισμοί εγχάραξης είναι η μηχανική αφαίρεση υλικού από τα ιόντα του πλάσματος που ονομάζεται ιονβολή (sputtering), η χημική εγχάραξη και η υποβοηθούμενη από ιόντα χημική εγχάραξη (ion enhanced chemical etching).

Η βασική διαφορά της ιονβολής από την χημική και την υποβοηθούμενη από ιόντα χημική εγχάραξη είναι ότι στην πρώτη έχουμε μηχανική αφαίρεση υλικού, ενώ στις άλλες δύο το υλικό μετατρέπεται σε μια χημική ένωση ( π.χ.  $SiF_x$ ) που είναι πτητική και διαφεύγει. Η χημική εγχάραξη έχει αρκετά μεγάλη επιλεκτικότητα καθώς

εξαρτάται από τις διαφορές μεταξύ των δεσμών και τη χημική συνοχή του υποστρώματος. Αντίθετα, η επιλεκτικότητα με την ιονοβολή είναι πολύ μικρή γιατί η εγχάραξη στην περίπτωση αυτή δεν εξαρτάται από τη χημική φύση των υλικών. Η καθαρά χημική εγχάραξη είναι συνήθως ιστροπική, ενώ η υποβοηθούμενη από ιόντα χημική εγχάραξη, που διακρίνεται σε ιοντικά ενεργή (energetic ion) και σε εγχάραξη με στρώμα προστασίας (inhibitor induced), είναι γενικά ανιστροπική.



σχήμα 7: η χημική εγχάραξη

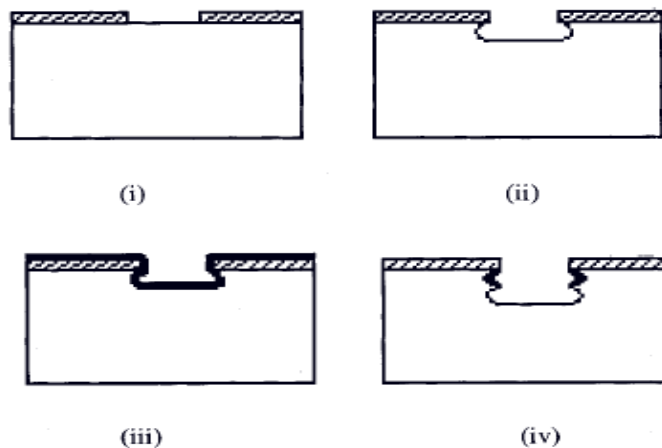
Στην ιοντικά ενεργή εγχάραξη, ένα ηλεκτρικό πεδίο επιταχύνει ιόντα που προσκρούουν κάθετα στην επιφάνεια και αυξάνουν τον αριθμό των αντιδράσεων που πραγματοποιούνται. Έτσι, ενώ μια επιφάνεια χωρίς ιοντικό βομβαρδισμό δεν θα μπορούσε να εγχαραχθεί με τη χρήση μόνο του αερίου, τώρα εγχαρασσεται.

Στην εγχάραξη με στρώμα προστασίας υπάρχουν δύο ειδών σωματίδια, αυτά που εγχαρασσουν (etchants) και αυτά που προστατεύουν (παρεμποδιστές-inhibitors). Οι παρεμποδιστές σχηματίζουν ένα λεπτό στρώμα στα κάθετα τοιχώματα, που εμποδίζει τη δράση των στοιχείων εγχάραξης σ' αυτή την κατεύθυνση. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με το ότι οι κάθετες επιφάνειες δέχονται ελάχιστο ή καθόλου ιοντικό βομβαρδισμό, έχει σαν αποτέλεσμα η εγχάραξη να είναι ανιστροπική, αφού στις οριζόντιες επιφάνειες η παρεμπόδιση απομακρύνεται με ιόντα.

## 2.5 Περιγραφή της διεργασίας Bosch

Μία κατηγορία της ξηρής εγχάραξης είναι η εγχάραξη με ενεργά ιόντα (reactive ion etching – RIE) κατά την οποία το υπόστρωμα τοποθετείται μέσα σε έναν αντιδραστήρα στον οποίο εισάγονται διάφορα αέρια. Με τη χρήση μιας πηγής ισχύος RF παράγεται πλάσμα και τα μόρια των αερίων διασπώνται σε ιόντα και σε ρίζες ουδετέρων. Τα ιόντα επιταχύνονται προς την επιφάνεια του υποστρώματος και σε συνέργεια με τα ουδέτερα αντιδρούν με αυτήν και δημιουργούν κάποιο αέριο προϊόν. Αυτό είναι το χημικό κομμάτι της εγχάραξης με ενεργά ιόντα. Υπάρχει επίσης και το φυσικό κομμάτι κατά το οποίο, εφόσον τα ιόντα έχουν αρκετή ενέργεια, μπορούν να εκτοπίσουν άτομα του εγχαρασσόμενου υλικού χωρίς χημική αντίδραση. Μεταβάλλοντας την ισορροπία μεταξύ της χημικής και φυσικής εγχάραξης, ρυθμίζοντας κατάλληλα τις διάφορες παραμέτρους, μπορούμε να επιδράσουμε στην ανισοτροπία της εγχάραξης. Μία ειδική υποκατηγορία της εγχάραξης με ενεργά ιόντα είναι η βαθιά εγχάραξη με ενεργά ιόντα (deep reactive ion etching - DRIE). Με αυτή τη διαδικασία μπορούν να επιτευχθούν βάθη εγχάραξης εκατοντάδων μικρομέτρων με σχεδόν κάθετα τοιχώματα καθώς και δομές υψηλού λόγου ασυμμετρίας (high aspect ratio structures - HARS), κάτι που συνήθως είναι και το ζητούμενο στην κατασκευή των MEMS. Ως λόγος ασυμμετρίας ορίζεται ο λόγος του βάθους προς το πλάτος της δομής. Η τεχνολογία της κατηγορίας αυτής βασίζεται κυρίως στην αποκαλούμενη “Bosch process”, τεχνική που κατοχύρωσε με ευρεσιτεχνία η Robert Bosch GmbH και στηρίζεται στην εναπόθεση φιλμ παρεμποδιστών στα πλευρικά τοιχώματα των εγχαρασσόμενων δομών Si ώστε να επιτευχθούν ανισοτροπικά προφίλ. Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιεί έναν κύκλο εγχάραξης με ροή SF<sub>6</sub> και στη συνέχεια γυρνάει σε έναν κύκλο παθητικοποίησης των τοιχωμάτων με χρήση C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> (Σχήμα 8). Το C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> εναποθέτει ένα πολυμερικό φιλμ (C<sub>x</sub>F<sub>y</sub>)<sub>n</sub> σε όλες τις δομές του υποστρώματος. Κατά τη διάρκεια του επόμενου κύκλου εγχάραξης, το φιλμ παθητικοποίησης απομακρύνεται κυρίως από τον πυθμένα των δομών εξαιτίας της κατευθυντικής ιονοβολής, ενώ συγχρόνως εμποδίζει την εγχάραξη των τοιχωμάτων [Kuo-Shen Chen et al. (2002)]. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια του βήματος εναπόθεσης οι εκτιθέμενες επιφάνειες δηλ. ο πυθμένας και τα τοιχώματα καλύπτονται ομοιόμορφα με πολυμερές. Αυτό το στρώμα πολυμερούς στις άκρες και τις επιφάνειες της μάσκας δημιουργεί ένα πολύ αποτελεσματικό προσωρινό προστατευτικό φιλμ από την εγχάραξη. Το στρώμα πολυμερούς που σχηματίζεται στον πυθμένα κατά τη διάρκεια του βήματος εναπόθεσης, διαλύεται γρήγορα κατά τη διάρκεια του ακόλουθου βήματος εγχάραξης, καθώς το πολυμερές απομακρύνεται με τη βοήθεια των ιόντων και η χημική αντίδραση των ενεργών ειδών του πλάσματος με το πυρίτιο στον πυθμένα μπορεί να συνεχιστεί. Τα τοιχώματα των δομών που εγχάρασσονται παραμένουν προστατευμένα κατά τη διάρκεια του βήματος εγχάραξης από το πολυμερές που είχε εναποτεθεί στα προηγούμενα βήματα. Η εναλλαγή κύκλων εγχάραξης και παθητικοποίησης δημιουργεί κυματισμούς (ripples) στα τοιχώματα των εγχαρασσόμενων δομών. Το μέγεθος των κυματιστών αυτών, όντας συνάρτηση των συνθηκών λειτουργίας, μπορεί να ελεγχθεί ως ένα βαθμό [Kuo-Shen Chen et al. (2002)]. Η ισορροπία μεταξύ της εγχάραξης και της παθητικοποίησης καθορίζει τα τελικά αποτελέσματα της διαδικασίας και αυτή η ισορροπία μπορεί να ελεγχθεί μέσω ενός μεγάλου αριθμού παραμέτρων όπως : διάρκεια κύκλου εγχάραξης, ρυθμός ροής SF<sub>6</sub>, ισχύς πηνίου κατά τη διάρκεια του κύκλου εγχάραξης, πίεση κατά τη διάρκεια του κύκλου εγχάραξης, θερμοκρασία υποστρώματος, απόσταση υποστρώματος από την πηγή πλάσματος, διάρκεια κύκλου

παθητικοποίησης, ισχύς πηνίου κατά τη διάρκεια του κύκλου παθητικοποίησης, πίεση κατά τη διάρκεια του κύκλου παθητικοποίησης κλπ. [A.M. Hynes et al. (1999)].



Σχ.8 : Διεργασία Bosch i) Μάσκα με το επιθυμητό σχήμα πάνω σε δισκίο πυριτίου, ii) Κύκλος εγχάραξης πυριτίου, iii) Εναπόθεση φιλμ φθοράναθρακα, iv) Κύκλος εγχάραξης πυριτίου [Kuo-Shen Chen et al. (2002)]

Για την κατασκευή διαφόρων εφαρμογών MEMS αρκετά από τα παρακάτω θέματα απαιτούν βελτιστοποίηση : κατασκευή δομών με μεγάλο λόγο ασυμμετρίας (high aspect ratio structures – HARS), ρυθμός εγχάραξης πυριτίου, γωνία του προφίλ, έλεγχος της κρίσιμης διάστασης (critical dimension – CD), τραχύτητα τοιχωμάτων και επιλεκτικότητα ως προς τη μάσκα. Η φύση της διεργασίας Bosch, συγκεκριμένα ο μεγάλος αριθμός των παραμέτρων της διαδικασίας, της δίνει την προσαρμοστικότητα που απαιτείται για να καλύψει τον μεγάλο αριθμό απαιτήσεων της βιομηχανίας MEMS, από τον καλό έλεγχο της κρίσιμης διάστασης και τα λεία τοιχώματα έως τον υψηλό ρυθμό εγχάραξης και την υψηλή επιλεκτικότητα [A.M. Hynes et al. (1999)].

## Παράρτημα 3<sup>ο</sup> : αντλίες κενού

### 3.1 Γενικά

Για να δημιουργηθεί κενό σε ένα σύστημα είναι απαραίτητο να κινηθούν όλα τα μόρια του αερίου εκτός του συστήματος αυτού. Τα μόρια θα κινηθούν μόνο εάν υπάρχει μια διαφορά πίεσης μεταξύ των δύο περιοχών του χώρου. Η χαμηλή πίεση αντιστοιχεί στην περιοχή αυτή με το μικρότερο αριθμό μορίων, ενώ η υψηλή πίεση στην περιοχή με το μεγαλύτερο αριθμό μορίων.

Οποιαδήποτε συσκευή μπορεί να προκαλέσει μια διαφορά πίεσης μεταξύ των δύο περιοχών του χώρου καλείται αντλία. Μια αντλία που μπορεί να δημιουργήσει κενό σ' ένα ορισμένο σύστημα καλείται αντλία κενού.

### 3.2 Βασικές κατηγορίες

Οι αντλίες κενού χωρίζονται, όσον αφορά το μηχανισμό λειτουργίας τους, σε δύο βασικές κατηγορίες : τις αντλίες μεταφοράς και τις αντλίες παγίδευσης του ρευστού.

Η βασική αρχή λειτουργίας των αντλιών μεταφοράς είναι η μετάδοση ορμής στο ρευστό, το οποίο, με τον τρόπο αυτό, προωθείται προς την έξοδο της αντλίας. Πιο συγκεκριμένα, τα κινούμενα (συνήθως περιστρεφόμενα) μέρη της αντλίας δημιουργούν μια περιοχή χαμηλής πίεσης στο εσωτερικό της, αναγκάζοντας έτσι τα μόρια του ρευστού να κινηθούν από το εσωτερικό της δεξαμενής που επιθυμούμε να εκκενώσουμε (περιοχή υψηλής πίεσης) προς την έξοδό της. Όταν επιτύχουμε το επιθυμητό επίπεδο κενού, απομονώνουμε τη δεξαμενή από το περιβάλλον με μια βαλβίδα κενού.

Οι αντλίες παγίδευσης τοποθετούνται συνήθως στο εσωτερικό της προς εκκένωση δεξαμενής. Η βασική αρχή λειτουργίας των αντλιών αυτού του τύπου είναι η προσρόφηση ή η συμπίκνωση του ρευστού στις εσωτερικές επιφάνειές της αντλίας.

Η προσρόφηση αφορά την περίπτωση όπου τα μόρια του αερίου αντιδρούν χημικά με το εσωτερικό υλικό της αντλίας ενώ το προϊόν υλικό της αντίδρασης εναποτίθεται με τη μορφή λεπτής ταινίας.

Η δε συμπίκνωση είναι η περίπτωση κατά την οποία το αέριο, ερχόμενο σε επαφή με τις καταψυχόμενες επιφάνειες της αντλίας, συμπυκνώνεται και κατόπιν αφαιρείται ως υγρό.

### 3.3 Αρχές λειτουργίας

Παρόλο που σκοπός μιας αντλίας είναι η απομάκρυνση μορίων από ένα χώρο, όλες οι αντλίες δε στηρίζονται στην ίδια αρχή. Συνήθως ένα σύστημα παραγωγής κενού στηρίζεται σε μία ή περισσότερες από τις εξής μεθόδους απομάκρυνσης μορίων:

A) Διαδοχικές συμπίεσεις και εκτονώσεις του αερίου, π.χ. περιστροφικές αντλίες.

B) Εκμετάλλευση των φαινομένων του ιξώδους και της διάχυσης

Γ) Εκμετάλλευση του φαινομένου της επικάθησης των μορίων σε μια επιφάνεια, π.χ. μοριακές αντλίες

Δ) Εκμετάλλευση του φαινομένου του ιονισμού των μορίων

E) Εκμετάλλευση του φαινομένου της φυσικής ή χημικής προσρόφησης μορίων

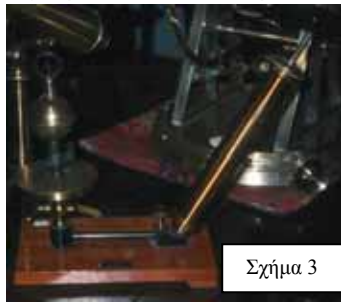


### 3.4 Μερικές αντλίες κενού του 19<sup>ου</sup> αιώνα



Σχήμα 1

Η αντλία κενού με έμβολο ανακαλύφθηκε από τον Otto von Guericke (1602-1686). (σχ.1) Στα αρχικά του πειράματα το 1647 ο van Guericke παρήγαγε κενό χρησιμοποιώντας μια αντλία αναρρόφησης για την μεταφορά νερού από ξύλινο σφραγισμένο βαρέλι. Όπως ήταν αναμενόμενο το βαρέλι «έβαλε» αέρα καθώς αφαιρούνταν το νερό, υποδεικνύοντας τη χρήση γυάλινων ή



Σχήμα 3

μεταλλικών συστημάτων. Αυτές οι απλές αντλίες (σχ. 2,3) σχεδιάστηκαν για τη χρήση τους σε σχολεία. Η μία (σχ.2) ανήκει στη συλλογή του κολλεγίου του St. Patrick στην Ιρλανδία ενώ η παρόμοια αντλία (σχ.3) στη Βόρεια Καρολίνα.



Σχήμα 2



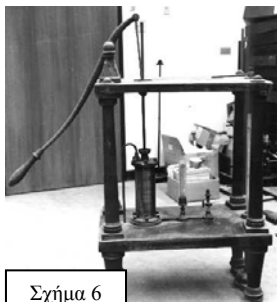
Σχήμα 4

Η παρακάτω μικρή αντλία κενού (σχ.4) βρίσκεται στο κολλέγιο Denison

στο Οχάιο, η αντλία του σχήματος 5 δημιουργήθηκε από τον William Harris το 1829.



Σχήμα 5



Σχήμα 6

Η αντλία του σχήματος 6 δημιουργήθηκε το 1855 από τον N.B Chamberlain και τον Ritchie στη Βοστώνη με μέγεθος κυλίνδρου από 12\*3,5 ίντσες μέχρι 13\*4,5 ίντσες.

Ο μπρούντζινος δίσκος στο μπροστινό επάνω μέρος της παρακάτω αντλίας (σχ.7) στο κολλέγιο Hampden-Sydney της Βιρτζίνια, φέρει το σημάδι των εμπνευστών του Chamberlain και Ritchie και χρονολογείται το 1851.



Σχήμα 7



Σχήμα 8

Μια ίδια αντλία (σχ.8) χωρίς όμως το μπρούντζινο δίσκο βρίσκεται στο πανεπιστήμιο Wesleyan του Κονέκτικατ και χρονολογείται το 1831.

Παρακάτω βλέπουμε δύο αντλίες διπλού κυλίνδρου που κατασκευάστηκαν από τον Pixili το 1849 και όπως παρατηρούμε στο σχήμα 9, οι κύλινδροι αυτή τη φορά είναι από γυαλί. Η αντλία του σχήματος 10 βρίσκεται στο μουσείο ιστορίας του Οχάιο, ενώ ακόμη μια



Σχήμα 10



Σχήμα 11

παρόμοια αντλία απεικονίζεται στο σχήμα 11. Η αντλία τοποθετείται σε ξύλινο ερμάριο με το δίσκο της υπερυψωμένο και βρίσκεται στο Union κολλέγιο της Νέας Υόρκης.

Άλλες δύο αντλίες διπλού κυλίνδρου φαίνονται παρακάτω



Σχήμα 9



Σχήμα 12



Σχήμα 13



Σχήμα 14



Σχήμα 15

με την οριζόντια ράβδο να θέτει σε κίνηση τους κυλίνδρους της (σχ.12,13).

Τον 19ο αιώνα οι επιτραπέζιες αντλίες όπως η παρακάτω (σχ.14), άρχισαν να λαμβάνουν μεγαλύτερη έκταση. Η

συγκεκριμένη κατασκευάστηκε από τον James.W.Queen το 1881 και αποτελείται από βαθμονομημένο σωλήνα για τη μέτρηση του κενού, ενώ έχει και μια σφαίρα συγκέντρωσης του αέρα βιδωμένη στο δίσκο της αντλίας.

Η παρακάτω ογκώδης αντλία διπλού κυλίνδρου (σχ.15) κατασκευάστηκε από τον John Freteric Newman γύρω στα 1830.

### 3.5 Τύποι αντλιών

Σε κάθε μια από τις βασικές κατηγορίες, υπάρχουν διαφορετικά είδη αντλιών, χρησιμοποιούμενα ανάλογα με το ‘επίπεδο’ κενού που επιθυμούμε να δημιουργήσουμε και φυσικά, τις ανάγκες και δυνατότητες του εγχειρήματος μας.

Αναλυτικότερα, συνήθεις τύποι αντλιών κενού, που κατατάσσονται στην ευρύτερη κατηγορία των αντλιών μεταφοράς, είναι οι εξής:

#### 3.5.1 Μηχανικές αντλίες

Όλες οι αντλίες της κατηγορίας αυτής αποτελούνται από ένα στρεφόμενο τμήμα, *το ρότορα*, και ένα ακίνητο, *το στάτορα*. Από αυτές οι λεγόμενες “περιστροφικές” αντλίες χρησιμοποιούν ως μέσο νερό ή ειδικό λάδι και είναι από τις πιο διαδομένες.

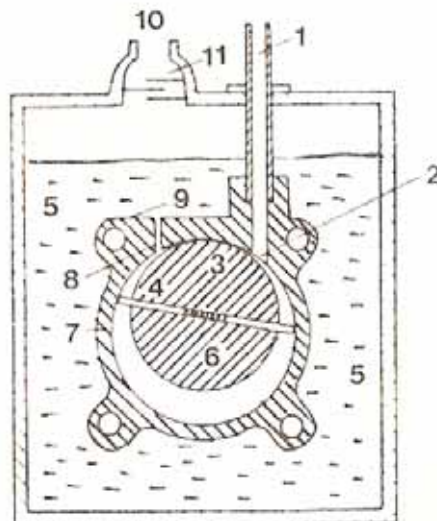
##### A) Περιστροφικές αντλίες με λάδι

Στις αντλίες αυτές ο ρότορας είναι κυλινδρικός και έκκεντρα τοποθετημένος στο στάτορα, που είναι ατσαλένιος και λίγες μοίρες αριστερά και δεξιά από την κατακόρυφη έχει την είσοδο και την έξοδο του αερίου. Ο ρότορας έχει μια κατάλληλη διαμετρική σχισμή στην οποία τοποθετούνται οι σύρτες που με κατάλληλη διάααξη πιέζονται ώστε να έρχονται σε επαφή με την εσωτερική κοίλη επιφάνεια του στάτορα. Το σύστημα είναι βυθισμένο σε δοχείο με ειδικό λάδι που χρησιμεύει για την καλή στεγανοποίηση και λίπανση του συστήματος



σχήμα 1: τυπική περιστροφική αντλία εμπορίου

Το όριο της λειτουργίας μιας περιστροφικής αντλίας καθορίζεται από το πότε η πυκνότητα του αέρα που θα μπαίνει στην αντλία θα είναι τόσο μικρή ώστε να μην είναι πια η συμπίεση αρκετή για να ανοίξει τη βαλβίδα εξαγωγής. Ο λόγος της πίεσης εξόδου προς την πίεση εισόδου λέγεται λόγος συμπίεσης και πρέπει να είναι της τάξης  $10^5$ , αν θέλουμε η αντλία να δημιουργεί κενό της τάξης  $10^{-2}$  Torr. Το λάδι της αντλίας, επειδή γεμίζει το χώρο, βοηθάει στην αύξηση του λόγου συμπίεσης. Ανέχουμε αντλία δύο βαθμίδων μπορούμε να δημιουργήσουμε κενό της τάξης του  $2 \cdot 10^{-5}$  Torr.

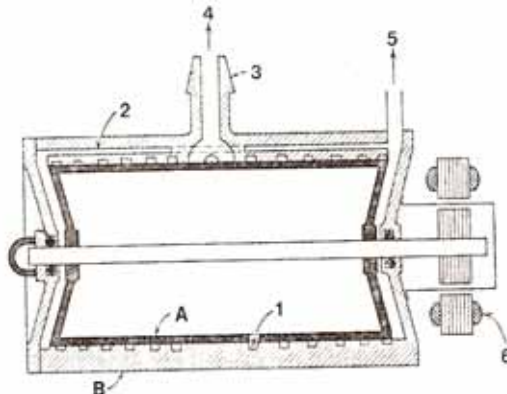


σχήμα 2 : γενική σχηματική παράσταση. 1: Σωλήνας εισόδου, 2: Σημείο εισόδου, 3: Θέση σφράγισης κορυφής, 4: Σύρτες, 5: Λάδι, 6: Ρότορας, 7: Στάτορας, 8: Σημείο εξόδου, 9: Βαλβίδα εξόδου, 10: Έξοδος, 11: Βαλβίδα κατακράτησης λαδιού

Μια σημαντική βελτίωση στις περιστροφικές αντλίες είναι η προσθήκη *βαλβίδας εμφύσησης αέρα* (gas ballast). Το σύστημα είναι ιδιαίτερα απαραίτητο, αν πρόκειται να δημιουργήσουμε κενό σε χώρο που υπάρχουν υδατμοί.

## B) Μοριακές αντλίες

Η πρώτη γενιά μοριακών αντλιών παρουσιάστηκε στα 1912 από τον *Gaede*, και στηριζόταν σε έναν απλό περιστρεφόμενο κύλινδρο. Η δεύτερη γενιά εμφανίστηκε στα 1922 από τον *Holweck* και εμφάνισε για πρώτη φορά την ενσκαφή. Το παρακάτω σχήμα δίνει τα κύρια χαρακτηριστικά μιας τέτοιας αντλίας.



σχήμα 3 : σχηματική παράσταση μιας μοριακής αντλίας Holweck. A: ρότορας, B: στάτορας, 1: ενσκαφή, 2: κανάλι απαγωγής, 3: είσοδος αερίου, 4: προς χώρο υπο εκκένωση, 5: προς προκαταρκτικό κενό και 6: κινητήρας για την περιστροφή

Η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα είναι γύρω στις 5000rpm και η πίεση που επιτυγχάνεται είναι της τάξεως  $10^{-6}$  Torr. Το κενό ανάμεσα στο στάτορα και το ρότορα είναι ένα από τα μειονεκτήματα της αντλίας καθώς μικρές θερμοκές διαστολές ή ξένα σωματίδια εξαιτίας του, μπορεί να την καταστρέψουν. Το πρόβλημα αυτό ξεπεράστηκε με ένα νέο τύπο αντλίας, η μοριακή αντλία *Becker* που σχεδιάστηκε από τον ίδιο στα 1958, και στην οποία τόσο ο στάτορας όσο και ο ρότορας αποτελούνται από πτερύγια, ακίνητα ή κινητά αντίστοιχα. Το κενό που μπορεί να δημιουργήσει φτάνει στα  $10^{-9}$  Torr.

Σήμερα, για εφαρμογές υπέρ-υψηλού κενού (ultra-high vacuum), χρησιμοποιούνται κυρίως **μοριακές στροβιλοαντλίες ( Turbomolecular pumbs)**, οι οποίες προωθούν το ρευστό μέσω υψηλής ταχύτητας αξονικών στροφέων (ως και 90.000rpm), κατασκευαστική δομή που προσιδιάζει ιδιαίτερος σε αεροστρόβιλο. Τέτοιου τύπου αντλίες διαθέτουν από 10 ως 40 βαθμίδες συμπίεσης και μπορούν να διακινήσουν ποσότητες αερίου μέχρι και 800 l/sec. Οι αντλίες αυτού του τύπου μπορούν να επιτύχουν πιέσεις της τάξεως των  $10^{-10}$  Torr.



σχήμα 4: μια Turbomolecular αντλία



## Γ) Αντλίες Roots

Οι αντλίες αυτές είναι περιστροφικές αντλίες, χωρίς όμως βαλβίδα εξαγωγής και υγρό. Το κινητό τμήμα τους αποτελείται από δύο στροφάλους σε σχήμα «οκτώ», οι οποίοι περιστρέφονται σε αντίθετες διευθύνσεις μέσα στο στάτορα της αντλίας. Οι στροφάλοι έχουν ίδιες διατομές και είναι έτσι φτιαγμένοι και τοποθετημένοι ώστε ένα μέρος του  $R_1$  να είναι πάντα σε «επαφή» με τον  $R_2$ , ενώ ταυτόχρονα και οι δύο «εφάπτονται» στο τοίχωμα του στάτορα. Αυτό σημαίνει πως πάντοτε τόσο ανάμεσα στα  $R_1$  και  $R_2$  όσο και στα σημεία 1, 2 και 3 του σχήματος 5, υπάρχει ένα μικρό διάκενο της τάξης του 0,1 mm.



σχήμα 5 : α) εξωτερική εμφάνιση αντλίας Roots β) σχηματική παράσταση αντλίας Roots με  $R_1$  και  $R_2$  οι δύο στροφάλοι και 1,2,3 τα διάκενα

Επειδή ουσιαστικά η είσοδος και η έξοδος της αντλίας επικοινωνούν μέσα από αυτό το διάκενο, υπάρχει πάντα ένα αντίστροφο ρεύμα επαναφοράς μορίων του αερίου στον αρχικό χώρο. Έτσι η δυνατότητα συμπίεσης της αντλίας είναι μικρότερη από τις περιστροφικές με λάδι. Ωστόσο, επειδή δεν υπάρχουν τριβές, επιτρέπουν μεγαλύτερες ταχύτητες περιστροφής (1000-3000rpm) και επομένως έχουν αρκετά υψηλές ταχύτητες αναρρόφησης. Ο συνδυασμός της με αντλία προκαταρκτικού κενού δημιουργεί κενό της τάξης των  $10^{-6}$  Torr. Οι αντλίες Roots, εξαιτίας της μεγάλης ταχύτητας αναρρόφησης που παρουσιάζουν, χρησιμοποιούνται σε διατάξεις όπου χρειάζεται να απομακρυνθούν μεγάλες ποσότητες αερίων, σε μια περιοχή πιέσεων από 1 ως  $10^{-3}$  Torr, όπως στην μεταλλουργία κενού και ιδιαίτερα στην απαέρωση του χάλυβα. Στις περιπτώσεις αυτές χρησιμοποιούνται αντλίες Roots δύο βαθμίδων, που παρουσιάζουν σταθερή ταχύτητα αναρρόφησης σε αυτή την περιοχή.

### 3.5.2 Αντλίες με ατμούς

Οι αντλίες αυτού του τύπου είναι οι πιο συνησμένες όταν θέλουμε να δημιουργήσουμε κενό της τάξης των  $10^{-6}$  -  $10^{-7}$  Torr και χρησιμοποιούνται πάντα με περιστροφικές ή άλλες αντλίες προκαταρκτικού κενού. Το μέσο με το οποίο γίνεται η απαγωγή των μορίων από το χώρο που θέλουμε να δημιουργήσουμε το κενό είναι οι ατμοί ειδικών λαδιών ή υδραργύρου. Οι αντλίες ατμών ( vapour pumps ) χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Στις αντλίες με εκτόξευση φλέβας ατμών (ejection pumps)

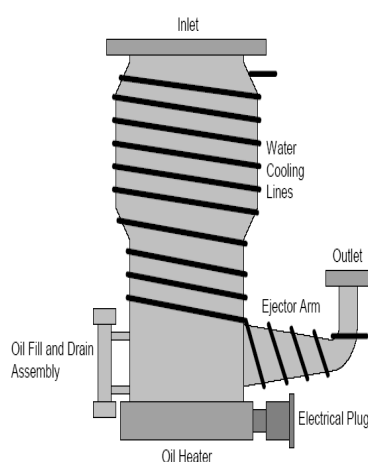
και στις αντλίες διάχυσης ( diffusion pumps ). Τόσο η μία όσο και η άλλη κατηγορία έχει κοινό χαρακτηριστικό το βραστήρα, όπου θερμαίνεται και εξαερώνεται το αντίστοιχο υγρό. Η διαφορά τους έγκειται στη μέση ελεύθερη διαδρομή των μορίων των αερίων του χώρου.

#### A) Αντλίες με εκτόξευση φλέβας ατμού

Ο αριθμός των ακροφυσίων της αντλίας δίνει και τον αριθμό των βαθμίδων της. Μια τέτοια αντλία μπορεί να δημιουργήσει κενό της τάξης των  $10^{-1}$  Torr , αν χρησιμοποιεί νερό και  $10^{-3}$  Torr αν χρησιμοποιεί λάδι ή υδράργυρο. Οι αντλίες αυτές χρησιμοποιούνται μάλλον σε μεγάλες διατάξεις όπου χρειάζεται γρήγορη απαγωγή μεγάλων όγκων αερίων, ως αντλίες προκαταρκτικού κενού.

#### B) Αντλίες διάχυσης

Η πρώτη αντλία διάχυσης χρησιμοποιήθηκε από τον Gaede το 1915, έχοντας για υγρό υδράργυρο. Το 1916 ο Langmuir χρησιμοποίησε ψύξη για συμπύκνωση ατμών του υδραργύρου στα τοιχώματα της αντλίας. Το 1928 ο Burch λάδια χαμηλής τάσης ατμών και λίγο αργότερα ο Hickman παρήγαγε μερικούς εστέρες για αυτή τη δουλειά. Τα πιο συνηθισμένα υγρά που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι εστέρες, μίγματα υδρογονανθράκων, χλωριομένα διφαινύλια και τα λεγόμενα λάδια σηλικόνης. Η συμπεριφορά μιας τέτοιας αντλίας διορθώνεται αν χρησιμοποιήσουμε ψυχόμενο διάφραγμα συμπύκνωσης ατμών ή διάφραγμα ψηλού κενού (baffle), το οποίο συνήθως τοποθετείται κοντά στην είσοδο της αντλίας, για να εμποδίσει τους ατμούς του λαδιού να μπουν στον υπο εκκένωση χώρο. Ο συνδυασμός μιας αντλίας διάχυσης με την κατάλληλη περιστροφική αντλία προκαταρκτικού κενού αποτελούν το πιο συνηθισμένο σύστημα παραγωγής κενού σε ηλεκτρονικά μικροσκόπια, διατάξεις ακτίνων X, συστήματα λέπτυνσης υλικών με βομβαρδισμό ιόντων κ.τ.λ. Το κενό που επιτυγχάνουμε με αυτό το συνδυασμό κυμαίνεται μεταξύ  $10^{-5}$  και  $10^{-7}$  Torr. Με τη βοήθεια αντλιών ρόφησης ή παγίδων υγρού αζώτου φτάνουμε και τα  $10^{-9}$  Torr.

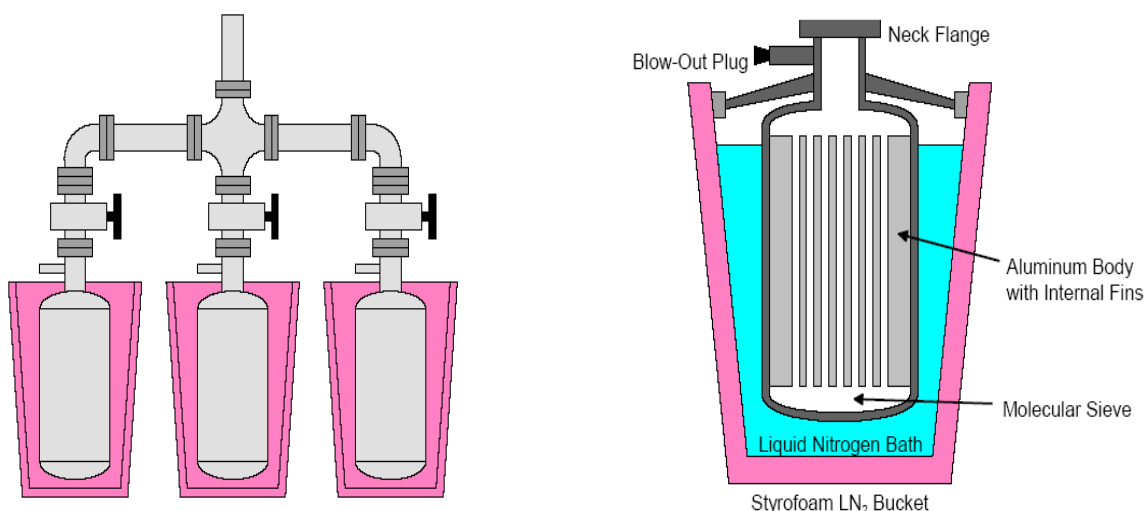


σχήμα 6: σχηματική παράσταση αντλίας διάχυσης

### 3.5.3 Αντλίες ρόφησης

Οι αντλίες αυτού του είδους (sorption pumps) αποτελούνται από ένα δοχείο ανοξείδωτου χάλυβα που έχει εσωτερικά χάλκινες λάμες που βοηθάνε στη μεταφορά θερμότητας και είναι γεμάτο με ζεόλιθο. Το δοχείο περιβάλλεται από ένα άλλο δοχείο στο οποίο βάζουμε υγρό άζωτο. Η αρχή λειτουργίας μιας τέτοιας αντλίας στηρίζεται στην πορώδη κρυσταλλική δομή του ζεόλιθου, ο οποίος ανάλογα με τη χημική του σύσταση παρουσιάζει πόρους με διάφορες διαμέτρους. Η διάμετρος αυτή καθορίζει και το μέγεθος του μορίου που μπορεί να προσροφηθεί (για το λόγο αυτό οι ουσίες αυτές είναι γνωστές και ως μοριακά κόσκινα, molecular sieves). Για θερμοκρασία -195°C (θερμοκρασία υγρού αζώτου) παρατηρούμε ότι έχουμε μερική πίεση  $10^{-2}$  Torr. Ανάλογα με τον όγκο της διάταξης όπου πρόκειται να δημιουργήσουμε το κενό, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε περισσότερες αντλίες ταυτόχρονα, ή να συνδέσουμε δύο αντλίες παράλληλα οι οποίες θα χρησιμοποιούνται εναλλάξ, δηλαδή όταν η μία προσροφά, η άλλη θα θερμαίνεται. Εκτός από τους ζεόλιθους, άλλες ουσίες που χρησιμοποιούνται στις αντλίες αυτές είναι ενεργοποιημένος άνθρακας και ενεργοποιημένη αλουμίνα. Το μεγάλο πλεονέκτημα των αντλιών αυτού του είδους είναι ότι δεν έχουν λάδια ή άλλα υγρά που οπωσδήποτε «μολύνουν» το κενό με τους ατμούς τους.

Η διαδικασία άντλησης απαιτεί 2-3 γαλόνια υγρού αζώτου και χρόνο περίπου 20 λεπτών για να επιτευχθεί η επιθυμητή θερμοκρασία. Μετά τη χρήση τους, οι αντλίες προσρόφησης πρέπει να θερμανθούν σε θερμοκρασία 250°C για περίπου 30 λεπτά, ώστε να αποδεσμευτούν τα παγιδευμένα αέρια και να επανακαταστεί έτοιμη προς χρήση.



σχήμα7 : αντλία ρόφησης

**δέσμευση** (getter-ion pump). Το δεσμευτικό αυτό υλικό (getter) είναι κλεισμένο μέσα στο σύστημα κενού και ενεργεί ως υλικό ρόφησης για τα μόρια του αερίου. Η κατανομή του στο χώρο του συστήματος γίνεται βασικά με δύο τρόπους: είτε με εξάχνωση (sublimation) του κατάλληλου υλικού (συνήθως τιτάνιο) θερμαινοντάς το με ένα σύρμα αντίστασης (π.χ. βολφράμιο), είτε με εξάτμιση (evaporation) του υλικού με βομβαρδισμό του με ηλεκτρόνια. Οι αντλίες αυτές ονομάζονται **αντλίες με ιονισμό και εξάτμιση** (evapor-ion pump). Το πλεονέκτημα των αντλιών αυτών είναι

ότι παρουσιάζουν φτηνό, γρήγορο και απλό τρόπο απομάκρυνσης, ιδιαίτερα για μόρια ενεργών αερίων, ενώ η ταυτόχρονη δυνατότητα ιονισμού συντελεί στην απομάκρυνση των ευγενών αερίων που δε μπορούν να δεσμευτούν από το τιτάνιο. Το μειονέκτημα είναι ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν όσο υπάρχει στο σύστημα το υλικό δέσμευσης, εκτός αν γίνεται τροφοδότηση με κάποιο μηχανικό τρόπο από έξω, πράγμα όμως που δημιουργεί προβλήματα σε UHV. Ανάλογα σε ποια κατηγορία ανήκουν, οι αντλίες αυτές μπορούν να δημιουργήσουν κενό  $10^{-9}$  Torr ( για μικρές αντλίες),  $10^{-7}$  με  $10^{-8}$  Torr ( για μεγάλες αντλίες ),  $10^{-10}$  Torr ( για αντλίες Orbitron). Στην ίδια κατηγορία των αντλιών με δέσμευση μπορεί να θεωρήσουμε ότι ανήκουν και οι **αντλίες με ιονισμό και κονιοποίηση της καθόδου** (sputter-ion pump) ( βλ. παραπάνω σχήμα), όπου το ενεργό υλικό είναι αυτό της καθόδου. Οι τιμές της ταχύτητας αναρρόφησης των αντλιών αυτών κυμαίνονται από 1 έως  $5000 \text{ l.s}^{-1}$ . Το κενό που μπορούν να δημιουργήσουν φτάνει μέχρι  $5 \cdot 10^{-12}$  Torr, όταν έχουμε ψύξη με υγρό άζωτο. Ο χρόνος ζωής τους ( όσο διαρκεί το υλικό της καθόδου ) εξαρτάται από την πίεση στην οποία λειτουργούν. Είναι 50000h στα  $10^{-6}$  Torr, αλλά μόνο 3000-5000h στα  $10^{-5}$  Torr.



σχήμα 8 : σύγχρονες ιοντικές αντλίες

### 3.5.4 Κρυαντλίες

Η αρχή λειτουργίας των αντλιών αυτών (cryopumps) είναι το γεγονός ότι τα μόρια των διάφορων αερίων όταν ελαττώνεται η θερμοκρασία υγροποιούνται και στη συνέχεια στερεοποιούνται, μειώνοντας έτσι την πίεση των ατμών τους. Αν έχουμε λοιπόν μια ψυχρή επιφάνεια σε μια αντλία, τα μόρια του αερίου θα συμπυκνωθούν πάνω σε αυτή την επιφάνεια, αν η θερμοκρασία είναι κατάλληλη. Έτσι παρόλο που δεν απομακρύνονται ουσιαστικά από το χώρο, η πίεση μειώνεται και μάλιστα σε σημαντικό βαθμό. Στη θερμοκρασία του υγρού ηλίου(He) 4.2 K η τάση ατμών για τα περισσότερα αέρια είναι μικρότερη από  $10^{-10}$  Torr. Η ταχύτητα αναρρόφησης μιας κρυαντλίας φτάνει μέχρι  $10^4 - 10^6 \text{ l/s}$ , ενώ η θερμοκρασία της ψυχρής επιφάνειας φτάνει στους 12-20K. Το ήλιο, το νέο και το υδρογόνο που δε συμπυκνώνονται σε αυτή την περιοχή, απομακρύνονται είτε με τη βοήθεια άλλης αντλίας, είτε από ειδικές προσροφητικές ουσίες με τις οποίες καλύπτεται η ψυχρή επιφάνεια. Οι κρυαντλίες, τέλος, μπορούν να δημιουργήσουν κενό της τάξεως των  $10^{-8}$  Torr.



σχήμα 9 : κρυαντλία σε εγκάρσια τομή



## Παράρτημα 4<sup>ο</sup> : Αισθητήρες κενού

### 4.1 Γενικά

Τα όργανα με τα οποία μετρούμε την πίεση ονομάζονται γενικά μανόμετρα, όταν όμως τα χρησιμοποιούμε για να μετρήσουμε χαμηλές πιέσεις (μικρότερες της ατμοσφαιρικής), μιλάμε για *μετρητές κενού* (vacuum gauges).

Η δύναμη που δημιουργείται από τη διαφορά πίεσης είναι ικανή να μετακινήσει μηχανικά κάποιο δείκτη μόνο μέχρι περίπου το 1 Torr. Επομένως για να μετρήσουμε μικρότερες πιέσεις είμαστε υποχρεωμένοι να κατασκευάσουμε μετρητές κενού που να χρησιμοποιούν κάποια άλλη φυσική ιδιότητα που σχετίζεται με τη μεταβολή της πίεσης, όπως το ιζώδες, τη μεταφορά ορμής, τη θερμική αγωγιμότητα, τον ιονισμό κ.α. Οι βασικοί παράγοντες που πρέπει να λάβουμε υπόψη μας όταν έχουμε να διαλέξουμε ένα μανόμετρο κατάλληλο για τη δουλειά που το θέλουμε είναι :

- Η περιοχή πιέσεων για την οποία το θέλουμε
- Να μετρήσουμε μερική ή ολική πίεση
- Αν πρέπει η ένδειξη να είναι ανεξάρτητη από το είδος του αερίου και
- Η ακρίβεια που θέλουμε να έχουμε στις ενδείξεις μας

Στην παράγραφο που ακολουθεί παρουσιάζονται συνοπτικά οι βασικότεροι τύποι αισθητήρων κενού:

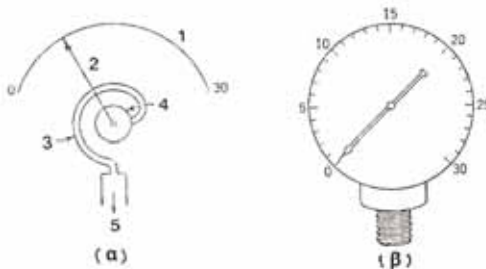
### 4.2 Τύποι αισθητήρων κενού

#### 4.2.1 Μηχανικά μανόμετρα

Τα μανόμετρα της κατηγορίας αυτής στηρίζονται στο κλασικό φαινόμενο της εμφάνισης μιας δύναμης ανάλογης με τη διαφορά της πίεσης που δημιουργείται μέσα και έξω από κάποιο στοιχείο. Η δύναμη αυτή μετακινεί ένα δείκτη σε μια κατάλληλα βαθμονομημένη κλίμακα. Η ένδειξη είναι ανεξάρτητη από το είδος του αερίου.

#### α) Μανόμετρα Bourton

Το στοιχείο στο οποίο δημιουργείται η δύναμη είναι ένας καμπυλωμένος σωλήνας, που στη μια του άκρη συνδέεται με το χώρο στον οποίο δημιουργείται το κενό και στην άλλη τη άκρη, που είναι κλειστή, έχει στερεωμένο το δείκτη, σχήμα 1, ο οποίος στρέφεται με κατάλληλο σύστημα οδοντωτών τροχών που ενισχύουν ταυτόχρονα την απόκλιση.

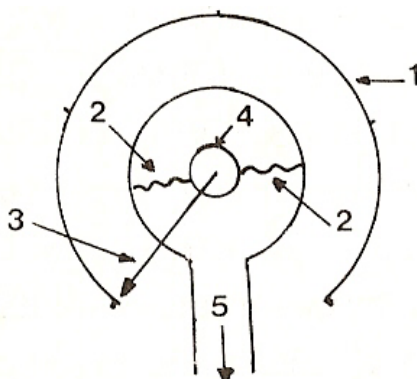


σχήμα 1: Μανόμετρο Bourdon, α) Σχηματική παράσταση της αρχής λειτουργίας, 1: Κλίμακα, 2: Δείκτης, 3: Σωλήνας, 4: Σύστημα τροχών και 5: Προς κενό β) Εξωτερική εμφάνιση

Η ακρίβεια στην ανάγνωση της κλίμακας ενός συνηθισμένου μανομέτρου Bourton είναι 5-10 mm Hg, συνεπώς δε μπορούμε να διαβάσουμε το 1 Torr. Αυτό όμως δεν έχει και τόση σημασία, μια και τα μανόμετρα αυτά χρησιμοποιούνται κυρίως ως ενδεικτικά της τάξης μεγέθους του κενού και ιδιαίτερα για να μας πληροφορήσουν αν υπάρχει κάποια σοβαρή διαρροή.

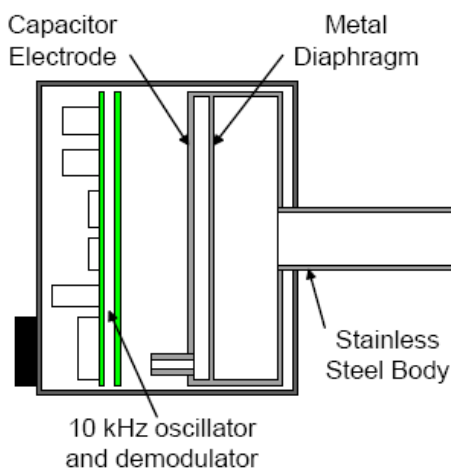
### β) Μανόμετρα μεμβράνης

Η διαφορά πίεσης δημιουργείται στις δυο πλευρές μιας μεταλλικής, συνήθως, μεμβράνης με πτυχές για να αυξηθεί το εμβαδόν της και επομένως και η δύναμη που θα ασκηθεί και στην οποία είναι στερεωμένο το σύστημα των οδοντωτών τροχών και ο δείκτης, σχήμα 2.



σχήμα 2: Σχηματική παράσταση μανομέτρου μεμβράνης

Μια παραλλαγή του μανομέτρου είναι το **μανόμετρο χωρητικότητας**, σχήμα 3. Σε αυτό μετριέται η μεταβολή της χωρητικότητας που εμφανίζεται από τη μεταβολή της απόστασης των οπλισμών ενός πυκνωτή. Ο πυκνωτής σχηματίζεται μεταξύ της μεμβράνης και μιας σταθερής πλάκας. Έχει ικανοποιητικά γραμμική συμπεριφορά (γραμμική συσχέτιση μεταξύ πίεσης αερίου και χωρητικότητας πυκνωτή) και δίνουν εξαιρετικά ακριβείς μετρήσεις στην περιοχή κενού μέχρι  $10^{-5}$  Torr



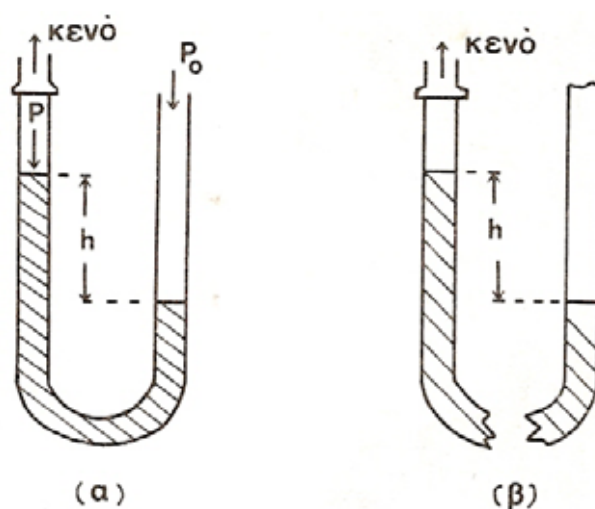
σχήμα 3: χωρητικός αισθητήρας πίεσης

#### 4.2.2 Μανόμετρα με υγρό

Η αρχή λειτουργίας των μανομέτρων αυτών στηρίζεται στην υψομετρική διαφορά που δημιουργείται όταν υπάρχει διαφορά πίεσης στην ελεύθερη επιφάνεια ενός υγρού που βρίσκεται μέσα σε συγκοινωνούντα δοχεία. Το πιο συνηθισμένο υγρο είναι ο υδράργυρος.

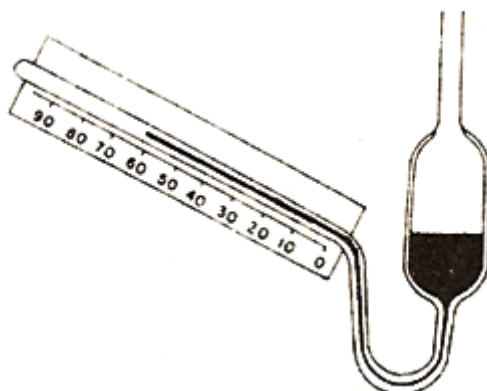
##### Μανόμετρο με υοειδή σωλήνα

Το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι ένας υοειδής σωλήνας με σταθερή διάμετρο. Το ένα σκέλος του συνδέεται με το χώρο όπου θα δημιουργηθεί το κενό και το άλλο είναι είτε ανοιχτό στην επιφάνεια είτε κλειστό



Σχήμα 4: Μανόμετρο με υοειδή σωλήνα. α) Ανοικτού άκρου β) Κλειστού άκρου

Μια παραλλαγή των μανομέτρων αυτών είναι όταν ο υοειδής σωλήνας έχει στο κλειστό του άκρο μια κλίση, σχήμα 5, ώστε να αυξηθεί η διακριτική ικανότητα της ανάγνωσης, μια και τώρα η ίδια υψομετρική διαφορά θα αναπτύσσεται σε μεγαλύτερο μήκος.



Σχήμα 5: Υοειδές μανόμετρο με κλίση

### **4.2.3 Μανόμετρα ιξώδους**

Τα μανόμετρα αυτά στηρίζονται είτε στη μείωση του πλάτους ενός ταλαντευόμενου συστήματος εξαιτίας της αντίστασης που προβάλλει το ιξώδες των μορίων του αερίου είτε στο φαινόμενο molecular drag, σύμφωνα με το οποίο αν ένα μόριο συναντήσει ένα κινούμενο τοίχωμα αποκτά μια κατευθυνόμενη συνιστώσα ταχύτητας, άρα και ορμής. Διακρίνονται σε **μανόμετρα απόσβεσης** με περιοχή πιέσεων από 1 έως  $10^{-4}$  Torr και σε **στατικά μανόμετρα** με περιοχή πιέσεων από  $10^{-4}$  ως  $10^{-9}$  Torr.

### **4.2.4 Μανόμετρα θερμικής αγωγιμότητας**

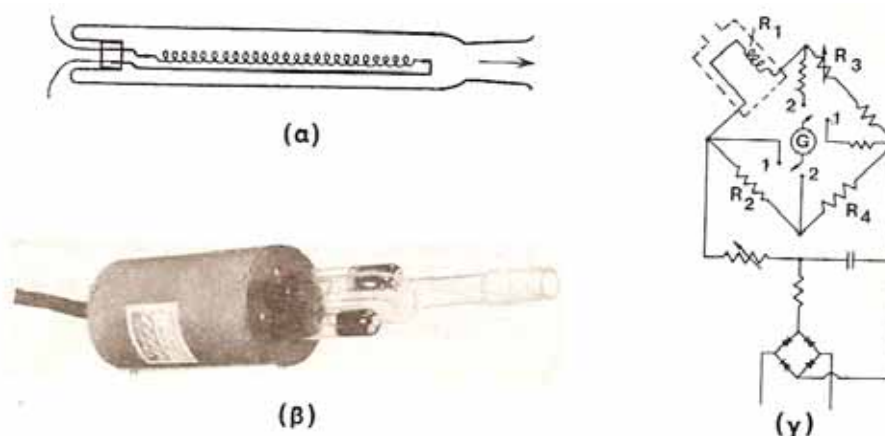
Το κύριο χαρακτηριστικό των μανομέτρων αυτής της κατηγορίας είναι ένα νήμα που θερμαίνεται με τη δίοδο ηλεκτρικού ρεύματος. Το νήμα βρίσκεται μέσα σε γυάλινο ή μεταλλικό περίβλημα το οποίο συνδέεται με τον προς εκκένωση χώρο και η θερμοκρασία του εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος με το οποίο τροφοδοτείται. Αν θεωρήσουμε πως η ένταση αυτή παραμένει σταθερή, τότε κάθε μείωση της θερμοκρασίας του θα οφείλεται στους παρακάτω τρεις λόγους.

- Απώλεια θερμότητας εξαιτίας θερμικής ακτινοβολίας του νήματος
- Απώλεια θερμότητας με αγωγή μέσα από τους αγωγούς σύνδεσης του νήματος με την τροφοδοσία
- Απώλεια θερμότητας με αγωγή στα μόρια του αερίου που έρχονται σε επαφή με το θερμό νήμα

Θα πρέπει να διευκρινίσουμε ότι στην περιοχή της ιξώδους ροής η θερμική αγωγιμότητα του αερίου είναι ανεξάρτητη από την πίεση του. Επομένως τα μανόμετρα αυτά δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιοχές πιέσεων που η ροή χαρακτηρίζεται ως ιξώδης, υπάρχει δηλαδή ένα ανώτατο όριο στην πίεση που μπορεί να μετρήσουν (~ 1 Torr). Θα πρέπει όμως να πούμε ότι υπάρχει και ένα κατώτατο όριο, το οποίο δημιουργείται όταν ο αριθμός των μορίων είναι τόσο μικρός ώστε πλέον η απώλεια θερμότητας με ακτινοβολία γίνεται συγκρίσιμη με την απώλεια θερμότητας στα μόρια του αερίου και άρα οι ενδείξεις έχουν σημαντικό λάθος. Το όριο αυτό είναι  $10^{-3}$  με  $10^{-4}$  Torr ανάλογα με το είδος του μανόμετρου και για το λόγο αυτό, σε αυτή την περιοχή πρέπει να τροφοδοτούμε το νήμα με τη μικρότερη ένταση ρεύματος που επιτρέπει να έχουμε ένδειξη στο μανόμετρο.

#### **α) Μανόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης**

Οι σπουδαιότεροι αντιπρόσωποι στην κατηγορία αυτή είναι το μανόμετρο Pirani και το μανόμετρο με θερμίστορ. Το μανόμετρο Pirani κατασκευάστηκε για πρώτη φορά από τον Pirani στα 1906 και είναι από τα πιο διαδεδομένα και χρησιμοποιούμενα μανόμετρα σε συστήματα κενού. Το σχήμα 6 δίνει μια σχηματική παράσταση της κατασκευής του.



Σχήμα 6: Μανόμετρο Pirani α) Σχηματική παράσταση β) Μια εμπορική μορφή της κεφαλής γ) Σχηματική παράσταση της αρχής με την οποία γίνεται η μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (γέφυρα Wheatstone).

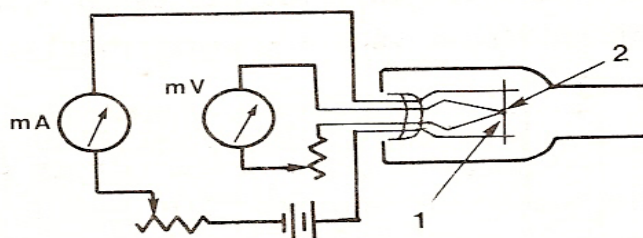
Το θερμαινόμενο νήμα είναι από μέταλλο με έντονη μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης με τη θερμοκρασία, συνήθως βολφράμιο, νικέλιο ή πλατίνα. Όταν θέλουμε να μετρήσουμε σχετικά μεγάλες πιέσεις χρησιμοποιείται η πλατίνα, επειδή είναι πιο ανθεκτική στο οξυγόνο και τους υδρατμούς.

Όταν η πίεση αυξάνεται, η θερμοκρασία του νήματος, άρα και η ηλεκτρική του αντίσταση, ελαττώνεται, μια και το απαγόμενο με αγωγή από τα μόρια ποσό θερμότητας αυξάνεται. Η μέτρηση της μεταβολής γίνεται με τη βοήθεια του ηλεκτρικού κυκλώματος που φαίνεται στο σχήμα (6.γ), που δεν είναι παρά μια γέφυρα αντιστάθμισης Wheatstone. Η περιοχή στην οποία μπορεί να γίνει σωστή ανάγνωση του μανομέτρου είναι συνήθως μεταξύ  $5 \cdot 10^{-1}$  και  $5 \cdot 10^{-3}$  Torr. Ο χρόνος απόκρισης ενός μανομέτρου Pirani είναι γύρω στα 1s και το όργανο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε γρήγορες μεταβολές, γεγονός που είναι πλεονέκτημα. Άλλα πλεονεκτήματα του είναι το απλό σχετικά ηλεκτρικό του κύκλωμα και το γεγονός ότι μπορεί ο τρόπος μέτρησης να μετατραπεί σε αυτόματη καταγραφή. Το κυριότερο μειονέκτημά του είναι ότι η απόκρισή του εξαρτάται από τη μεταφορά θερμότητας στα μόρια του αερίου. Επομένως κάθε μεταβολή στην κατάσταση της επιφάνειας του νήματος (π.χ από οξείδωση) θα έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της ρύθμισης του μανομέτρου.

Στην ίδια κατηγορία με τα μανόμετρα Pirani ανήκουν και τα μανόμετρα με θερμίστορ. Σε αυτά το νήμα έχει αντικατασταθεί από ένα ημιαγωγικό υλοκό με μεγάλο αρνητικό θερμικό συντελεστή ηλεκτρικής αντίστασης. Το πλεονέκτημα του μανομέτρου είναι ότι το ρεύμα στη γέφυρα Wheatstone παρουσιάζεται σε γραμμική εξάρτηση με την πίεση για όλη την περιοχή από 1 ως  $10^{-3}$  Torr.

## β) Θερμοηλεκτρικά μανόμετρα

Η μεταβολή της θερμοκρασίας του νήματος στα μανόμετρα αυτά μετρείται απευθείας με τη βοήθεια ενός θερμοζεύγους που είναι συνδεδεμένο στη μέση περίπου του νήματος, σχήμα 7, το οποίο τροφοδοτείται με σταθερή ένταση ρεύματος.



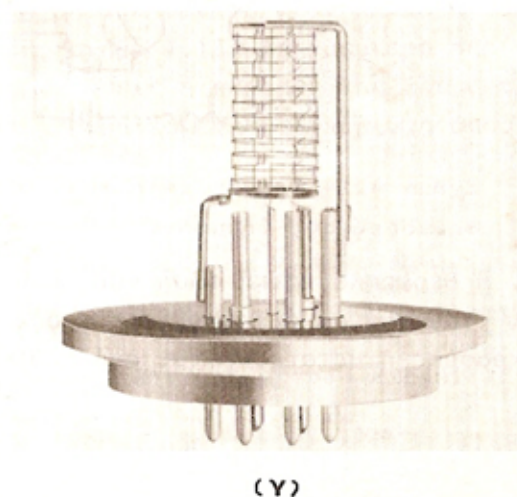
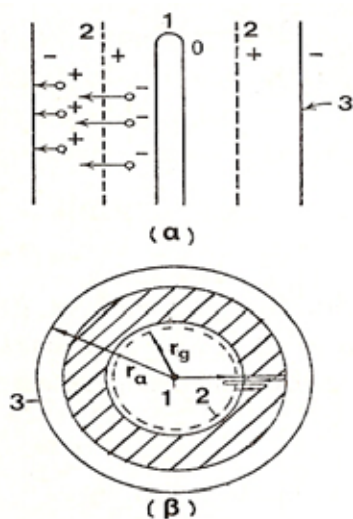
Σχήμα 7: Θερμοηλεκτρικό μανόμετρο. 1: Νήμα, 2: Επαφή θερμοζεύγους-νήματος

Τα μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα του μανομέτρου είναι όμοια με αυτά του Pirani, είναι όμως ευκολότερο στο καθαρίσιμα, μικρότερο σε μέγεθος και έχει πιο γρήγορη απόκριση 20 ως  $5 \cdot 10^{-3}$  Torr.

### 4.2.5 Μανόμετρα με ιονισμό

#### Θερμιονικά μανόμετρα

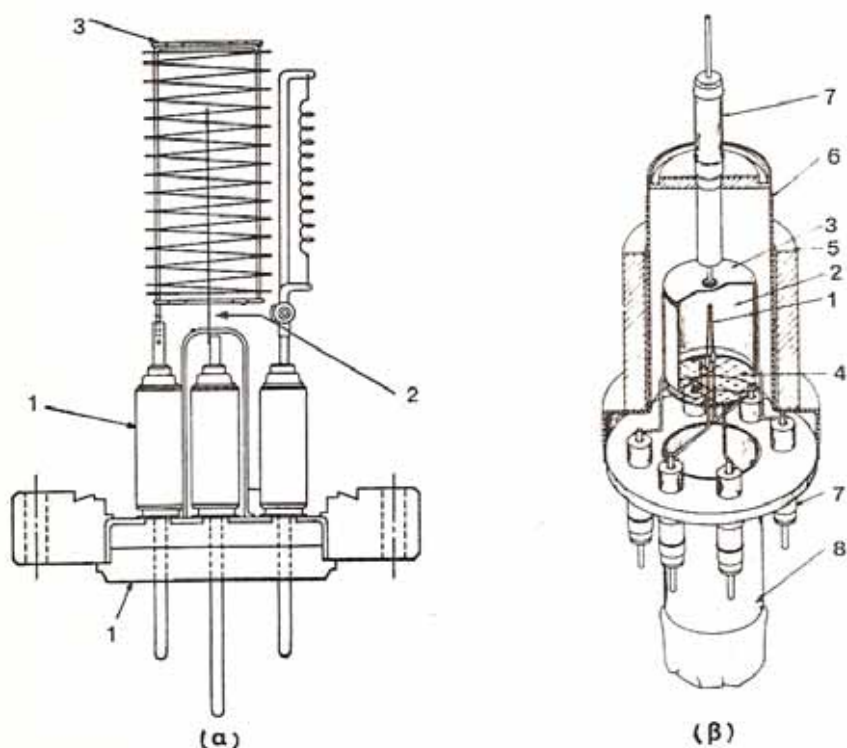
Στα μανόμετρα αυτού του τύπου χρησιμοποιείται η θερμιονική εκπομπή ηλεκτρονίων. Η αρχή λειτουργίας φαίνεται στο σχήμα 8. Τα ηλεκτρόνια που παράγονται από ένα θερμαινόμενο νήμα 1 επιταχύνονται από ένα ηλεκτρικό πεδίο με τη βοήθεια ενός πλέγματος 2 που βρίσκεται σε απόσταση  $r_g$  από το νήμα.



Σχήμα 8: α, β) Αρχή λειτουργίας θερμιονικού μανομέτρου 1: Θερμαινόμενο νήμα, 2: Πλέγμα επιτάχυνσης, 3: Άνοδος - συλλέκτης, γ) Φωτογραφία κεφαλής ενός θερμιονικού μανομέτρου του εμπορίου

Τα ηλεκτρόνια αυτά συγκρούονται με τα μόρια του αερίου και τα θετικά ιόντα που παράγονται συλλέγονται από την άνοδο-συλλέκτη 3 που βρίσκεται σε αρνητικό δυναμικό σε σχέση με το πλέγμα και σε απόσταση  $r_a$ . Ταυτόχρονα τα ηλεκτρόνια απωθούνται και έτσι αναγκάζονται να αλλάξουν διεύθυνση, εκτελώντας μια ταλάντωση ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια και αυξάνοντας έτσι το μήκος της διαδρομής τους ώσπου να συλληφθούν από την άνοδο. Η περιοχή πιέσεων των μανόμετρων αυτών φτάνει τα  $10^{-8}$  Torr και παρουσιάζονται σε διάφορους τύπους :

Στο μανόμετρο Bayard-Albert, σχήμα 9.α, στο οποίο η περιοχή πιέσεων κατεβαίνει στα  $10^{-12}$  Torr, για διάμετρο σύρματος  $4\mu\text{m}$ .



Σχήμα 9: α) Μανόμετρο Bayard – Albert. 1: Μονωτικό υλικό, 2: Συλλέκτης, 3: Πρόσθετο πλέγμα ασπίδα, β) Μανόμετρο Lafferty. 1: Νήμα, 2: Άνοδος, 3: Συλλέκτης ιόντων, 4) Δικτυωτό πλέγμα – ασπίδα, 5: Μαγνήτης, 6: Περιβλήμα από ανοξειδωτο χάλυβα, 7: Μονωτικό υλικό, 8: Σύνδεση με χώρο κενού

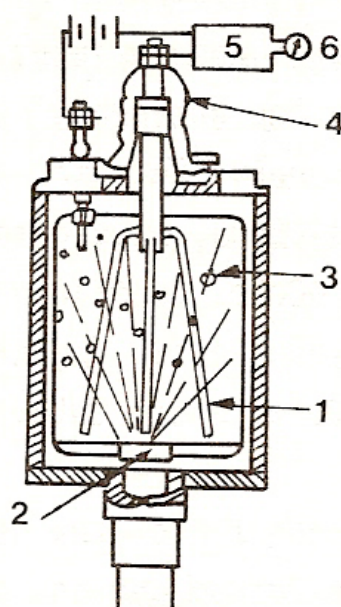
Στο μανόμετρο Lafferty, σχήμα 9.β, με όριο στα  $10^{-14}$  Torr και στο μανόμετρο orbitron που μετρά κενό της τάξης των  $10^{-12}$  Torr.



#### 4.2.6 Μανόμετρα με ραδιενεργό πηγή

Ως μέσο ιονισμού των μορίων του αερίου στα μανόμετρα αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιούνται σωματίδια α ή β.

Ο κυριότερος αντιπρόσωπος των μανομέτρων αυτών είναι το άλφατρο (σχήμα 10). Ως πηγή της ακτινοβολίας α χρησιμοποιείται κράμα χρυσού με ράδιο. Τα ιόντα που παράγονται από τη σύγκρουση των σωματιδίων α με μόρια του αερίου συλλέγονται από ένα σύστημα όπου ο κύριος συλλέκτης, που ρίσκεται σε αρνητικό δυναμικό ή είναι γειωμένος, περιβάλλεται από ένα βοηθητικό συλλέκτη που βρίσκεται σε κάποιο θετικό δυναμικό και απωθεί τα ιόντα προς τον κύριο συλλέκτη. Το ρεύμα των ιόντων που εμφανίζεται, επειδή είναι χαμηλό ( $2 \cdot 10^{-10}$  A στο 1 Torr), ενισχύεται και διαβάζεται στον κατάλληλο μετρητή, στον οποίο οι ενδείξεις είναι κατευθείαν σε Torr.



Σχήμα 10: Μανόμετρο άλφατρο. 1: Σύστημα συλλέκτη, 2: Πηγή ακτινοβολίας, 3: Ιονισμός, 4: Μονωτικό, 5: Ενισχυτής d.c., 6: Όργανο μέτρησης

Το μανόμετρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως και  $10^{-5}$  Torr. Όσο χαμηλότερη πίεση θέλουμε να μετρήσουμε τόσο μεγαλύτερη ένταση πρέπει να έχει η πηγή, πράγμα επικίνδυνο που χρειάζεται κατάλληλη προστατευτική θωράκιση, γεγονός που ανεβάζει το κόστος κατασκευής. Παρόλαυτα χρησιμοποιείται στην παραπάνω περιοχή επειδή έχει μεγάλη διάρκεια ζωής και μεγάλη γραμμική περιοχή.



## Βιβλιογραφία

- 1) Σ.Τσαγγάρης, Μηχανική των Ρευστών, εκδ.Συμεών, 1995
- 2) Κ.Μπούκουρας, Εγχάραξη επιφανειών πυριτίου σε αντιδραστήρα πλάσματος υψηλής πυκνότητας και μελέτη της επιφανειακής και πλευρικής ταχύτητας, Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος»
- 3) Π.Παπασημάκης, Κατασκευή και προσομοίωση μικρομηχανικών δομών με διεργασίες πλάσματος, Νοέμβριος 2005, Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος»
- 4) Γ.Αντωνόπουλος, Τεχνολογία κενού, Ξάνθη 1984
- 5) A.Pipko, V.Pliskovsky, B.Korolev, V.Kuznetsov, Fundamentals of Vacuum Techniques, MIR Publisers, Moscow 1984
- 6) Φ.Μπούρας, Πειραματική διερεύνηση της ροής αεριοποιημένων αερίων σε μικροαγωγούς, Ε.Μ.Π, 2006
- 7) G.E.Karniadakis, A.Beskok, Micro flows: fundamentals and simulation, Springer-Verlag, 2002
- 8) M.Gad-El-Hak, Handbook of MEMS, CRC Press, 2001
- 9) E.B.Arkilic, M.A.Schmidt, K.S.Breuer, Gaseous slip flow in long microchannels, submitted to: J. Microelectromechanical Systems, 1995
- 10) J.C.Harley, Y.Huang, H.Bau, J.N.Zemel, Gas flow in microchannels, J. Fluid Mech. vol.284, pp.257, 1995
- 11) S.Colin, P.Lalonde, R.Caen, Validation of a second-order slip flow model in rectangular microchannels, Heat transfer engineering, vol.25, no.3, 2004
- 12) J.Jang, S.T.Wereley, Pressure distributions of gaseous slip flow in straight and uniform rectangular microchannels, Microfluidics and nanofluidics, Springer-Verlag, 2004
- 13) F.Sharipov, V.Seleznev, Data on rarefied gas flows, J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol.27, No3, 1998