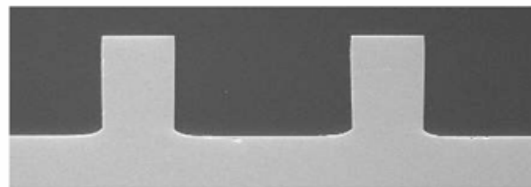




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ
ΑΡΑΙΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΑΕΡΙΩΝ (Rarefied Gases),
ΣΕ ΔΙΑΤΑΞΗ ΜΙΚΡΟΑΓΩΓΩΝ»



(a) Microchannel 1



(b) Microchannel 2



(c) Microchannel 3

ΜΑΚΡΟΜΑΛΛΗΣ ΚΥΡΙΑΚΟΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΜΑΘΙΟΥΛΑΚΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΑΘΗΝΑ
2009

Αφιερώνεται στους γονείς μου, Αντώνη και Λουκία, που με τις προσωπικές τους θυσίες και στερήσεις, κατάφεραν να μεγαλώσουν έναν «άνθρωπο» με ιδανικά, αξίες και φιλοδοξίες.

Σας ευχαριστώ ...

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ:

Περίληψη	9
Abstract	10
Εισαγωγή	11

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ

1.1 Μοριακά μεγέθη	14
1.2 Οι περιοχές της ροής	16
1.3 Στοιχεία πειραματικής θεμελίωσης	18
1.4 Δυναμική ομοιότητα	22
1.5 Συστήματα μεικτής ροής	23
1.6 Η συνάρτηση κατανομής	24
1.7 Κινητικές εξισώσεις και μέθοδοι επίλυσης τους	28
1.7.1 Αριθμητική επίλυση της εξίσωσης Boltzmann	29
1.7.2 Η μέθοδος άμεσης προσομοίωσης Monte Carlo (DSMC)	32
1.8 Μια αναφορά σε προηγούμενες συναφείς εργασίες	
1.8.1 Η «προϊστορία»	35
1.8.2 Η «ιστορία»	36

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Η ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

2.1 Η «φιλοσοφία»	52
2.2 Η μορφή της διάταξης	53

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3. Πειραματικά αποτελέσματα	63
3.1 Αναλυτική παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων	64
• Πλάκα μικροαγωγών μήκους $L=4750\mu\text{m}$, πλάτους $W=250\mu\text{m}$ και βάθους $H=30\mu\text{m}$. Αριθμός καναλιών $N=27$ Αργό ως εργαζόμενο μέσο.....	64
• Πλάκα μικροαγωγών μήκους $L=4880\mu\text{m}$, πλάτους $W=285\mu\text{m}$ και βάθους $H=20\mu\text{m}$. Αριθμός καναλιών $N=19$ Αργό ως εργαζόμενο μέσο 1 ^η Περίπτωση.....	114
• Πλάκα μικροαγωγών μήκους $L=4880\mu\text{m}$, πλάτους $W=285\mu\text{m}$ και βάθους $H=20\mu\text{m}$. Αριθμός καναλιών $N=19$ Αργό ως εργαζόμενο μέσο 2 ^η Περίπτωση.....	117
• Πλάκα μικροαγωγών μήκους $L=4880\mu\text{m}$, πλάτους $W=285\mu\text{m}$ και βάθους $H=20\mu\text{m}$. Αριθμός καναλιών $N=19$ Αέρας ως εργαζόμενο μέσο.....	121
• Πλάκα μικροαγωγών μήκους $L=4880\mu\text{m}$, πλάτους $W=285\mu\text{m}$ και βάθους $H=20\mu\text{m}$. Αριθμός καναλιών $N=19$ Ήλιο ως εργαζόμενο μέσο.....	125
3.2 Συγκεντρωτικά και συγκριτικά αποτελέσματα	130
• Πλάκα μικροαγωγών μήκους $L=4750\mu\text{m}$, πλάτους $W=250\mu\text{m}$ και βάθους $H=30\mu\text{m}$. Αριθμός καναλιών $N=27$ Αργό ως εργαζόμενο μέσο.....	130
• Πλάκα μικροαγωγών μήκους $L=4880\mu\text{m}$, πλάτους $W=285\mu\text{m}$	

και βάθους $H=20\mu\text{m}$. Αριθμός καναλιών $N=19$ Αργό ως εργαζόμενο μέσο 1 ^η Περίπτωση.....	136
● Πλάκα μικροαγωγών μήκους $L=4880\mu\text{m}$, πλάτους $W=285\mu\text{m}$ και βάθους $H=20\mu\text{m}$. Αριθμός καναλιών $N=19$ Αργό ως εργαζόμενο μέσο 2 ^η Περίπτωση.....	140
● Πλάκα μικροαγωγών μήκους $L=4880\mu\text{m}$, πλάτους $W=285\mu\text{m}$ και βάθους $H=20\mu\text{m}$. Αριθμός καναλιών $N=19$ Αέρας ως εργαζόμενο μέσο.....	144
● Πλάκα μικροαγωγών μήκους $L=4880\mu\text{m}$, πλάτους $W=285\mu\text{m}$ και βάθους $H=20\mu\text{m}$. Αριθμός καναλιών $N=19$ Ήλιο ως εργαζόμενο μέσο.....	147
■ Σύγκριση των αερίων μεταξύ τους.....	150
■ Διερεύνηση όγκου δεξαμενών.....	157
→ Για όγκο δεξαμενών 31 ml.....	157
→ Για όγκο δεξαμενών 32 ml.....	159
→ Για όγκο δεξαμενών 33 ml.....	160
→ Για όγκο δεξαμενών 34 ml.....	162
→ Για όγκο δεξαμενών 35 ml.....	163
→ Για όγκο δεξαμενών 36 ml.....	165
→ Για όγκο δεξαμενών 37 ml.....	166
→ Για όγκο δεξαμενών 38 ml.....	168
3.3 Συμπεράσματα	170

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Παράρτημα 1^ο: α) Το Αργό (Ar)

1.1 Η ιστορία	174
1.2 Τα χαρακτηριστικά	174
1.3 Ύπαρξη – Ανίχνευση	175
1.4 Εφαρμογές	175
1.5 Οι χημικές του ενώσεις	176
1.6 Επιδράσεις στην υγεία	177
1.7 Επιδράσεις στο περιβάλλον	177

Παράρτημα 1^ο: β) Το Ήλιο (He)

1.1 Ιστορία.....	178
1.2 Ιδιότητες.....	179
1.3 Παραγωγή.....	180
1.4 Χρήσεις.....	181
1.5 Ασφάλεια – Υγεία.....	181

Παράρτημα 2^ο: Ανισοτροπική εγχάραξη δομών πυριτίου με πλάσμα φθορανθράκων

2.1 Εισαγωγή στο πλάσμα	182
2.2 Εγχάραξη	184
2.3 Η διεργασία Bosch	188

Παράρτημα 3^ο: Αντλίες κενού

3.1 Γενικά	191
3.2 Βασικές κατηγορίες	191
3.3 Τύποι αντλιών	192
α) Περιστροφικές αντλίες	192
β) Αντλίες εμφύλων	193
γ) Αντλίες διάχυσης	194
δ) Αντλίες τύπου Venturi	195
ε) Αντλίες του «Turbomolecular»	196
στ) Αντλίες προσρόφησης	197
ζ) Cryopumps	198

Παράρτημα 4^ο: Αισθητήρες κενού

4.1 Γενικά	201
4.2 Τύποι αισθητήρων	201
α) Μηχανικοί αισθητήρες	201
β) Χωρητικοί αισθητήρες	202
γ) Αισθητήρες θερμοστοιχείου	202
δ) Οι αισθητήρες Pirani	203
ε) Αισθητήρες ιονισμού	204

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 5^ο: Το φαινόμενο «outgassing»

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ:.....

Περίληψη:

«Πειραματική μελέτη ροής αραιοποιημένων αερίων (Rarefied Gases) σε διάταξη μικροαγωγών»

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μια πειραματική μελέτη της ροής αραιοποιημένων αερίων σε διάταξη μικροαγωγών. Τα αέρια που χρησιμοποιούνται είναι το Αργό, το Ήλιο και ο αέρας, η ροή των οποίων γίνεται σε μια κατάλληλα διαμορφωμένη διάταξη ώστε οι πιέσεις να είναι ιδιαίτερα χαμηλές (της τάξης των mbar). Πιο συγκεκριμένα, οι μικροαγωγοί έχουν χαρακτεί σε πλάκες πυριτίου, με τη μέθοδο της λιθογραφίας, και αντλία κενού ελαττώνει την πίεση εντός των αγωγών σε επιθυμητά επίπεδα.

Οι παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν το πλάτος των καναλιών, το βάθος τους, το μήκος τους, ο αριθμός των καναλιών, το αέριο και η διαφορά πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου των καναλιών.

Οι μακροσκοπικές ιδιότητες της ροής υπολογίζονται από τις μετρήσεις που λαμβάνονται από τους αισθητήρες πίεσης και θερμοκρασίας, που είναι εγκατεστημένοι στην είσοδο και έξοδο αντίστοιχα. Οι υπολογισμένες αυτές ποσότητες συγκρίνονται με τα αποτελέσματα που δίνουν αναλυτικά μοντέλα προσομοίωσης της ροής.

Abstract:

«Experimental flow study of rarefied gases in microchannels»

An experimental flow investigation of rarefied gases in microchannels is presented in this study. Argon gas, Helium gas and air were used in an appropriate experimental setup, so that low absolute pressures were obtained (of the order of a few mbars), within a number of parallel microchannels. More specifically, the microchannels were etched on silicon pieces using lithography, and a vacuum pump which reduced the pressure in the microchannels to desired levels.

The examined parameters were: the width, the depth, the length, the number of the channels, the type of gas and the pressure difference between the entrance and exit of the channels.

The macroscopic quantities of the flow were calculated based on the measurements that were taken from pressure and temperature sensors. These quantities were compared with the results that computation models 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 χρησιμοποιείτε ευρέως στη ρευστομηχανική μακροσκοπικής κλίμακας, δεν έχει ισχύ στις διεπιφάνειες ρευστού-στερεού.

Η συμπιεστότητα είναι ένα επιπλέον χαρακτηριστικών των ροών μέσα σε μικροαγωγούς. Σε μακροσκοπική κλίμακα, μπορούμε να καθορίσουμε μονοσήμαντα, αν η συνεχής ροή είναι συμπιεστή ή ασυμπίεστη. Αν ο τοπικός αριθμός Mach είναι μικρότερος από 0,3 τότε η ροή μπορεί να θεωρηθεί ασυμπίεστη, 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 την 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 βγουν τα κατάλληλα συμπεράσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ

1. Στοιχεία Θεωρίας

1.1 Μοριακά μεγέθη

Ο αριθμός των μορίων που περιέχονται σ' ένα mole αερίου, γνωστός και ως αριθμός Avogadro: $6.02252 \cdot 10^{23}$ καθώς και ο όγκος που καταλαμβάνουν αυτά σε δοσμένες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, είναι σταθεροί και ανεξάρτητοι από τη σύνθεση του αερίου. Αυτό μας οδηγεί στο νόμο του ιδανικού αερίου:

$$P = n \cdot k_B \cdot T$$

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

Gas	Density [kg/m ³]	Dynamic Viscosity [kg/(ms)]	Thermal Con- ductivity [W/(mK)]	Thermal Diffusivity [m ² /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

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

Αν υποθέσουμε ότι αυτά τα μόρια είναι κατανεμημένα ομοιόμορφα, μπορούμε να ορίσουμε μια μέση μοριακή απόσταση δ ως:

$$\delta \propto n^{-1/3}$$

η οποία σε κανονικές συνθήκες είναι περίπου $\delta = 3.3 \cdot 10^{-9} m$.

Η μέση μοριακή διάμετρος d για τα τυπικά αέρια, όπως προκύπτει από τη θεωρία των Chapman-Enskog για μόρια σφαιρικού σχήματος, είναι της τάξεως των $10^{-10} m$. Για τον αέρα σε κανονικές συνθήκες είναι $d = 3.7 \cdot 10^{-10} m$.

Παρατηρούμε ότι η μέση μοριακή απόσταση είναι μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από την μέση μοριακή διάμετρο. Έτσι οδηγούμαστε στην υπόθεση του αραιού αερίου, όπου $\delta/d \gg 1$. Στο αραιό αέριο, οι διαμοριακές 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 στο πεδίο αυτό.

Ως μέση ελεύθερη διαδρομή λ ορίζεται η απόσταση που διανύεται από ένα μόριο μεταξύ δυο διαδοχικών συγκρούσεων και η τιμή της δίδεται από τη σχέση:

$$\lambda = (2^{1/2} \cdot \pi \cdot d^2 \cdot n)^{-1}$$

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

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

$$\bar{c} = \sqrt{\frac{3 \cdot P}{\rho}} = \sqrt{3 \cdot R \cdot T}$$

όπου R η ειδική σταθερά του αερίου.

Η μέση τετραγωνική μοριακή ταχύτητα για τον αέρα, υπό κανονικές συνθήκες, υπολογίζεται σε 486 m/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 λ προς τη μέση τετραγωνική μοριακή ταχύτητα c . Για τον αέρα σε κανονικές συνθήκες υπολογίζεται σε $t_c = 10^{-10}$ sec .

1.2 Οι περιοχές της ροής

Στις τεχνολογικές εφαρμογές είναι σημαντικό οι διάφορες μοριακές αλληλεπιδράσεις 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:

- πόσο πρέπει να είναι το μέγεθος του δείγματος, ώστε να μπορούν να προσδιοριστούν σε αυτό τέτοιες μακροσκοπικές ιδιότητες;
- Σε ποια 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 την δεδομένη ακρίβεια θα είχε όγκο περίπου $3.7 \cdot 10^{-22} m^3$.

Τη διασαφήνιση της κατάστασης διευκολύνει η εισαγωγή μιας αδιάστατης παραμέτρου που ονομάζεται **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:

$$Kn \equiv \frac{\lambda}{L} = \sqrt{\frac{\gamma \cdot \pi}{2}} \cdot \frac{M}{Re}$$

Σε σύνθετες γεωμετρίας, που εκτείνονται και στις τρεις διαστάσεις του χώρου, είναι δύσκολο να προσδιοριστούν οι τιμές των μακροσκοπικών μεγεθών για ροές με $Kn > 1$. Παρ' όλα 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.

Τα φαινόμενα αραιοποίησης γίνονται σημαντικότερα, καθώς ο αριθμός Knudsen αυξάνει 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 κινηματική 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.

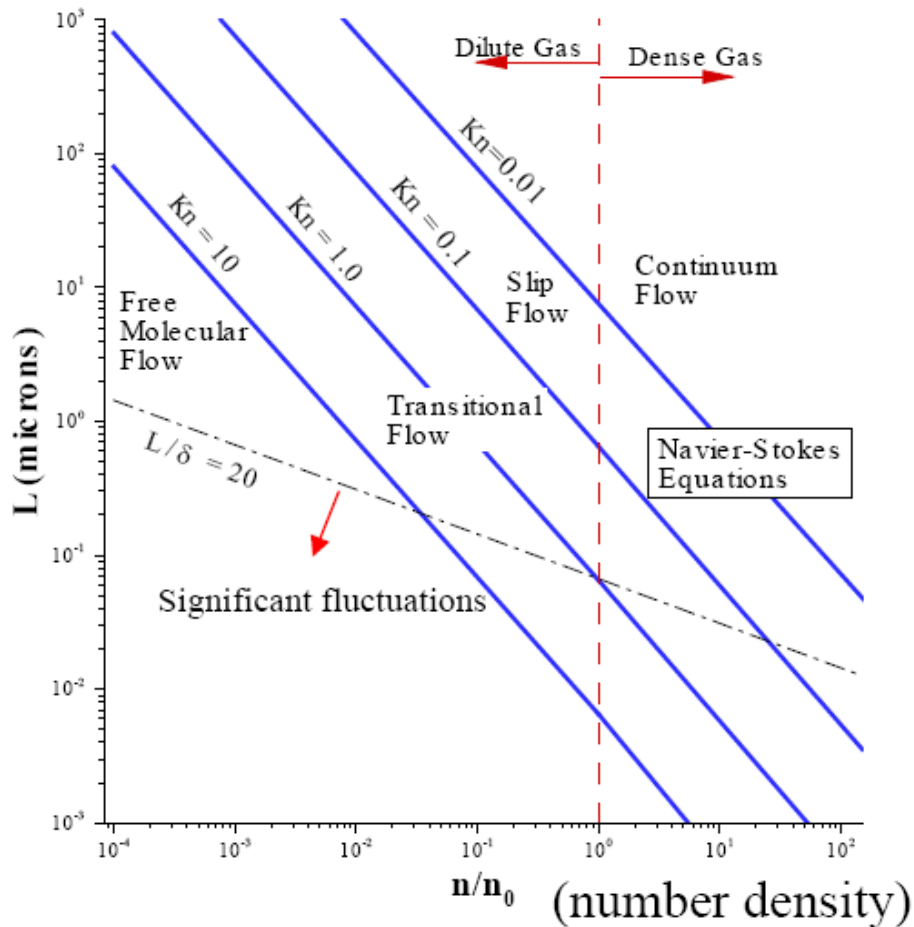
Στην περιοχή του αριθμού Knudsen μεταξύ των τιμών 10^{-2} και 10, το ρευστό δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ούτε ως πλήρως συνεχές, ούτε ότι βρίσκεται στην ελεύθερη μοριακή περιοχή.

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.



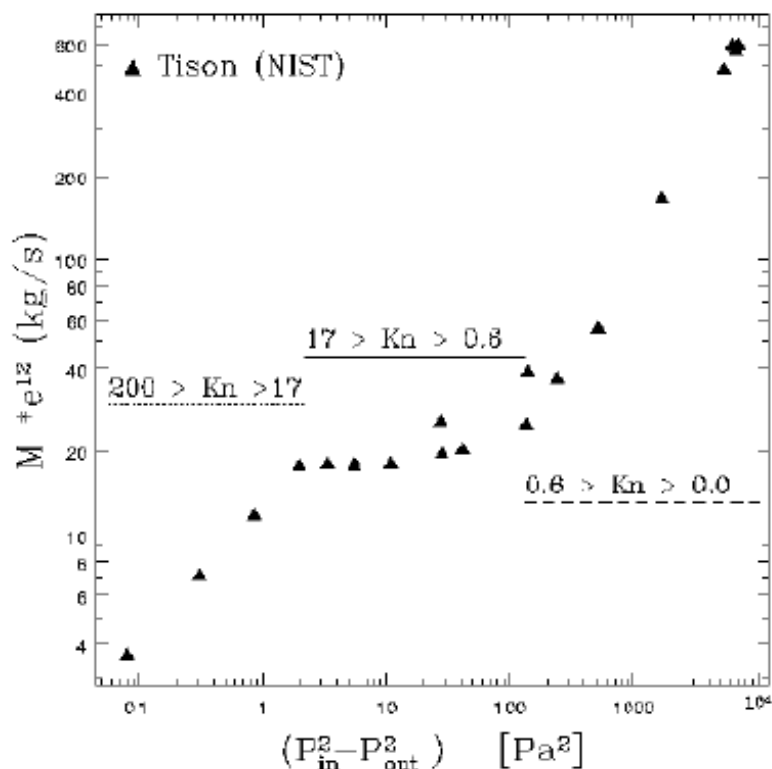
Σχήμα 1: οι περιοχές της ροής στο διάγραμμα χαρακτηριστικής διαμέτρου-αριθμητικής πυκνότητας

1.3 Στοιχεία πειραματικής θεμελίωσης

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

Στο πείραμά του αυτό 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 κάτι διαφορετικές από αυτές που ορίσαμε προηγουμένως. (βλ. σχήμα 2).

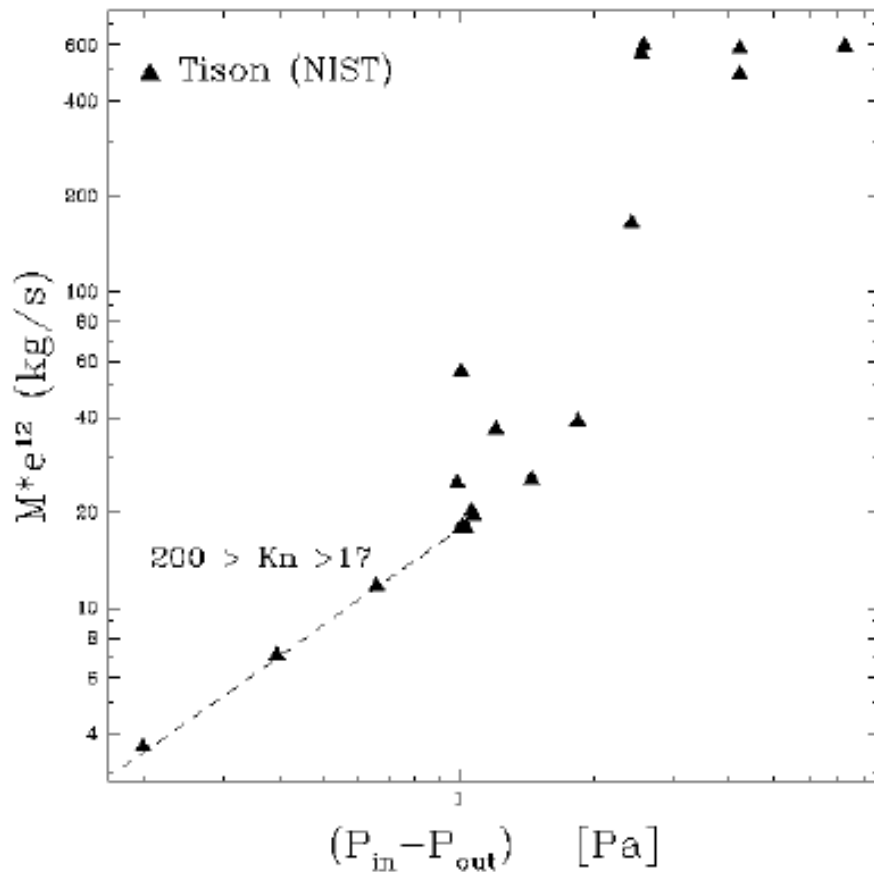


Σχήμα 2: οι περιοχές της ροής στο διάγραμμα παροχής μάζας-διαφοράς τετραγώνων πίεσης

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 υποδεικνύει επίσης 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 ασυμπιεστη 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 3: 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:

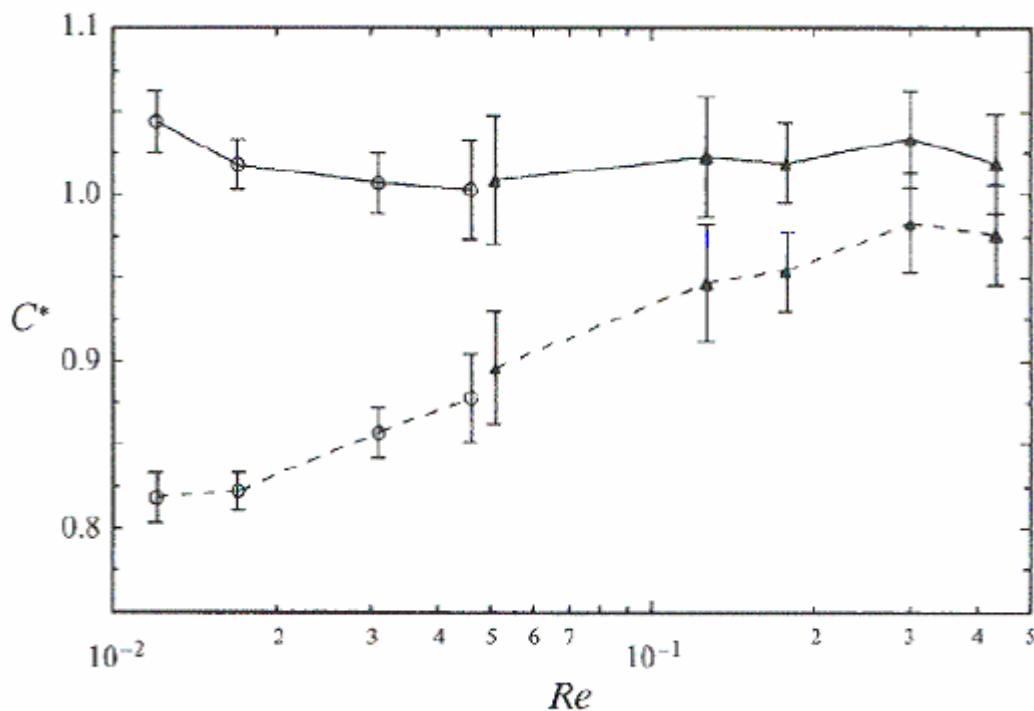
$$C^* = \frac{(Po)_{\text{exp}}}{(Po)_{\text{th}}}$$

Ο αριθμός Poiseuille ορίζεται:

$$Po = C_f \cdot Re$$

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 $(Po)_{\text{th}} = 64$, ενώ για διδιάστατα κανάλια είναι $(Po)_{\text{th}} = 96$.



Σχήμα 4: ο λόγος C^* συναρτήσει του αριθμού Reynolds

Για το πείραμα χρησιμοποιήθηκε κανάλι βάθους $0.51\mu\text{m}$. Η πίεση εισόδου κυμάνθηκε από 1.1 MPa ως 3.5 MPa , 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 ορισθεί ως αντιστρόφως ανάλογος του αριθμού Mach.

1.4 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.

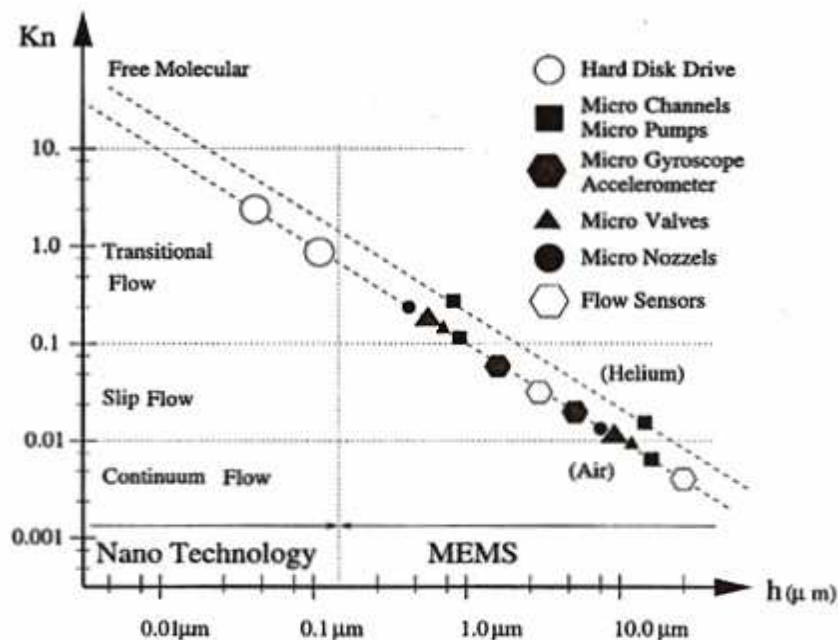
Παραδείγματος χάρη: για ατμοσφαιρικές συνθήκες, η τιμή του αριθμού $Kn=1$ επιτυγχάνεται για μέγεθος καναλιού περί τα 65nm. Για μικρότερες διατομές, που αντιστοιχούν σε μεγαλύτερους Knudsen, οι μακροσκοπικές ιδιότητες του ρευστού δεν μπορούν να προσδιοριστούν. Παρόλα αυτά, σε χαμηλότερες πιέσεις, για 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.

1.5 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 5: 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.

1.6 Η συνάρτηση κατανομής

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

$$d^3r = dx dy dz$$

Ο συγκεκριμένος όγκος έχει επιλεγεί ώστε να εμπεριέχει το σημείο r . Παρόμοια ένας στοιχειώδης όγκος στο χώρο των μοριακών ταχυτήτων θα συμβολίζεται με:

$$d^3\xi = d\xi_x d\xi_y d\xi_z$$

και θα βρίσκεται γύρω από την ταχύτητα ξ .

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 3×10^{25} μορια / 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' ό,τι η μεμονωμένη περιγραφή κάθε μορίου ξεχωριστά. Η υπόθεση αυτή μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι χρησιμοποιούμε ένα στοιχειώδη όγκο ελέγχου d^3r , 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 3×10^{10} μόρια), που να επιτρέπει την στατιστική περιγραφή τους [Ferziger, 1972].

Οι μακροσκοπικές ποσότητες στην ρευστοδυναμική εκφράζονται ως ροπές της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας $f(r, \xi, t)$, 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 $f(r, \xi, t) d^3\xi d^3r$ να αντιπροσωπεύει τον αναμενόμενο αριθμό των μορίων στον φυσικό όγκο $d^3r d^3\xi$,

δηλαδή τον αναμενόμενο αριθμό των μορίων τα οποία στην χρονική στιγμή t , βρίσκονται στο στοιχειώδη όγκο d^3r γύρω από τη θέση r με ταχύτητες στον όγκο $d^3\xi$ γύρω από το διάνυσμα ξ .

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

$$n(r,t) = \int f(r,\xi,t) d^3\xi$$

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

$$\rho(r,t) = m \cdot n(r,t)$$

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

$$d^3r \int m \cdot \xi \cdot f(r,\xi,t) d^3\xi$$

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

$$u(r,t) = \frac{1}{\rho(r,t)} \int m\xi f(r,\xi,t) d^3\xi = \frac{1}{n(r,t)} \int \xi f(r,\xi,t) d^3\xi$$

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

$$\frac{1}{2}m \cdot \xi^2 = \frac{1}{2}m(\zeta + u)^2 = \frac{1}{2}m \cdot \zeta^2 + m \cdot \zeta \cdot u + \frac{1}{2}m \cdot u^2$$

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:

$$e(r,t)\rho(r,t)d^3r = \frac{1}{2}m\zeta^2 f(r,\xi,t)d^3r$$

και ολοκληρώνοντας προκύπτει η έκφραση για την **εσωτερική ενέργεια**:

$$e(r,t) = \frac{1}{\rho(r,t)} \int \frac{1}{2}m\zeta^2 f(r,\xi,t)d^3\xi$$

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

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

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

ή

$$T = \frac{m}{3nk_B} \int \zeta^2 f(r,\xi,t)d^3\xi$$

Εκτός από τις μακροσκοπικές ποσότητες υπάρχουν και ποσότητες που εκφράζονται 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:

$$\Phi = \int \phi_{\zeta} f(r, \xi, t) d^3 \xi$$

η οποία εκφράζει το τυχαίο άνυσμα ροής Φ της αντίστοιχης ποσότητας ϕ .

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

Δηλαδή,

i) Αν $\phi(\zeta) = m$ τότε:

$$\Phi(r, t) = m \int \zeta f(r, \xi, t) d^3 \xi = 0$$

Δηλαδή το διάνυσμα της ροής μάζας για ένα απλό αέριο είναι μηδέν

ii) Αν $\phi(\zeta) = m \zeta_{\alpha}$ τότε:

$$\Phi(r, t) = m \int \zeta_{\alpha} \cdot \zeta f(r, \xi, t) d^3 \xi$$

Η σχέση αυτή μας δίνει το διάνυσμα της ροής που σχετίζεται με την μεταφορά ορμής σε κάθε μία από τις τρεις διευθύνσεις. Ο τανυστής της ροής ορμής, ο οποίος είναι συμμετρικός και 2^{ns} τάξης αποτελείται από 9 συνιστώσες δίνεται από την σχέση:

$$P_{ij}(r, t) = m \int \zeta_i \cdot \zeta_j f(r, \xi, t) d^3 \xi$$

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

$$P = \frac{1}{2}(P_{xx} + P_{yy} + P_{zz}) = \frac{1}{3}nm \int (\zeta_x^2 + \zeta_y^2 + \zeta_z^2) f(r, \zeta, t) d^3 \zeta = nk_B T$$

Από τα παραπάνω έχουμε την γνωστή καταστατική εξίσωση των τέλειων αερίων

$$P(r, t) = n(r, t)k_B T(r, t) = \frac{N}{V} k_B T = \frac{b}{V} RT$$

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.

Τέλος,

iii) Αν $\phi(\zeta) = \frac{1}{2}m\zeta^2$ τότε:

$$q(r, t) = \frac{1}{2}m \int \zeta^2 \zeta f(r, \zeta, t) d^3 \zeta$$

Η σχέση αυτή μας δίνει το άνυσμα της ροής θερμότητας.

1.7 Κινητικές εξισώσεις και μέθοδοι επίλυσης τους

Μια σημαντική διαφορά ανάμεσα στην μικρορευστοδυναμική και την κλασσική ρευστοδυναμική, είναι ότι πλέον η συμπεριφορά των ρευστών δεν μπορεί να περιγραφεί από τις εξισώσεις Navier-Stokes, τουλάχιστον στην αρχική τους μορφή, αλλά είναι αναγκαία μια διαφορετική προσέγγιση. 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.

1.7.1 Αριθμητική επίλυση της εξίσωσης Boltzmann

Η επίλυση της εξίσωσης Boltzmann έχει σαν κυριότερο πλεονέκτημα την ευρύτητα εφαρμογής (μπορεί να εφαρμοστεί τόσο για συνεχή μέσα, όσο και για ελεύθερη μοριακή κίνηση), την πολύ καλή φυσική θεμελίωση της και τη δυνατότητα ανάκτησης μεγάλης ποσότητας πληροφορίας εφόσον μπορούν να υπολογιστούν όλες οι μακροσκοπικές ποσότητες. Βασικό μειονέκτημα αποτελεί η σημαντική μαθηματική πολυπλοκότητα 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 παράλληλων πλακών υπό την επίδραση κλίσης πίεσης και θερμοκρασίας, μεταξύ κινούμενων πλακών καθώς και εντός κυλινδρικών και ορθογωνικών αγωγών. Αντίθετα, η διερεύνηση ροών μιγμάτων 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 $f(r, \xi, t)$. Η συνάρτηση προκύπτει από την επίλυση της εξίσωσης Boltzmann:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \xi \frac{\partial f}{\partial r} + X \frac{\partial f}{\partial \xi} = Q(f, f^*)$$

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

Εφόσον προσδιοριστεί η συνάρτηση κατανομής $f(r, \xi, t)$, 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 ροηκού πεδίου είναι κατά πολύ μικρότερη από την ταχύτητα του ήχου, όπως συμβαίνει σχεδόν πάντα σε μικροροηκές 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:

$$f(r, \xi, t) = f_{abs}^M [1 + h(r, \xi, t)]$$

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:

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

και

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

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

$$\delta = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \frac{H}{\lambda}$$

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:

$$G_{*P}^{th} = \frac{\dot{M} \cdot u_0}{\pi \cdot r^3 \cdot \frac{\Delta P}{L}}$$

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 δ που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\delta = \frac{r \cdot P}{\mu \cdot u_0}$$

όπου μ το δυναμικό ιξώδες του ρευστού στη θερμοκρασία αναφοράς T_0 .

δ	G_{*P}^{th}			δ	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 δ

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 υπολόγισαν ο Shapiro, χρησιμοποιώντας το μοντέλο S, και στη στήλη c αυτές που υπολόγισαν οι Loyalka και Hamoodi με το μοντέλο BE.

1.7.2 Η μέθοδος άμεσης προσομοίωσης Monte Carlo (DSMC)

Υπό κανονικές συνθήκες, σε έναν όγκο $10\mu\text{m}\times 10\mu\text{m}\times 10\mu\text{m}$ 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 δύο διαδοχικών συγκρούσεων) και καταγραφή της εξέλιξη 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 λ (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):

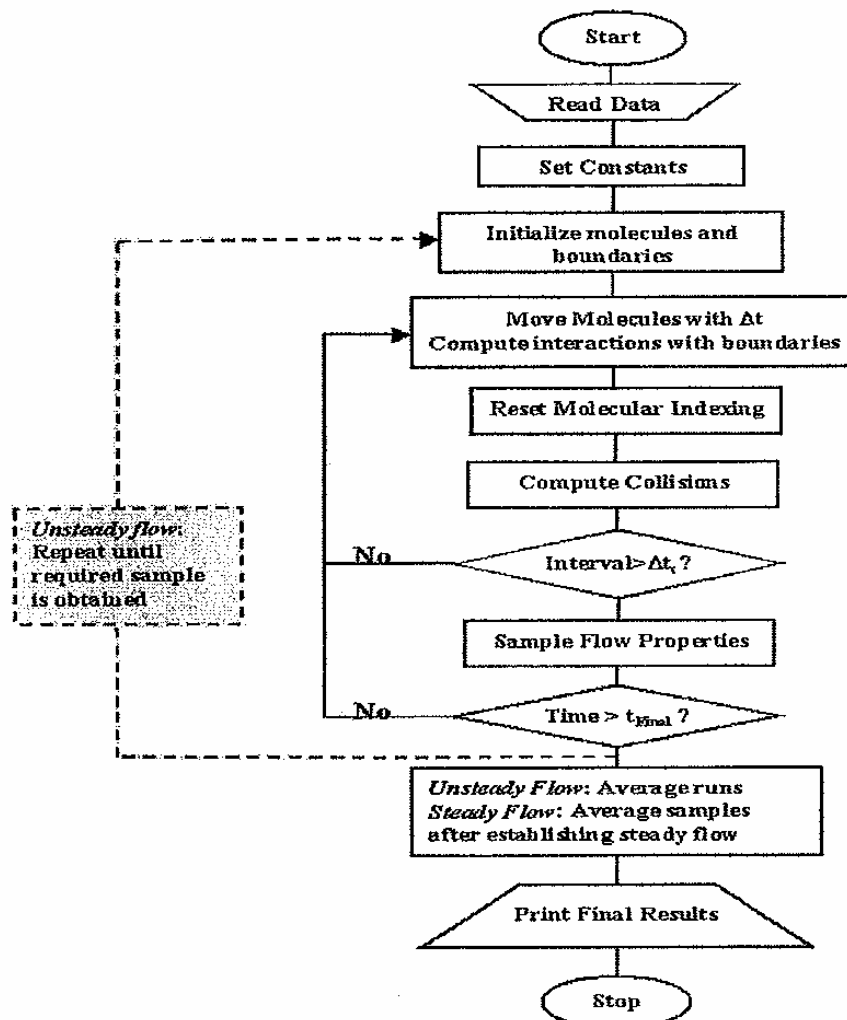
- Κίνηση των μορίων
- Καταχώρηση των μορίων
- Προσομοίωση των συγκρούσεων
- Δειγματοληψία των μακροσκοπικών ιδιοτήτων του πεδίου ροής

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 καταχώρηση των σωματιδίων που, κατά την 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 αλγόριθμου.

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. Στο βήμα αυτό 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.



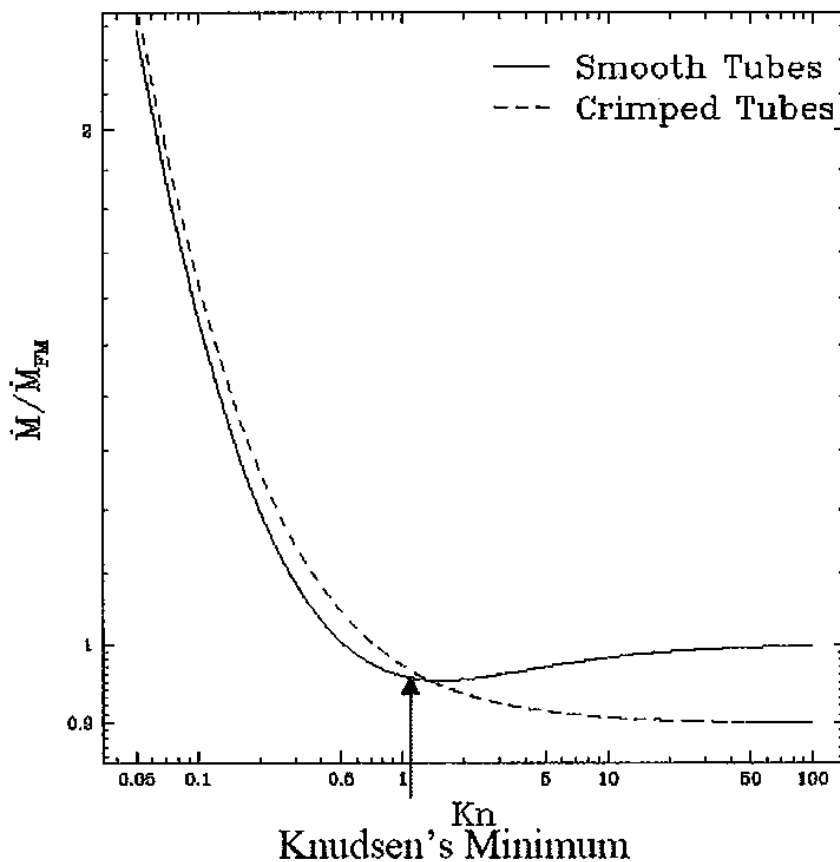
Σχήμα 2: το λογικό διάγραμμα του αλγόριθμου DSMC

1.8 Μια αναφορά σε προηγούμενες συναφείς εργασίες

1.8.1 Η «προϊστορία»

- Το **1846**, ο **Poiseuille** δημοσιεύει την πρώτη ερευνητική εργασία που αφορά ροές μέσα σε αγωγούς με διάμετρο από 30 ως 150 μm . Τα πειράματά του, που γίνονται αποκλειστικά με υγρά, οδηγούν στις μέχρι σήμερα ευρέως γνωστές σχέσεις μεταξύ παροχής, πτώσης πίεσης και διαστάσεων του αγωγού.

- Το **1909** και **1910**, ο **Knudsen** μελετά την ροή του αερίου μέσα σε τριχοειδής αγωγούς, στην περιοχή της μεταβατικής και ελεύθερης μοριακής ροής. Με τα πειράματα αυτά δείχνει ότι η παροχή μάζας του ρευστού, αδιαστατοποιημένη με την διαφορά της 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.

- Το **1913 ο Gaede** πραγματοποίησε το πρώτο πείραμα ροής μέσα σε μικροκανάλι, που κατασκεύασε χρησιμοποιώντας δύο παράλληλες πλάκες σε απόσταση 4μm. 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 (βλ. σχήμα 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.

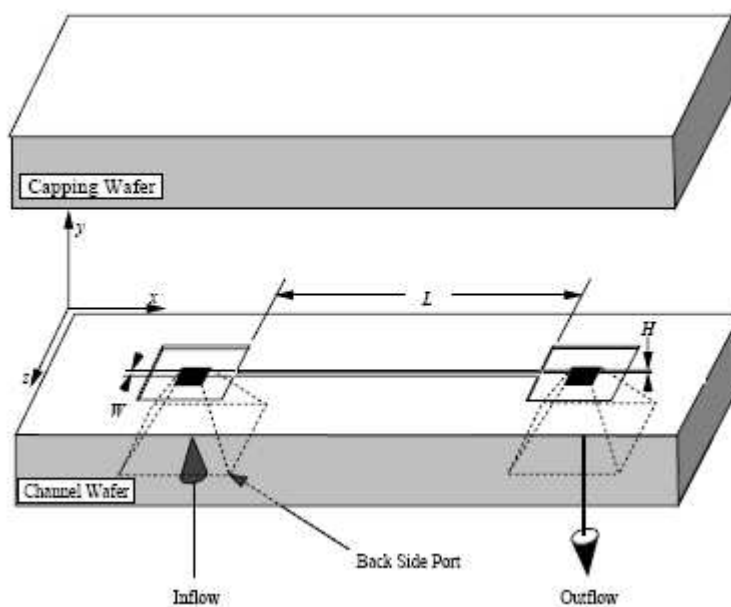
1.8.2 Η «ιστορία»

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.

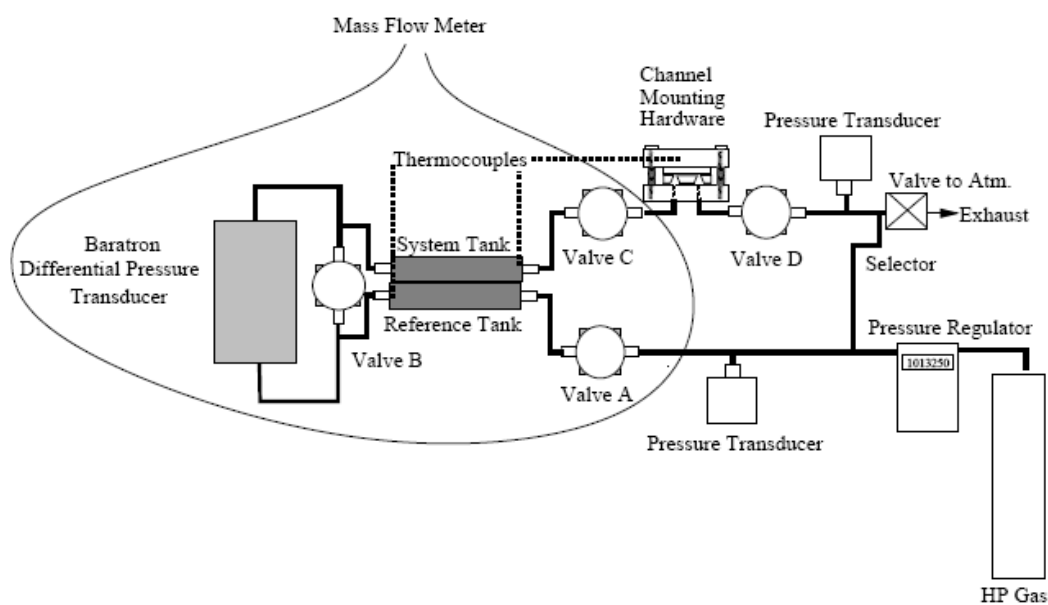
- Το πρώτο κατεργασμένο μικροκανάλι, με υδραυλική διάμετρο $D_H=8\mu\text{m}$ και μήκος 11mm αναφέρεται σε εργασία του **Pfahler το 1991**. Μέσα σ' αυτό επετεύχθη ροή αερίου με $0.50 \leq Re \leq 20$ και $0.001 \leq Kn \leq 0.363$. Ο αριθμός Mach στην είσοδο του καναλιού είναι πολύ μικρός, στην έξοδο 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 και από άλλες πειραματικές μελέτες (Liu 1993, Pong 1994, Arkilic 1994), που χρησιμοποιούν μάλιστα διαφορετικές τεχνικές διαμόρφωσης του μικροκαναλιού.

- 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). Ενδελεχής 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

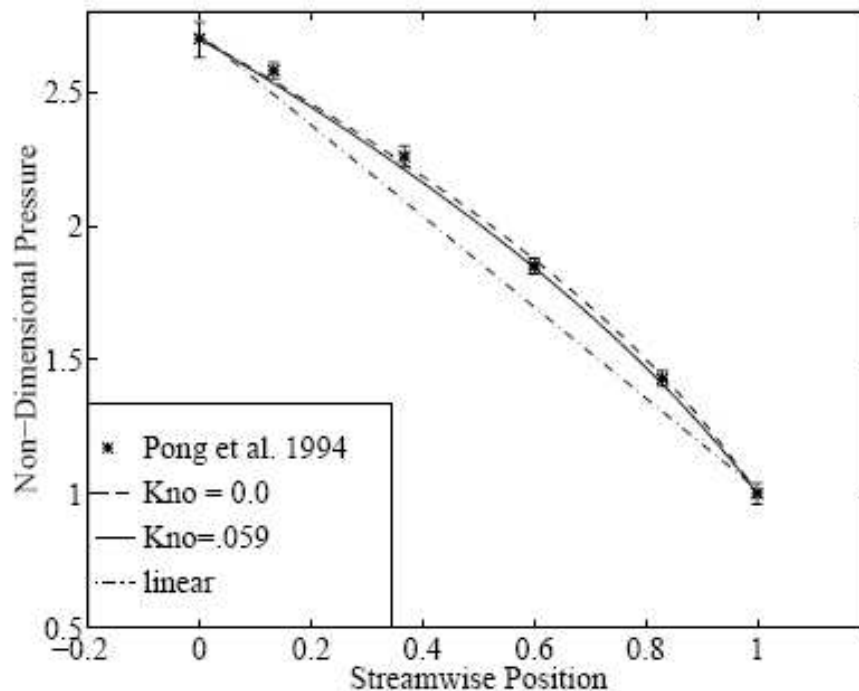
Στον παρακάτω πίνακα καταγράφονται οι συνθήκες κάτω από τις οποίες πραγματοποιήθηκε το πείραμα:

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

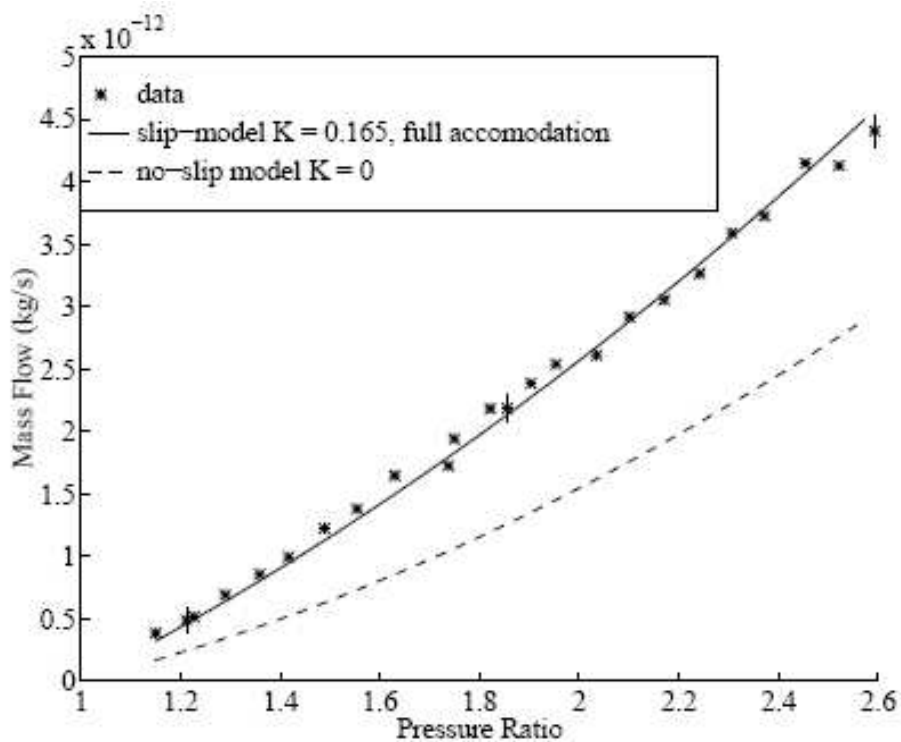
Το ρευστό που χρησιμοποιήθηκε ήταν Ήλιο.

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.

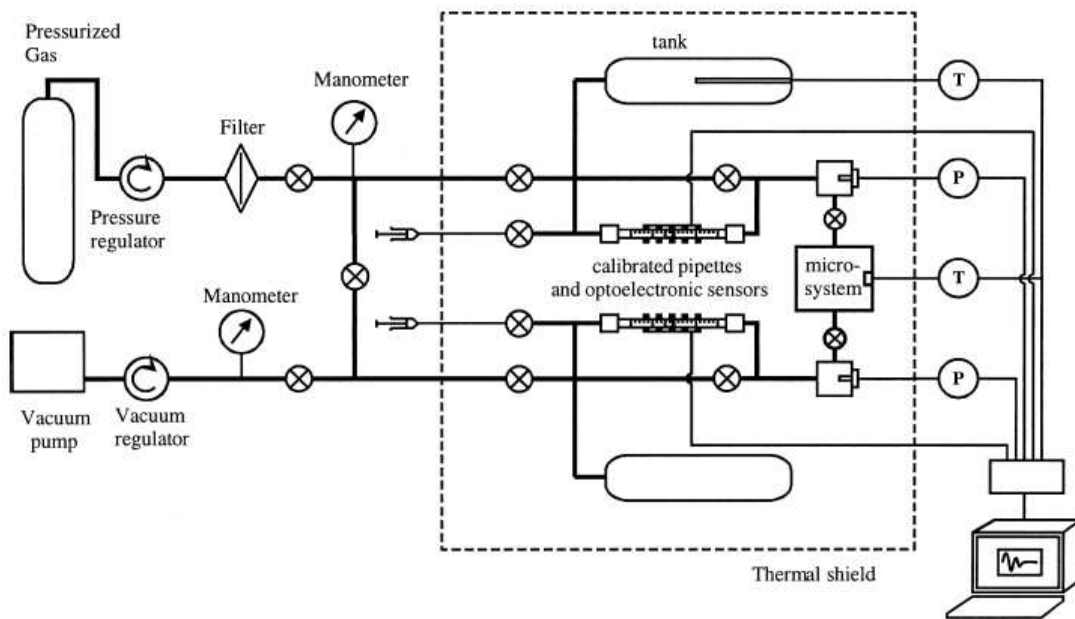


Σχήμα 4: η διανομή της πίεσης κατά μήκος του αγωγού

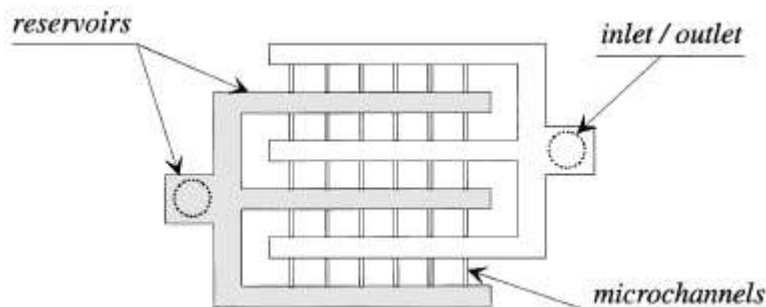


Σχήμα 5: η παροχή μάζας του ρευστού συναρτήσει του λόγου πίεσης

• 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 (βλ. σχήμα 6), ελήφθησαν μετρήσεις για τη ροή Ηλίου και Αζώτου μέσα σε μικροκανάλι ορθογωνικής διατομής, με βάθος από 4.5 ως 0.5 μm και λόγο διαστάσεων (βάθος προς πλάτος) από 1 ως 9%.



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



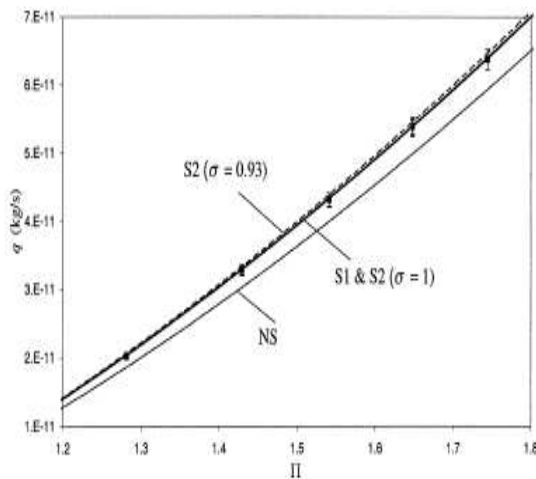
Σχήμα 7: η διαμόρφωση των μικροκαναλιών

Από τις μετρήσεις αυτές προέκυψε ότι το μοντέλο αυτό είναι ιδιαίτερώς αξιόπιστο για αέριες ροές που χαρακτηρίζονται από αριθμό Knudsen ≥ 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 $Kn = 0.05$).

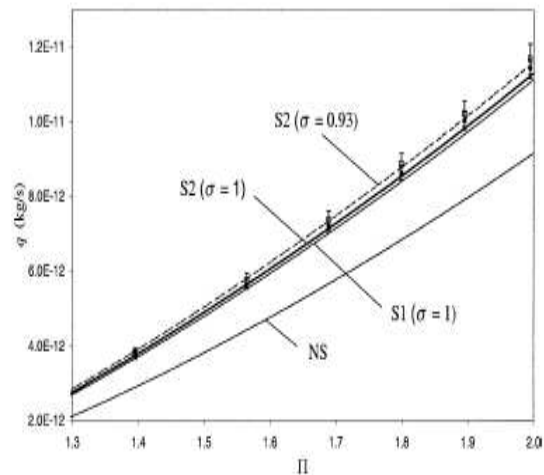
Τέλος, παρατηρήθηκε πως η βέλτιστη τιμή του συντελεστή προσαρμογής (accommodation coefficient) είναι $\sigma = 0.93$, κοινός για το Ήλιο και το Άζωτο.

Στα παρακάτω διαγράμματα δίδονται οι καμπύλες της παροχής μάζας \dot{q} συναρτήσει του λόγου πίεσης Π (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.

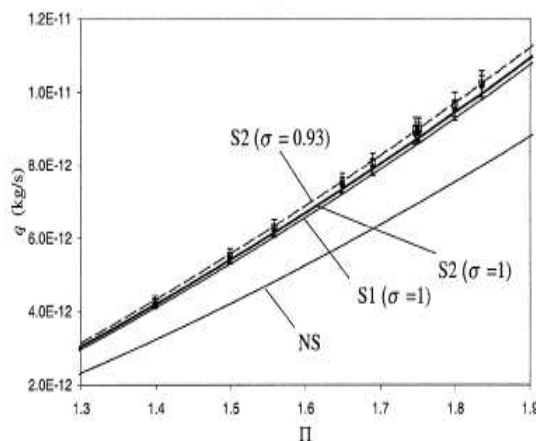
■ Μικροκανάλι βάθους $H = 1.88\mu\text{m}$



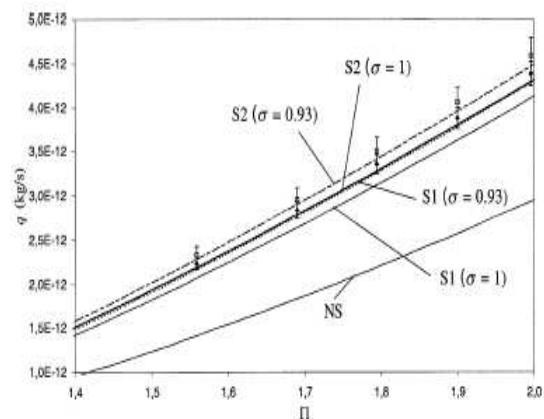
Άζωτο, $0.01 \leq Kn \leq 0.017$



Άζωτο, $0.027 \leq Kn \leq 0.053$

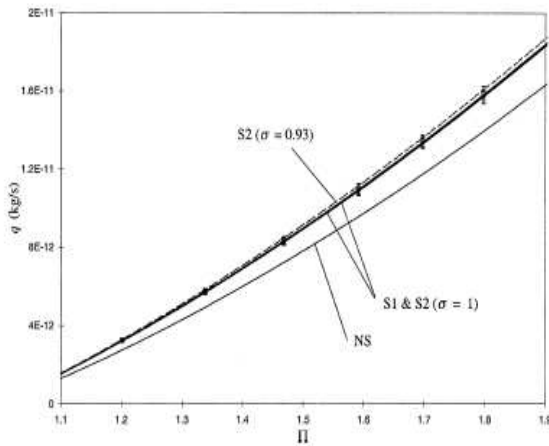


Ήλιο, $0.029 \leq Kn \leq 0.053$

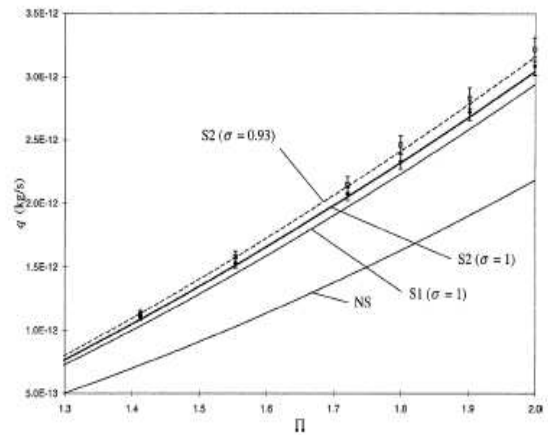


Ήλιο, $0.05 \leq Kn \leq 0.1$

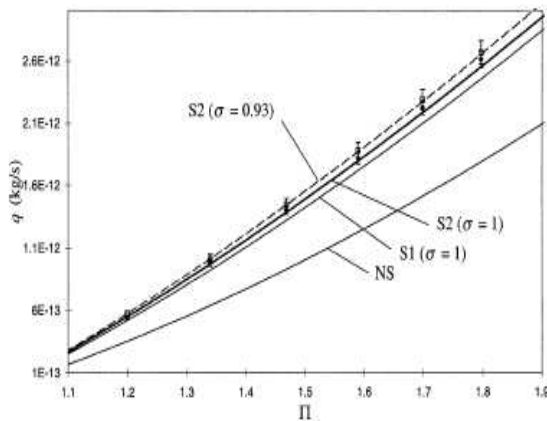
■ Μικροκανάλι βάθους $H = 1.16\mu\text{m}$



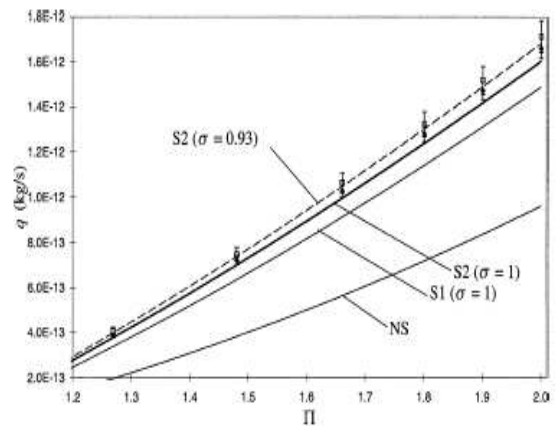
Άζωτο, $0.016 \leq Kn \leq 0.03$



Άζωτο, $0.04 \leq Kn \leq 0.09$



Ήλιο, $0.05 \leq Kn \leq 0.09$



Ήλιο, $0.1 \leq Kn \leq 0.22$

- 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.

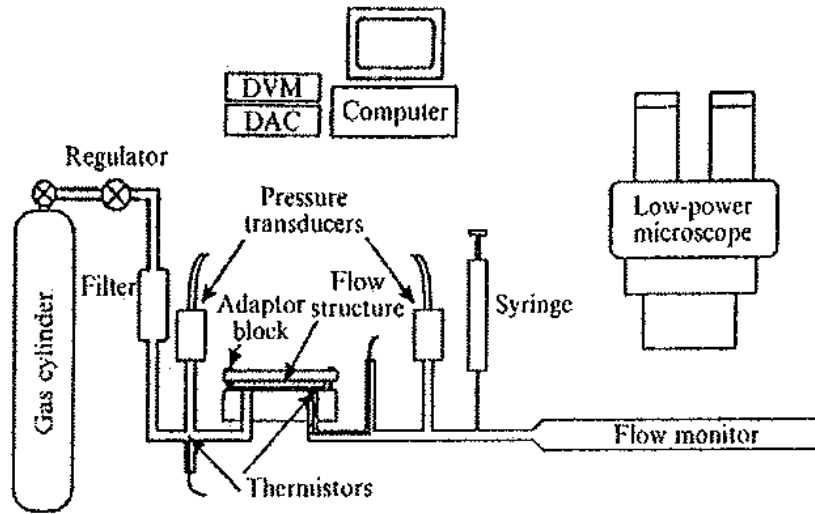


FIGURE 1. The experimental apparatus.

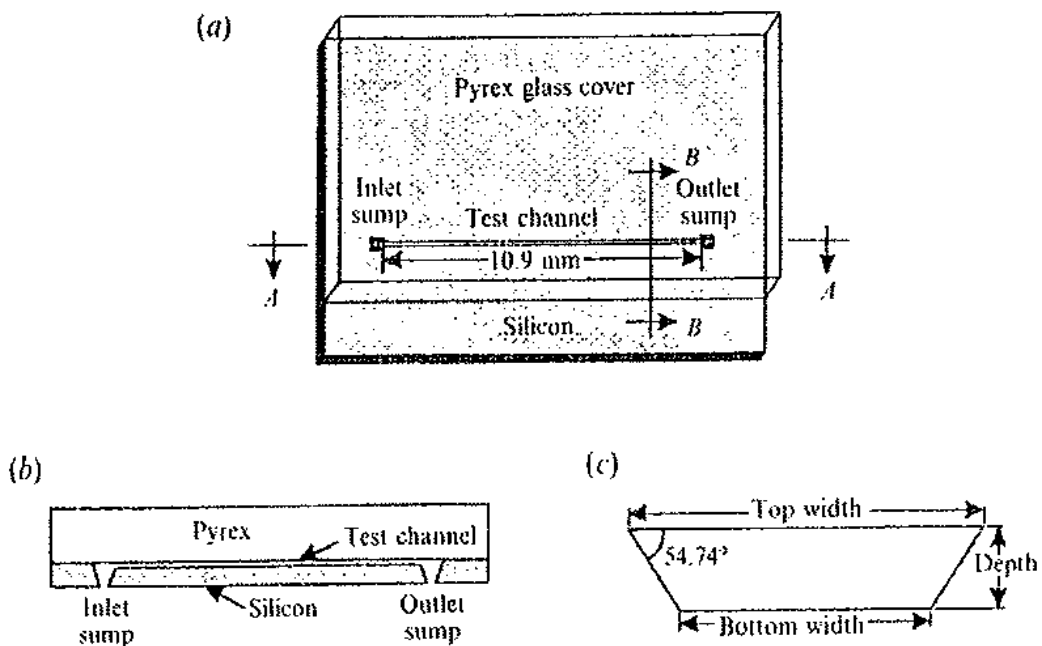


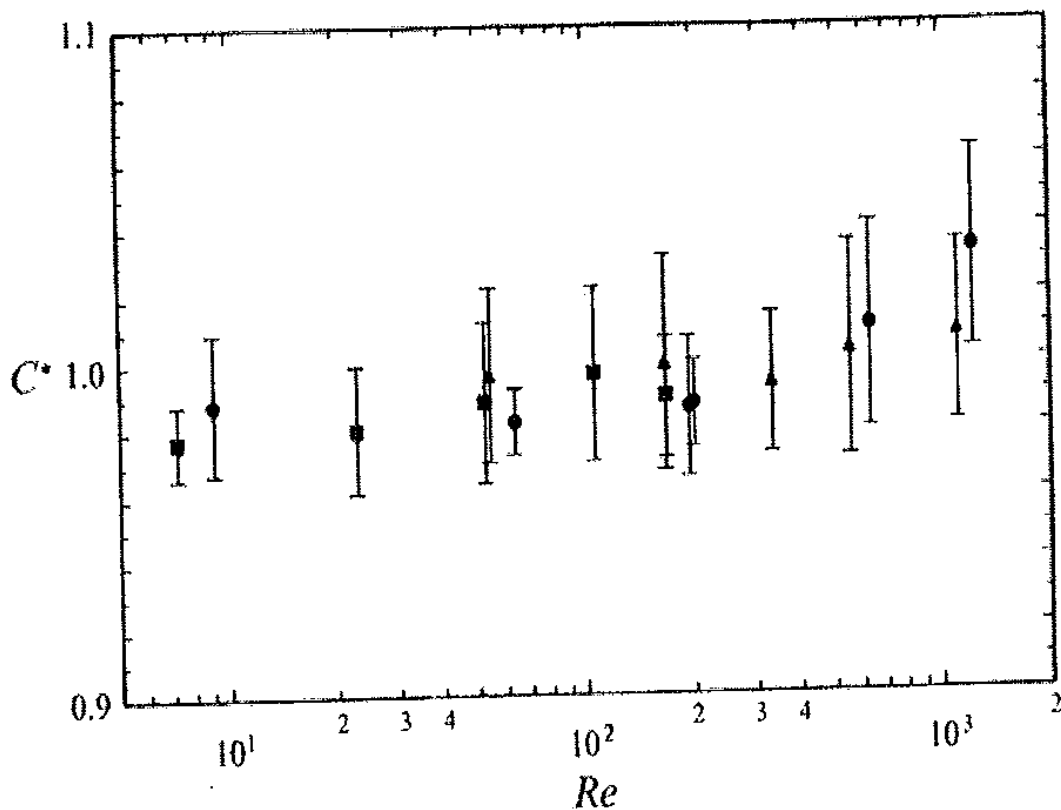
FIGURE 2. Views of a test channel microfabricated on a silicon wafer. (a) Top view. (b) Cross-section *A-A*. (c) Cross-section *B-B*.

Σχήμα 8: η πειραματική διάταξη των Harley, Huang, Bau και Zamel και όψεις του μικροκαναλιού πάνω στο δίσκο πυριτίου.

Στα παρακάτω διαγράμματα, τα αποτελέσματα του πειράματος παρουσιάζονται υπό την μορφή του λόγου C^* συναρτήσει του αριθμού Reynolds:

ο οποίος παίρνει την τιμή $C^* = 1$, όταν ο πειραματικά μετρούμενος συντελεστής τριβής f ταυτίζεται με τη θεωρητική εκτίμησή του.

Στο σχήμα 9 παρουσιάζονται οι τιμές του λόγου C^* συναρτήσει του αριθμού Reynolds για κανάλι βάθους $11.04\mu\text{m}$, με την πίεση στην είσοδο του να κυμαίνεται από 0.2 ως 2.1 MPa ενώ στην έξοδο του να είναι ατμοσφαιρική. Η θεωρητική τιμή του αριθμού Poiseuille υπολογίζεται, με βάση την συνθήκη μη ολίσθησης στο στερεό όριο ($Kn=0$).

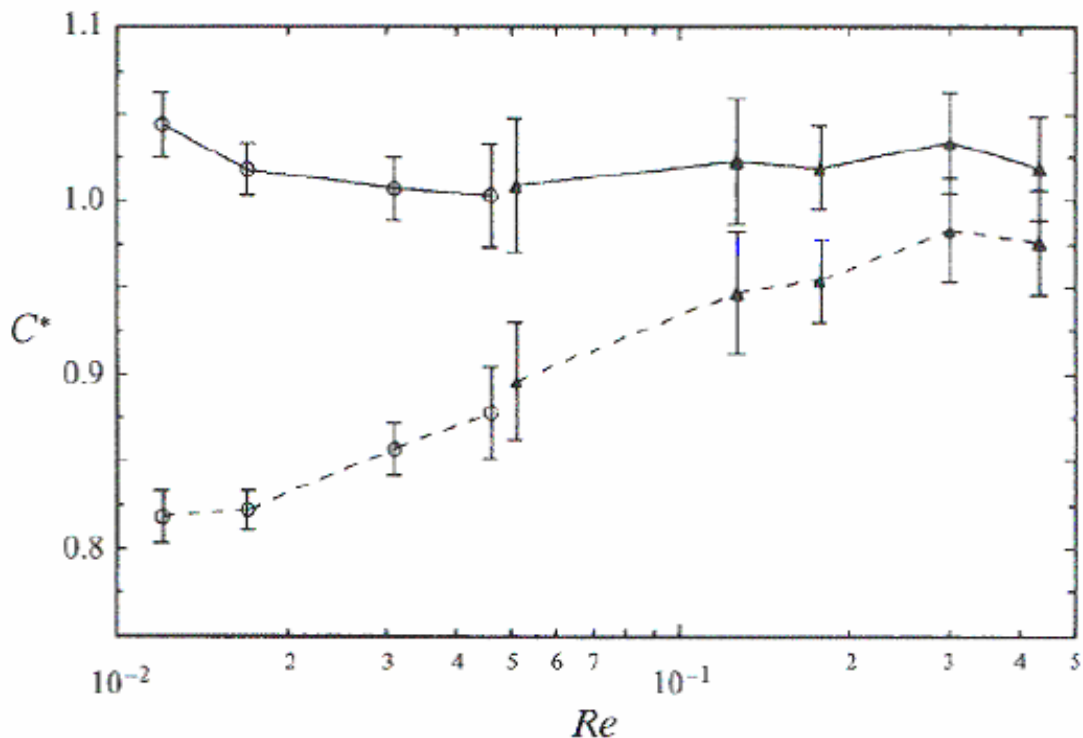


Σχήμα 9: ο λόγος C^* συναρτήσει του αριθμού Reynolds για ●Άζωτο, ■Ήλιο, ▲Αργό

Στο σχήμα 10 παρουσιάζονται οι τιμές του λόγου C^* συναρτήσει του αριθμού Reynolds για κανάλι βάθους 0.51 μm , με την πίεση στην έξοδο του να κυμαίνεται από 1.1 ως 3.4 MPa, ενώ στη έξοδο του να είναι ατμοσφαιρική.

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 ($0.004 \leq Kn \leq 0.373$).



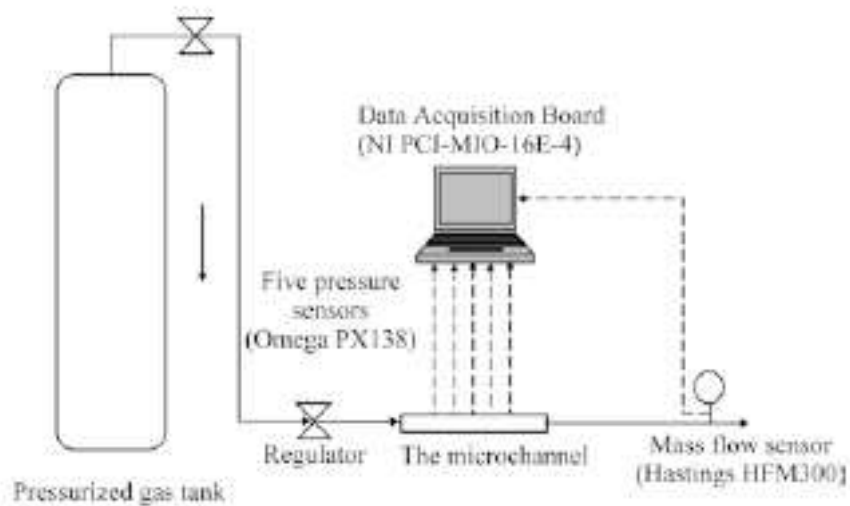
Σχήμα 10: ο λόγος C^* συναρτήσει του αριθμού Reynolds για ▲ Άζωτο, ○ Ήλιο

- Το 2004, οι **J.Jang και S.T.Wereley**, 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 σε 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.

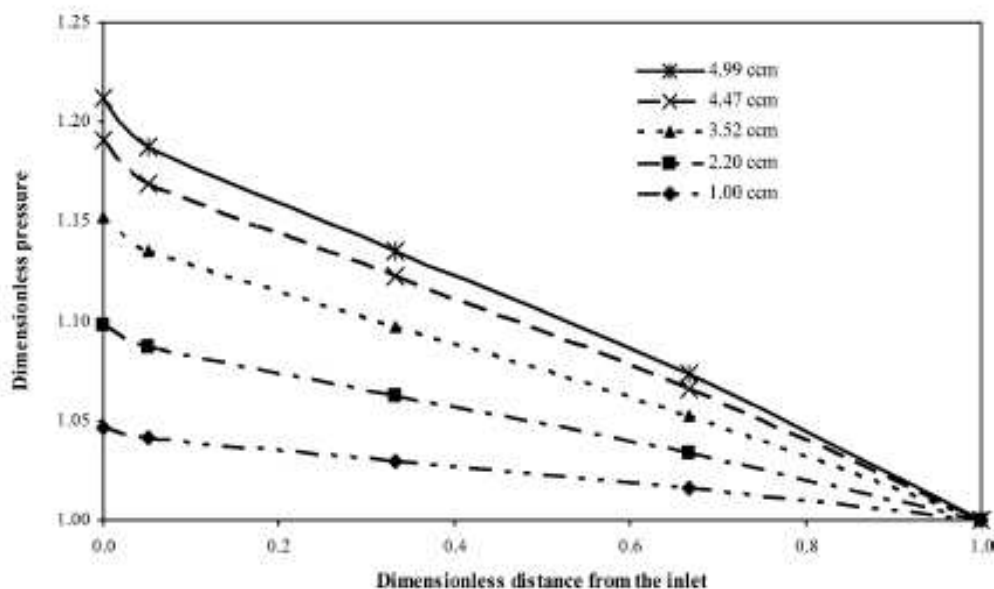
Παρακάτω φαίνεται σχηματικά η πειραματική διάταξη, με τη βοήθεια της οποίας ελήφθησαν οι μετρήσεις και οι συνθήκες κάτω από τις οποίες εκτελέστηκε το πείραμα:



Σχήμα 11: η πειραματική διάταξη

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

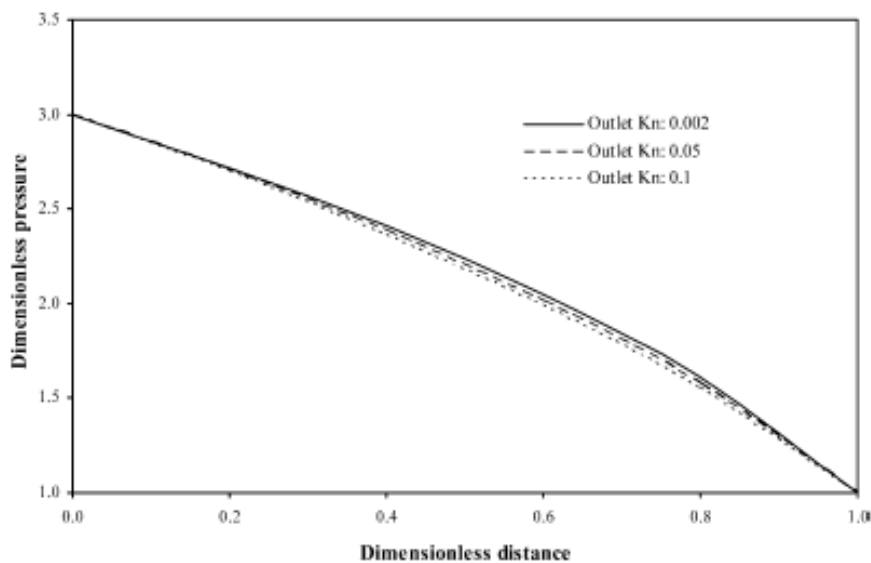
Στο σχήμα 12 παρουσιάζεται η πειραματικά μετρούμενη διανομή της πίεσης καθ' όλο το μήκος μικροκαναλιού ορθογωνικής διανομής για διαφορετικές τιμές της παροχής μάζας. Η απότομη πτώση που εμφανίζεται στην αρχή του πειράματος, αποδίδεται στο μεταβατικό φαινόμενο στην είσοδο του καναλιού. Από τη μορφή των καμπυλών παρατηρούμε μια ελαφρά απόκλιση από τη γραμμική συμπεριφορά.



Σχήμα 12: η πειραματικά μετρημένη διανομή της πίεσης κατά μήκος μικροκαναλιού

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

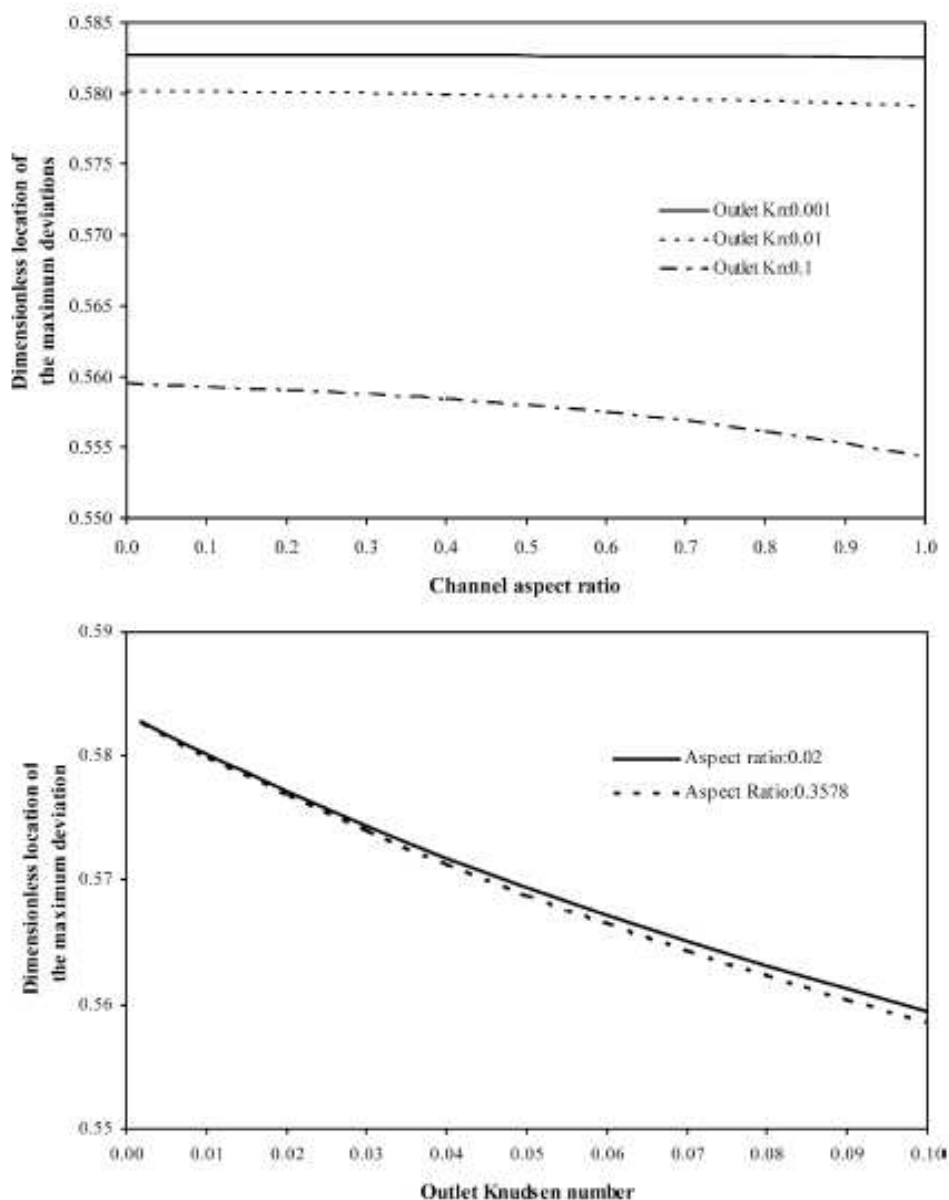
Στο σχήμα 13 παρουσιάζεται η θεωρητική διανομή της πίεσης κατά μήκος αγωγού με λόγο διαστάσεων 0.36 και λόγο πίεσης 3.0, για διάφορες τιμές του αριθμού Knudsen.



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%.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:

Η ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

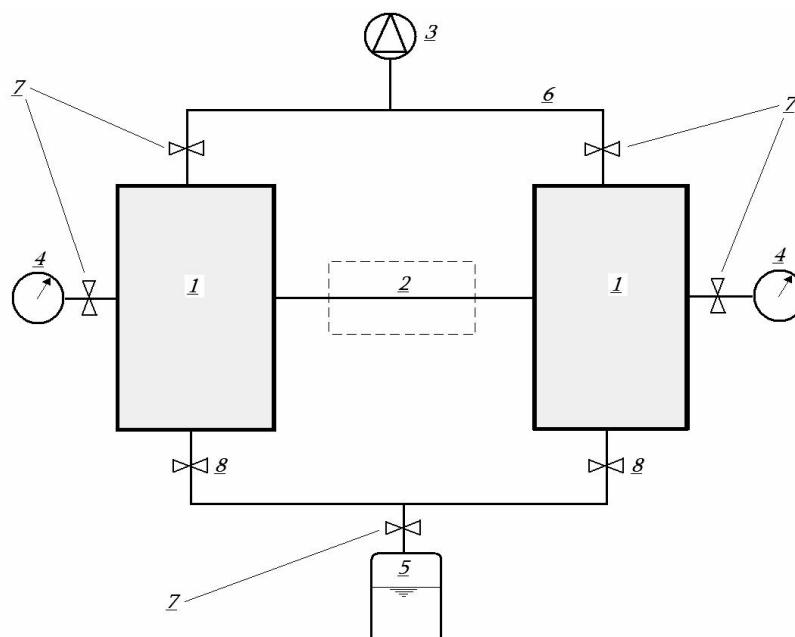
2. Η πειραματική διάταξη

2.1 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 κατά μήκος μικροαγωγών που έχουν χαρακτεί 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.

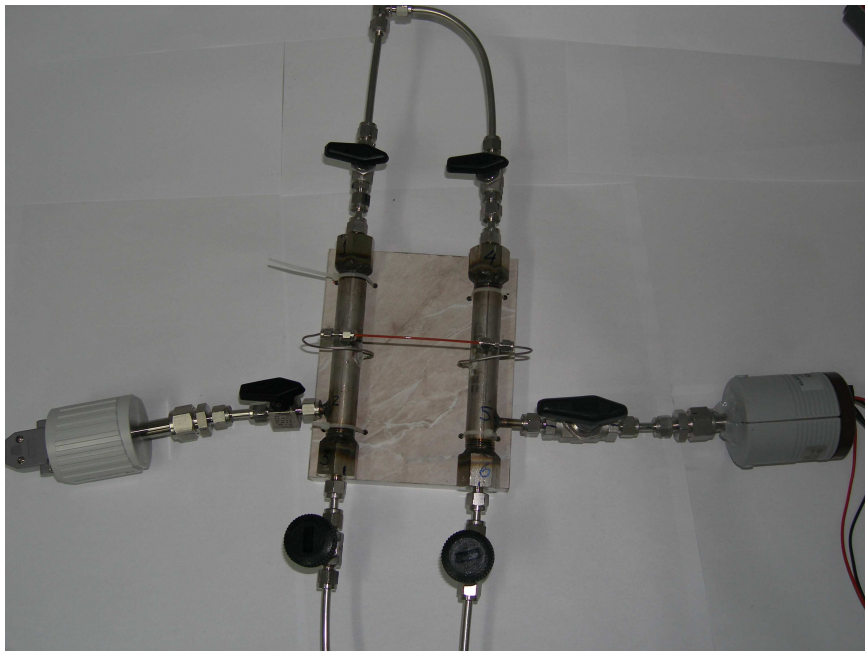
Παρακάτω παρουσιάζεται ένα σχηματικό διάγραμμα της διάταξης :



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

2.2 Η μορφή της διάταξης

Η πειραματική μας διάταξη έχει τη μορφή που φαίνεται στο σχήμα 1. Στη θέση του κόκκινου μικροαγωγού υπάρχει η πλάκα πυριτίου στην οποία έχουν εγχαρακτεί καταλλήλως τα μικροκανάλια (βλ. παράρτημα 2).



Σχήμα 1 : η πειραματική διάταξη

Στο σχήμα 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 βάνα 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.

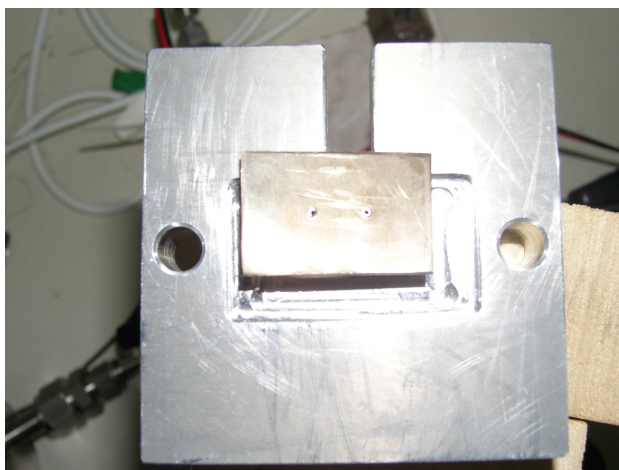
Στην είσοδο κάθε δεξαμενής έχει τοποθετηθεί περιστροφική βαλβίδα για την ρύθμιση της παροχής του ρευστού σ' αυτή.

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 (σχήμα 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 (σχήμα 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 (σχήμα 3). 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 μια οπή της πλάκας πυριτίου στην άλλη.



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



Σχήμα 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 στοιχεία της πειραματικής διάταξης.

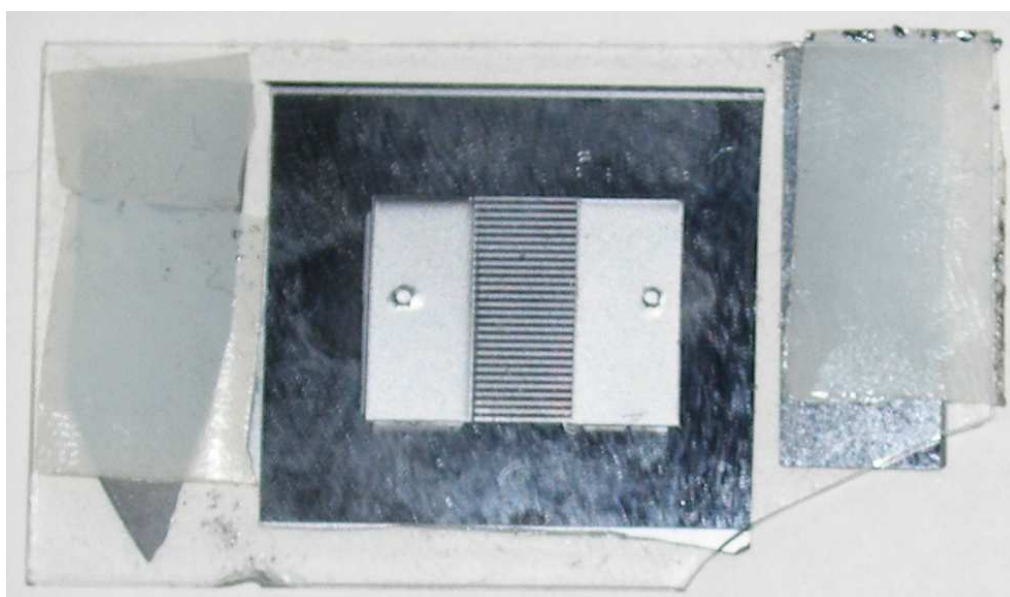
1. Οι δεξαμενές του αερίου:

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



Σχήμα 4: οι δεξαμενές του αερίου

2. Χρησιμοποιήθηκαν δυο διαφορετικές πλάκες πυριτίου



σχήμα α



σχήμα β

Σχήμα 5 : οι δυο πλάκες πυριτίου σε φωτογραφία

Στην πρώτη πλάκα (σχήμα α) εγχαράκτηκαν 27 μικροκανάλια ορθογωνικής διατομής με μήκος $L=4750\mu\text{m}$, πλάτος $W=250\mu\text{m}$ και βάθος $H=30\mu\text{m}$.

Στην δεύτερη πλάκα (σχήμα β) εγχαράκτηκαν 19 μικροκανάλια ορθογωνικής διατομής με μήκος $L=4880\mu\text{m}$, πλάτος $W=285\mu\text{m}$ και βάθος $H=20\mu\text{m}$.

Όπως διακρίνουμε και στις φωτογραφίες οι πλάκες πυριτίου προστατεύονται από πάνω με γυαλί, το οποίο κολλάει πάνω στην πλάκα πυριτίου με ειδική κολλητική ουσία, κατόπιν πίεσης.

Η τεχνοτροπία αυτή, όπως θα δούμε και παρακάτω, πιθανόν να επηρεάζει αρνητικά τα αποτελέσματα μας, αφού είναι σχετικά εύκολο το γυαλί να μην κολλήσει καλά πάνω στο πυρίτιο, οπότε θα έχουμε διαρροές, ή ακόμα μπορεί ποσότητα από την κολλητική ουσία να εισχωρήσει μέσα στα μικροκανάλια και να τα φράξει.

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

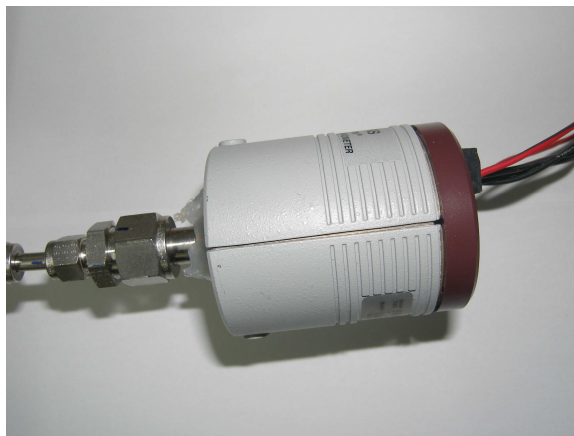


Σχήμα 6: Leybold Cerevac Transmitter CTR90

> **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.



Σχήμα 7: MKS Baratron 622A

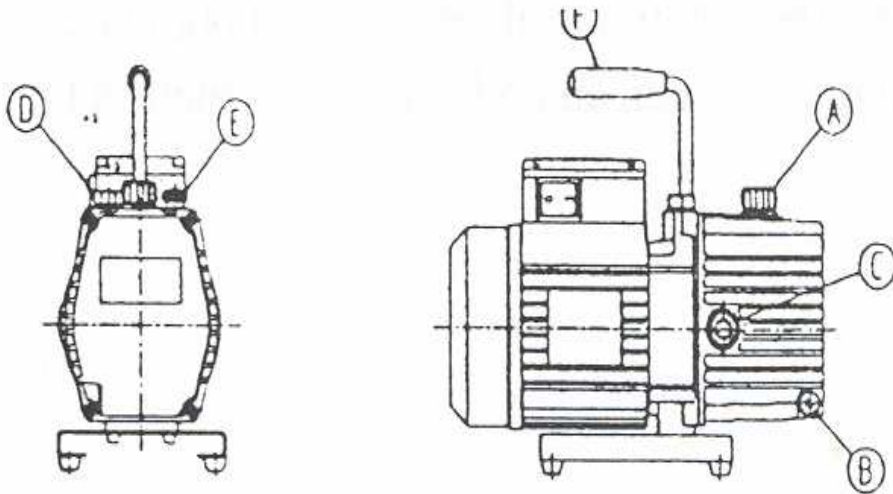


Σχήμα 8: το τροφοδοτικό των δύο αισθητήρων πίεσης

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 m³/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**» (βλ. Παράρτημα 5^ο) 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 και το Ήλιο, τα οποία είναι μακράν πιο αδρανές από τον ατμοσφαιρικό αέρα κι έτσι ελαχιστοποιείται το ενδεχόμενο αλληλεπιδράσεις τους με τις μεταλλικές επιφάνειες που έρχονται σε επαφή. Το Αργό και το Ήλιο τα προμηθευτήκαμε σε υγρή μορφή, υπό πίεση 200bar, μέσα σε μεταλλικές φιάλες.

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».



Σχήμα 9 : η φιάλη με το Αργό

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3. Πειραματικά αποτελέσματα

Οι μετρήσεις που συλλέχθηκαν στο εργαστήριο κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, αφορούν δυο διαφορετικές πλάκες πυριτίου. Στην πρώτη πλάκα ο αριθμός των καναλιών είναι $N=27$ το μήκος τους $L=4750\mu\text{m}$, το πλάτος της ορθογωνικής διατομής $W=250\mu\text{m}$ και το βάθος τους $H=30\mu\text{m}$. Στη δεύτερη πλάκα είναι χαραγμένα 19 κανάλια ($N=19$), με μήκος $L=4880\mu\text{m}$, πλάτος $W=285\mu\text{m}$ και βάθος $H=20\mu\text{m}$.

Με P_{leyb} ονομάζουμε τη διαφορά πίεσης που μετράμε κατά την εισαγωγή του αερίου από το μανόμετρο LEYBOLD, ενώ αντίστοιχα η P_{mks} αναφέρεται στην πίεση που μετρά το μανόμετρο MKS κατά την έξοδο. Κύριο μέλημά μας είναι να πάρουμε ένα ικανοποιητικό εύρος μετρήσεων για την πίεση εισόδου, ξεκινώντας περίπου από τα 100 Torr και ρίχνοντας την ακόμα και κάτω από 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, για συγκεκριμένη αρχική διαφορά πίεσης μεταξύ των δεξαμενών και για συγκεκριμένο αέριο). Βασικά μακροσκοπικά μεγέθη, όπως η πίεση εισόδου και εξόδου, η παροχή μάζας, η ταχύτητα του ρευστού στο μικροκάναλι 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 πιο 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.

3.1 Αναλυτική παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων

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

Αργό ως εργαζόμενο μέσο.

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

ΜΕΤΡΗΣΗ	Pleyb (Pa), (torr)	Pmks (Pa), (torr)	K_n
Test 1	13031,34 (97,98)	337,022 (2,534)	0,033969
Test 2	11089,54 (83,38)	202,293 (1,521)	0,040214
Test 3	10053,47 (75,59)	224,371 (1,687)	0,044175
Test 4	8512 (64)	422,541 (3,177)	0,050815
Test 5	6397,3 (48,1)	354,046 (2,662)	0,067244
Test 6	5101,88 (38,36)	108,4216 (0,8152)	0,087133
Test 7	4334,47 (32,59)	80,332 (0,604)	0,102835
Test 8	3080,28 (23,16)	81,1832 (0,6104)	0,143614
Test 9	2327,5 (17,5)	63,84 (0,48)	0,189896
Test 10	1581,37 (11,89)	54,6896 (0,4112)	0,277694
Test 11	1134,224 (8,528)	48,7312 (0,3664)	0,386078
Test 12	709,688 (5,336)	48,7312 (0,3664)	0,59887

ΠΙΝΑΚΑΣ 1

Όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα, αυτό που μας ενδιαφέρει και προσπαθούμε να πετύχουμε είναι η σταδιακή μείωση της πίεσης στην είσοδο της μάσκας (P_{leyb}), με την πίεση εξόδου (P_{mks}) να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα βασικά μακροσκοπικά μεγέθη, όπως η πίεση εισόδου και εξόδου, η παροχή μάζας, η ταχύτητα του ρευστού στο μικροκανάλι καθώς και η σταθερά Re του ρευστού, συναρτήσει του χρόνου και της διαφοράς πίεσης DP μεταξύ των δεξαμενών.

Η διεργασία που ακολουθήσαμε 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 δυο ακραία σημεία, έστω P_{leyb1} και P_{leyb2} . Βρίσκουμε τη μέση τιμή τους:

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

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

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

Έτσι το DP προκύπτει ως η διαφορά: $DP = P_{mleyb} - P_{mmks}$

Η παροχή μάζας με την ταχύτητα σχετίζονται με τη σχέση $\dot{M} = \frac{P}{R \cdot T} \cdot u \cdot A$ στην οποία $P = P_m = \frac{P_{mleyb} + P_{mmks}}{2}$, με τα P_{mleyb} και P_{mmks} , όπως ορίστηκαν παραπάνω, A είναι το εμβαδόν της ορθογωνικής διατομής, η θερμοκρασία είναι σταθερή $T=293K$ και η σταθερά $R = 208 \frac{m^2}{s^2k}$ για το Αργό, $R=287$ για τον αέρα και $R=2078,6$ για το Ήλιο. Έτσι, γνωρίζοντας την παροχή μάζας και λύνοντας ως προς την ταχύτητα, έχουμε τη μεταβολή της με το DP (σχήμα 6).

Ο αριθμός Re προκύπτει από τη σχέση:

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

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

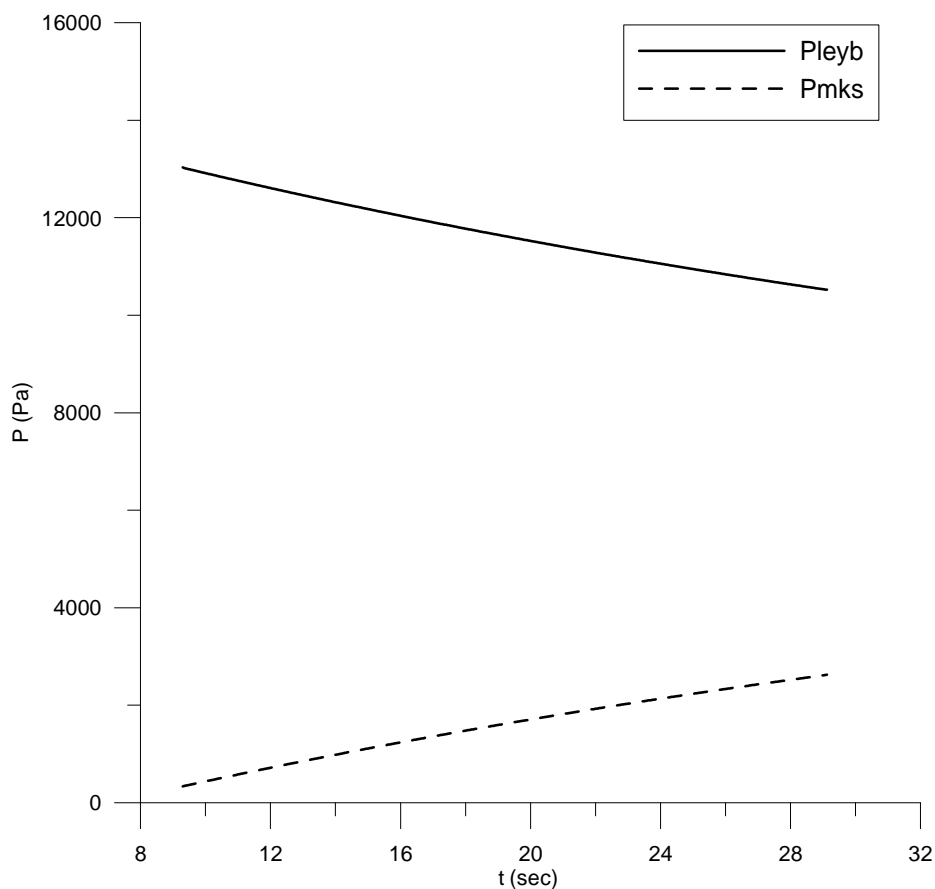
$$\rho = \rho_m = \frac{P_m}{R \cdot T}$$

με μ συμβολίζεται η δυναμική συνεκτικότητα του αερίου, ενώ για την υδραυλική διατομή D_h ισχύει ο τύπος:

$$D_h = \frac{4A}{S}$$

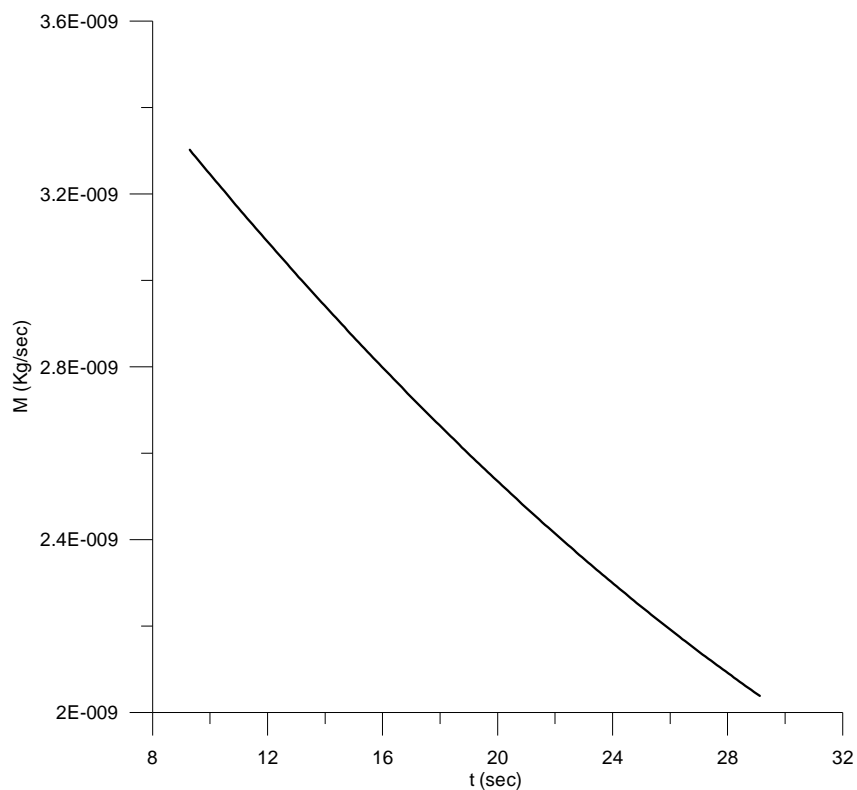
με A το εμβαδόν της ορθογωνικής διατομής και S την περίμετρο της.

ΜΕΤΡΗΣΗ	Pleyb (Pa), (torr)	Pmks (Pa), (torr)	Kn
Test 1	13031,34 (97,98)	337,022 (2,534)	0,033969

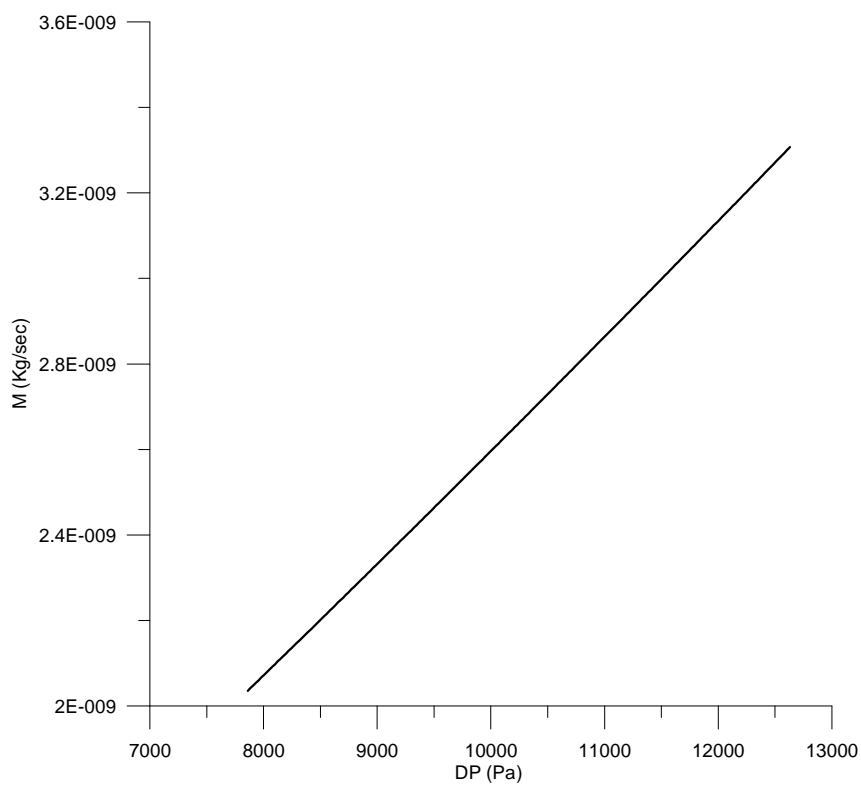


σχήμα 1

Όπως περιμέναμε και φαίνεται από τα σχήματα 1, η πίεση εισόδου μειώνεται καθώς περνάει ο χρόνος σε αντίθεση με την πίεση στην έξοδο η οποία αυξάνεται.



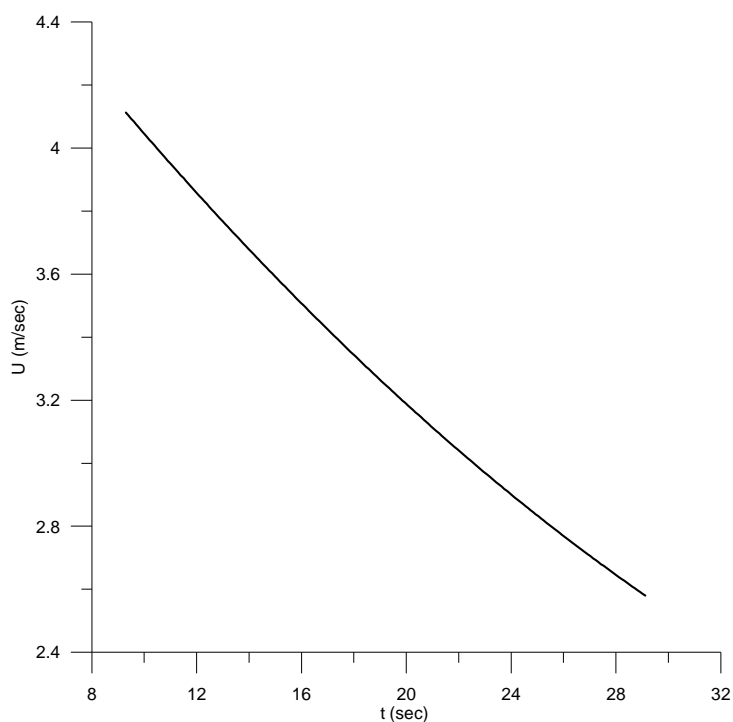
σχήμα 2



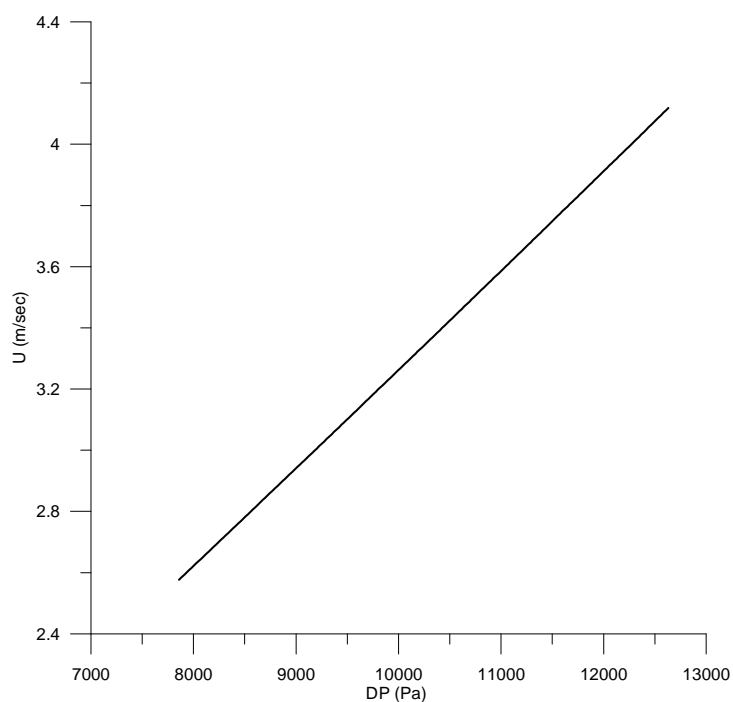
σχήμα 3

Από το σχήμα 2 φαίνεται το αναμενόμενο, ότι δηλαδή η παροχή μάζας ελαττώνεται καθώς περνάει ο χρόνος, αφού η διαφορά πίεσης στα άκρα του μικροαγωγού ελαττώνεται.

Από το σχήμα 3 προκύπτει πως η παροχή μάζας M συσχετίζεται γραμμικά με τη διαφορά πίεσης DP , μεταξύ εισόδου και εξόδου.

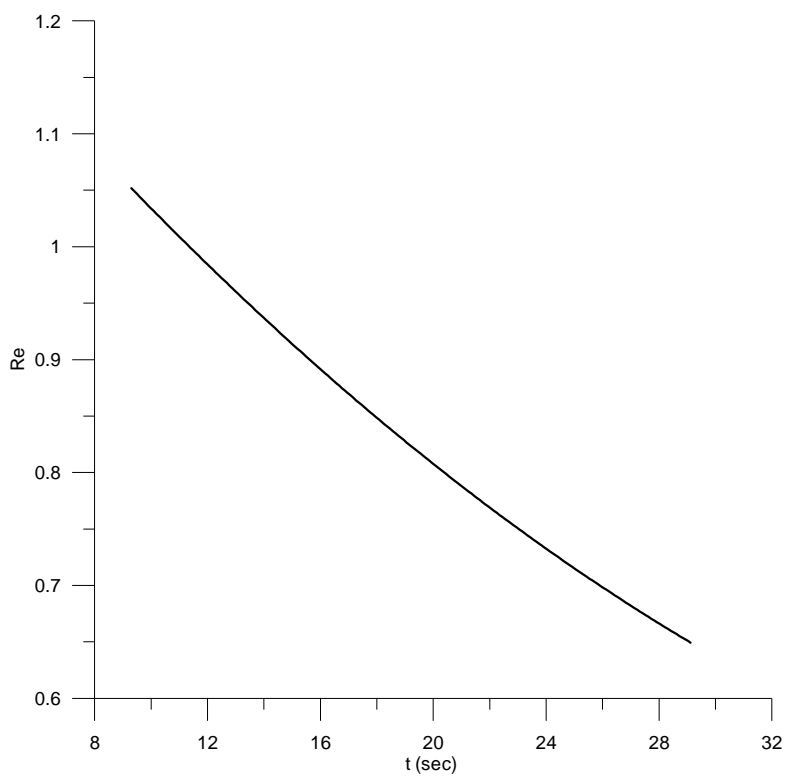


σχήμα 4

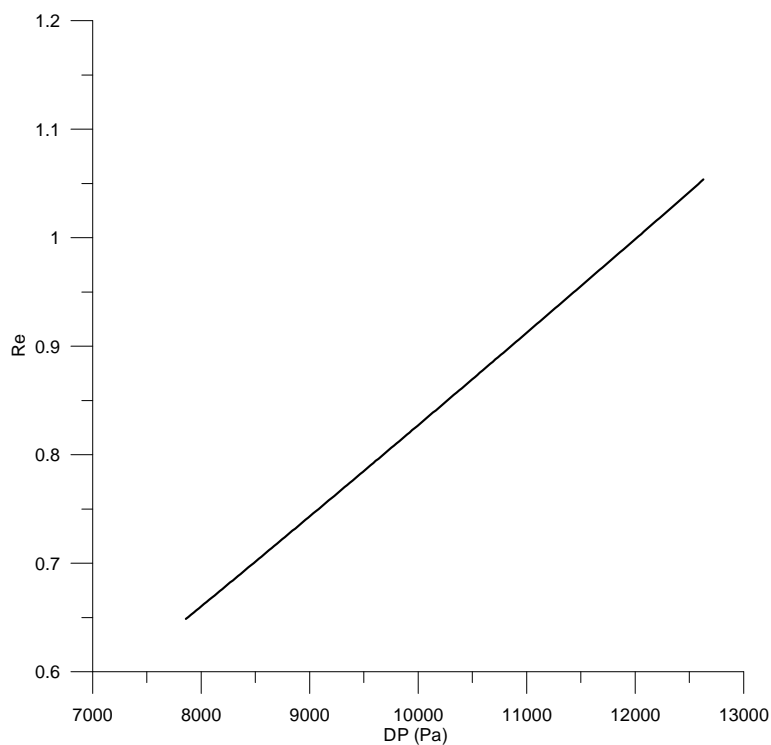


σχήμα 5

Στα σχήματα 4 και 5 παρατηρούμε, όπως άλλωστε ήταν αναμενόμενο, ότι με την πάροδο του χρόνου όπως και η παροχή μάζας έτσι και η ταχύτητα ελαττώνεται συνεχώς, καθώς η διαφορά πίεσης ελαττώνεται.



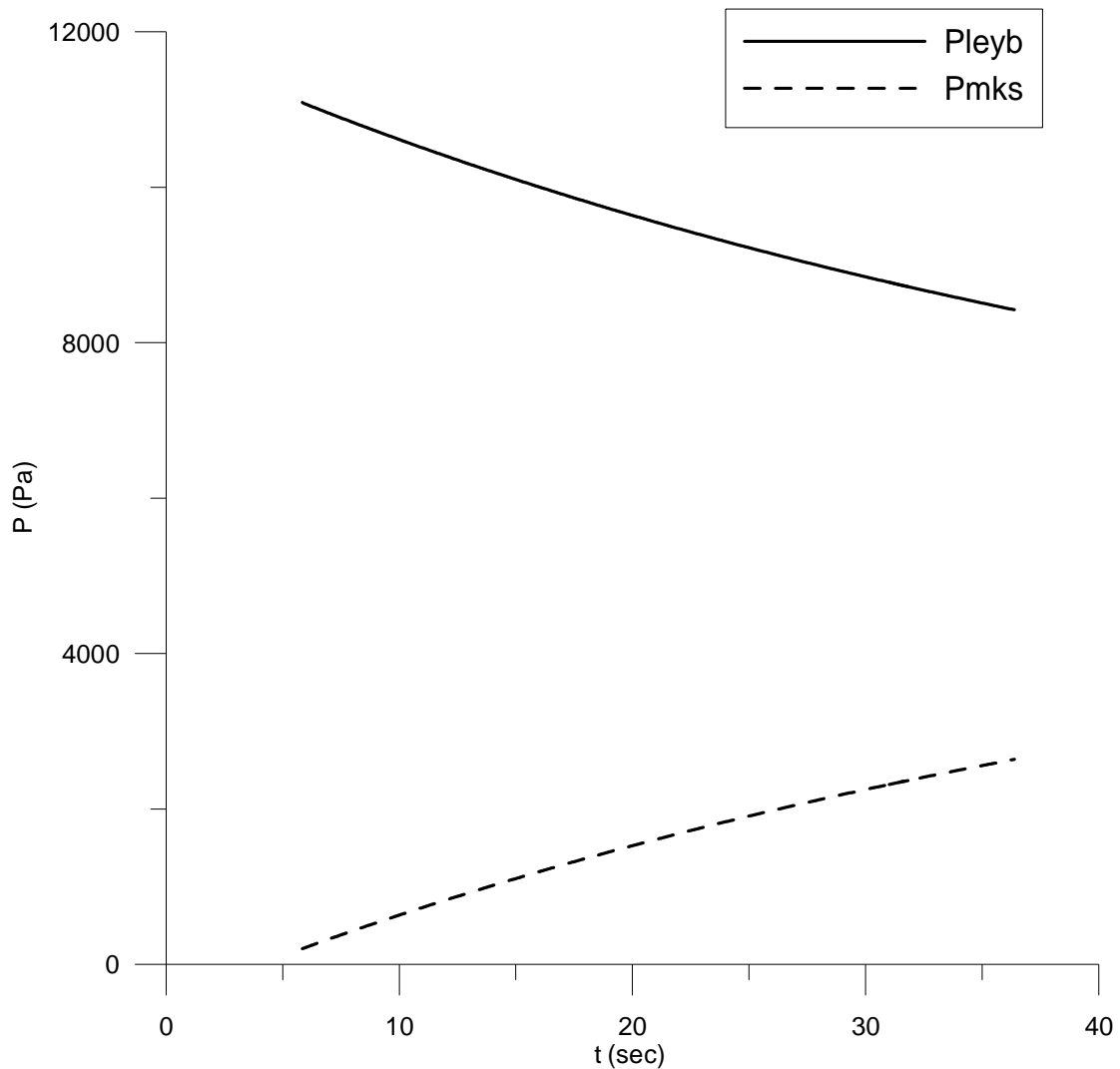
σχήμα 6



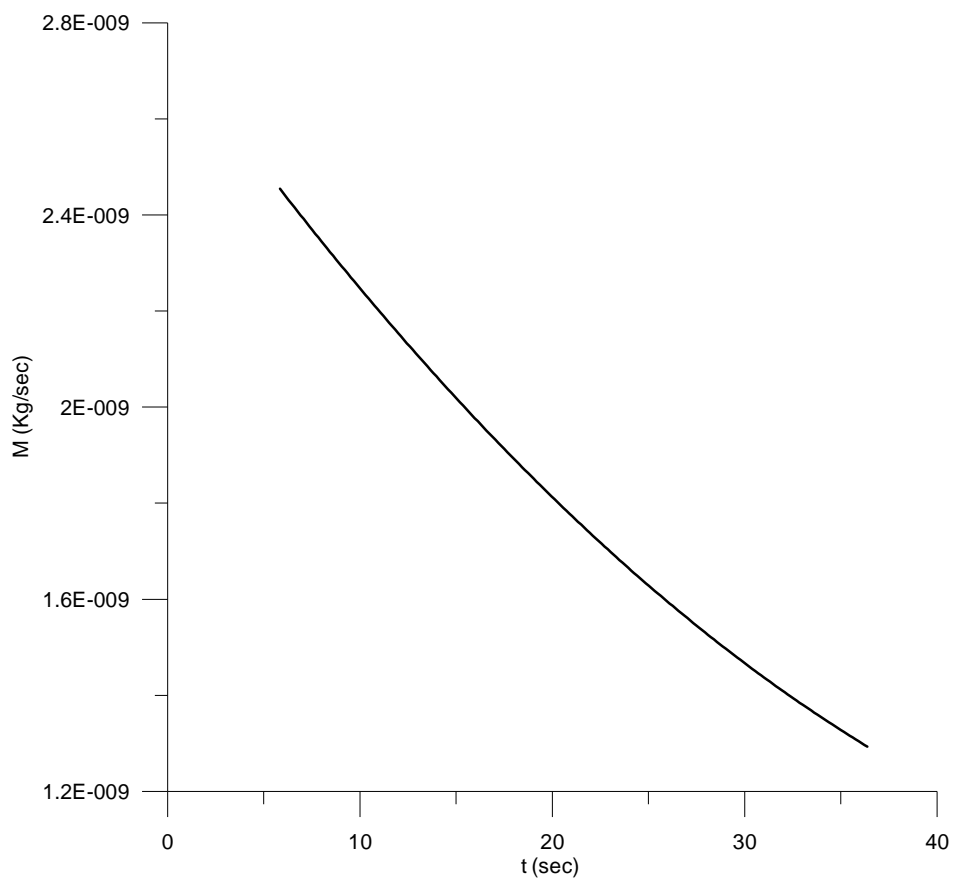
σχήμα 7

Τα αποτελέσματα στις επόμενες περιπτώσεις θα παρουσιάζονται συνοπτικότερα, καθότι ως σχόλια ισχύουν όσα ελέχθησαν στο προηγούμενο πείραμα.

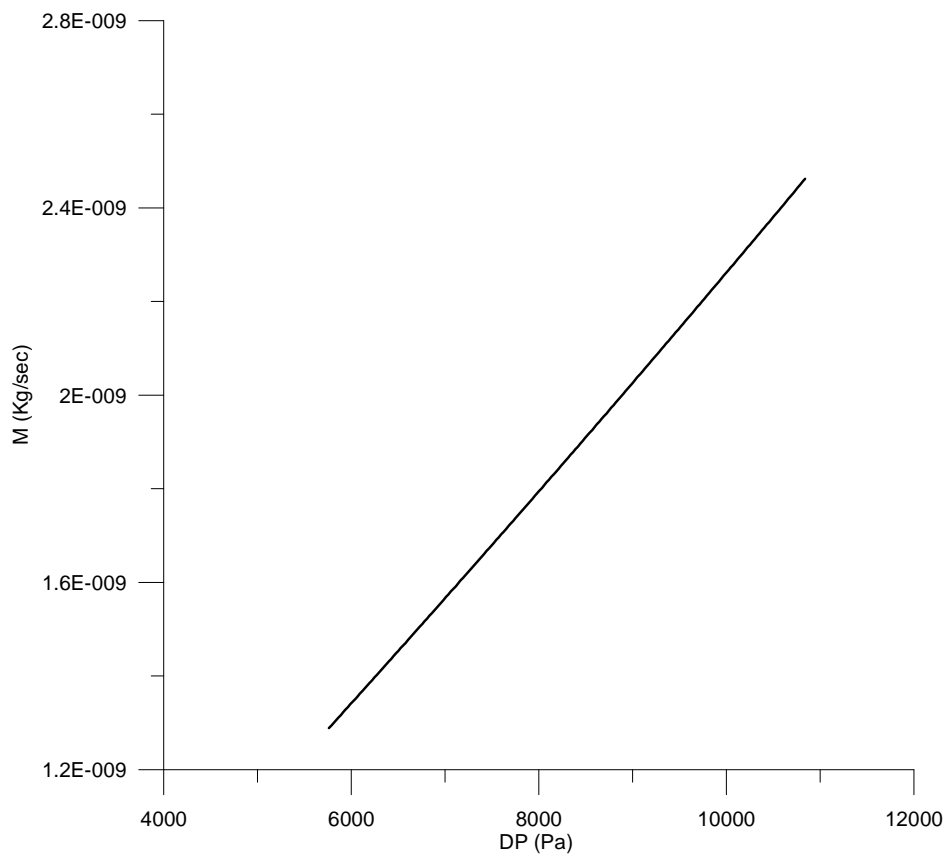
ΜΕΤΡΗΣΗ	Pleyb (Pa), (torr)	Pmks (Pa), (torr)	Kn
Test 2	11089,54 (83,38)	202,293 (1,521)	0,040214



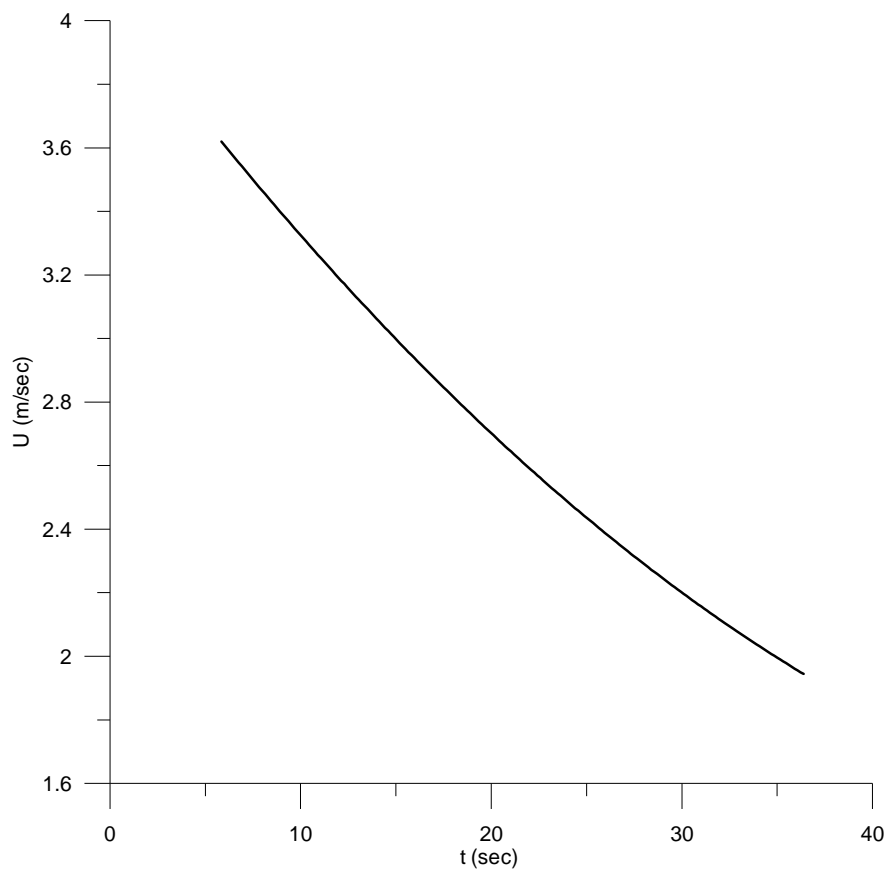
σχήμα 1



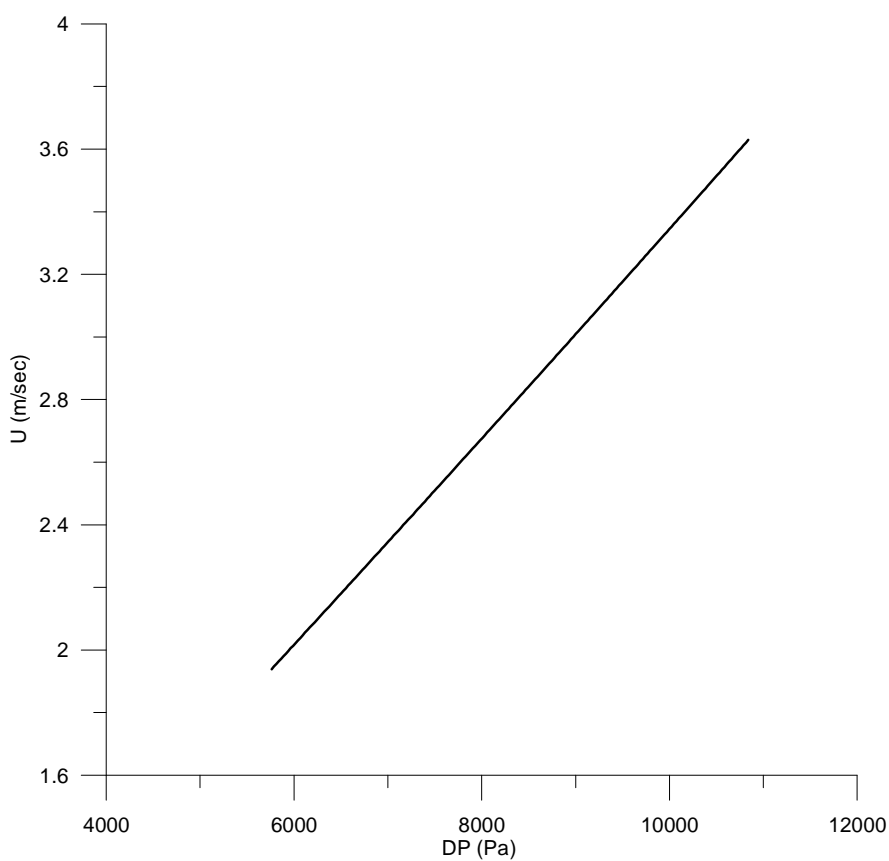
σχήμα 2



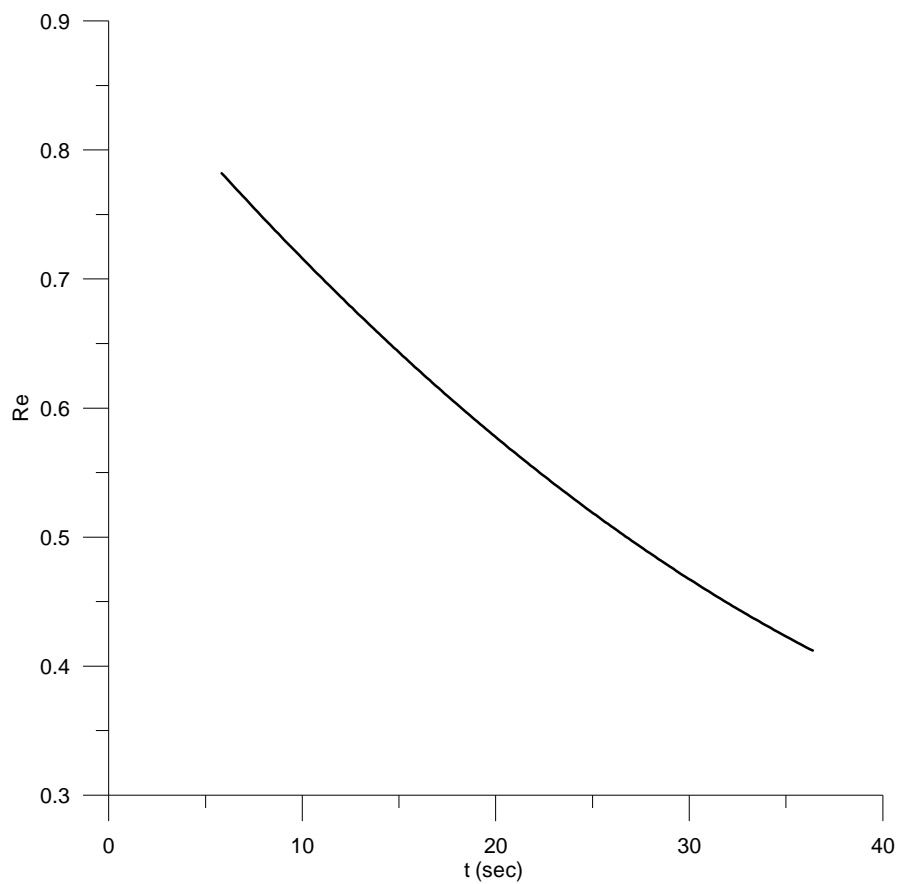
σχήμα 3



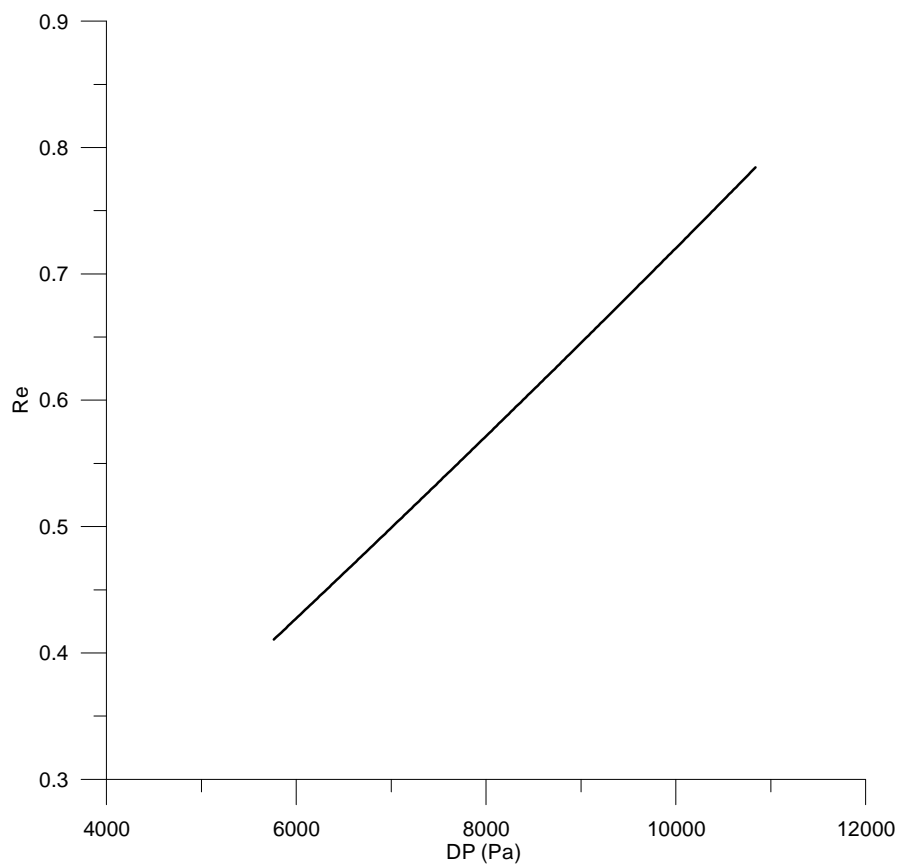
σχήμα 4



σχήμα 5

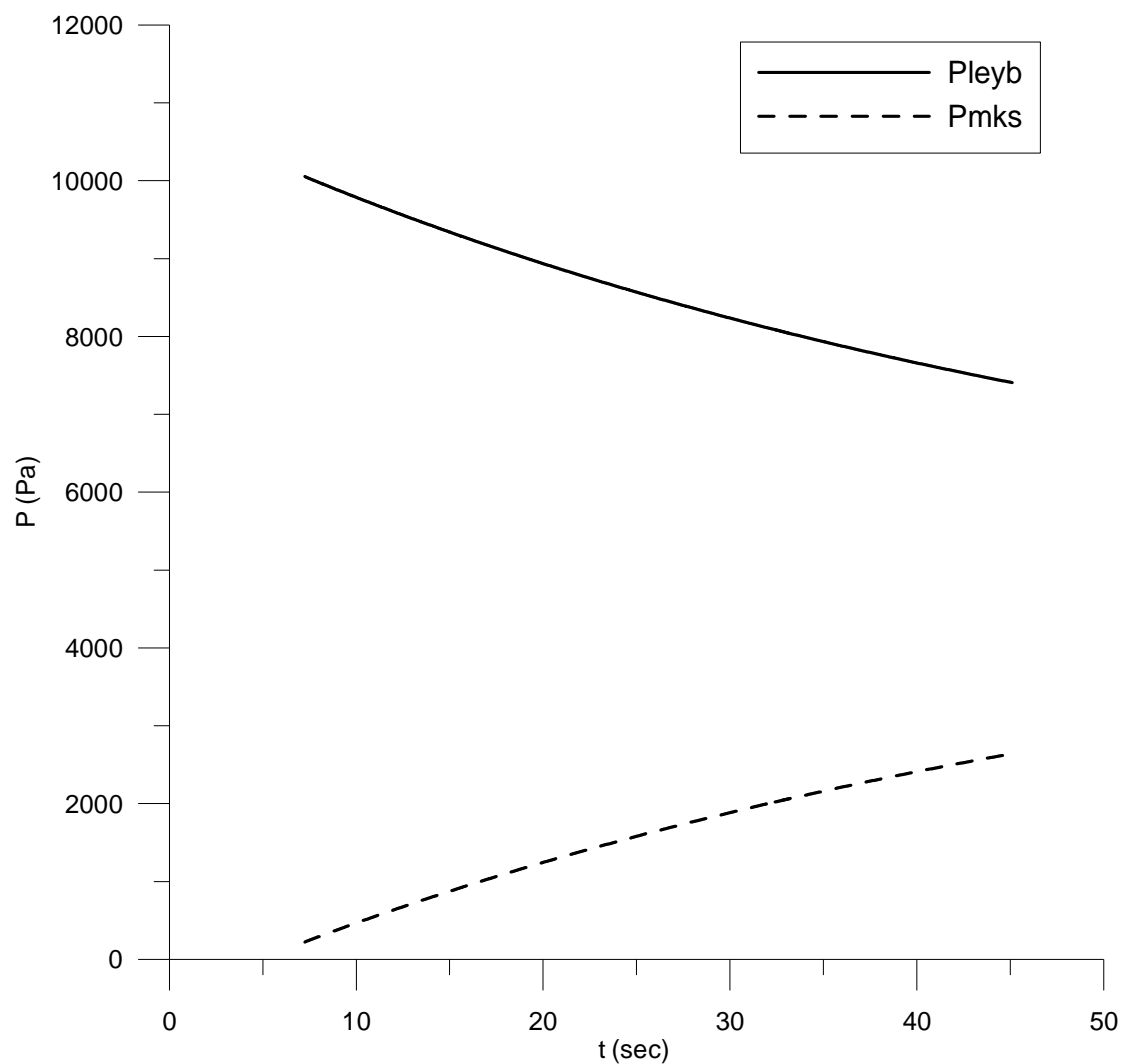


σχήμα 6

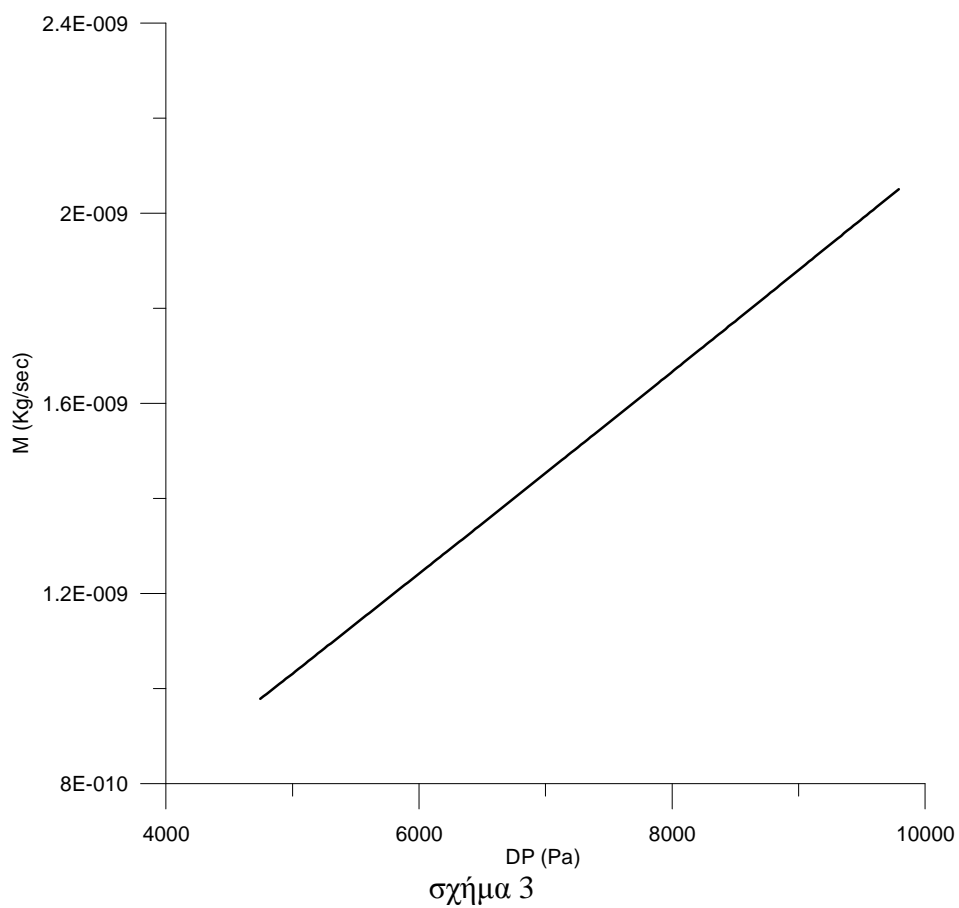
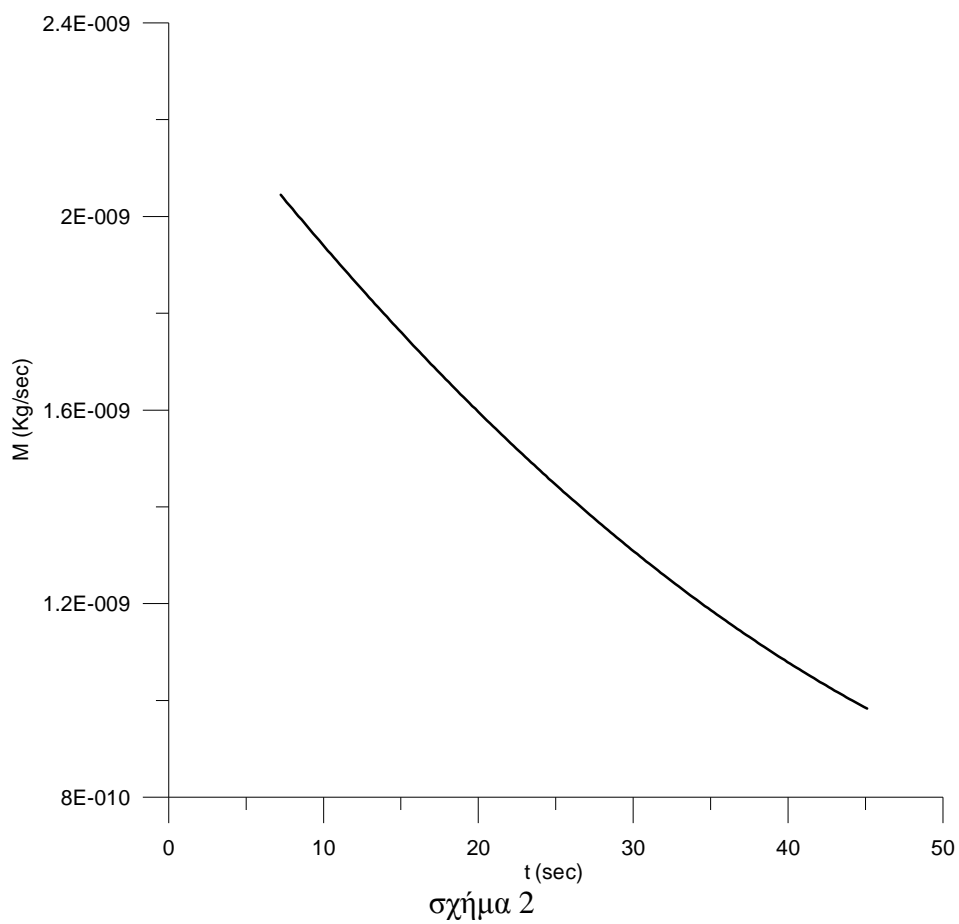


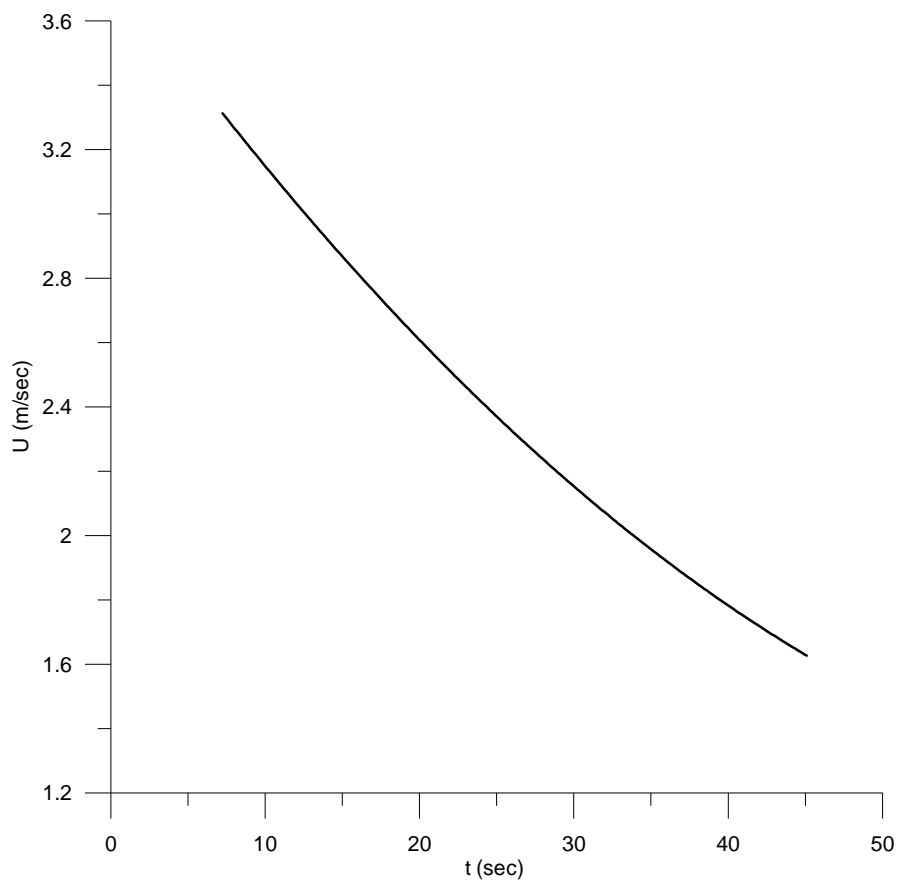
σχήμα 7

ΜΕΤΡΗΣΗ	P_{leyb} (Pa), (torr)	P_{mks} (Pa), (torr)	Kn
Test 3	10053,47 (75,59)	224,371 (1,687)	0,044175

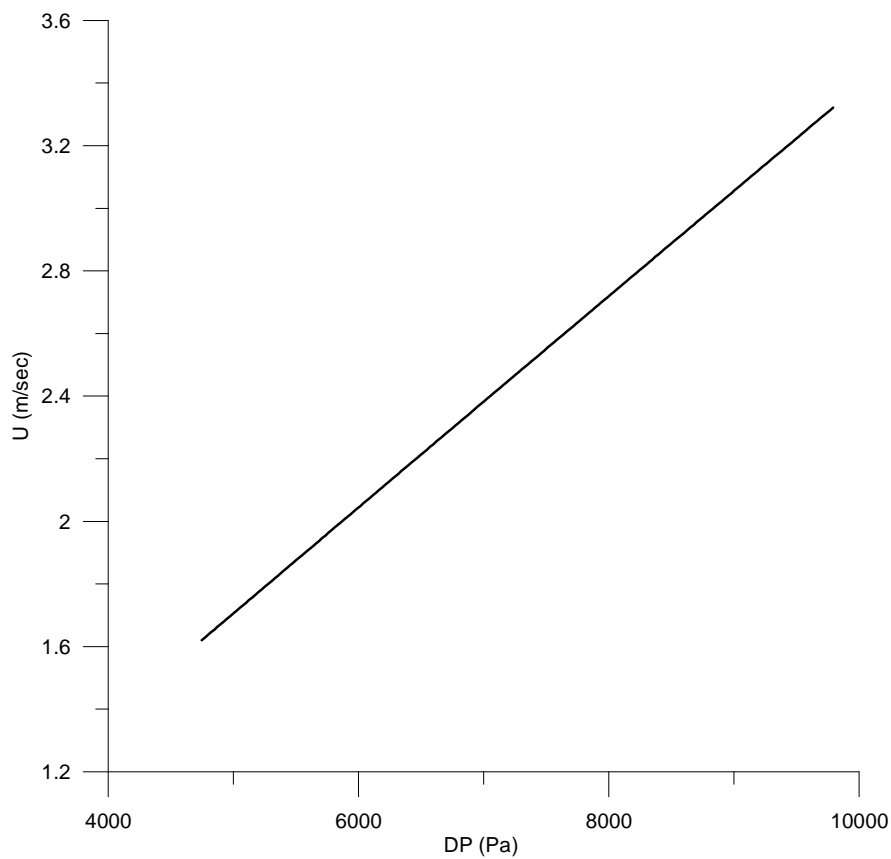


σχήμα 1

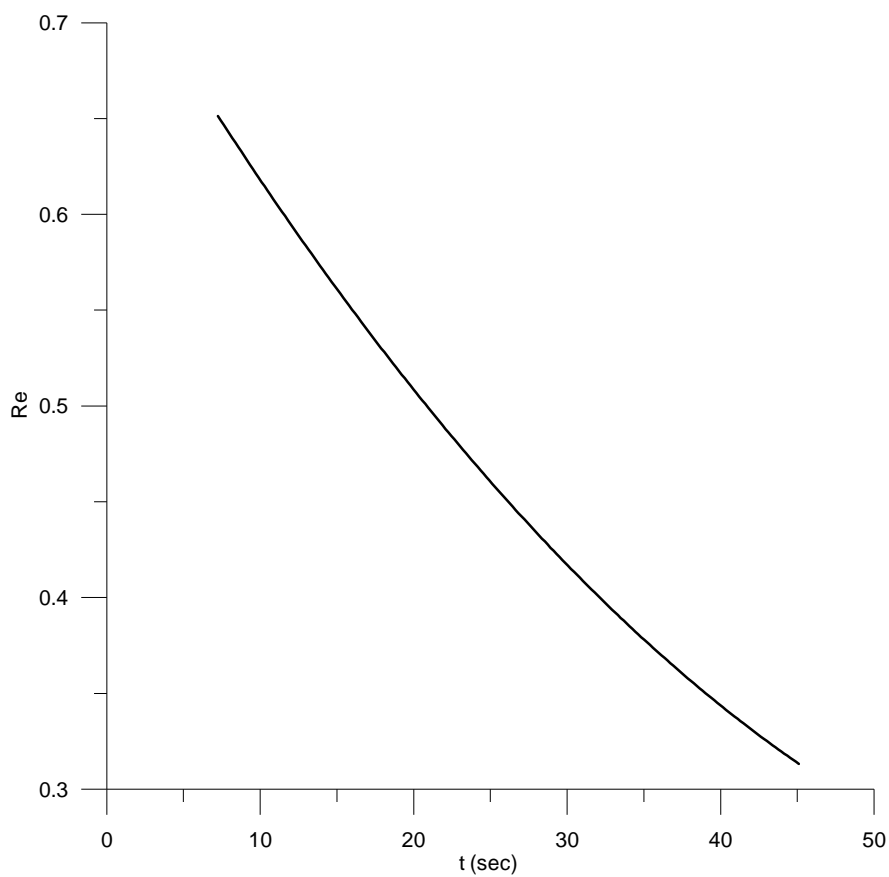




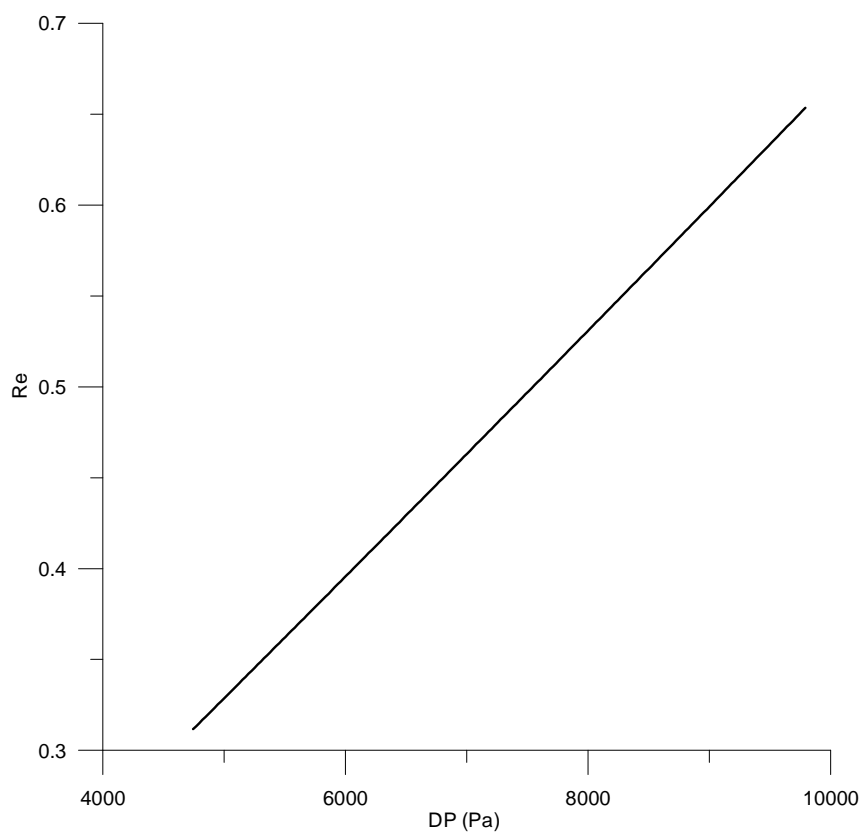
σχήμα 4



σχήμα 5

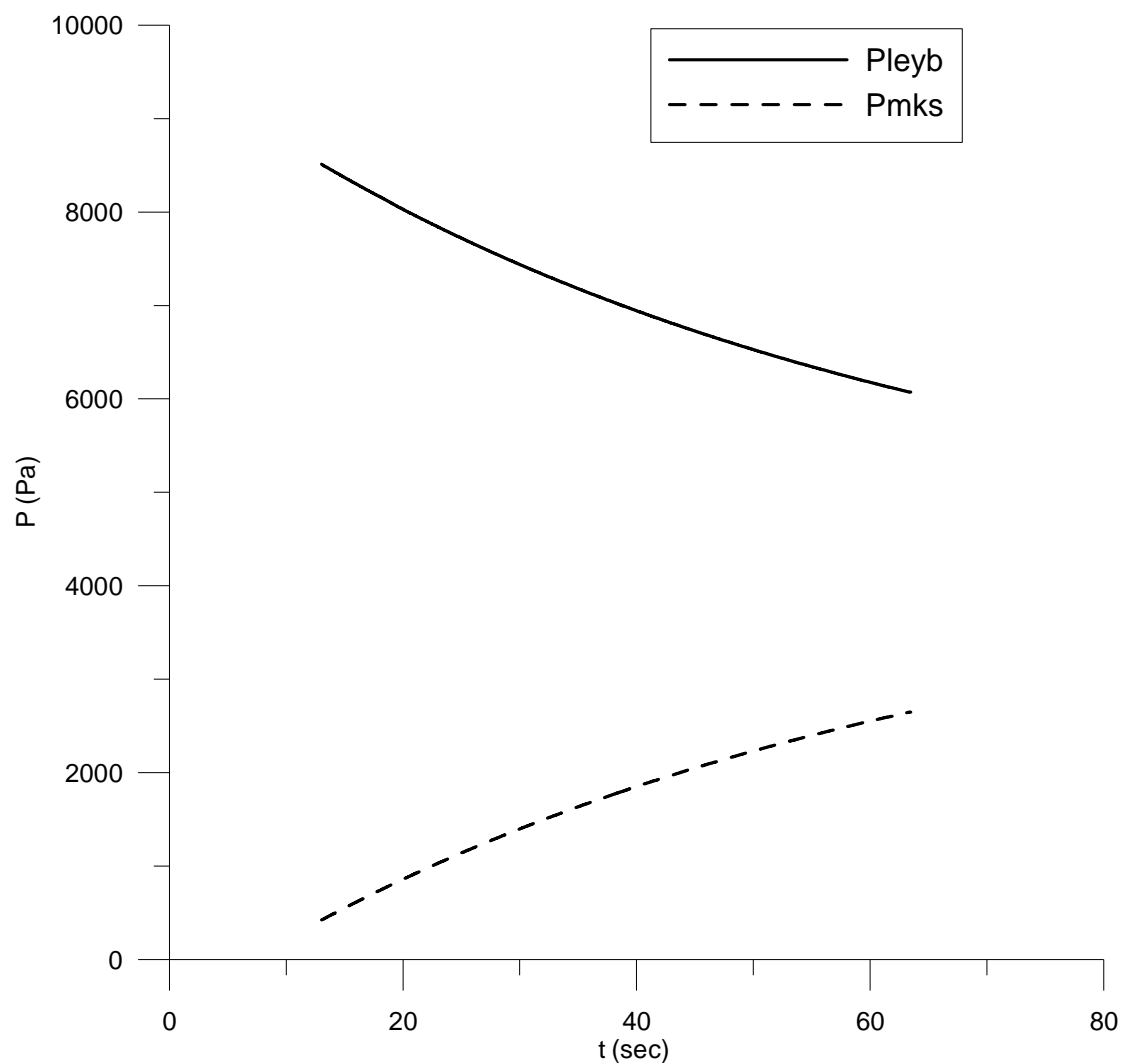


σχήμα 6

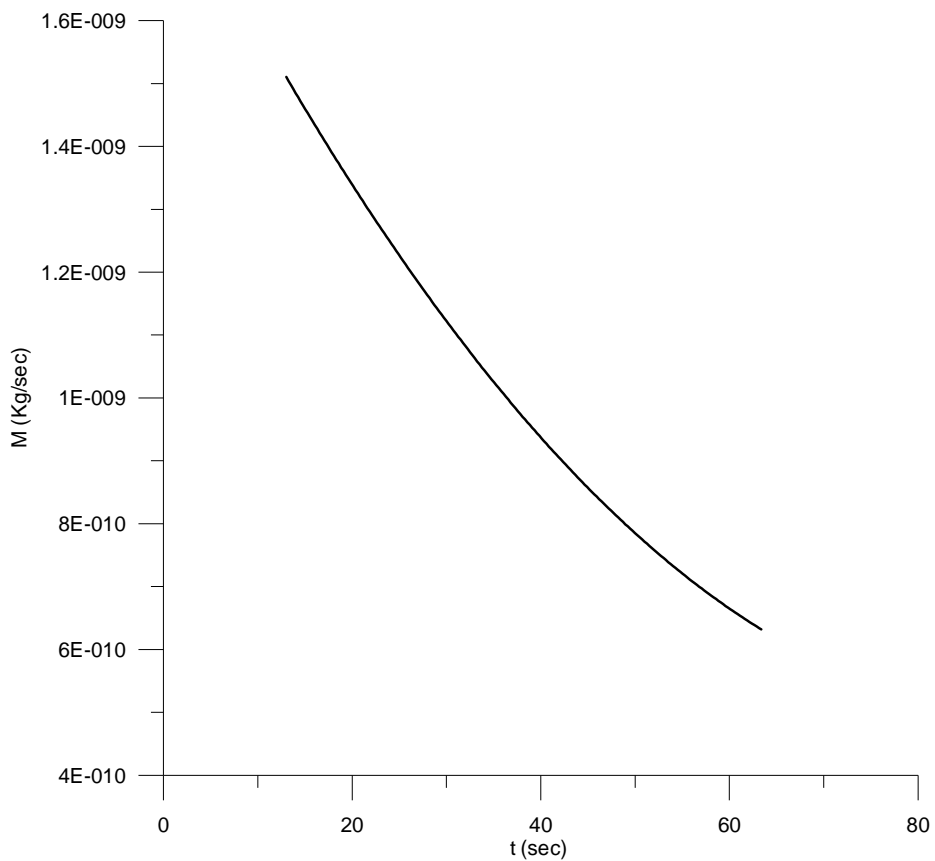


σχήμα 7

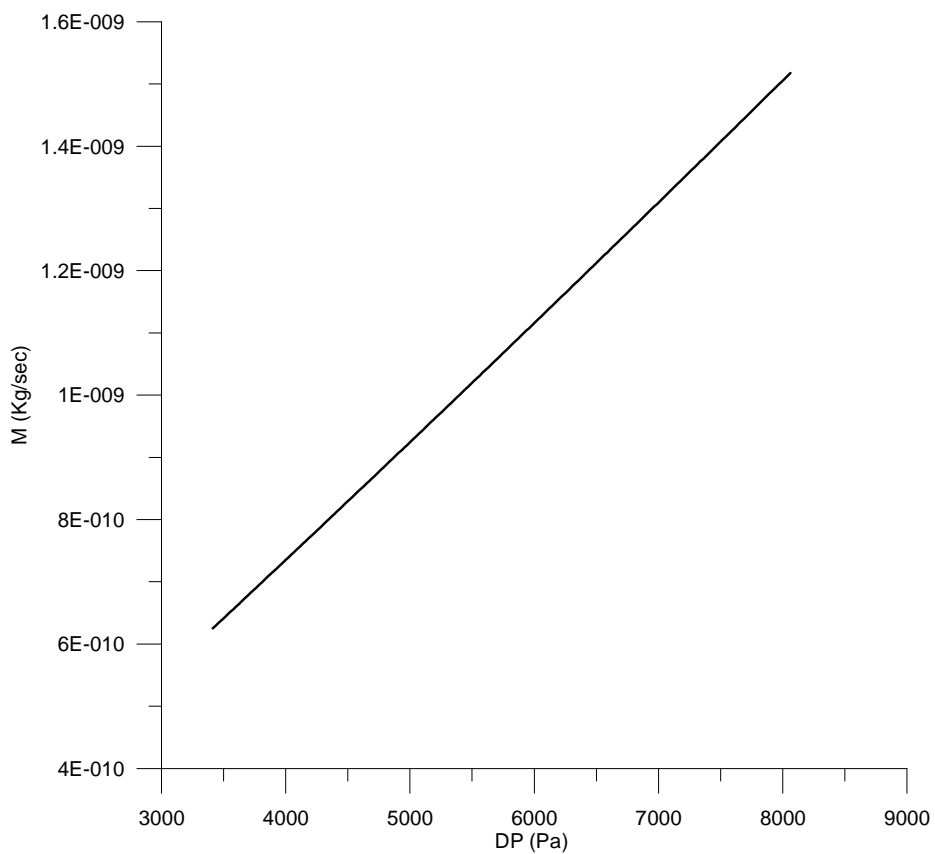
ΜΕΤΡΗΣΗ	P _{leyb} (Pa), (torr)	P _{mks} (Pa), (torr)	Kn
Test 4	8512 (64)	422,541 (3,177)	0,050815



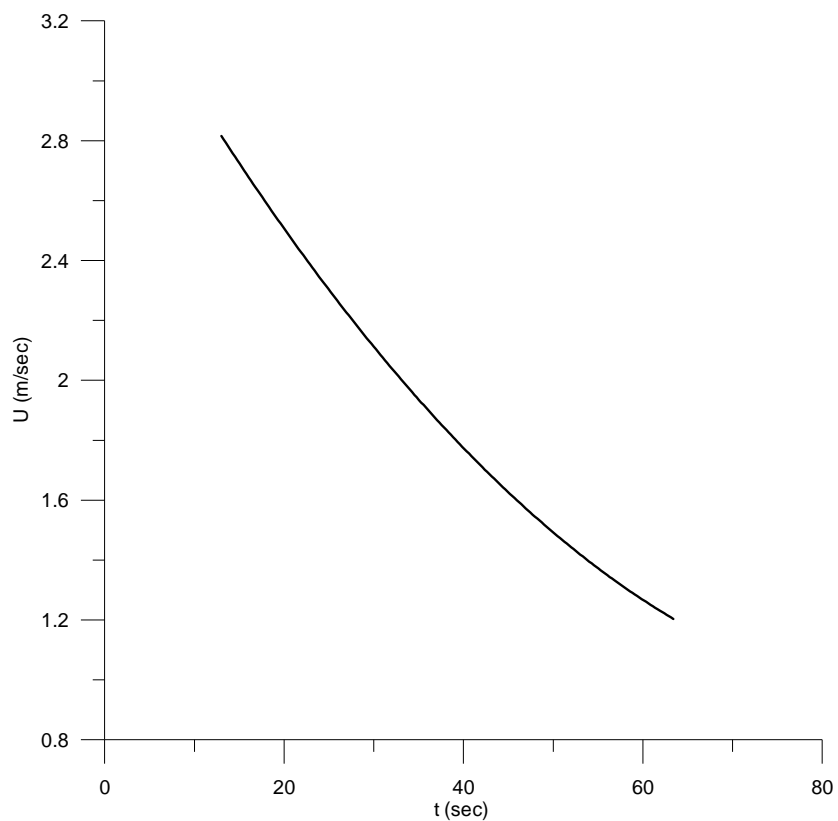
σχήμα 1



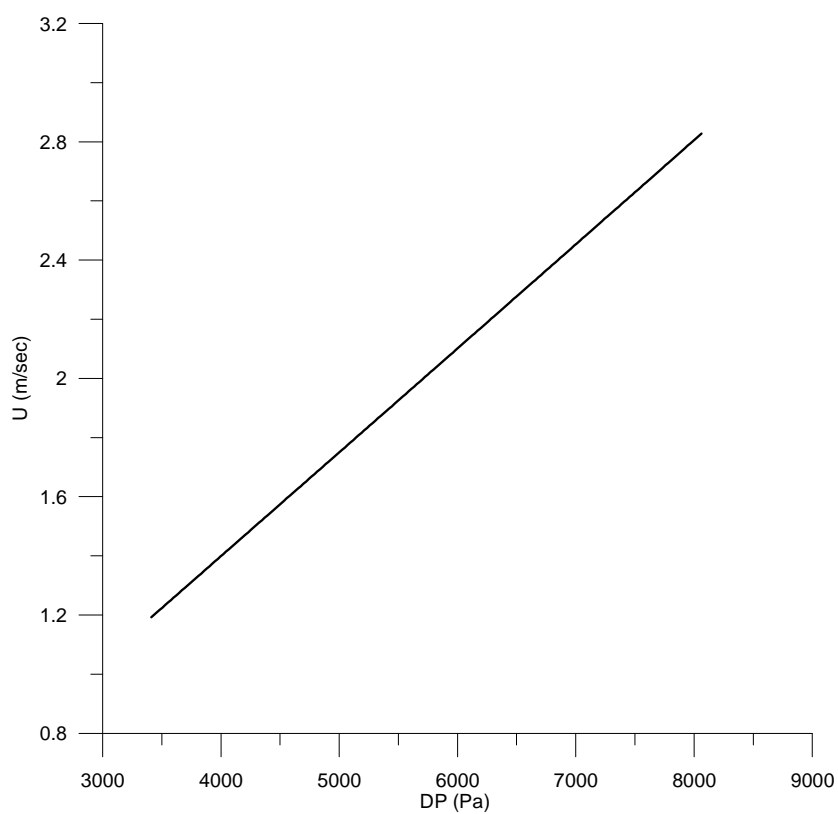
σχήμα 2



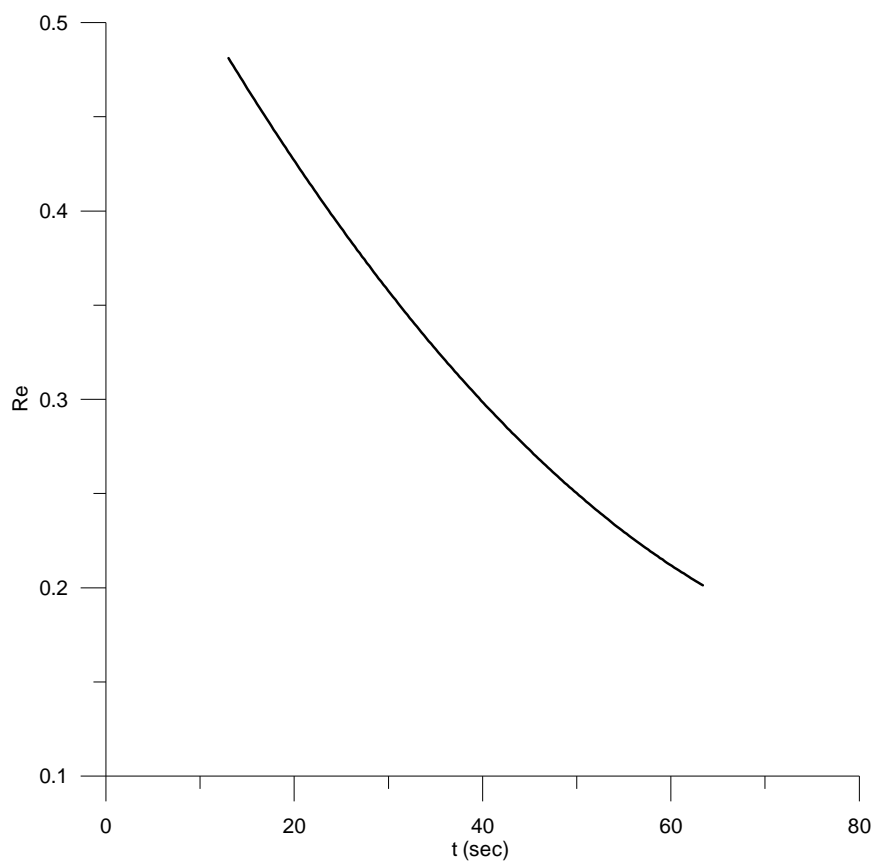
σχήμα 3



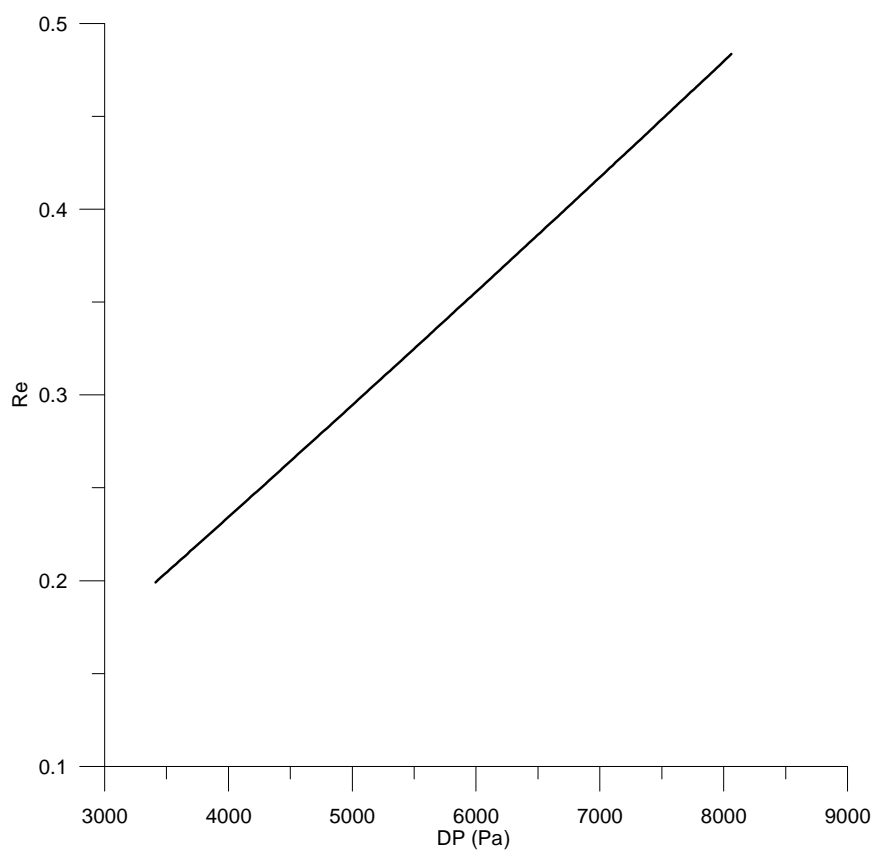
σχήμα 4



σχήμα 5

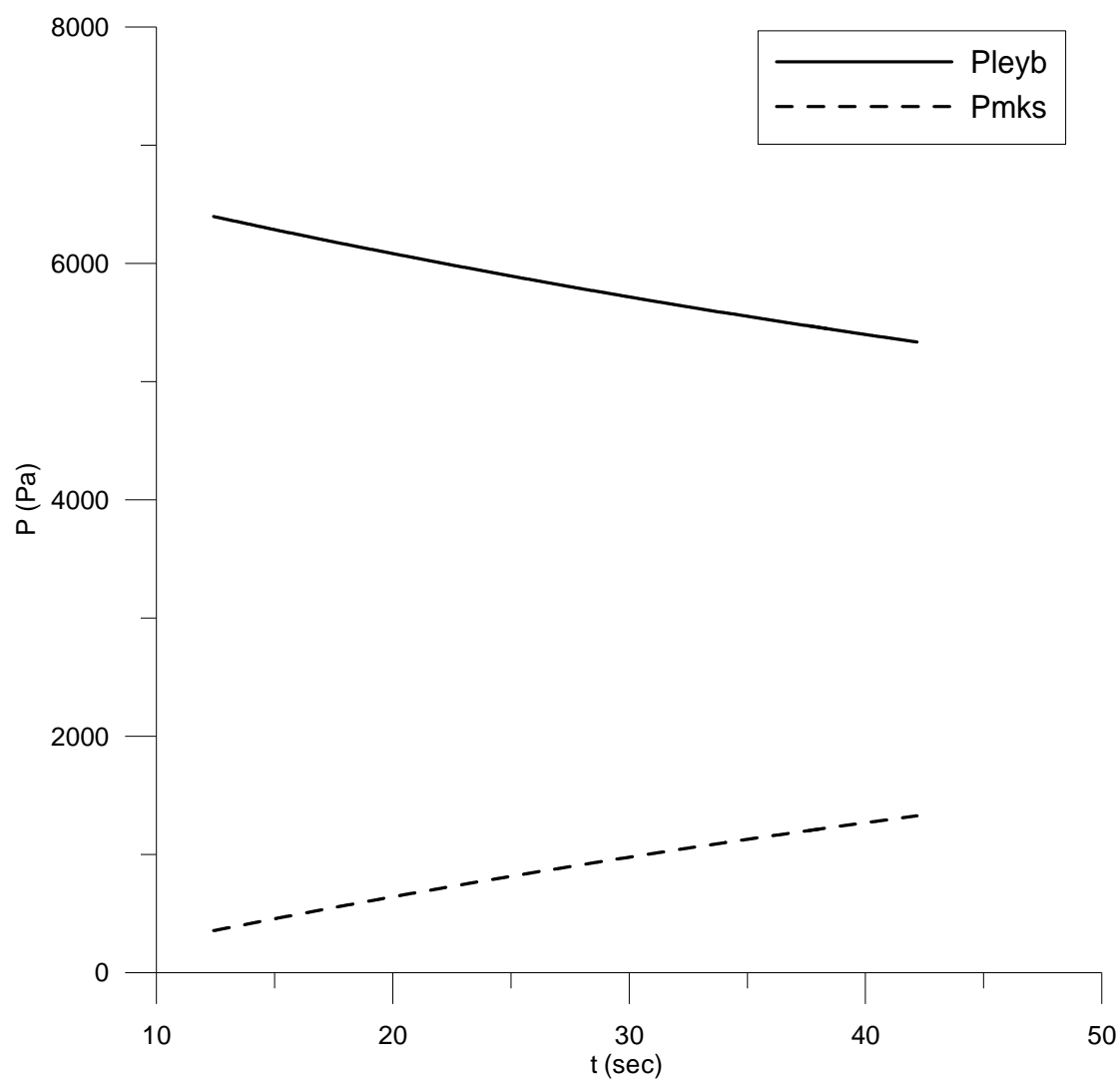


σχήμα 6

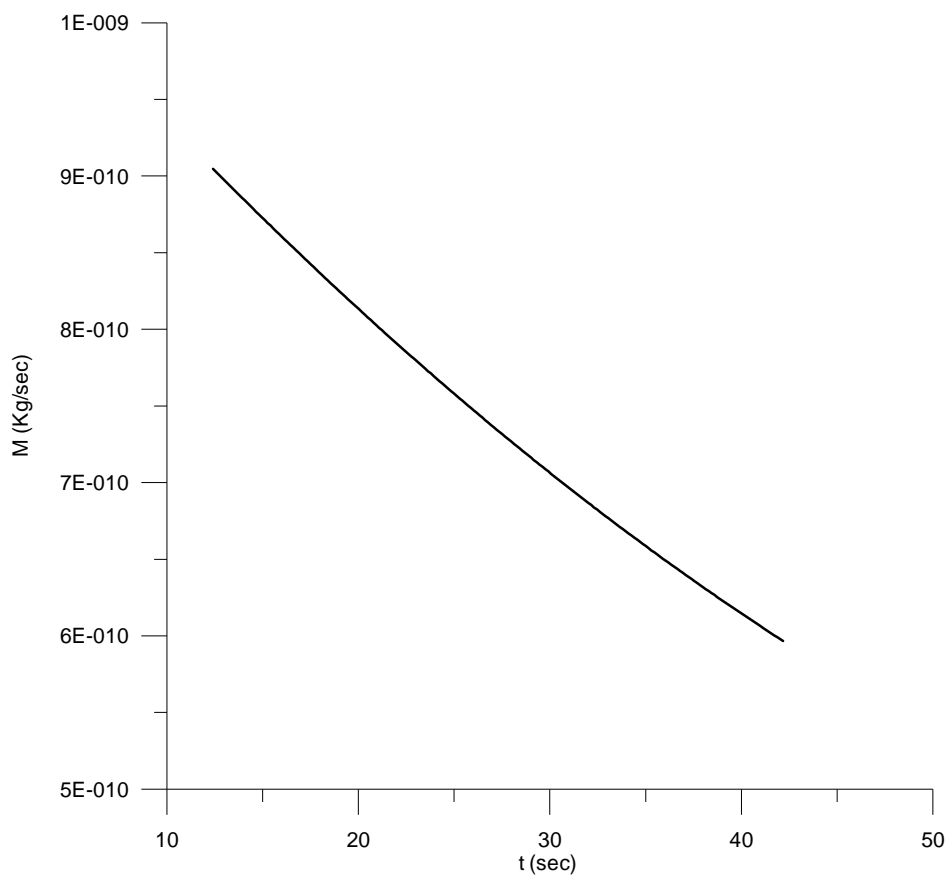


σχήμα 7

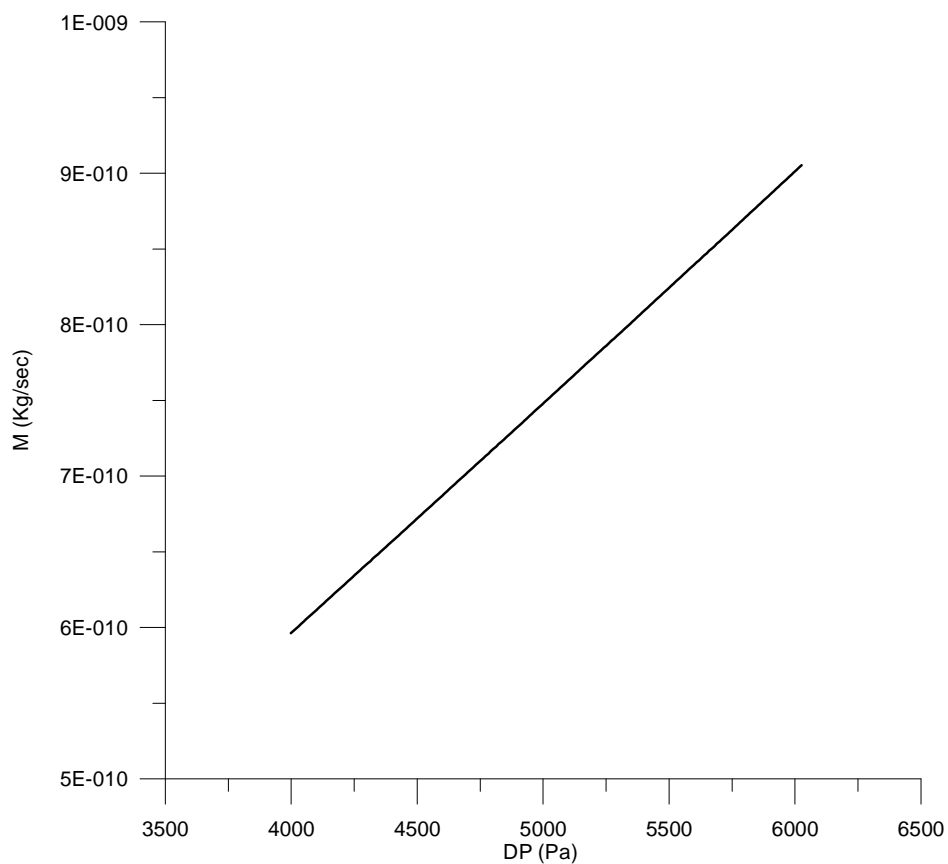
ΜΕΤΡΗΣΗ	P _{leyb} (Pa), (torr)	P _{mks} (Pa), (torr)	K _n
Test 5	6397,3 (48,1)	354,046 (2,662)	0,067244



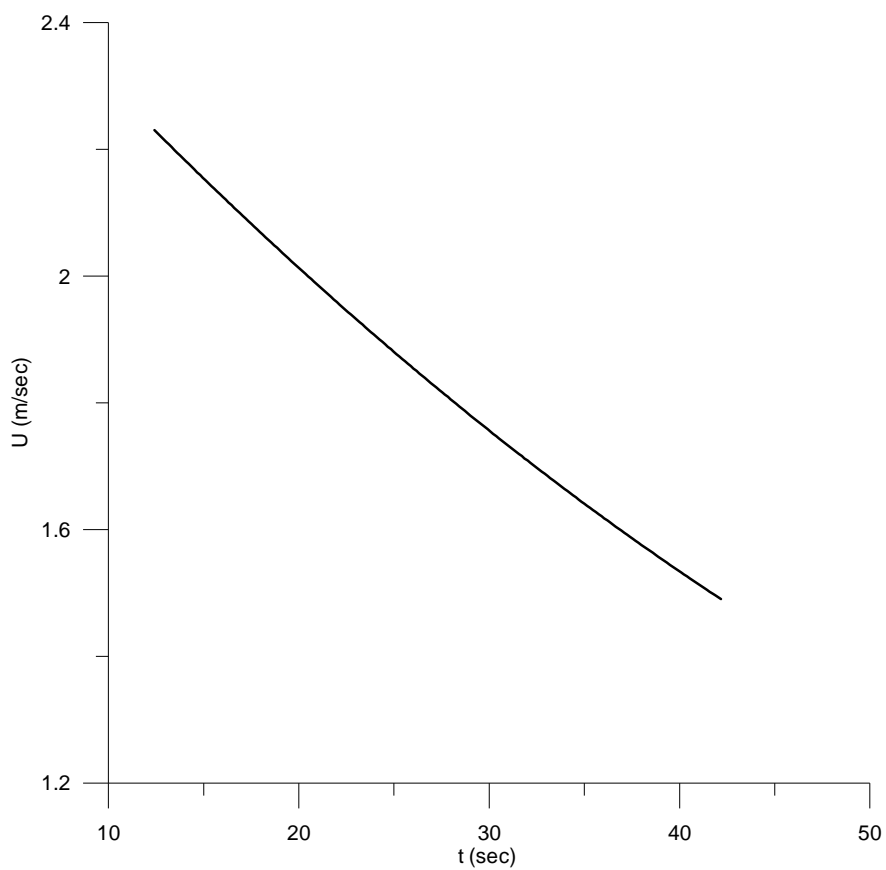
σχήμα 1



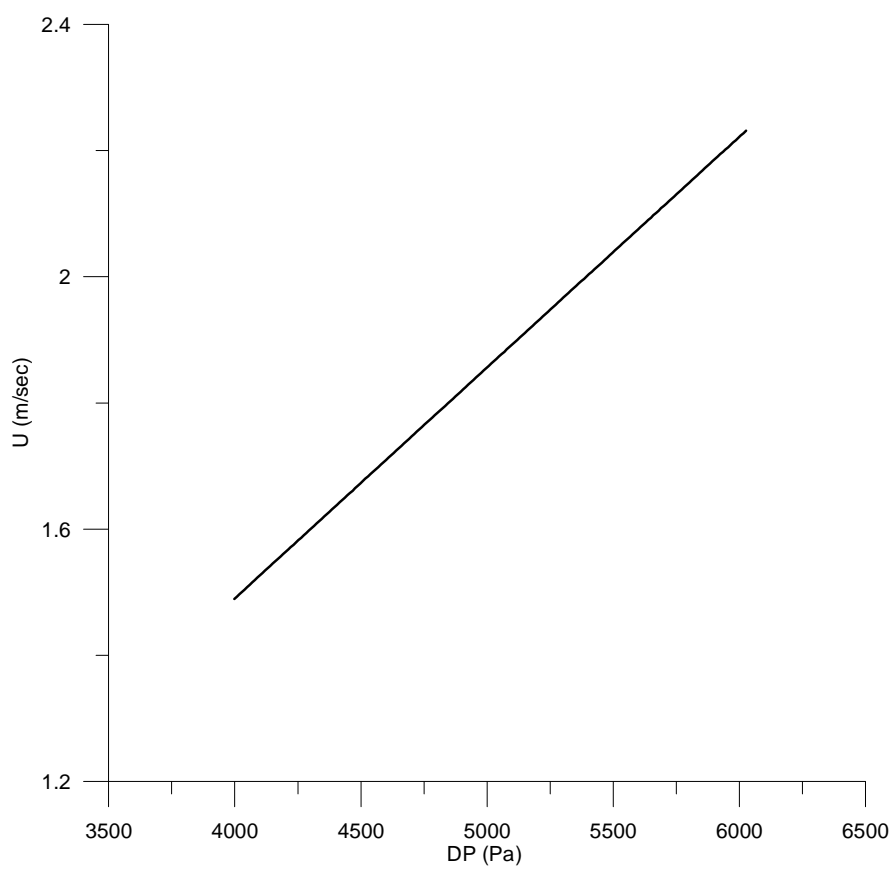
σχήμα 2



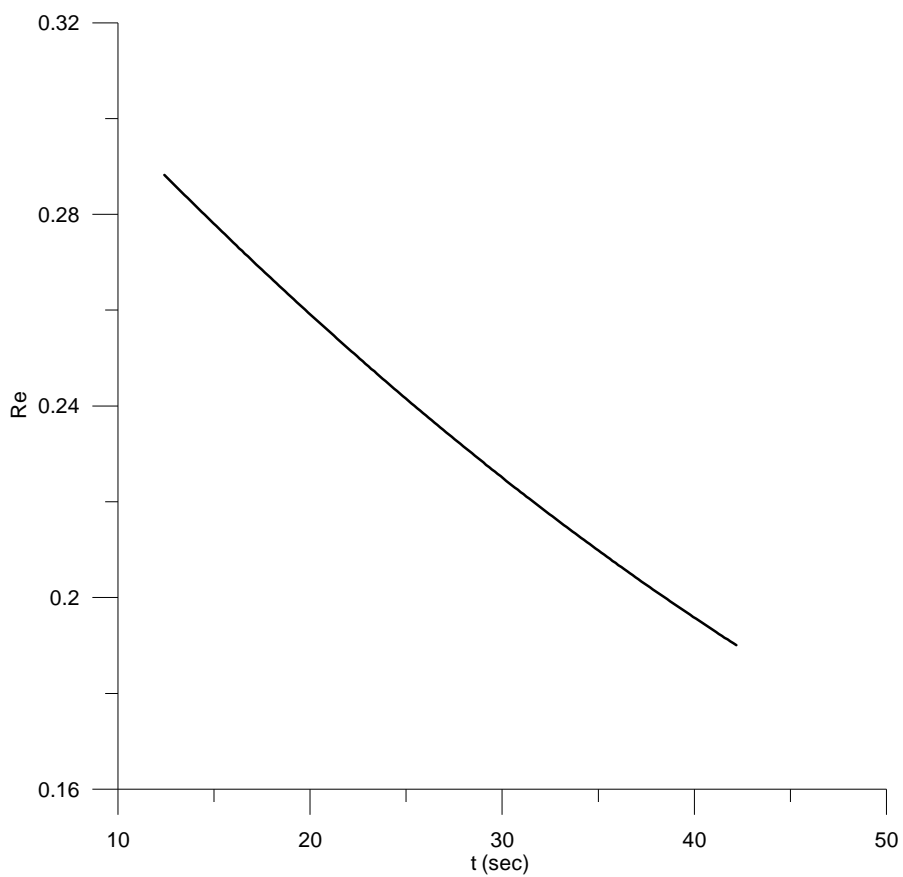
σχήμα 3



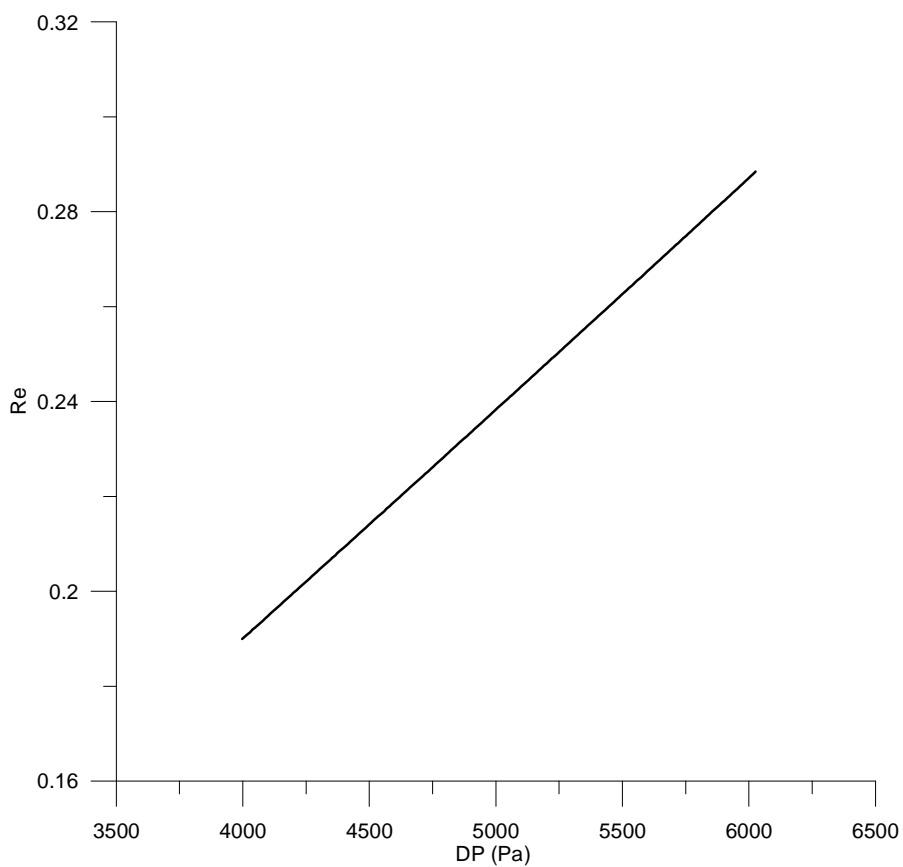
σχήμα 4



σχήμα 5

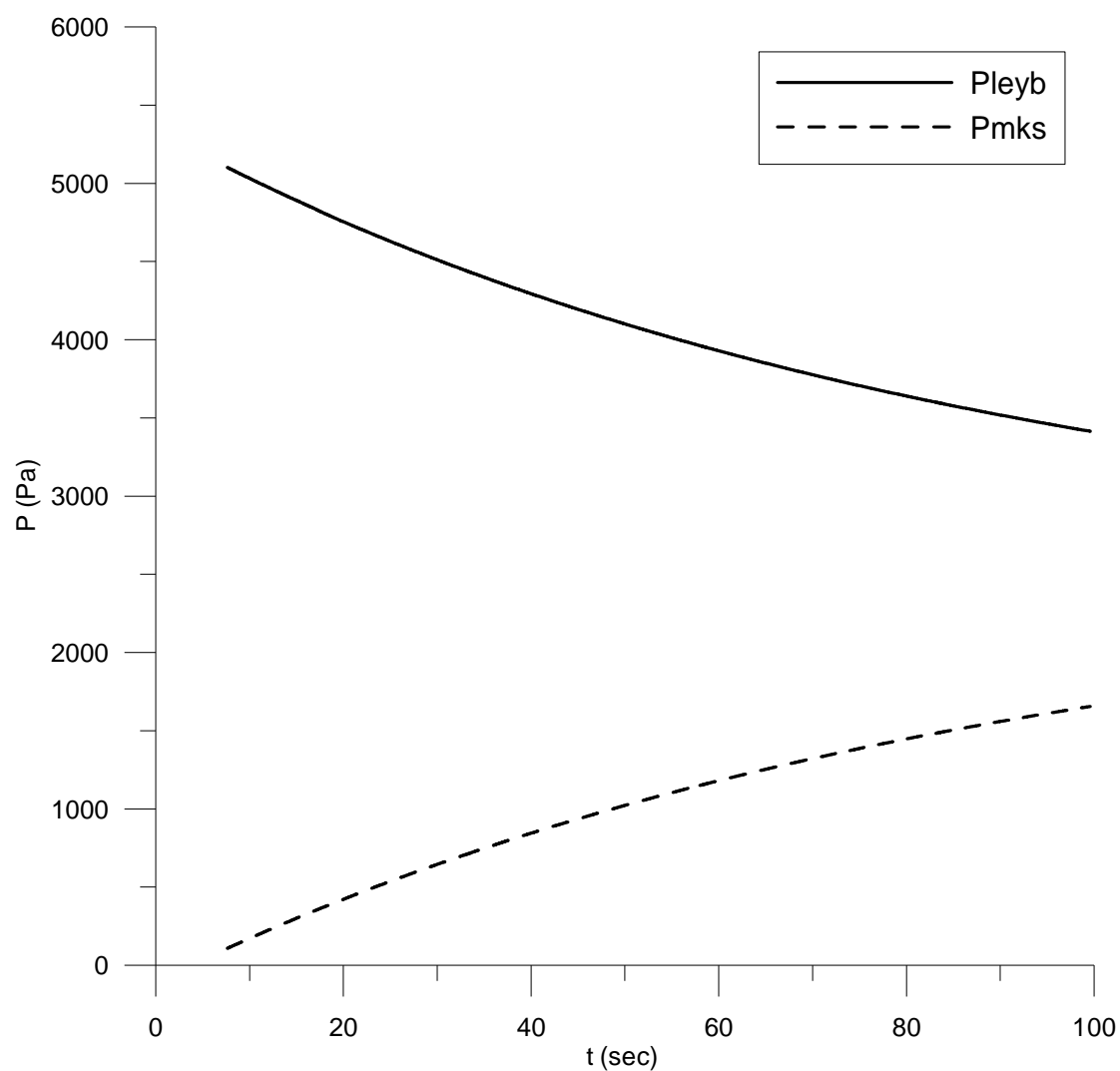


σχήμα 6

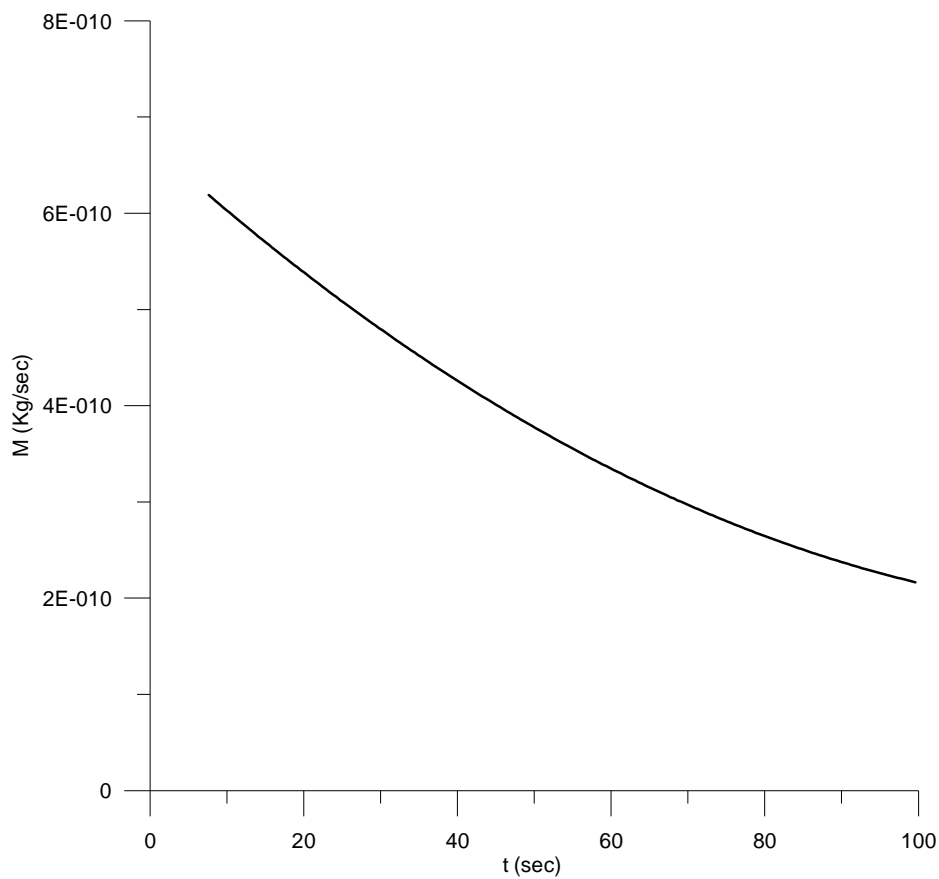


σχήμα 7

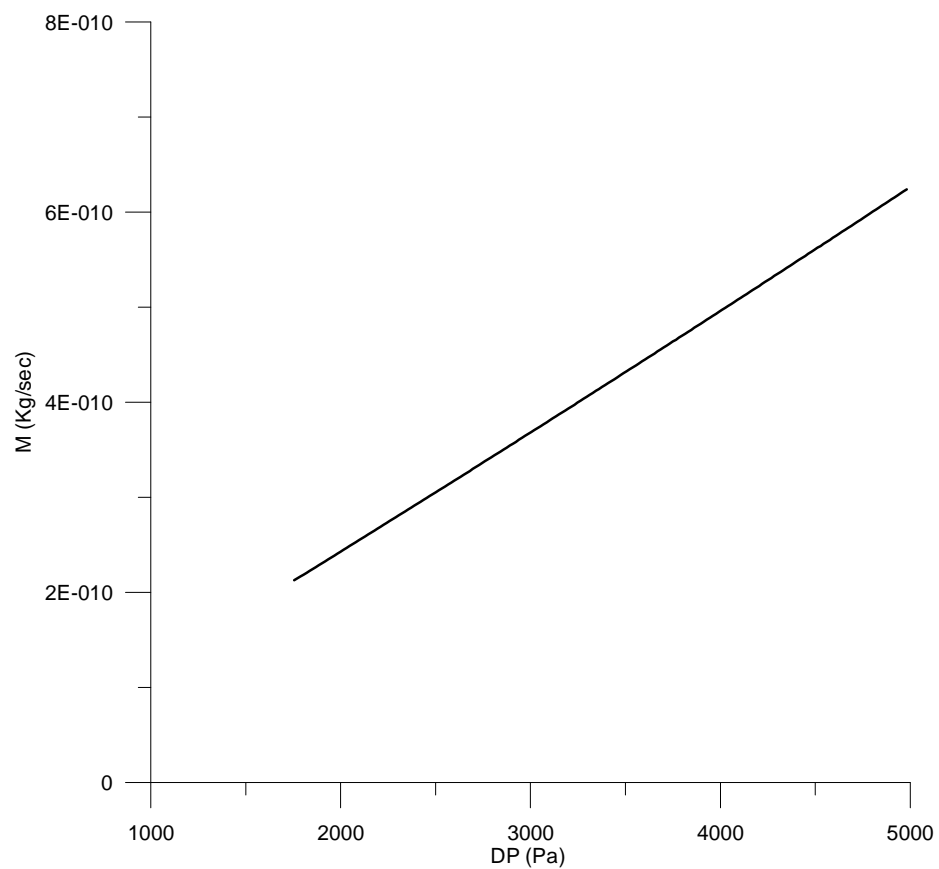
ΜΕΤΡΗΣΗ	P _{leyb} (Pa), (torr)	P _{mks} (Pa), (torr)	Kn
Test 6	5101,88 (38,36)	108,4216 (0,8152)	0,087133



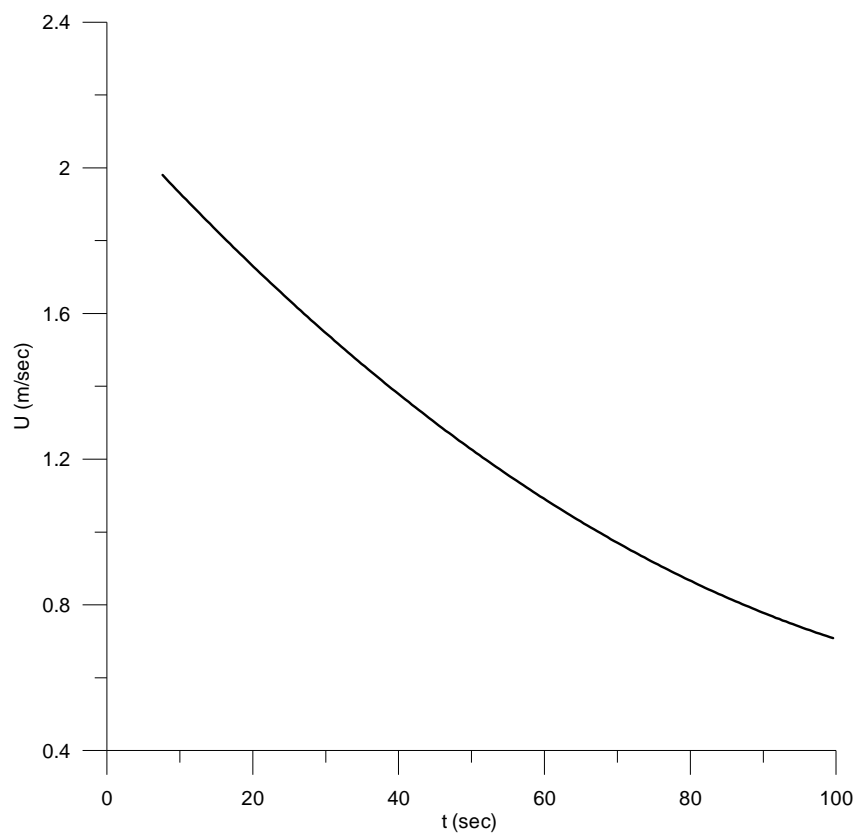
σχήμα 1



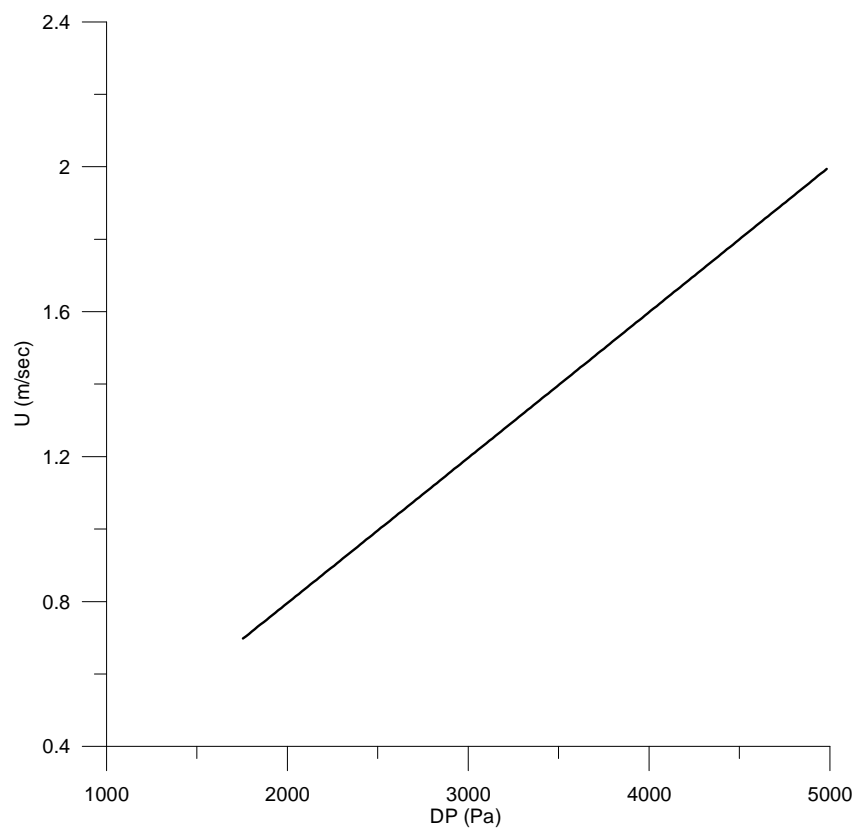
σχήμα 2



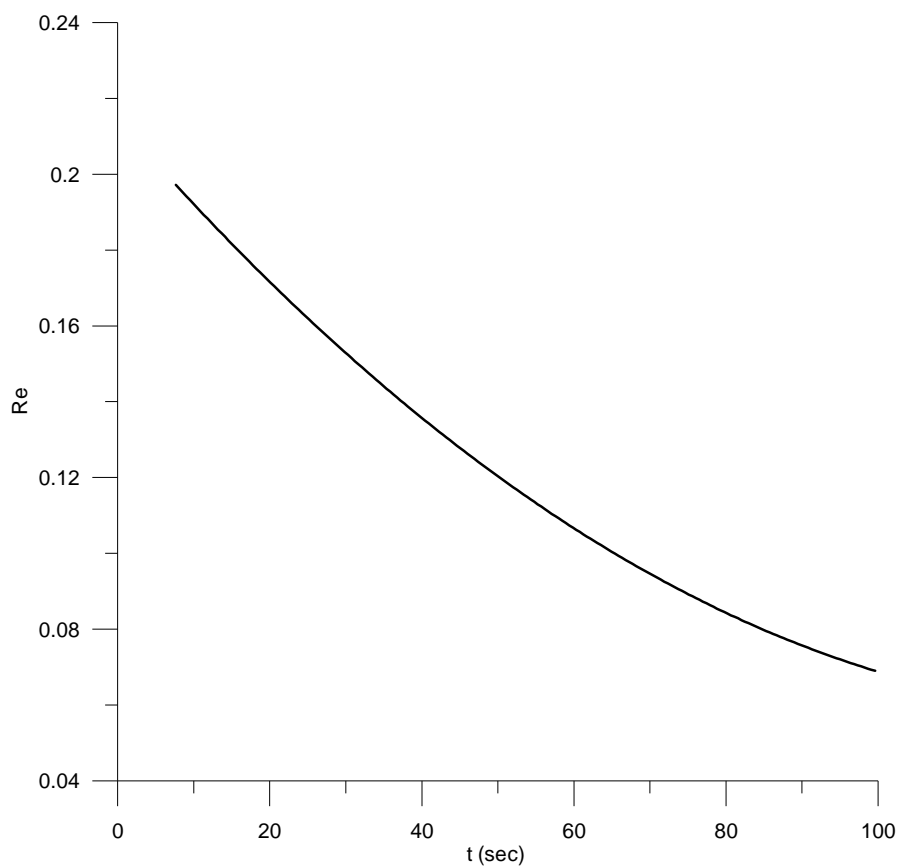
σχήμα 3



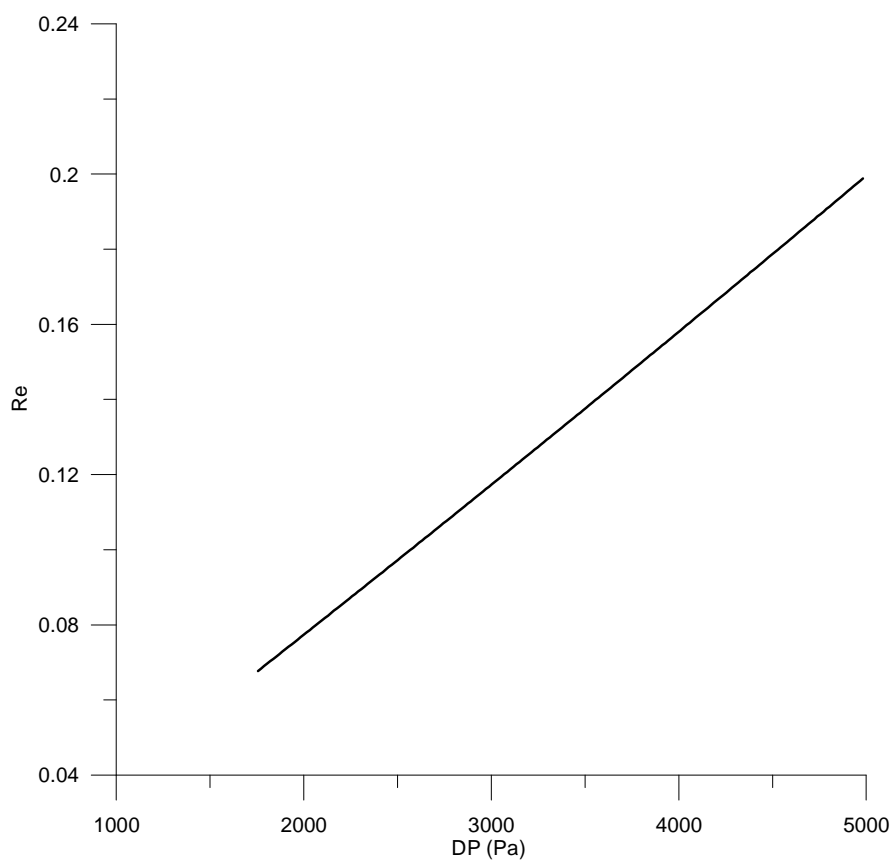
σχήμα 4



σχήμα 5

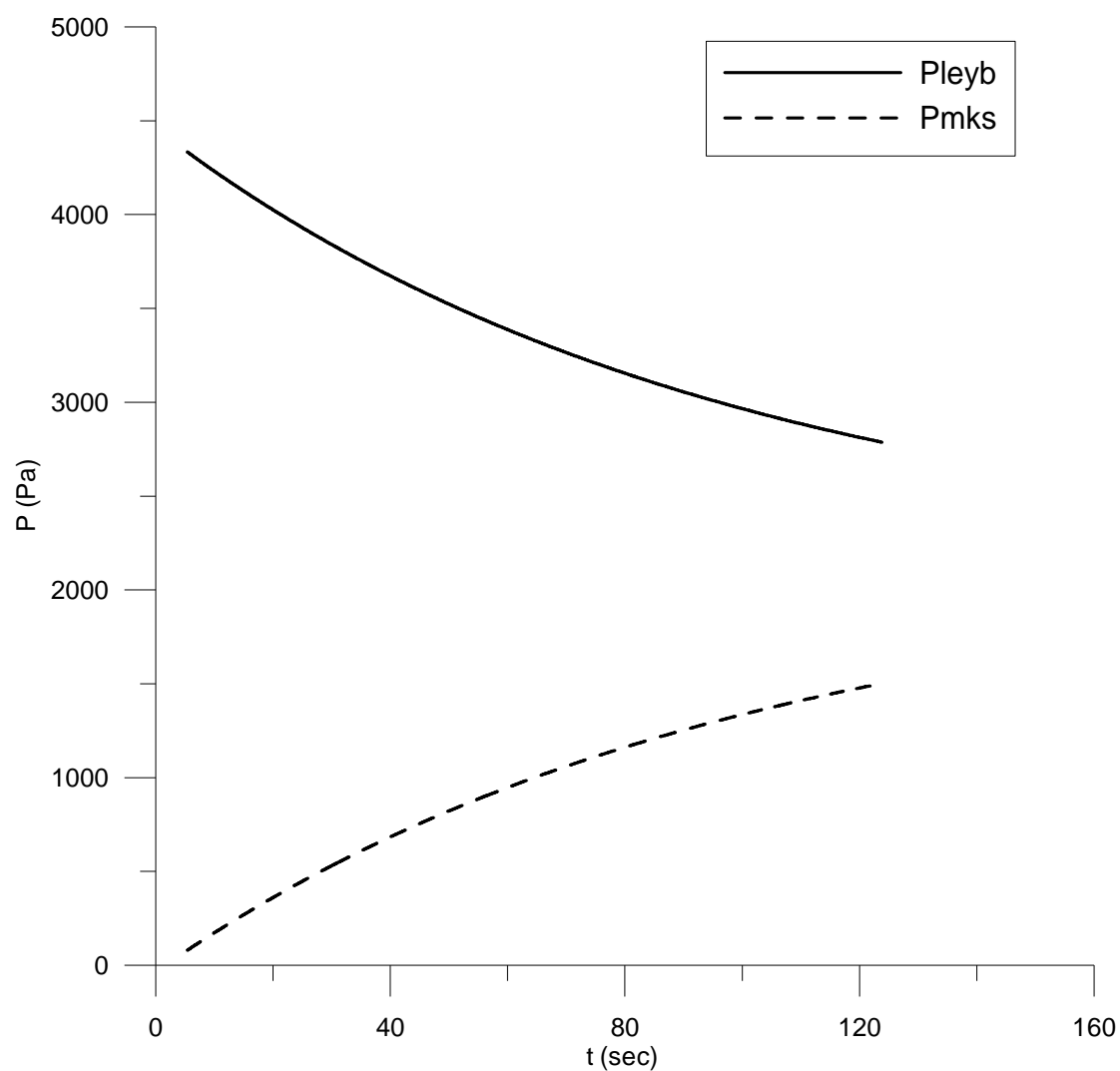


σχήμα 6

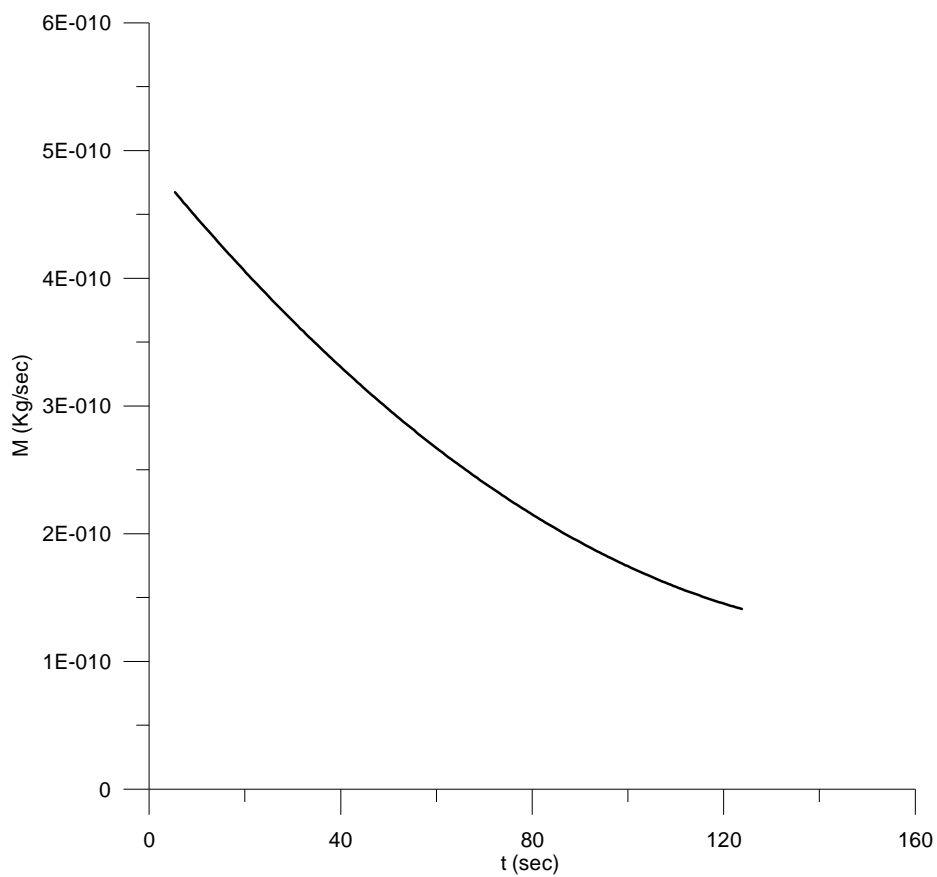


σχήμα 7

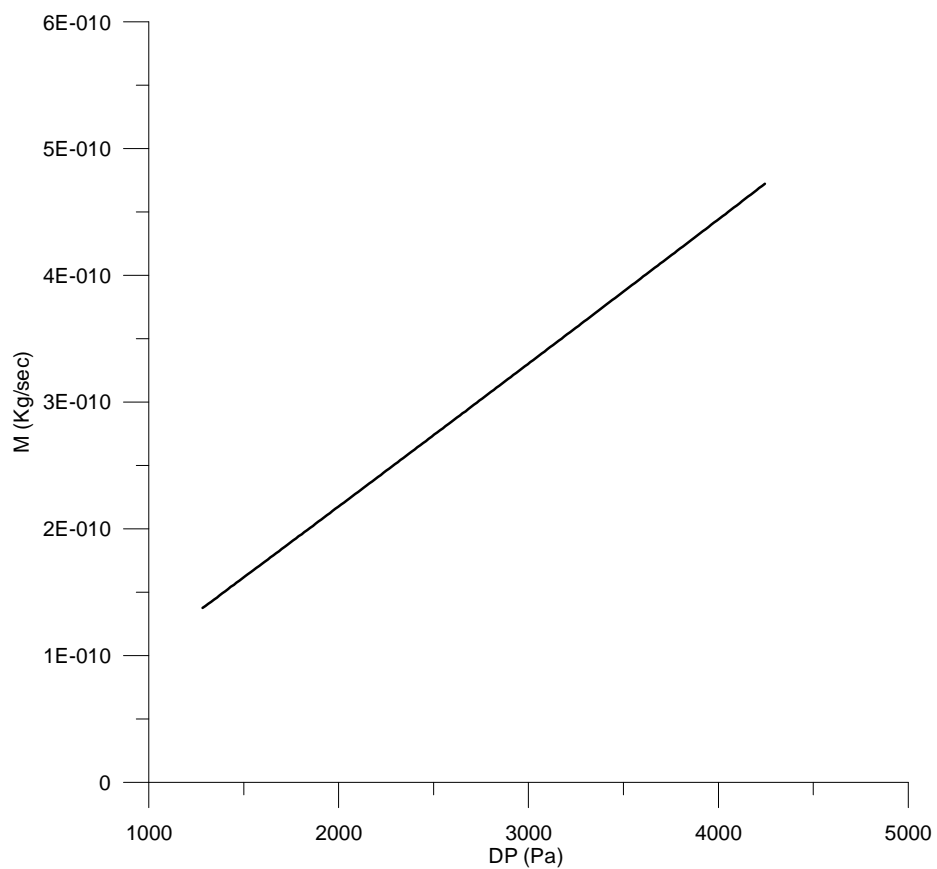
ΜΕΤΡΗΣΗ	P _{leyb} (Pa), (torr)	P _{mks} (Pa), (torr)	Kn
Test 7	4334,47 (32,59)	80,332 (0,604)	0,102835



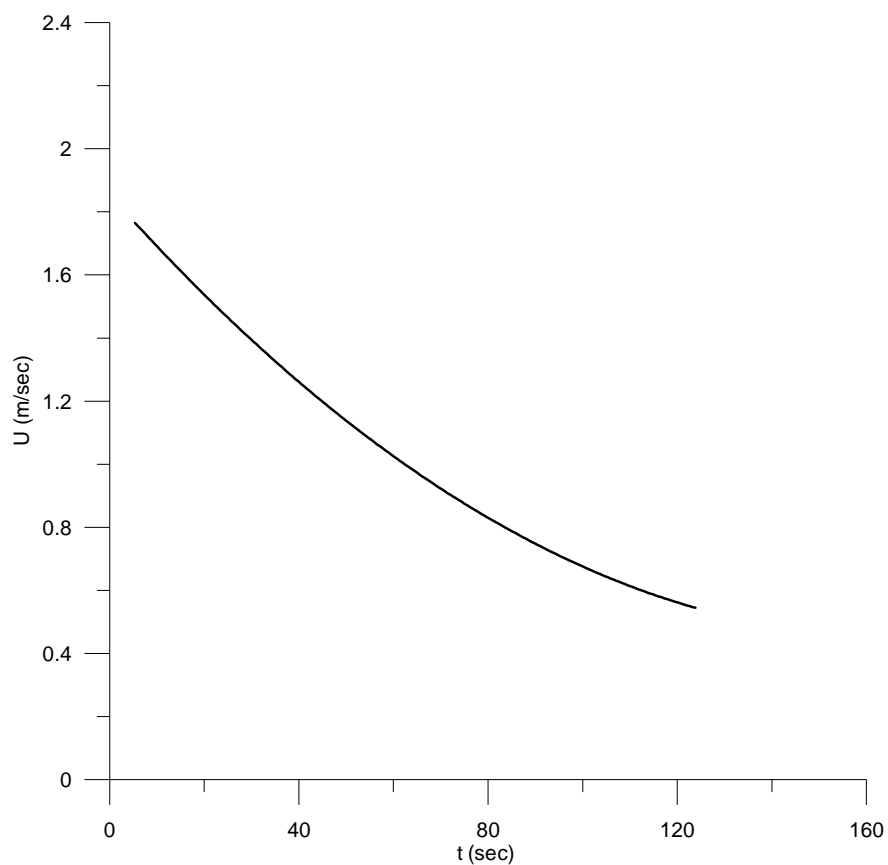
σχήμα 1



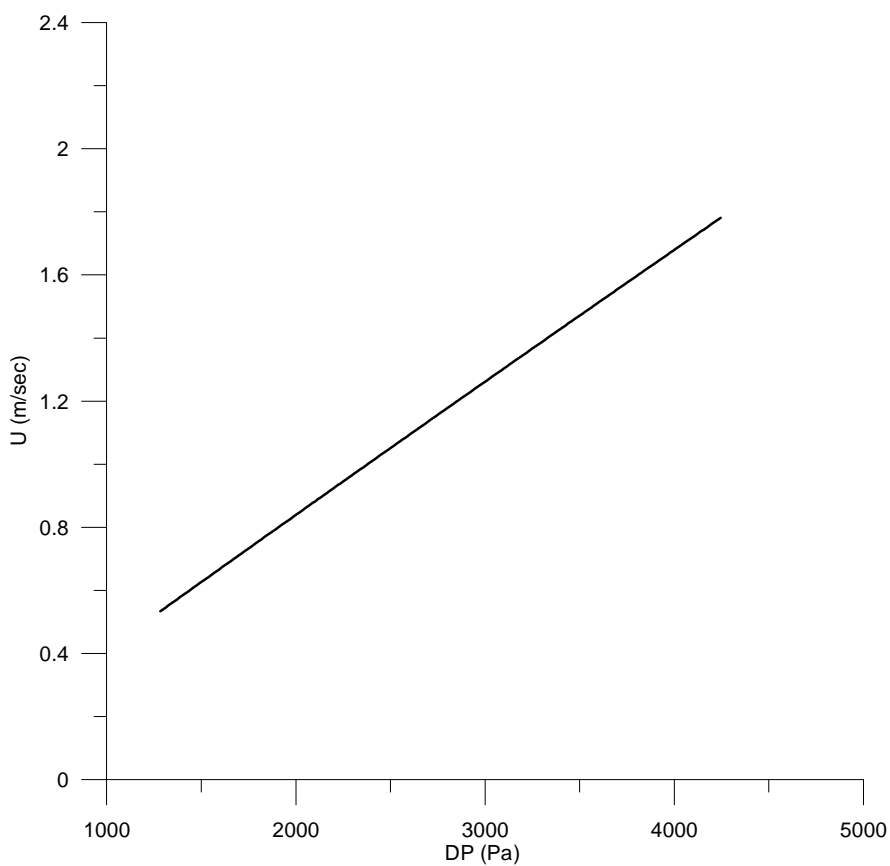
σχήμα 2



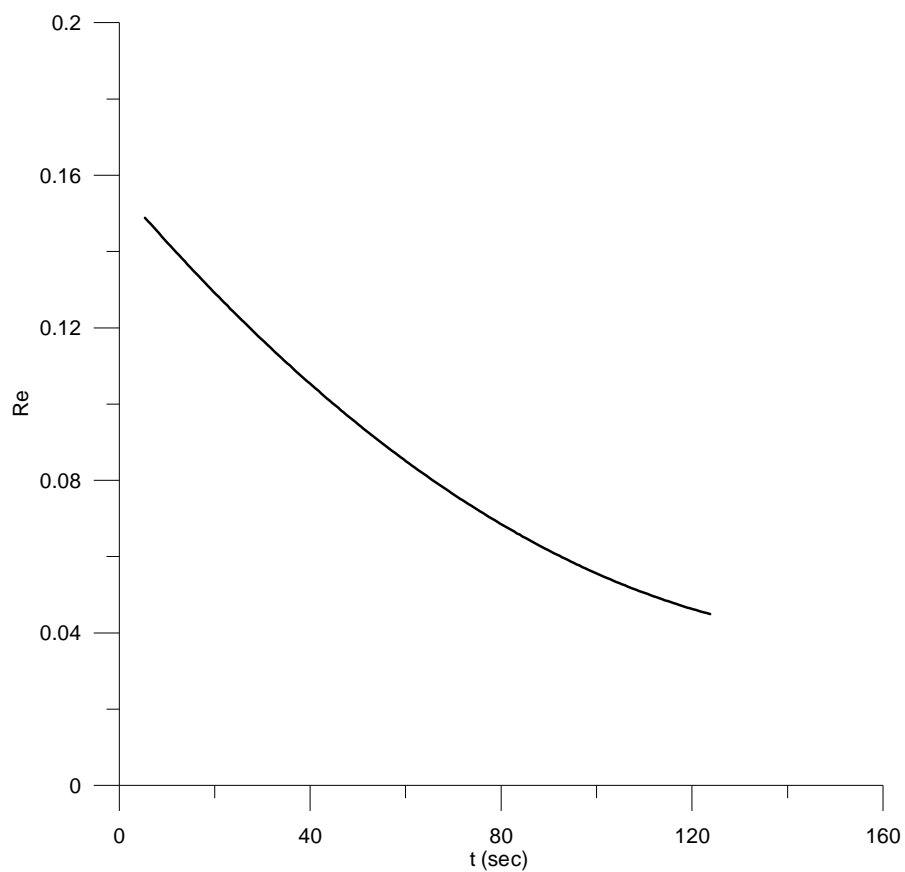
σχήμα 3



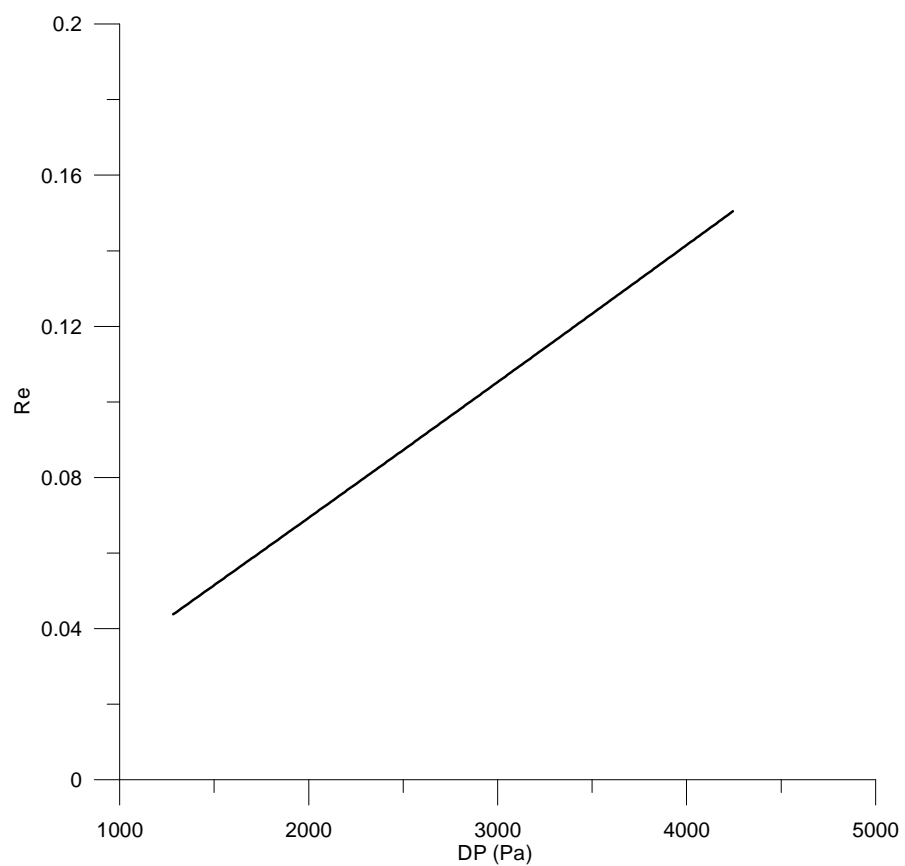
σχήμα 4



σχήμα 5

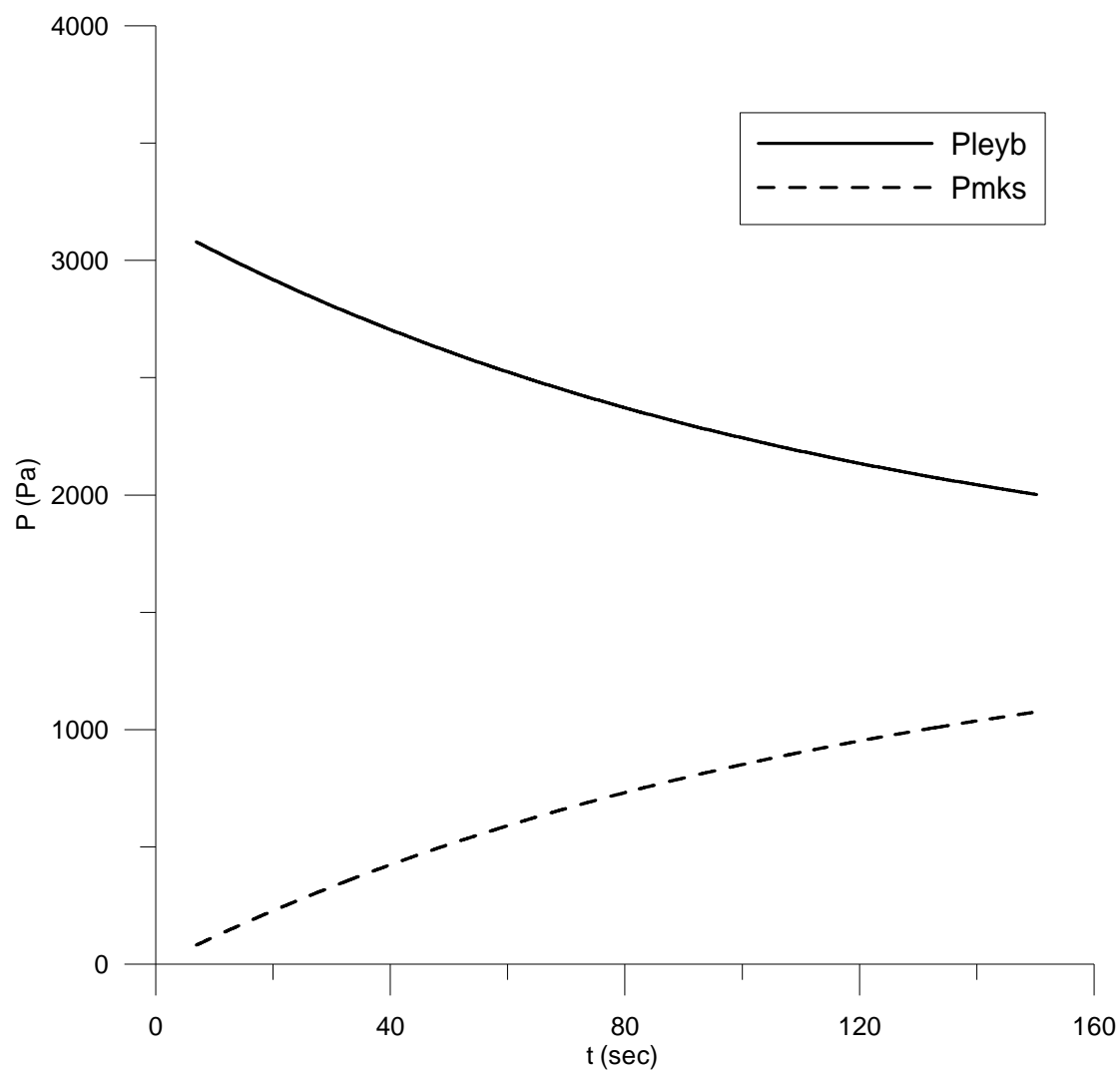


σχήμα 6

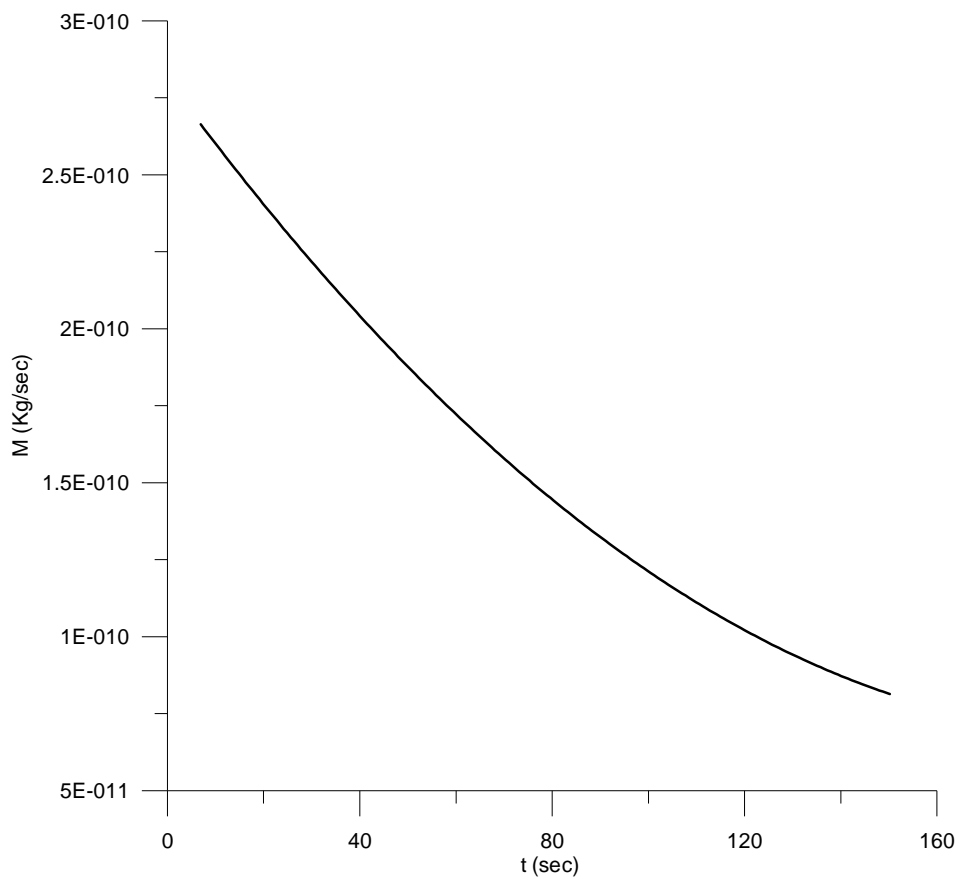


σχήμα 7

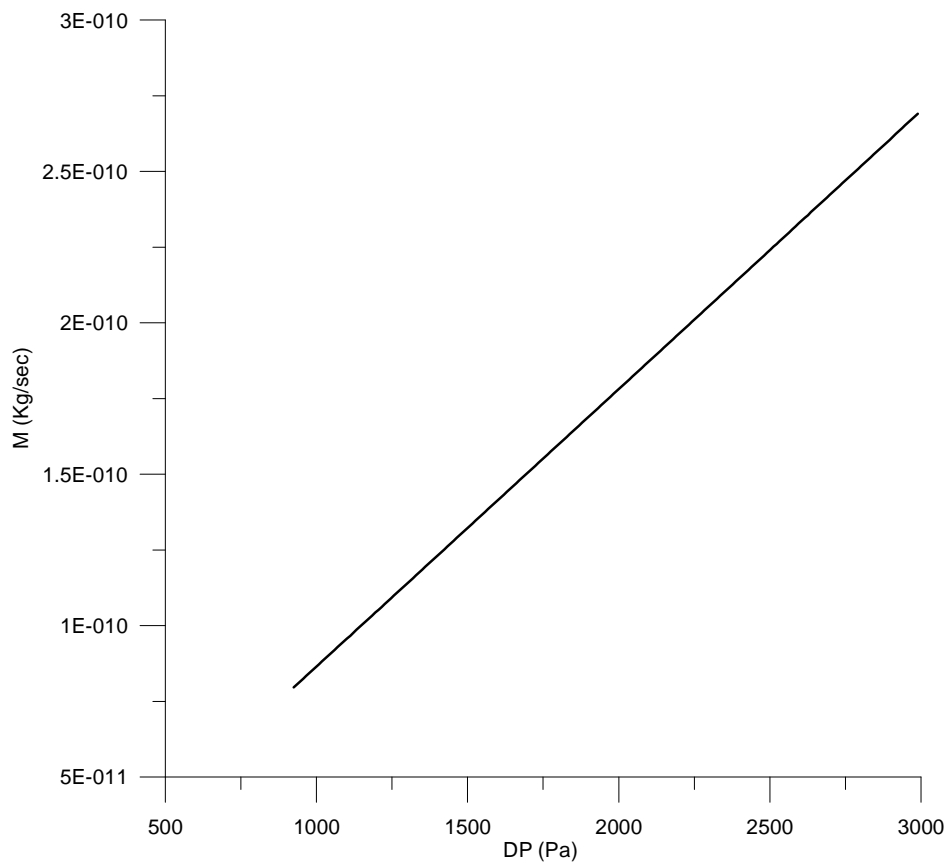
ΜΕΤΡΗΣΗ	P _{leyb} (Pa), (torr)	P _{mks} (Pa), (torr)	Kn
Test 8	3080,28 (23,16)	81,1832 (0,6104)	0,143614



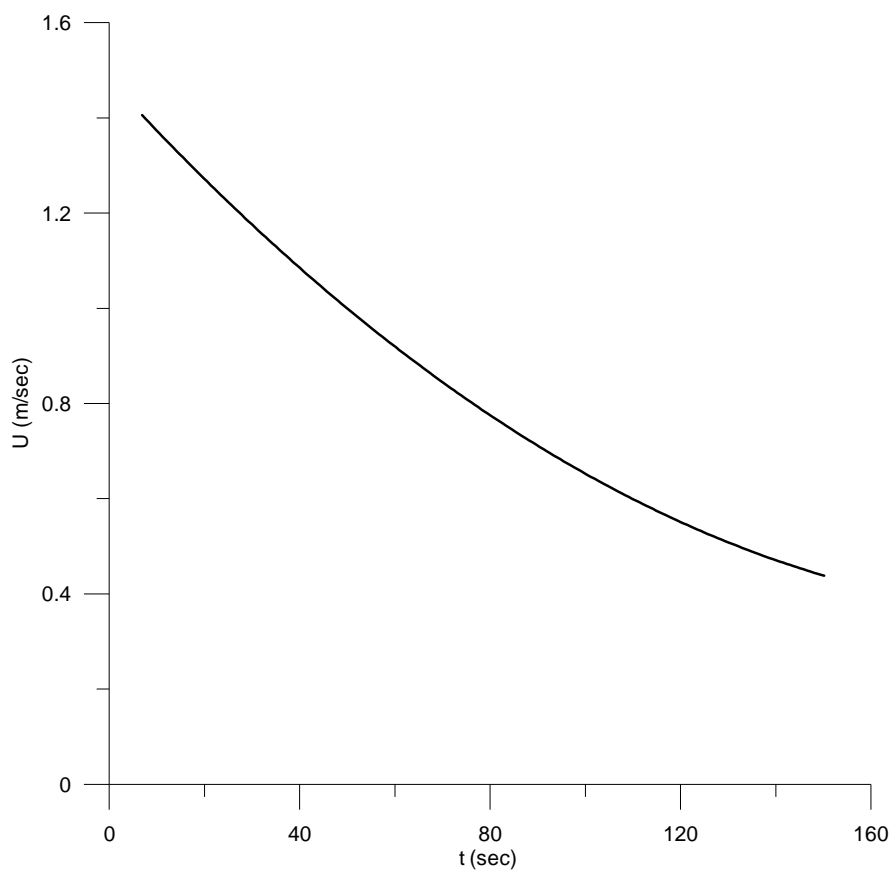
σχήμα 1



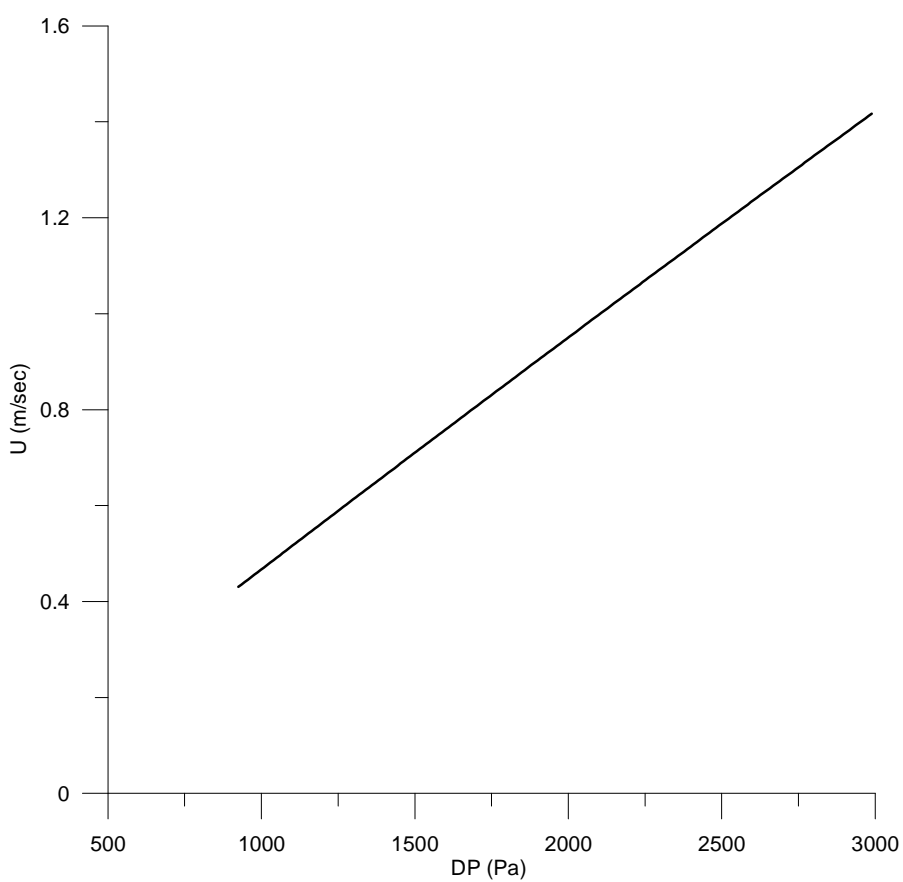
σχήμα 2



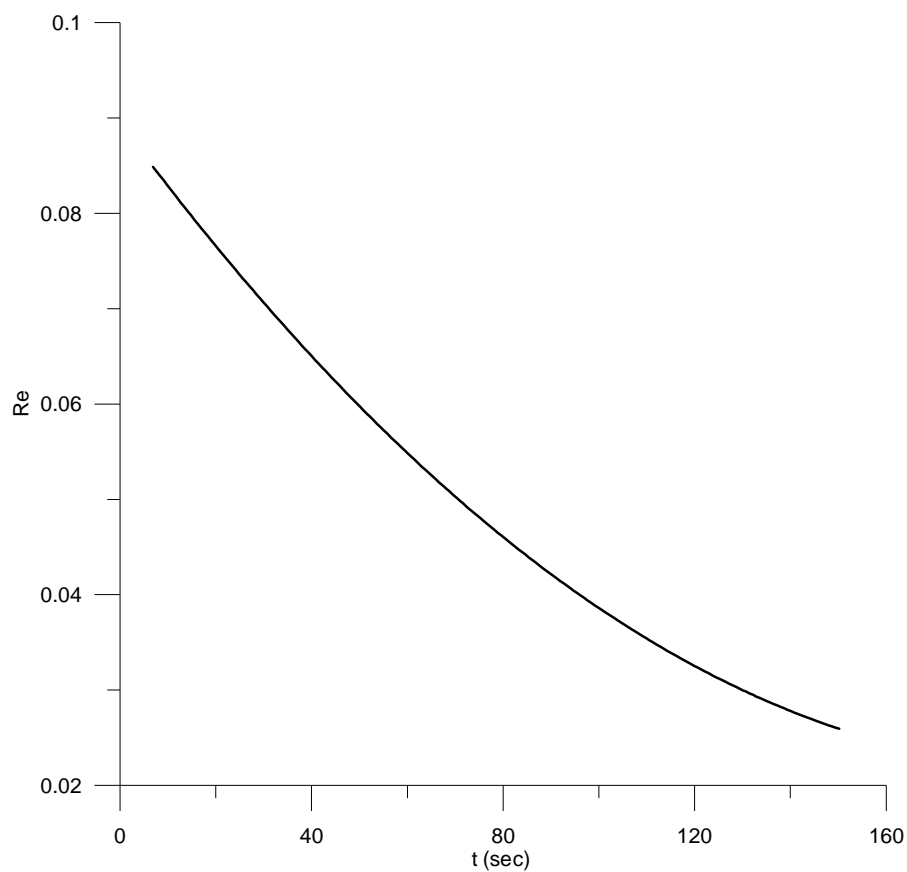
σχήμα 3



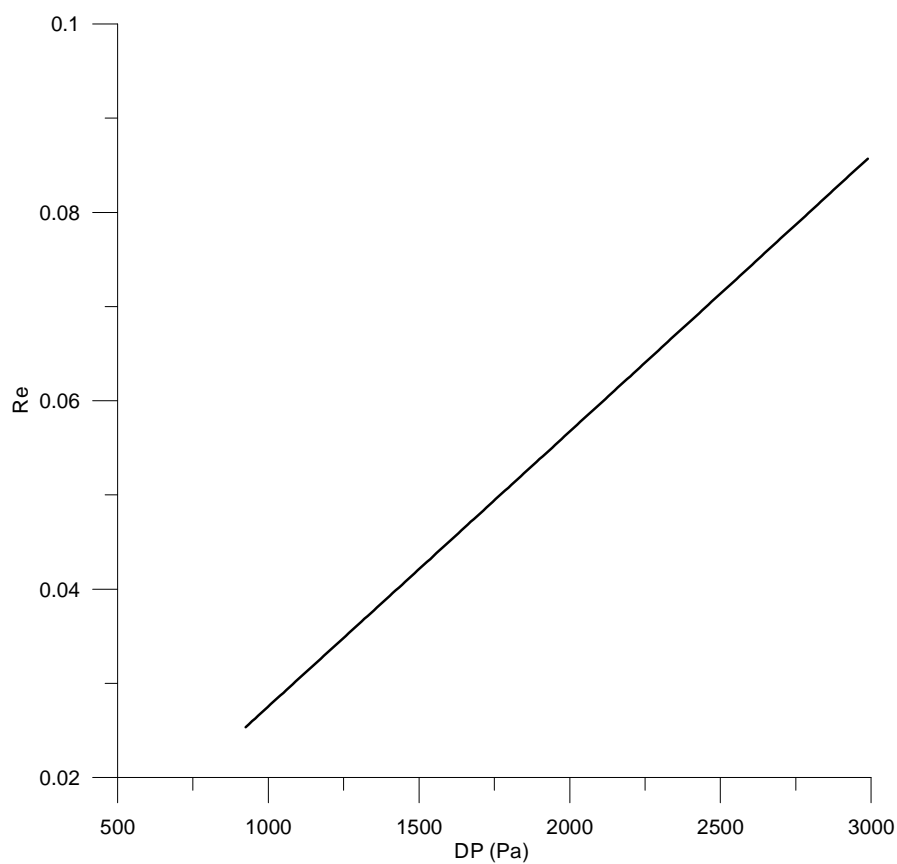
σχήμα 4



σχήμα 5

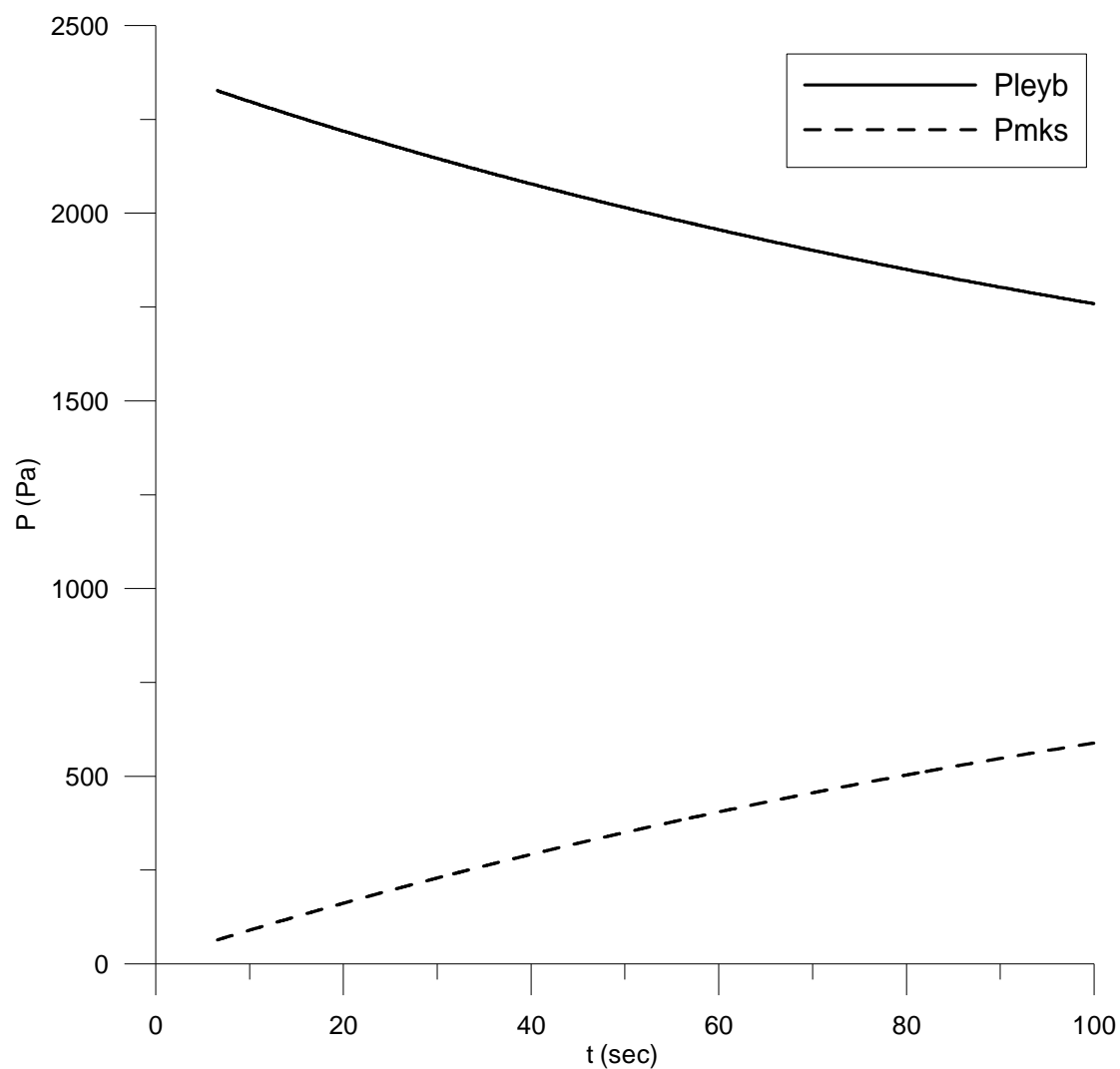


σχήμα 6

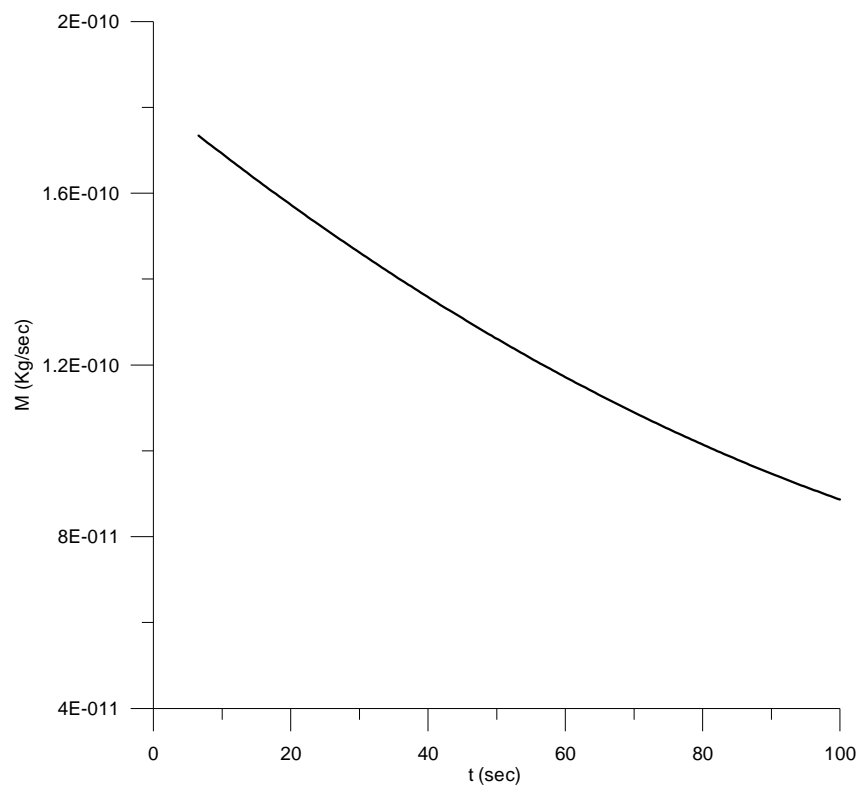


σχήμα 7

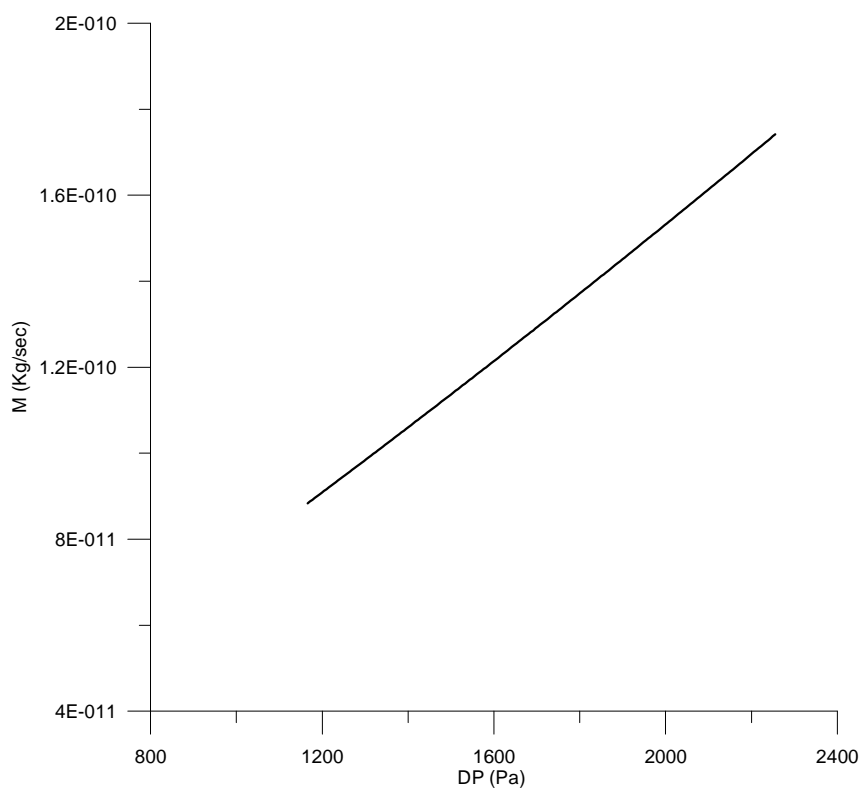
ΜΕΤΡΗΣΗ	P _{leyb} (Pa), (torr)	P _{mks} (Pa), (torr)	Kn
Test 9	2327,5 (17,5)	63,84 (0,48)	0,189896



σχήμα 1

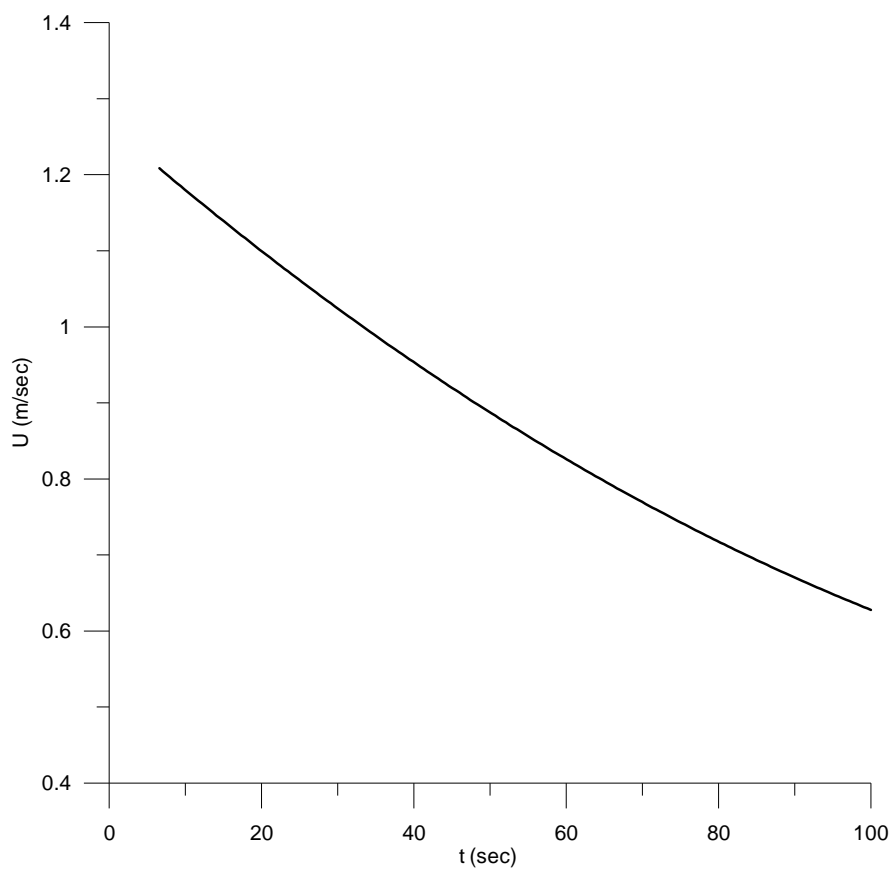


σχήμα 2

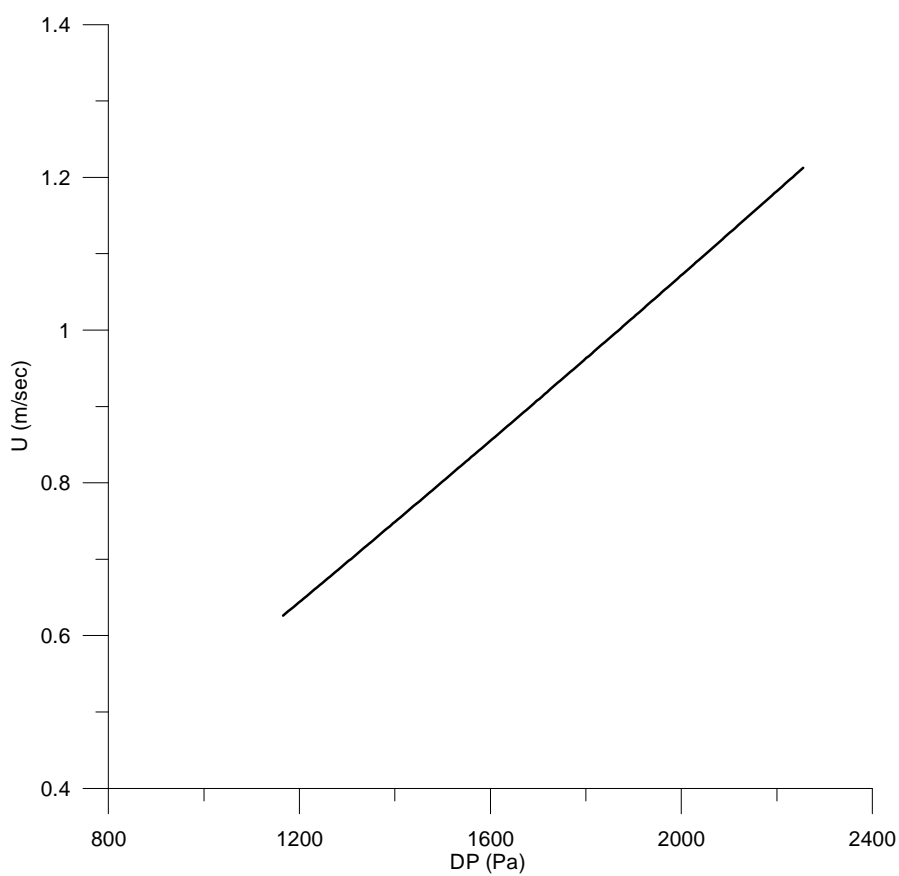


σχήμα 3

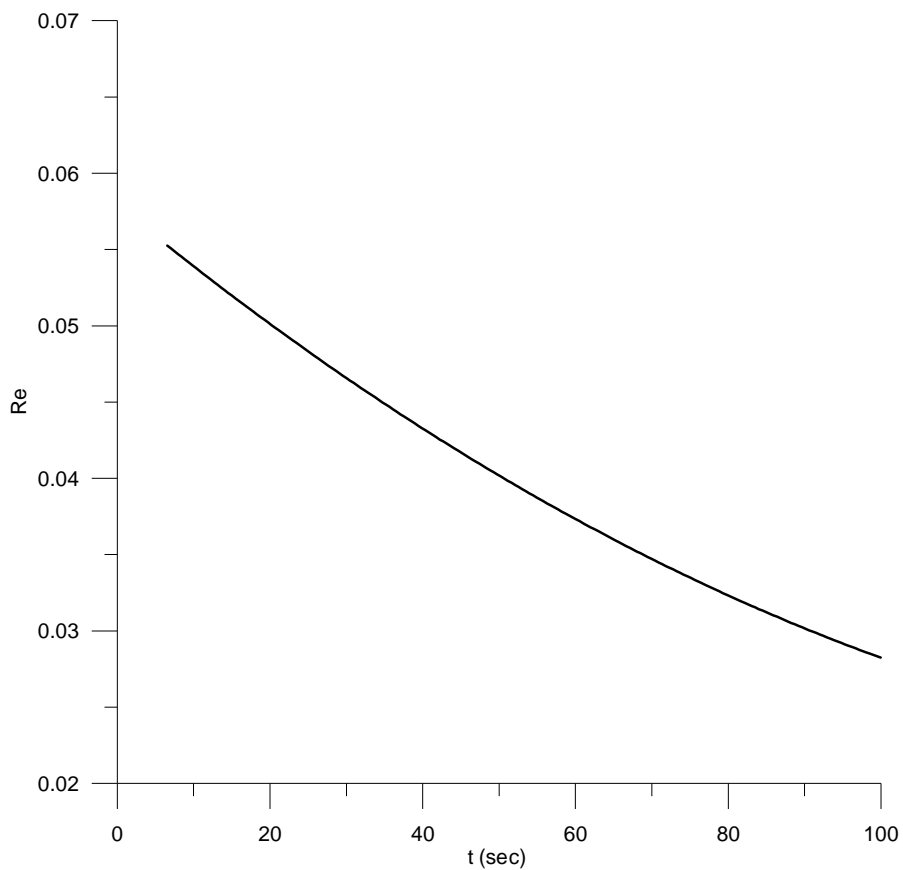
Από το σχήμα 3 φαίνεται πως η σχέση μεταξύ της παροχής μάζας και της διαφοράς πίεσης ξεφεύγει ελαφρώς από τη γραμμικότητα.



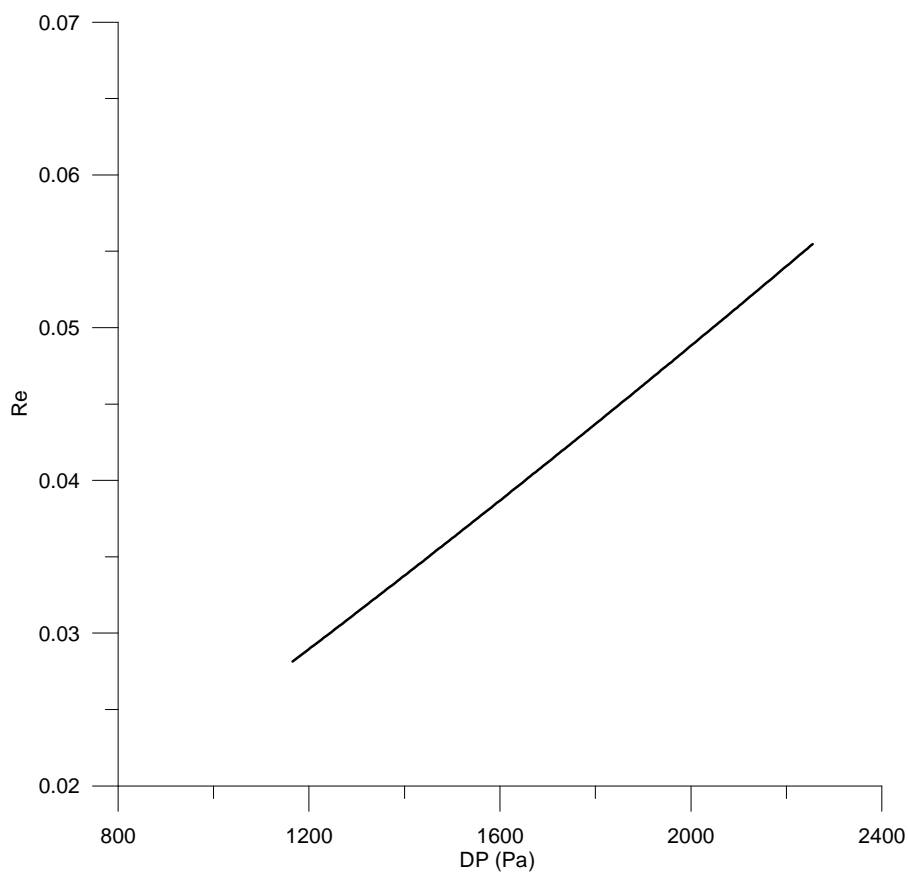
σχήμα 4



σχήμα 5

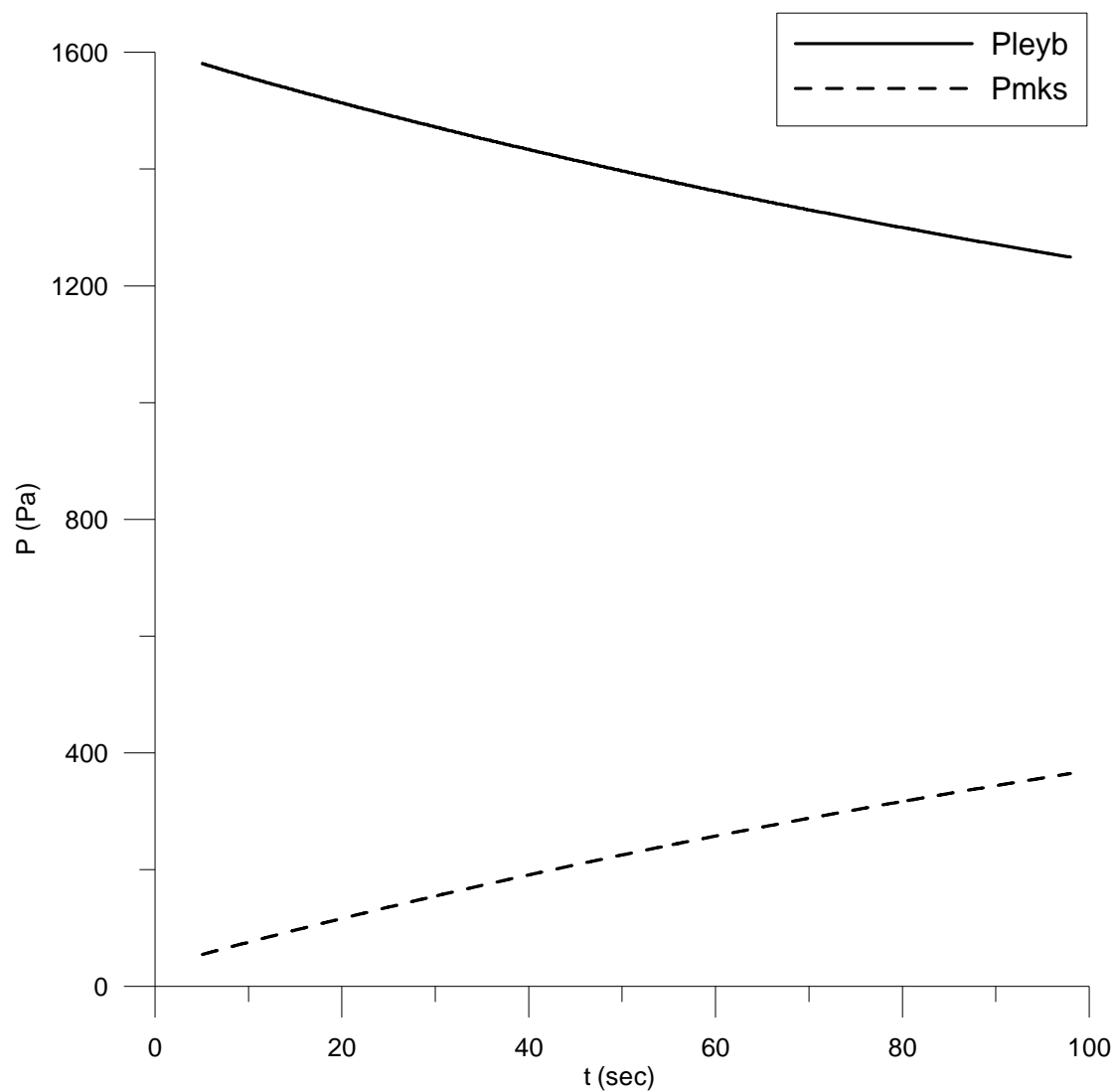


σχήμα 6

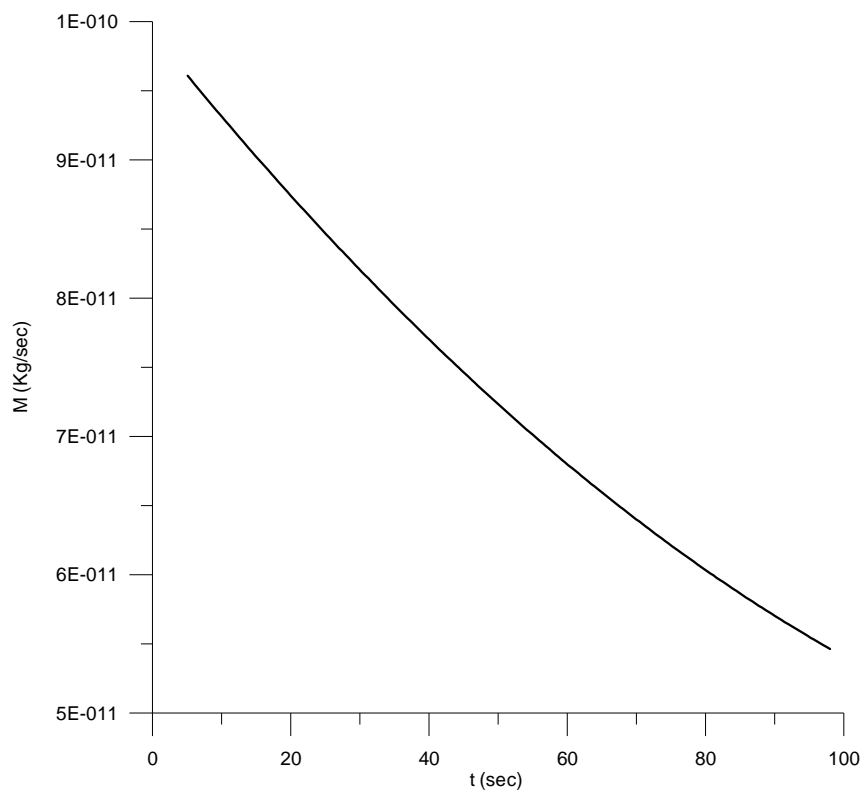


σχήμα 7

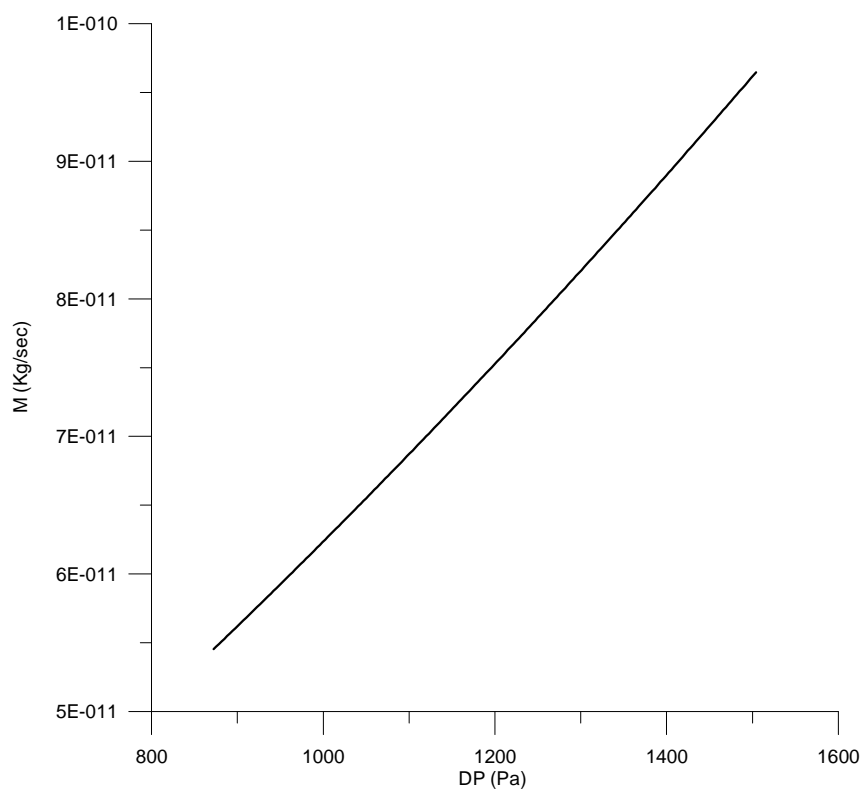
ΜΕΤΡΗΣΗ	P _{leyb} (Pa), (torr)	P _{mks} (Pa), (torr)	Kn
Test 10	1581,37 (11,89)	54,6896 (0,4112)	0,277694



σχήμα 1

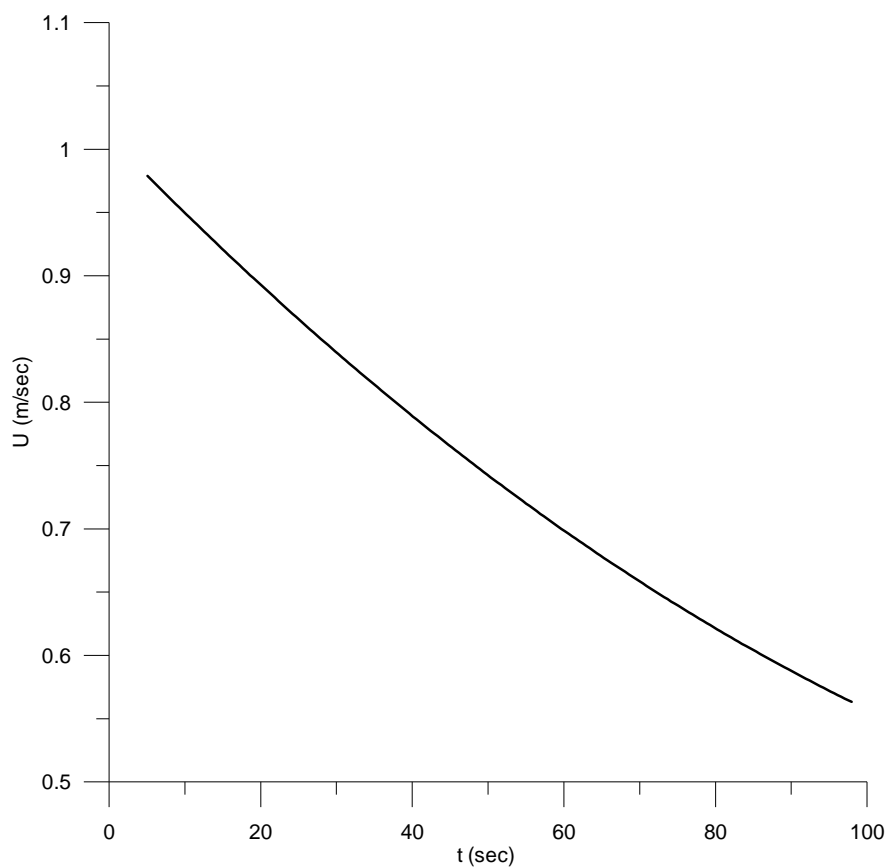


σχήμα 2

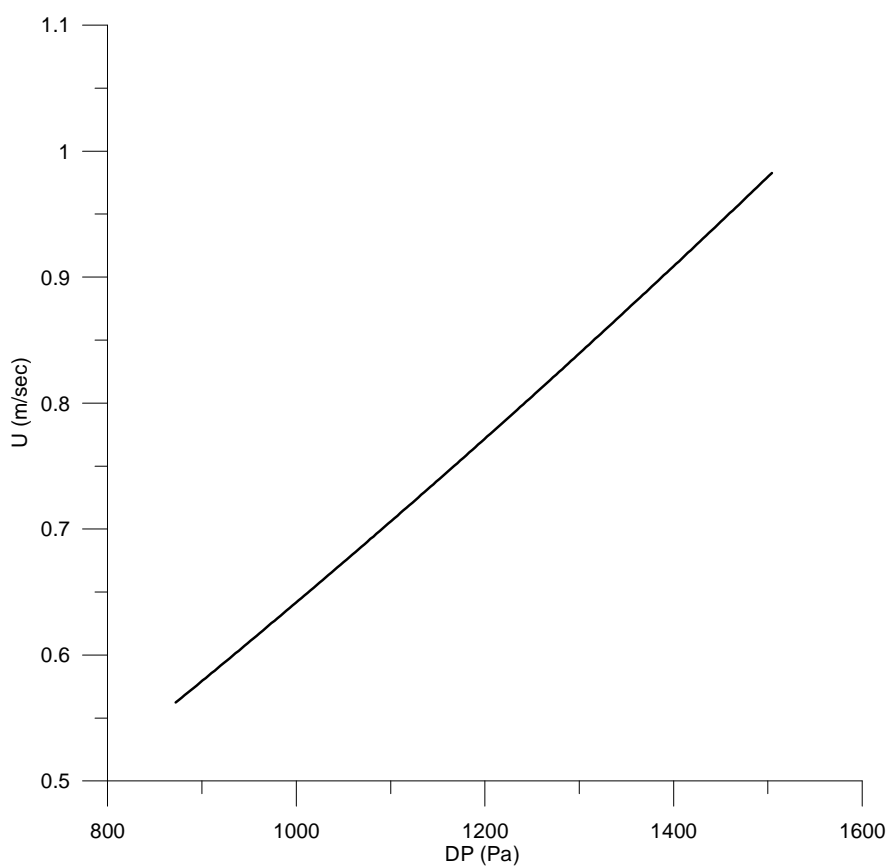


σχήμα 3

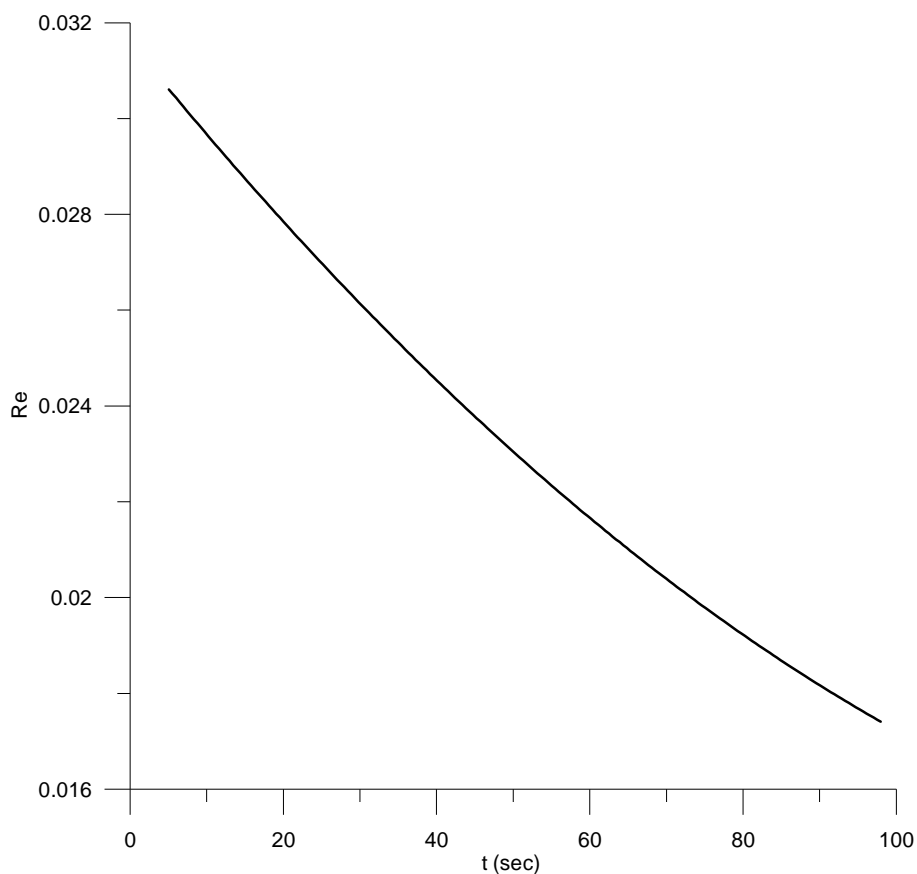
Και εδώ, όπως και στο προηγούμενο πείραμα, παρατηρούμε ότι η σχέση μεταξύ της παροχής μάζας και της διαφοράς πίεσης ξεφεύγει ελαφρώς από τη γραμμικότητα.



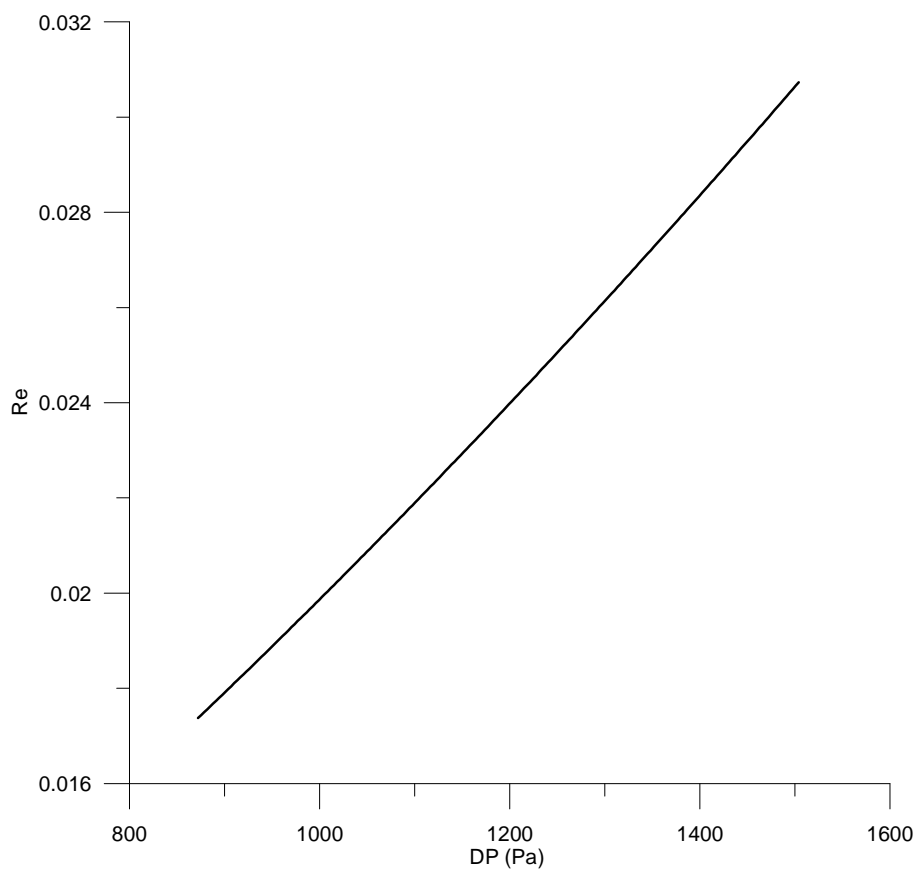
σχήμα 4



σχήμα 5

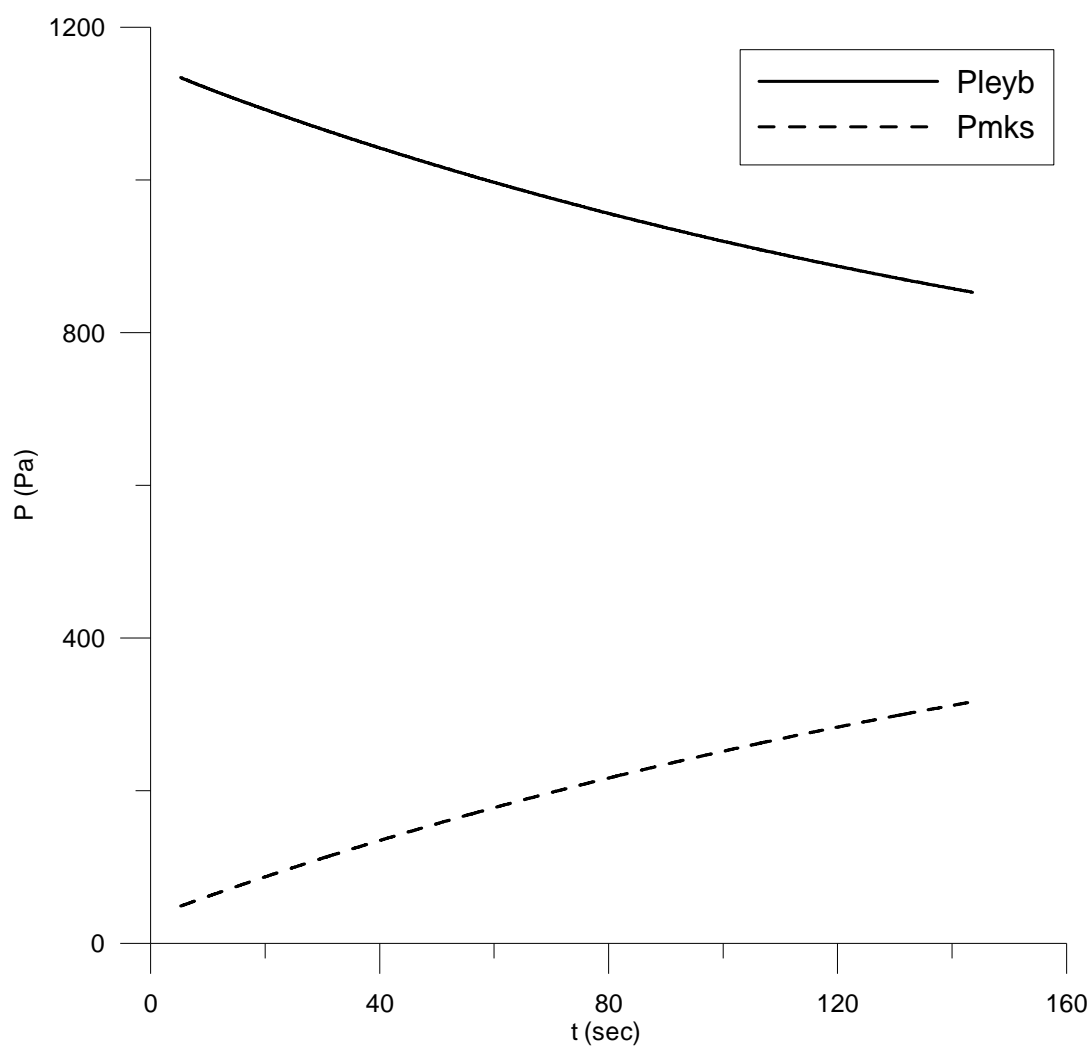


σχήμα 6

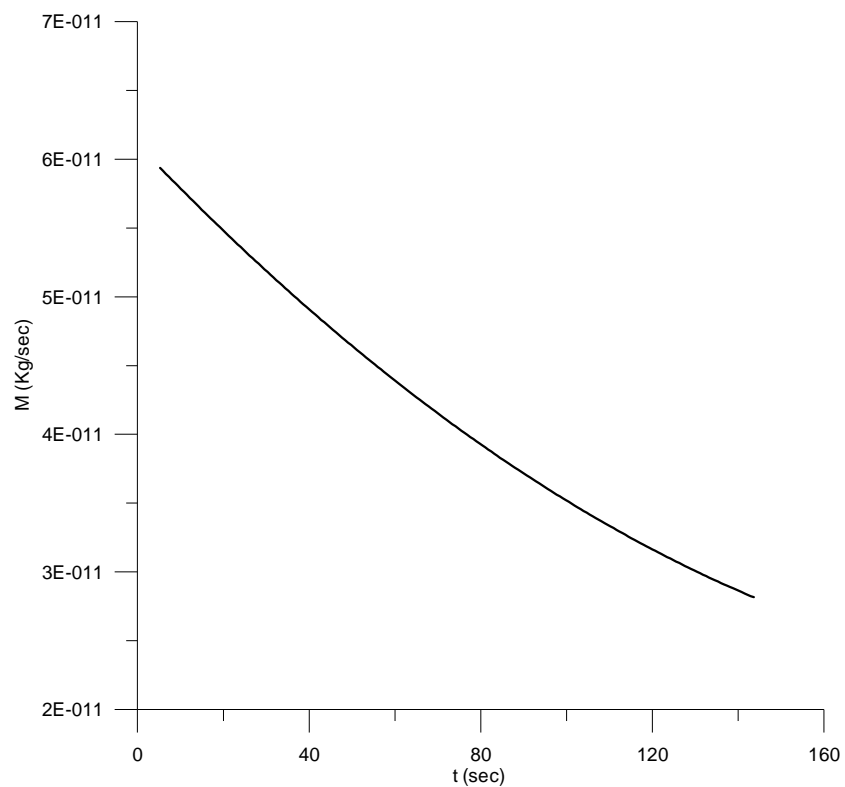


σχήμα 7

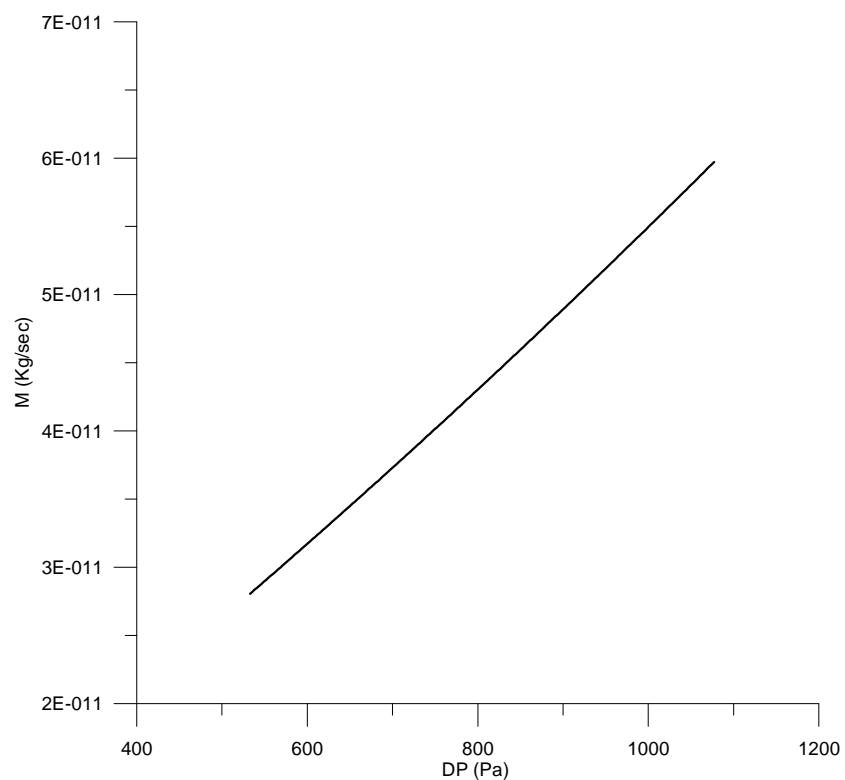
ΜΕΤΡΗΣΗ	P _{leyb} (Pa), (torr)	P _{mks} (Pa), (torr)	Kn
Test 11	1134,224 (8,528)	48,7312 (0,3664)	0,386078



σχήμα 1

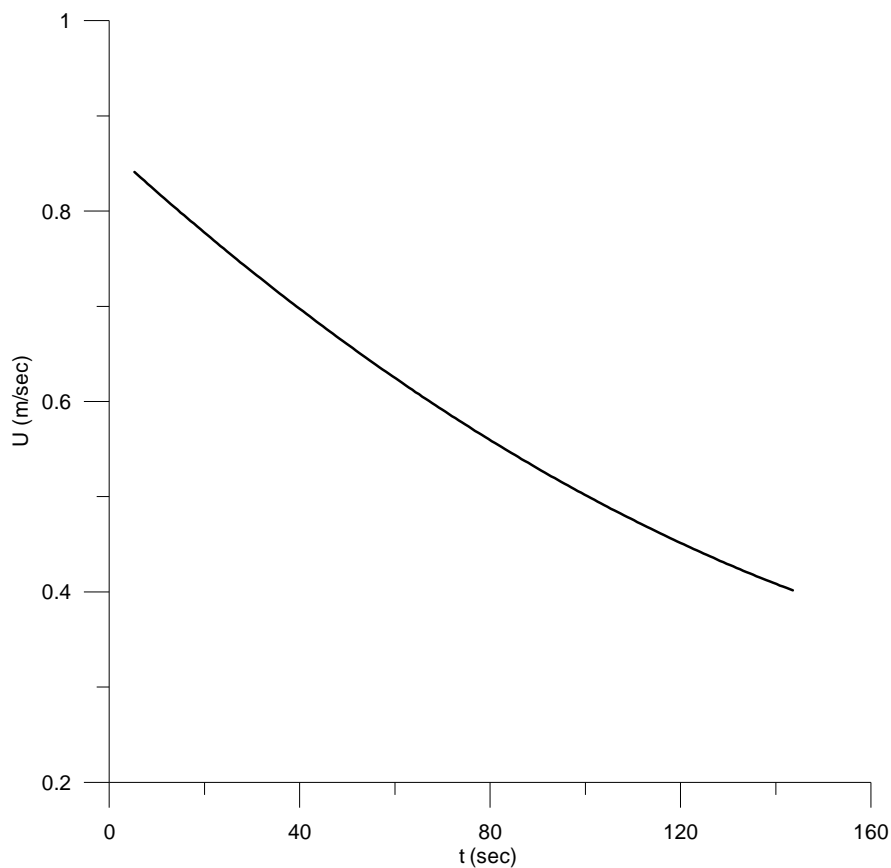


σχήμα 2

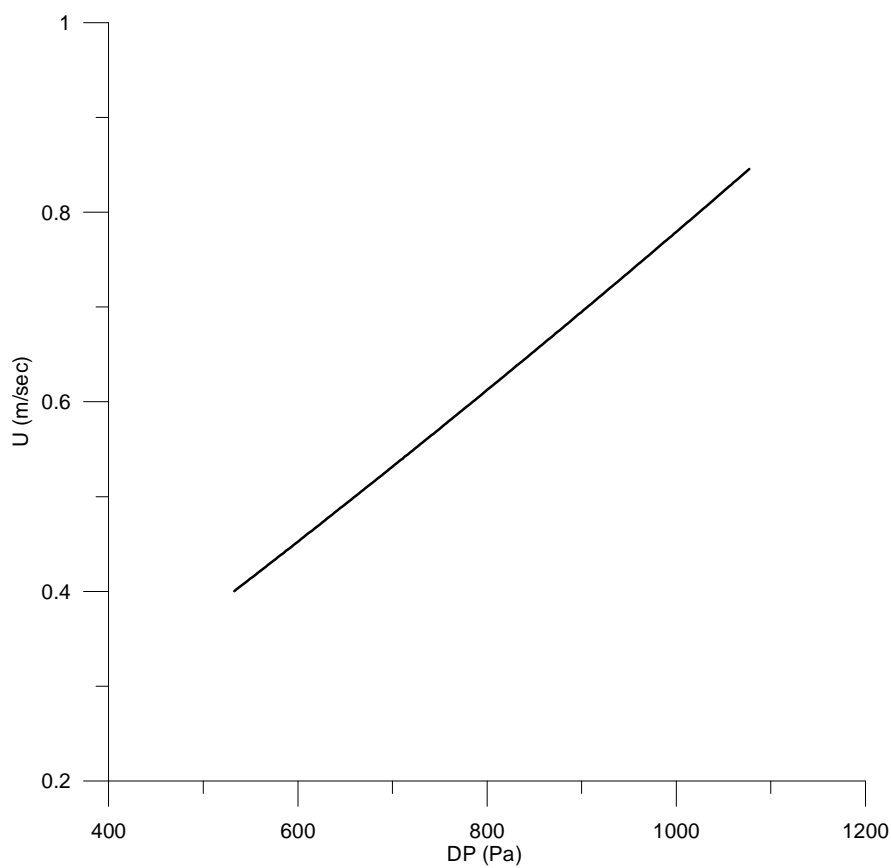


σχήμα 3

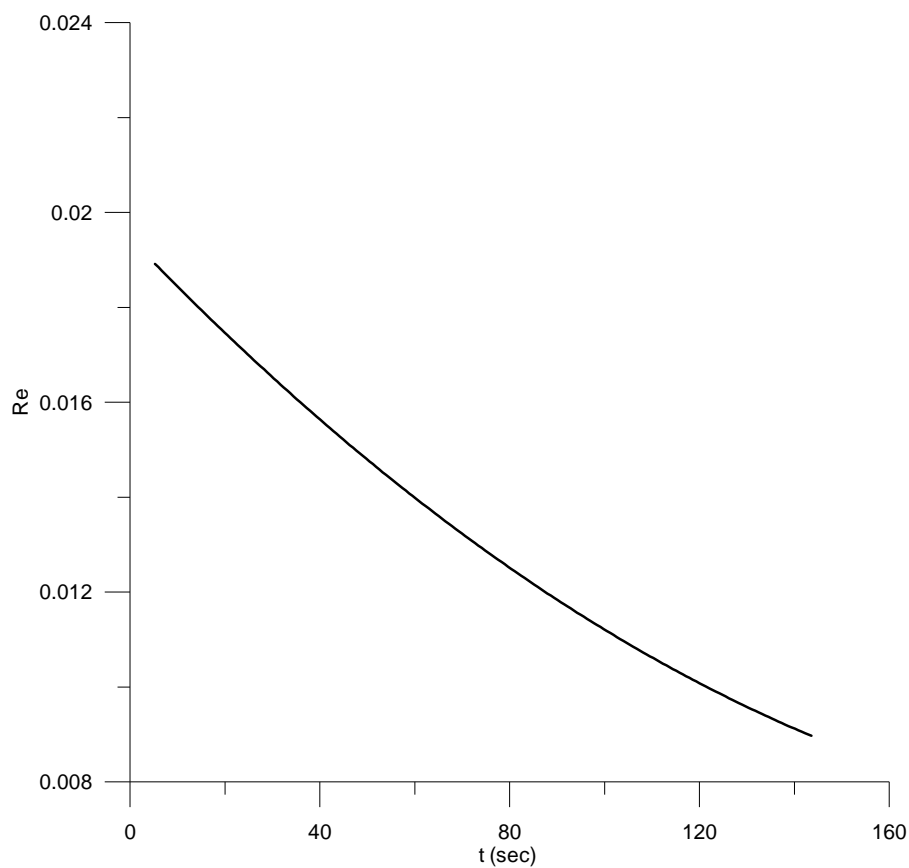
Και εδώ, όπως και στο προηγούμενο πείραμα, η σχέση μεταξύ της παροχής μάζας και της διαφοράς πίεσης ξεφεύγει ελαφρώς από τη γραμμικότητα.



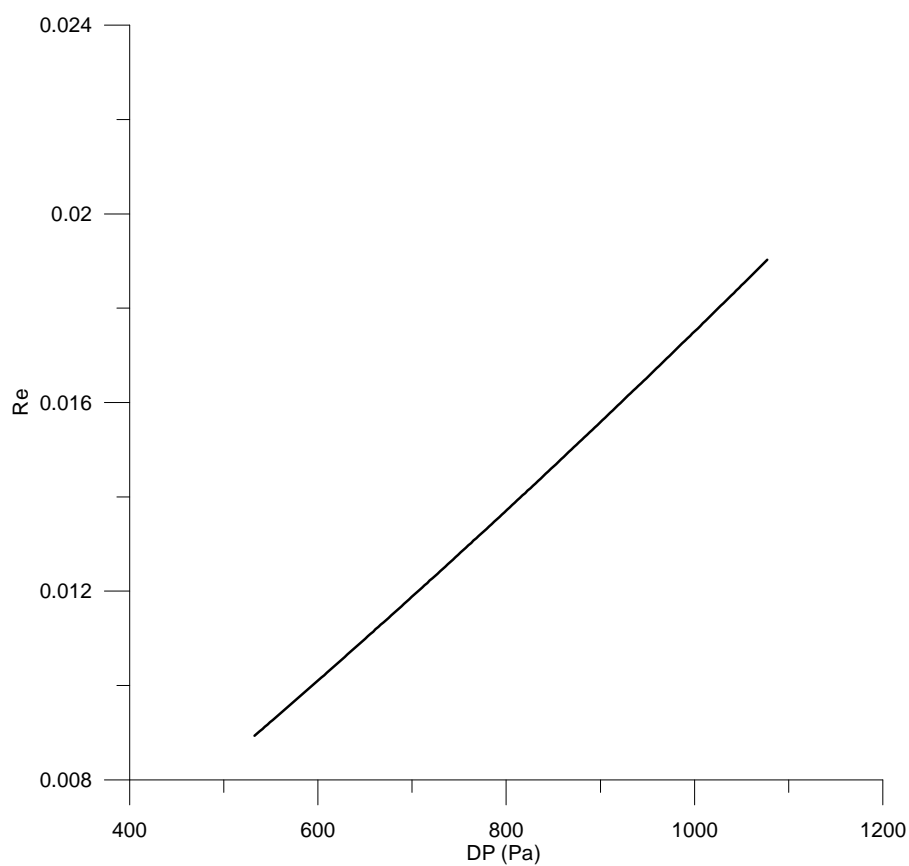
σχήμα 4



σχήμα 5

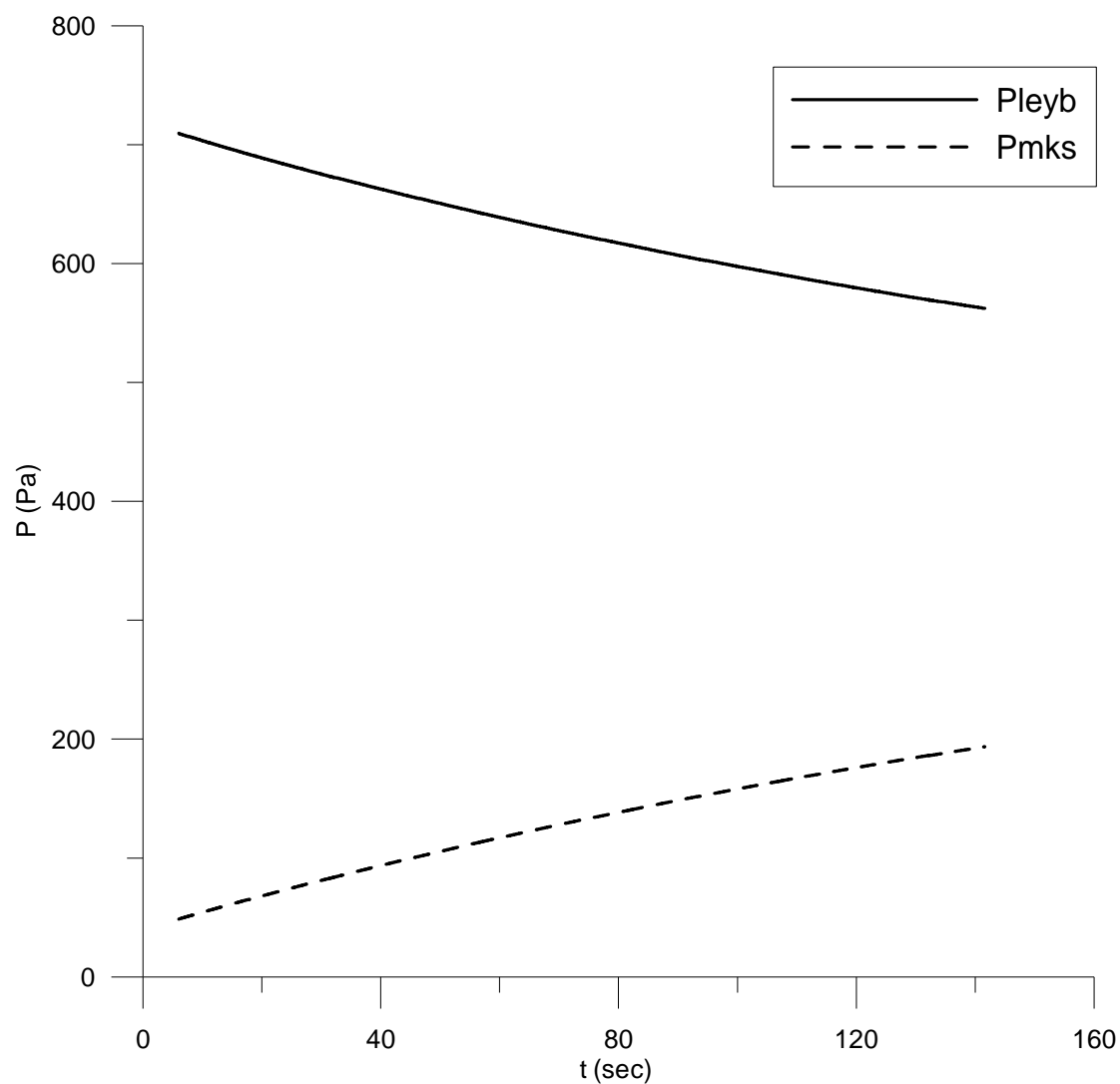


σχήμα 6

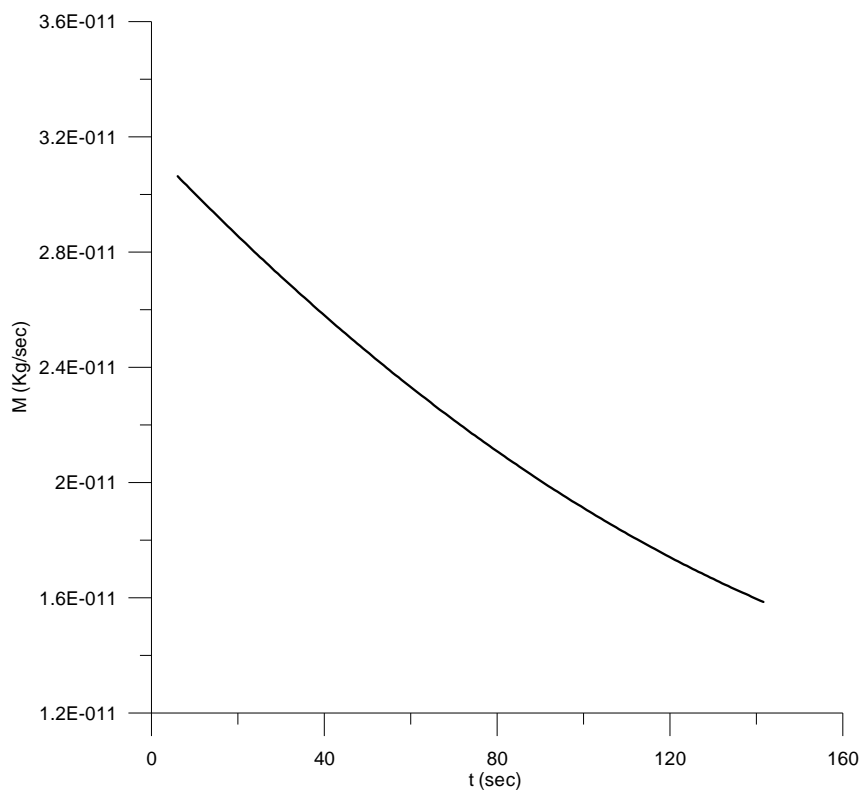


σχήμα 7

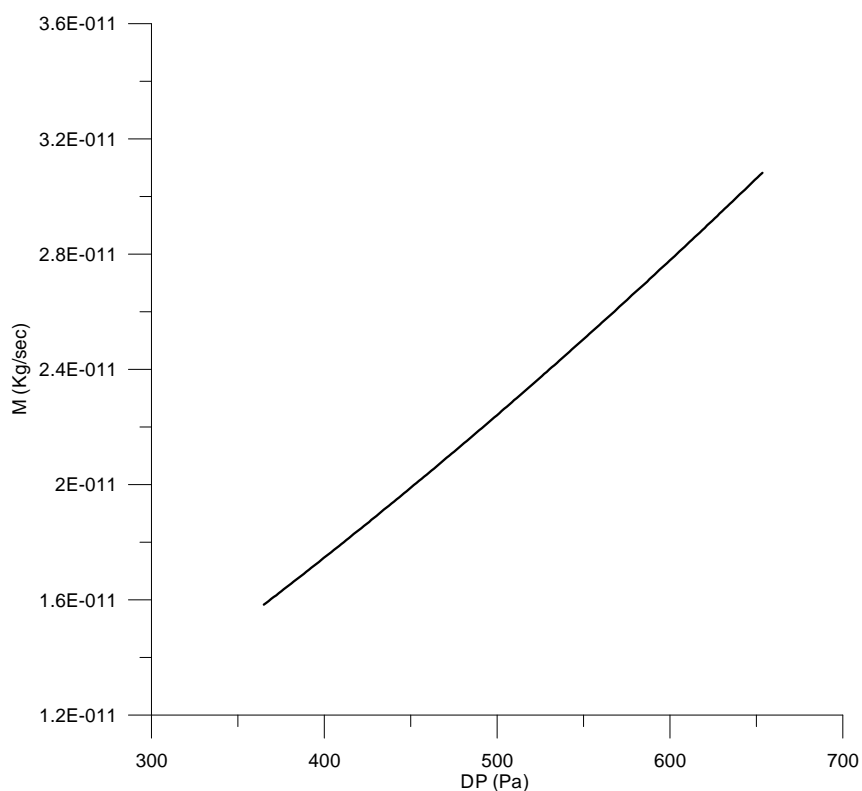
ΜΕΤΡΗΣΗ	P _{leyb} (Pa), (torr)	P _{mks} (Pa), (torr)	Kn
Test 12	709,688 (5,336)	48,7312 (0,3664)	0,59887



σχήμα 1

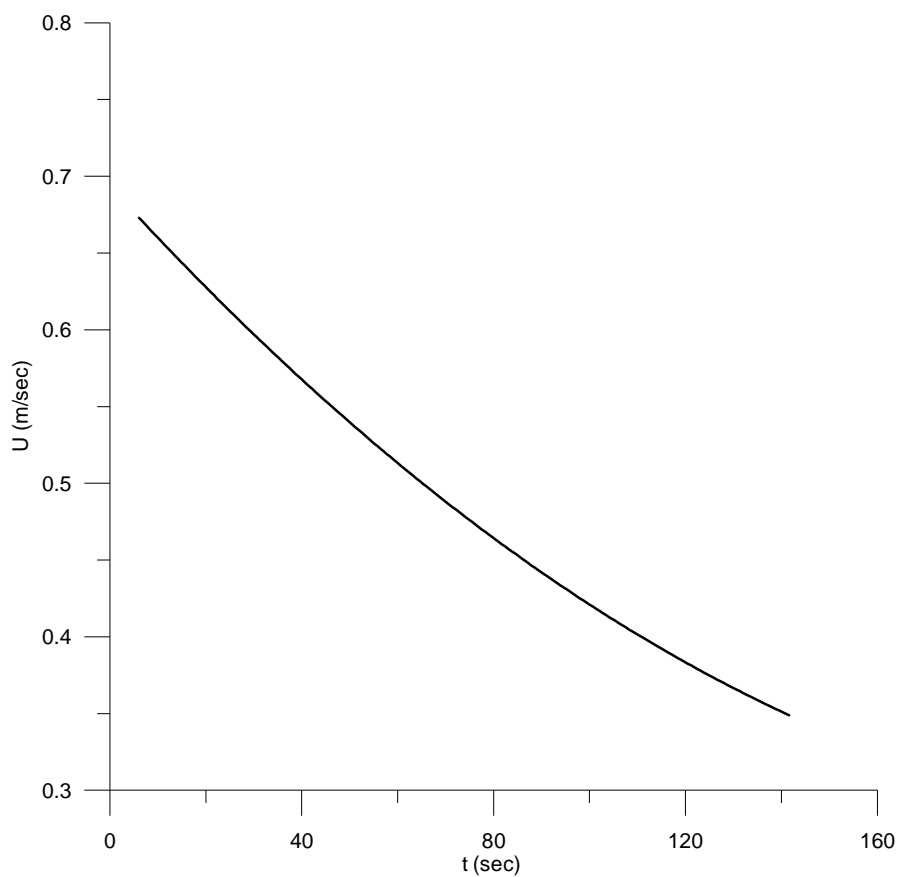


σχήμα 2

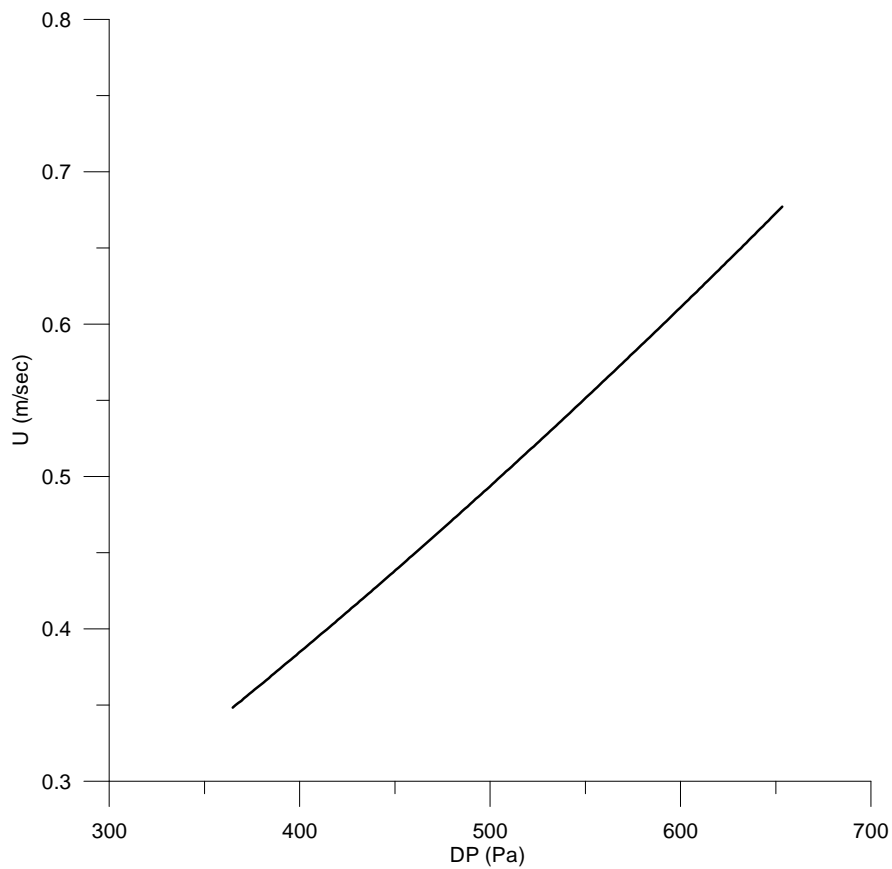


σχήμα 3

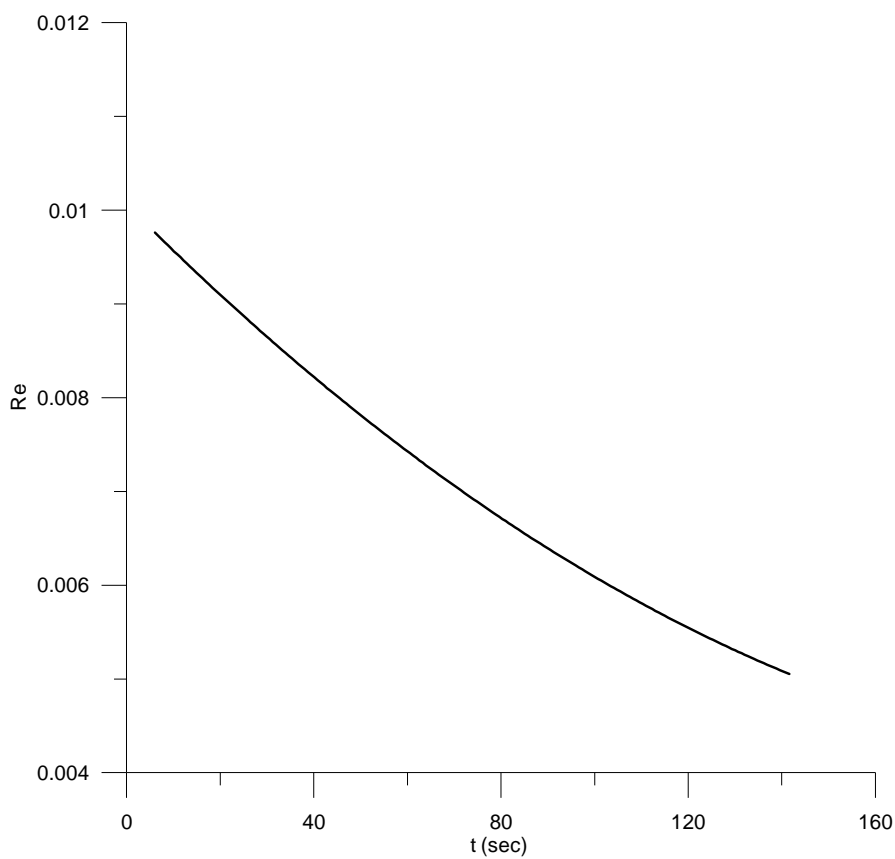
Και εδώ βλέπουμε ότι η σχέση μεταξύ παροχής μάζας και διαφοράς πίεσης φαίνεται να ξεφεύγει ελαφρώς από τη γραμμικότητα.



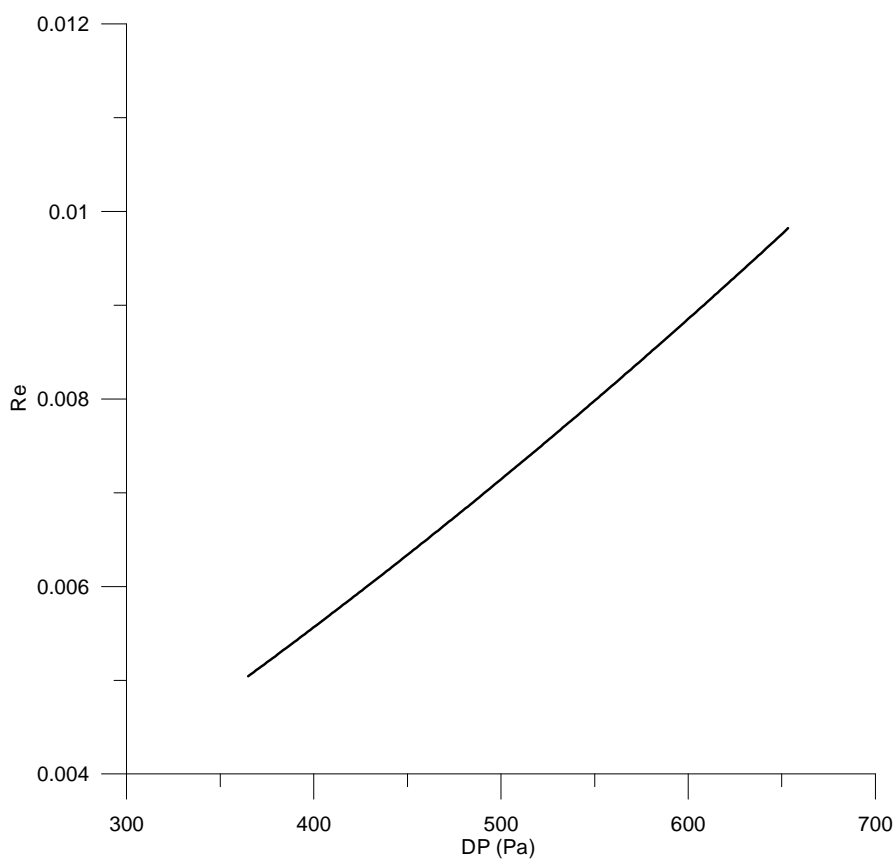
σχήμα 4



σχήμα 5



σχήμα 6



σχήμα 7

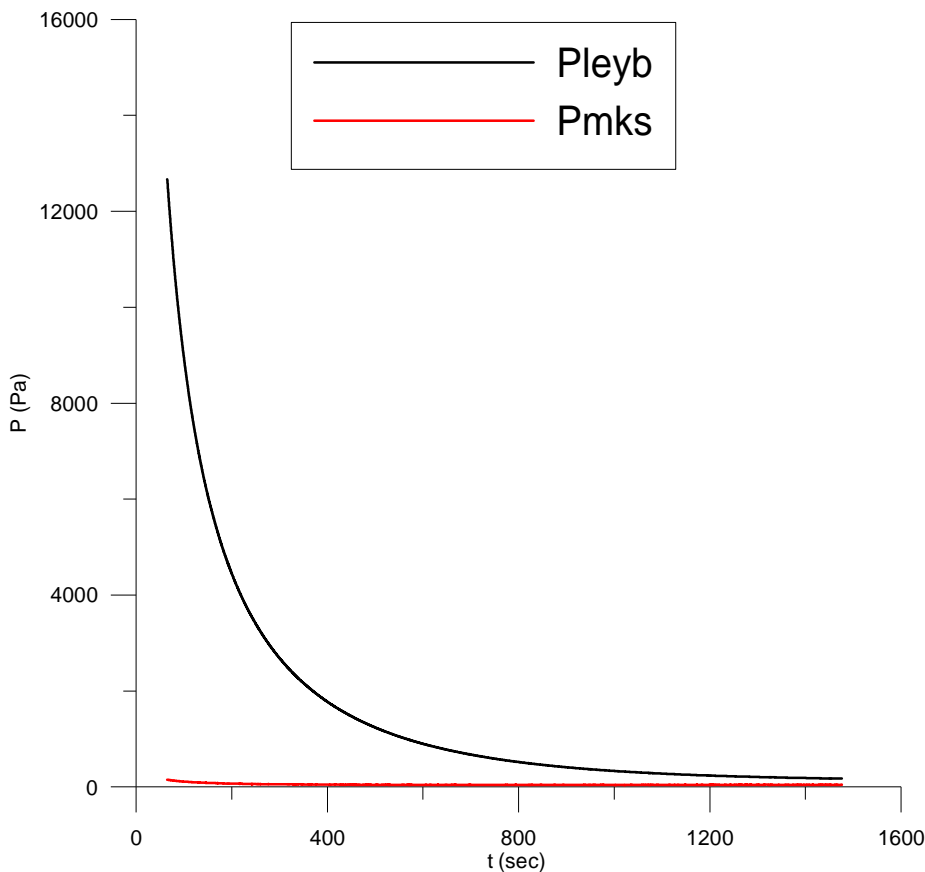
- Πλάκα μικροαγωγών μήκους $L=4880\mu\text{m}$, πλάτους $W=285\mu\text{m}$ και βάθους $H=20\mu\text{m}$. Αριθμός καναλιών $N=19$.

Αργό ως εργαζόμενο μέσο.

1^η Περίπτωση:

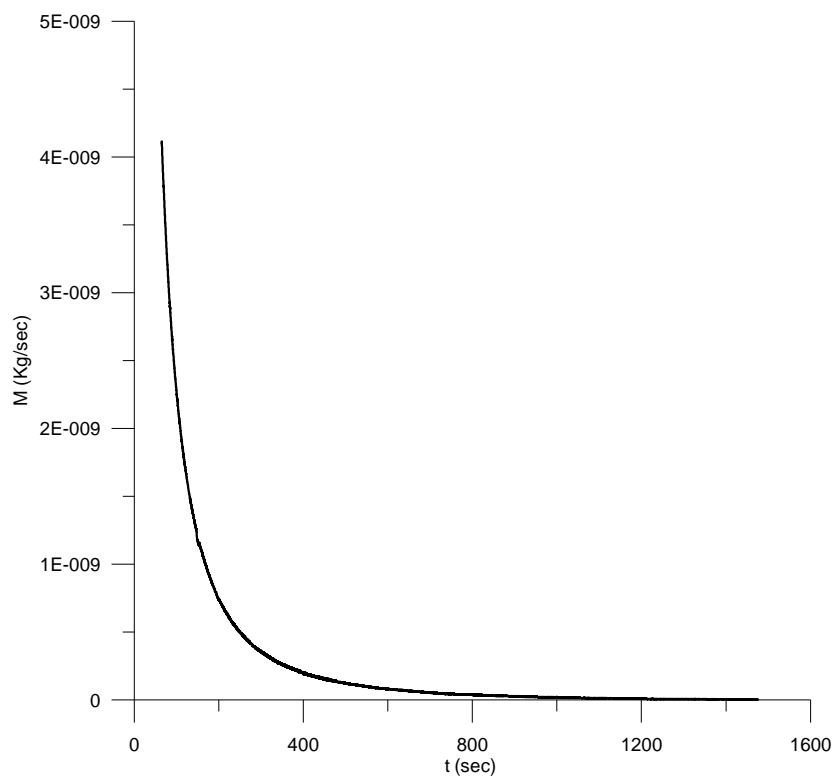
Στο πείραμα αυτό ακολουθήσαμε την ίδια μεθοδολογία όπως και στο προηγούμενο, με την μόνη διαφορά ότι κρατήσαμε την πίεση P_{mks} σταθερή περίπου μεταξύ των τιμών 1,102 και 0,3504 torr (146,566 και 46,6032 Pa). Η αρχική πίεση P_{leyb} ήταν 95,25 torr (12668,25 Pa). Αρχικά ο αριθμός Knudsen ήταν $Kn=0,053874$. Ο τελικός αριθμός Knudsen ήταν $Kn=3,074098$.

Ακολουθούν τα σχετικά διαγράμματα:

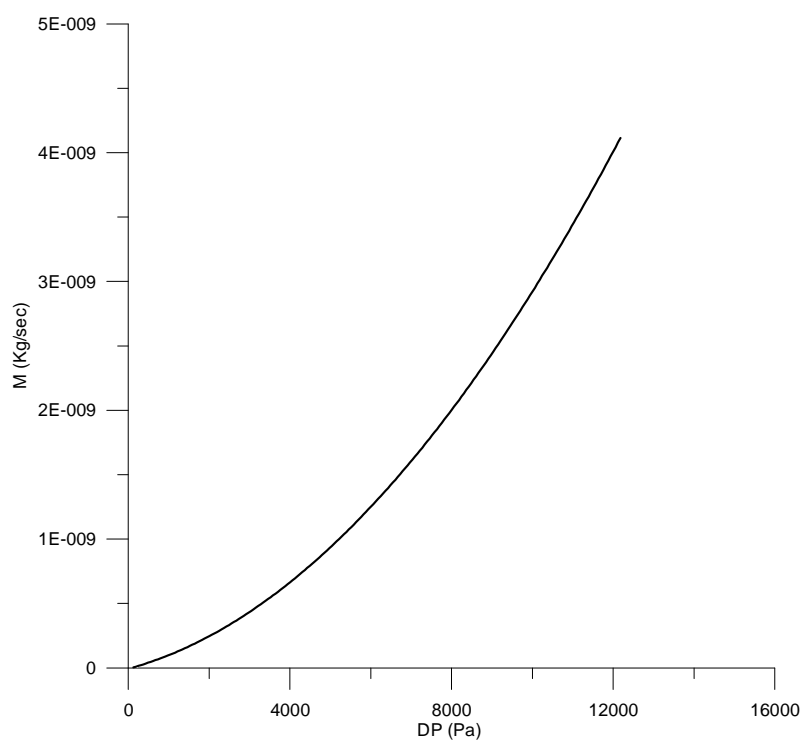


Σχήμα 1

Όπως περιμέναμε και φαίνεται και στο σχήμα 1, η πίεση εισόδου μειώνεται καθώς μεταβάλλεται ο χρόνος, ενώ η πίεση στην έξοδο παραμένει σταθερή.

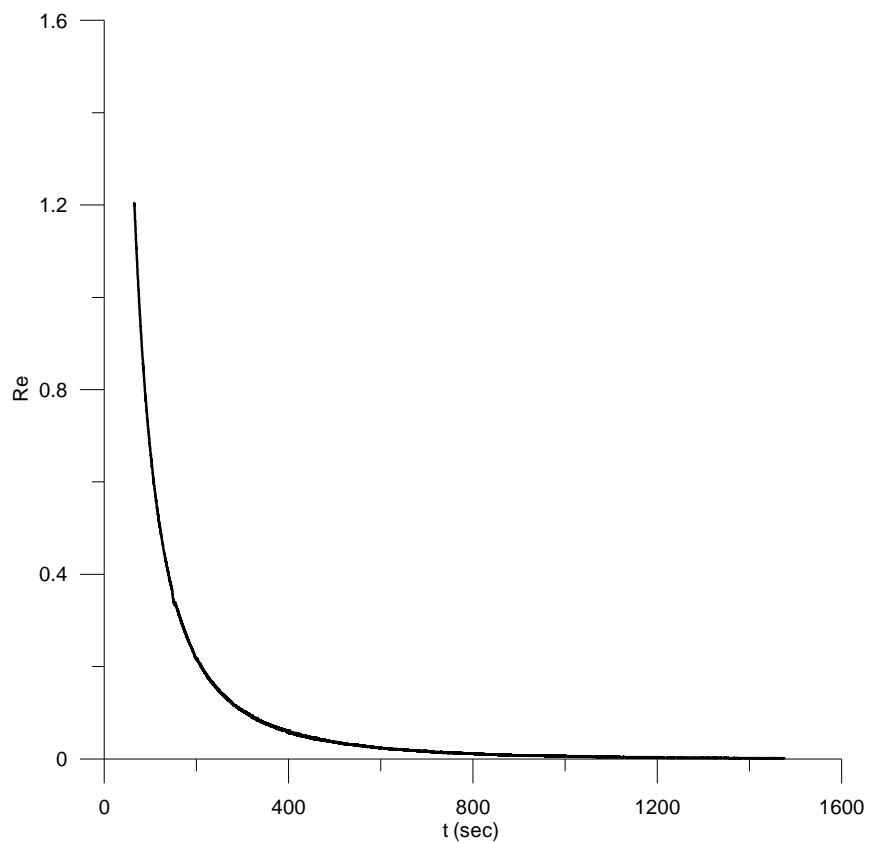


Σχήμα 2

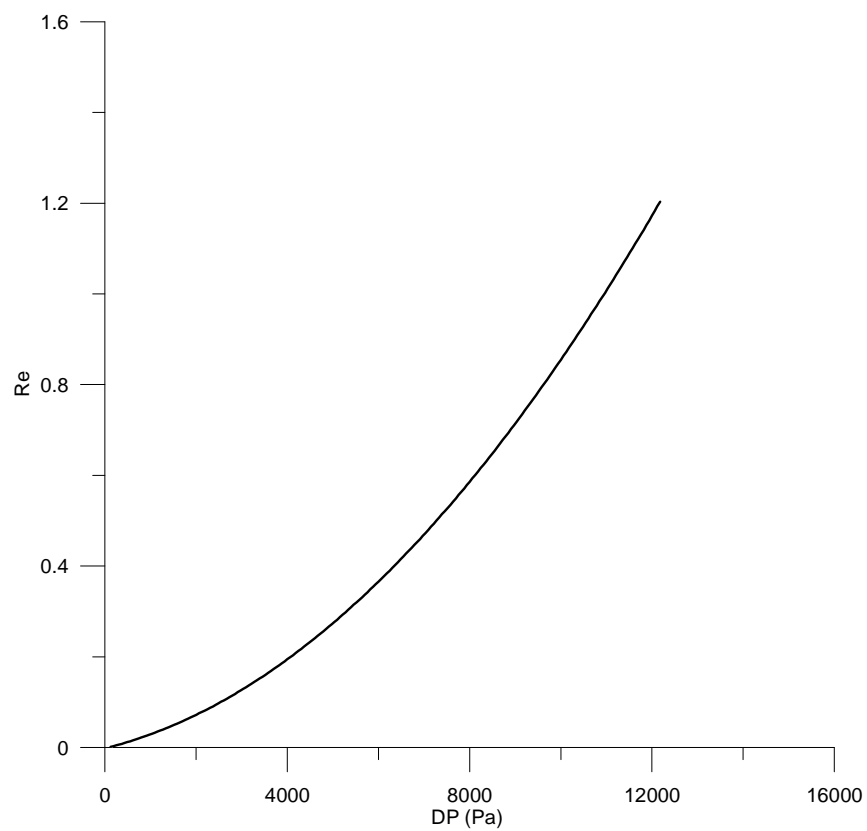


Σχήμα 3

Από το σχήμα 2 και 3 φαίνεται το αναμενόμενο, ότι δηλαδή η παροχή μάζας ελαττώνεται καθώς περνάει ο χρόνος, αφού η διαφορά πίεσης στα άκρα του μικροαγωγού ελαττώνεται.



Σχήμα 4



Σχήμα 5

- Πλάκα μικροαγωγών μήκους $L=4880\mu\text{m}$, πλάτους $W=285\mu\text{m}$ και βάθους $H=20\mu\text{m}$. Αριθμός καναλιών $N=19$.

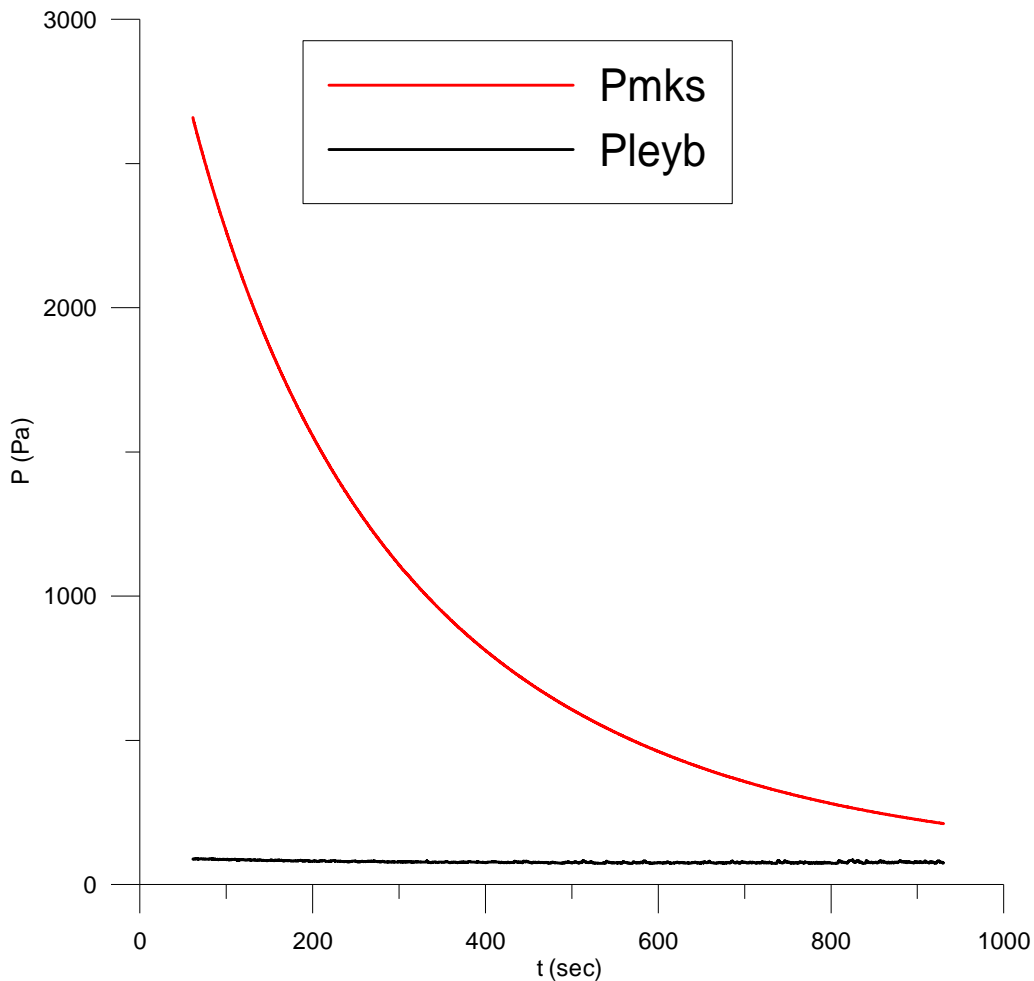
Αργό ως εργαζόμενο μέσο.

2^η Περίπτωση:

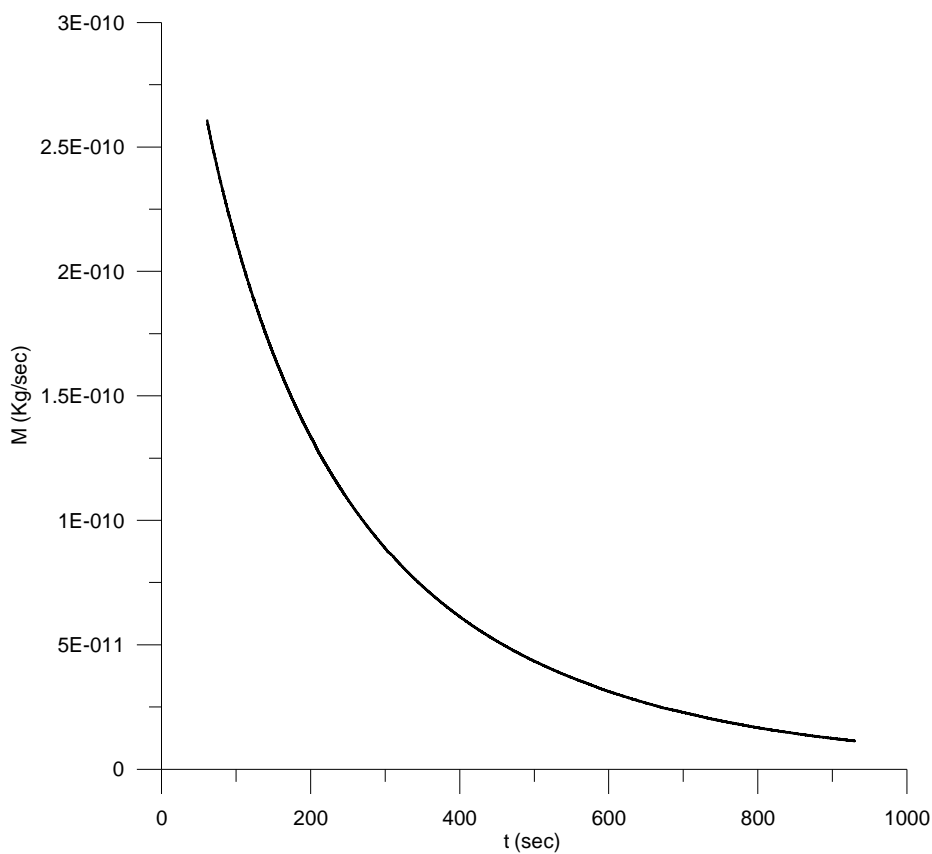
Στην δεύτερη αυτή περίπτωση ακολουθήσαμε την ίδια μεθοδολογία όπως και στην προηγούμενη, με την μόνη διαφορά ότι εδώ κρατήσαμε την πίεση Pleyb σταθερή περίπου μεταξύ των τιμών 0,664 και 0,56 torr (88,312 και 74,48 Pa). Η αρχική πίεση Pmks ήταν 20 torr (2660 Pa). Αρχικά ο αριθμός Knudsen ήταν $Kn=0,2907$. Ο τελικός αριθμός Knudsen ήταν $Kn=2,5019$.

Δηλαδή αν πούμε ότι στην 1^η περίπτωση το ρευστό πάει από την A δεξαμενή προς την B, τότε στη 2^η περίπτωση το ρευστό πάει από την B προς την A.

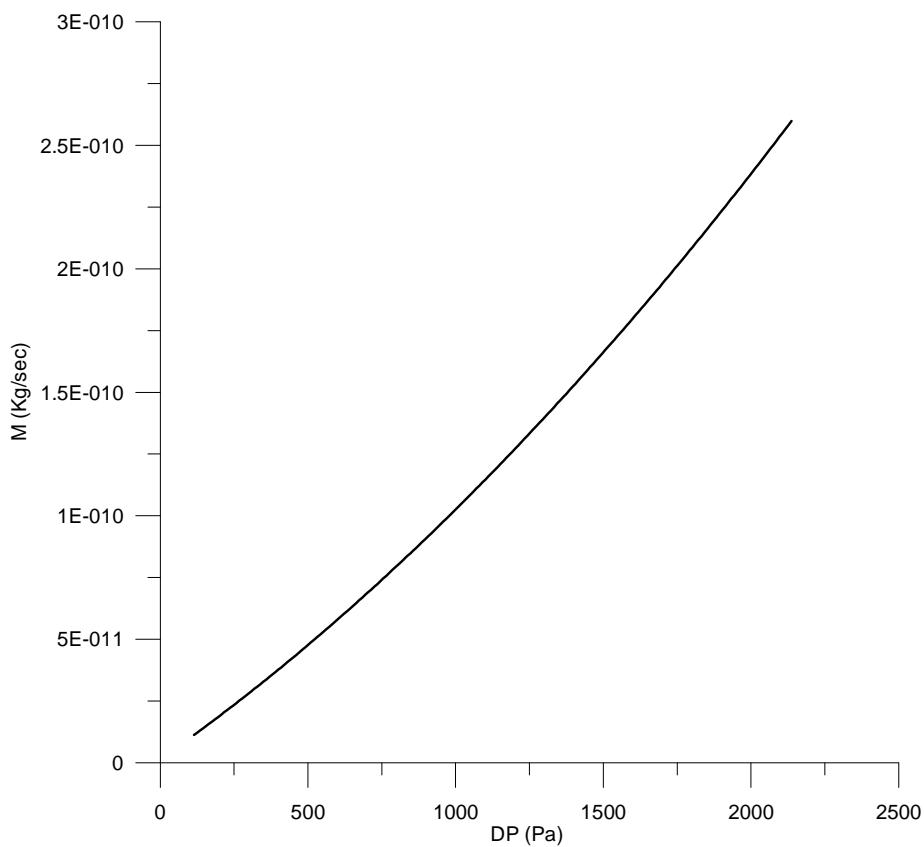
Ακολουθούν τα σχετικά διαγράμματα. Τα σχόλια είναι τα ίδια με την προηγούμενη περίπτωση:



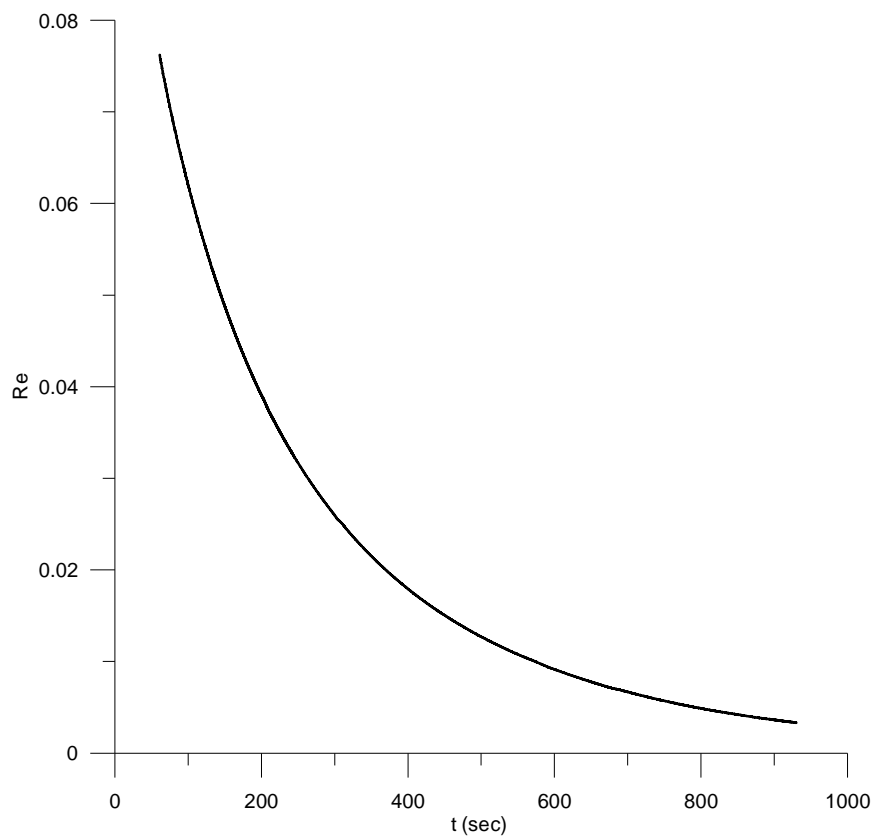
Σχήμα 1



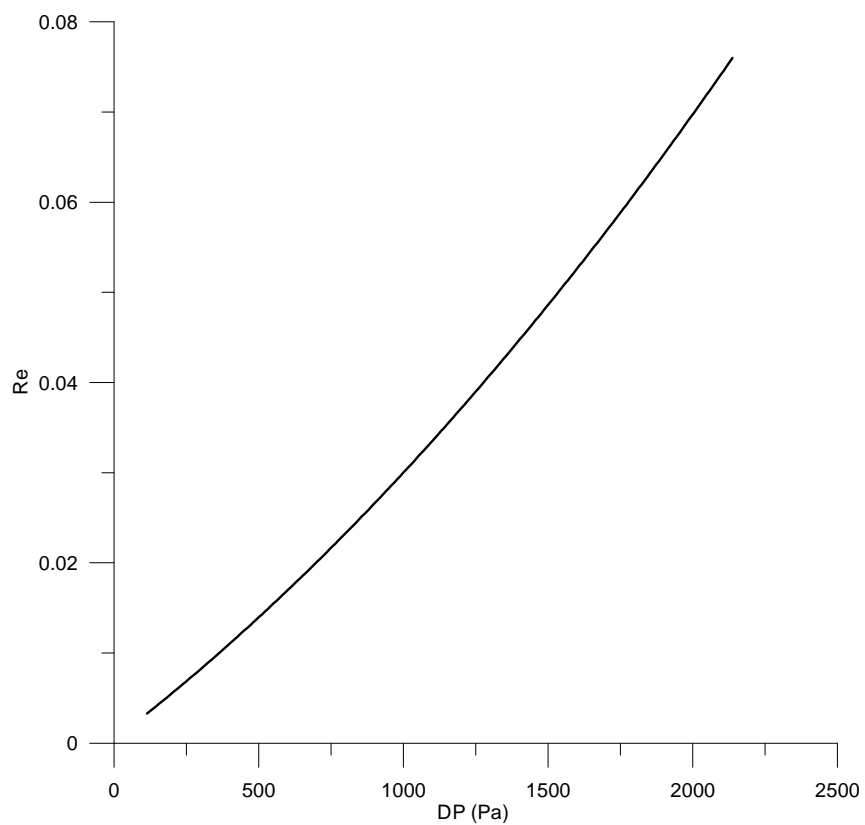
Σχήμα 2



Σχήμα 3

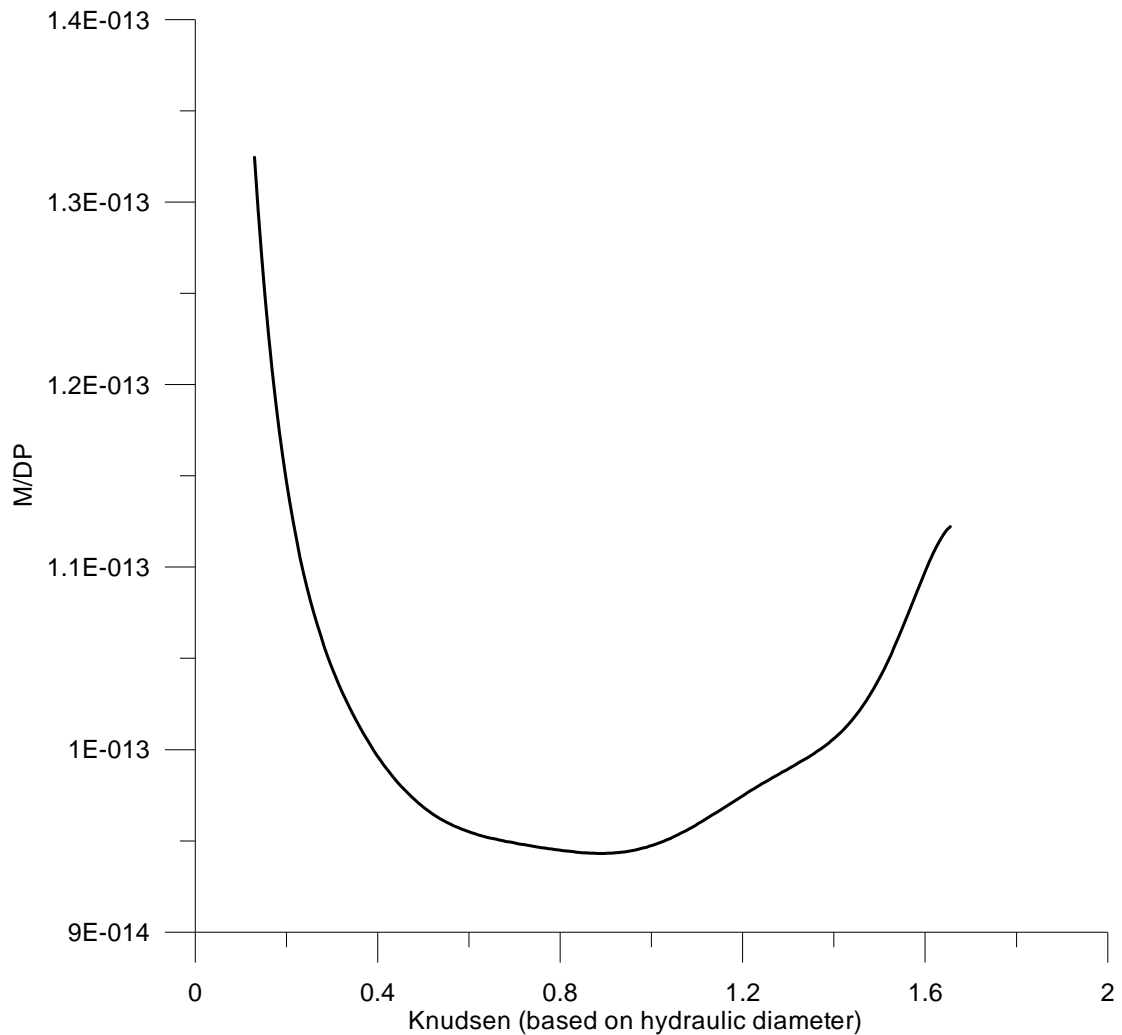


Σχήμα 4



Σχήμα 5

Το τελευταίο και πολύ ενδιαφέρον διάγραμμα (σχήμα 6) που φαίνεται πιο κάτω, είναι αυτό της παροχής μάζας του ρευστού αδιαστατοποιημένης με την διαφορά της πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου, $M/(P_i - P_o)$, συνάρτηση του αριθμού Knudsen.



Σχήμα 6

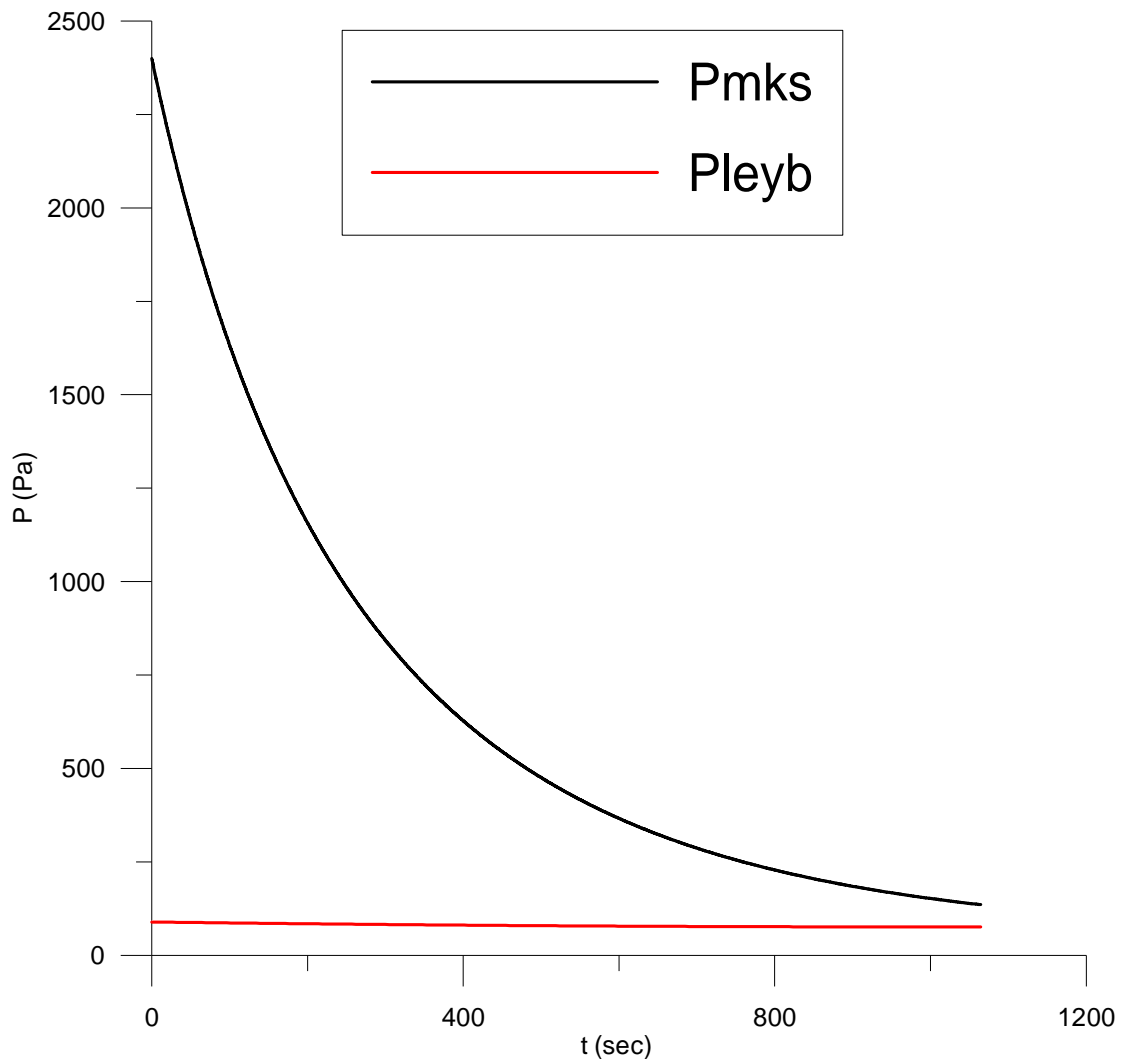
Στο σχήμα αυτό παρατηρούμε ότι η παροχή μάζας ελαττώνεται μέχρι ενός σημείου όπου παρουσιάζει ελάχιστο για Knudsen περίπου 0,9, και στη συνέχεια αρχίζει να αυξάνει και πάλι.

- Πλάκα μικροαγωγών μήκους $L=4880\mu\text{m}$, πλάτους $W=285\mu\text{m}$ και βάθους $H=20\mu\text{m}$. Αριθμός καναλιών $N=19$.

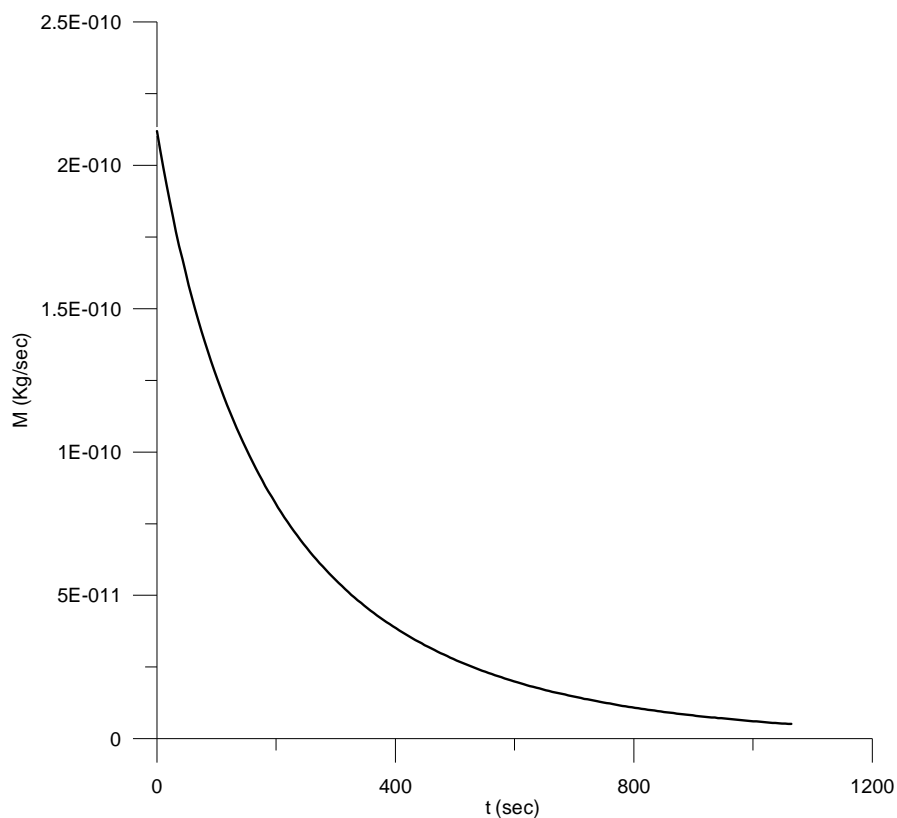
Αέρας ως εργαζόμενο μέσο.

Στο πείραμα αυτό ακολουθήσαμε την ίδια μεθοδολογία όπως και στο προηγούμενο, με την μόνη διαφορά ότι αντί του Αργού χρησιμοποιήσαμε **αέρα** ως εργαζόμενο μέσο. Κρατήσαμε την πίεση P_{leyb} σταθερή περίπου μεταξύ των τιμών 0,684 και 0,58 torr (91,19225 και 77,32676 Pa). Η αρχική πίεση P_{mks} ήταν 18 torr (2399,796 Pa). Αρχικά ο αριθμός Knudsen ήταν $Kn=0,175034$. Ο τελικός αριθμός Knudsen ήταν $Kn=2,046523$.

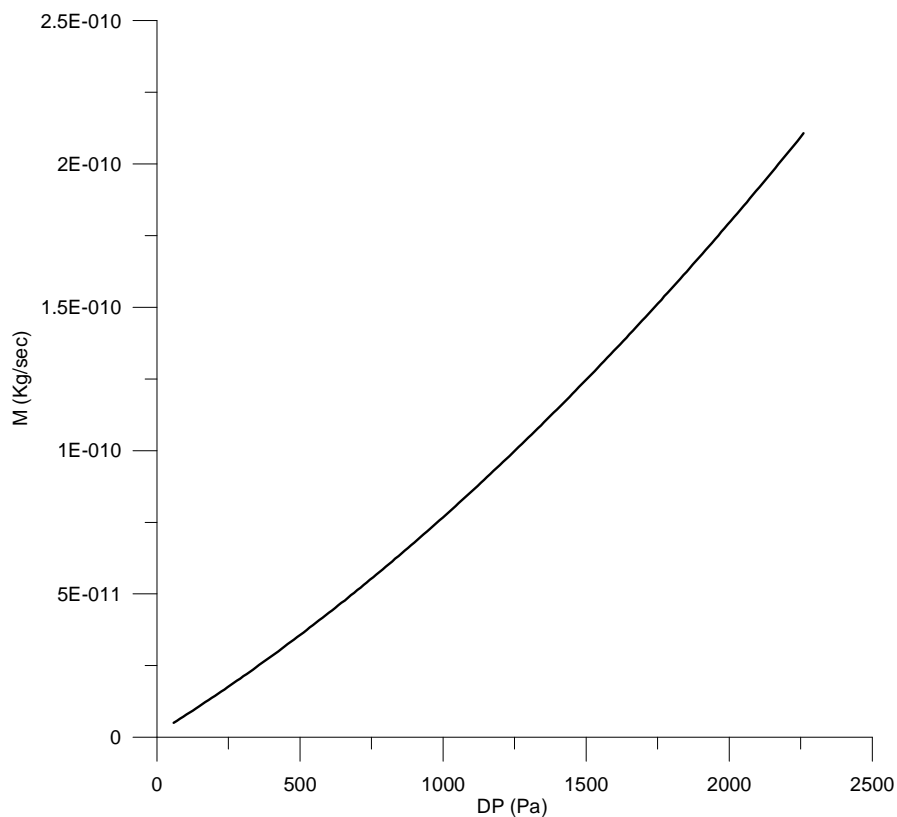
Ακολουθούν τα σχετικά διαγράμματα:



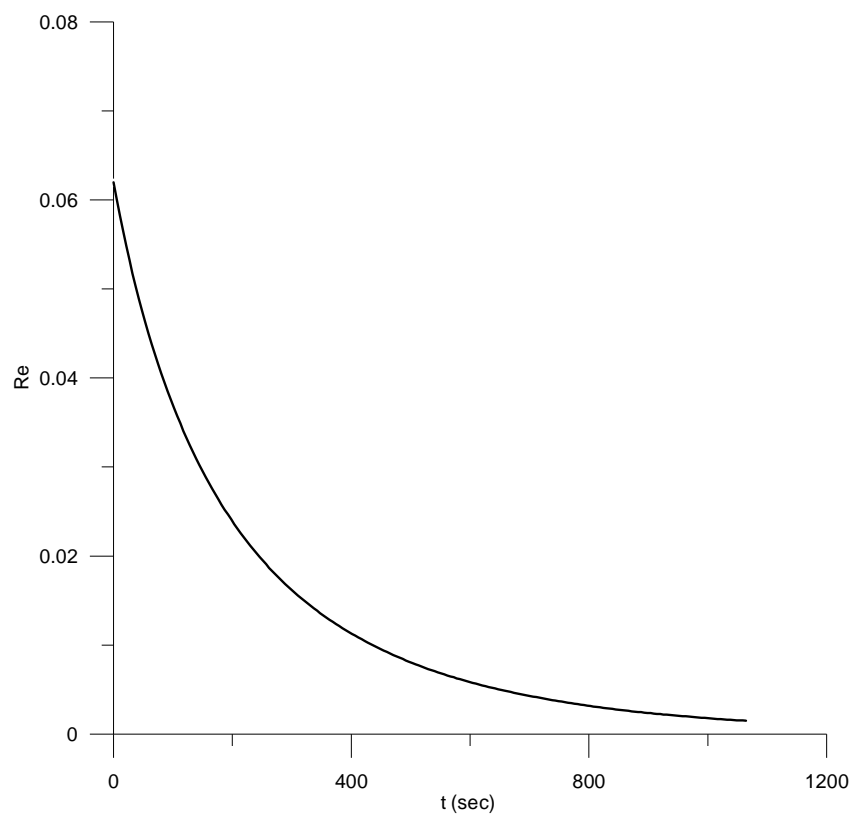
Σχήμα 1



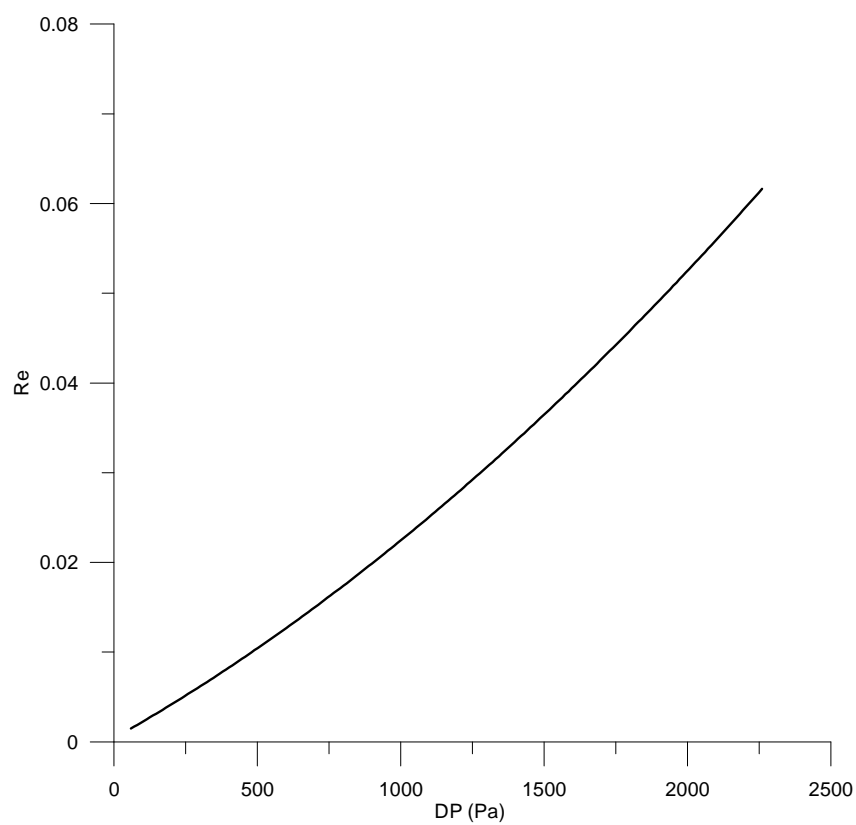
Σχήμα 2



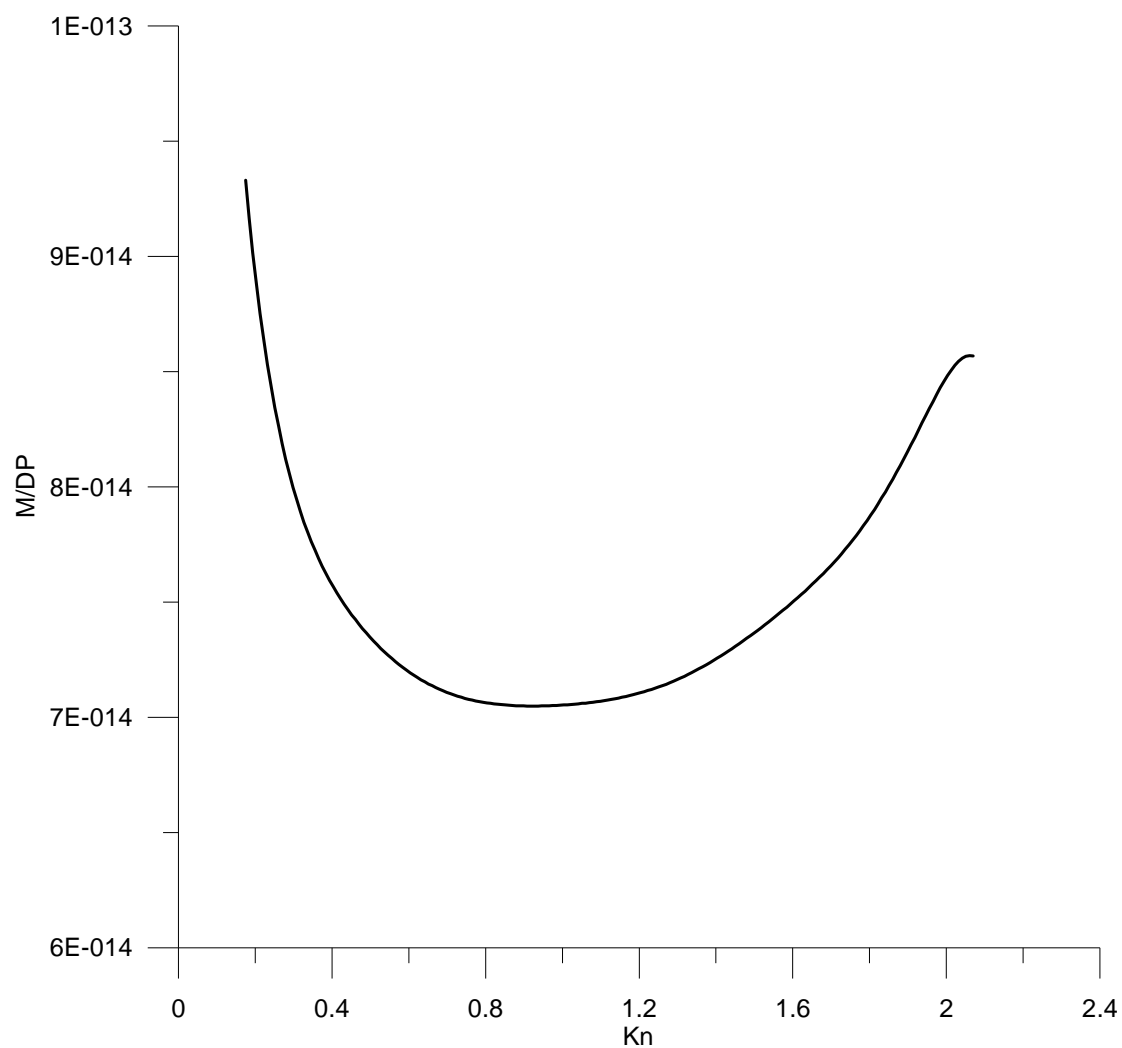
Σχήμα 3



Σχήμα 4



Σχήμα 5



Σχήμα 6

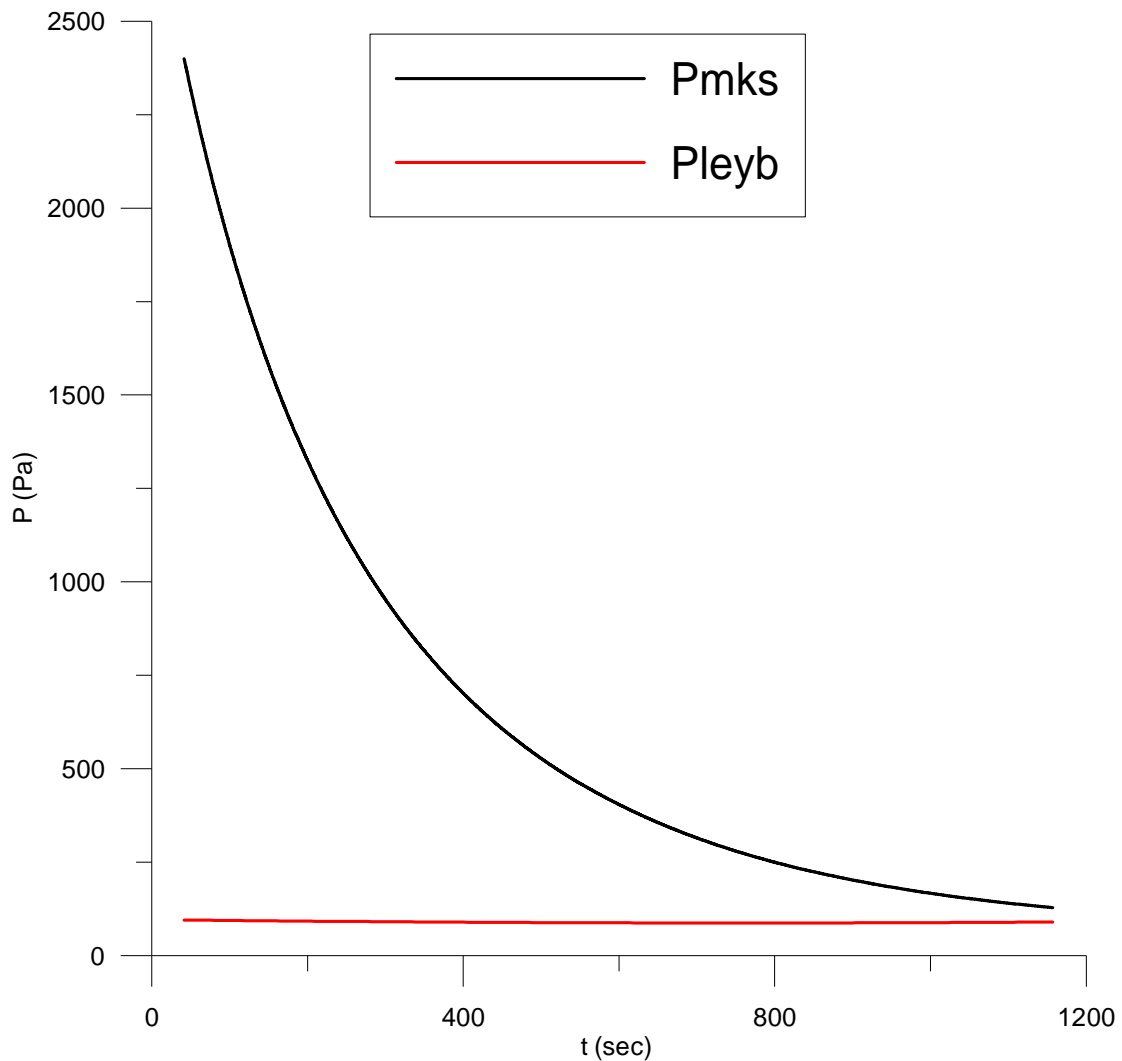
Ισχύουν τα ίδια σχόλια όπως και στην προηγούμενη περίπτωση.

- Πλάκα μικροαγωγών μήκους $L=4880\mu\text{m}$, πλάτους $W=285\mu\text{m}$ και βάθους $H=20\mu\text{m}$. Αριθμός καναλιών $N=19$.

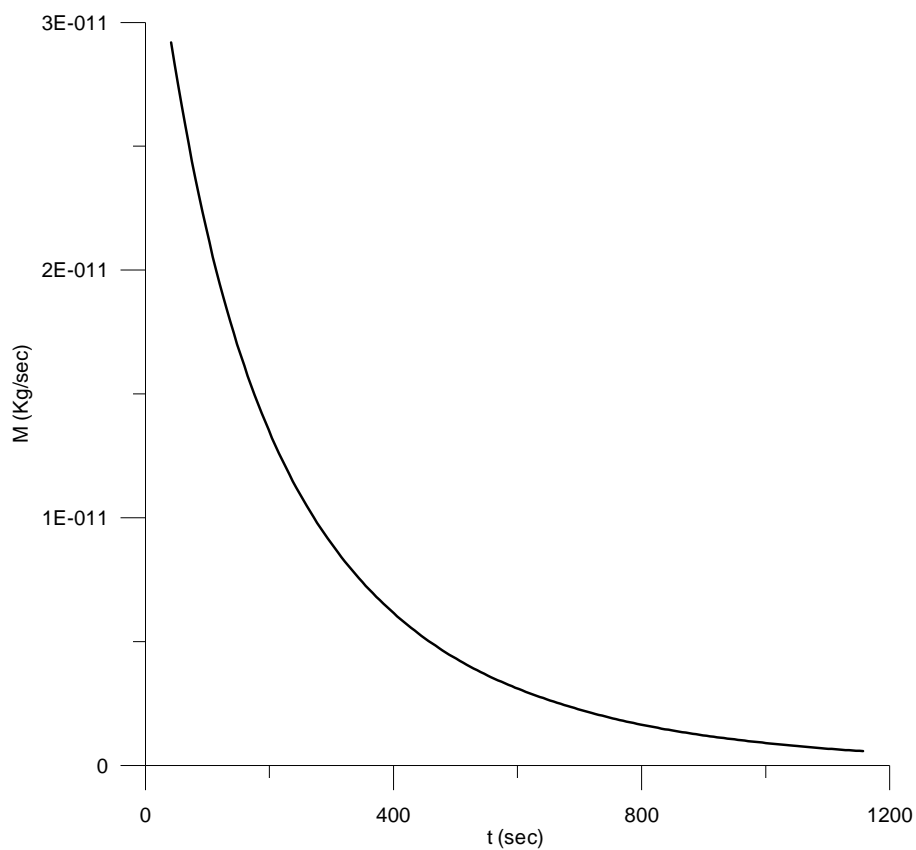
Ήλιο ως εργαζόμενο μέσο.

Στο πείραμα αυτό ακολουθήσαμε την ίδια μεθοδολογία όπως και στο προηγούμενο, με την μόνη διαφορά ότι αντί του αέρα χρησιμοποιήσαμε Ήλιο ως εργαζόμενο μέσο. Κρατήσαμε την πίεση Pleyb σταθερή περίπου μεταξύ των τιμών 0,748 και 0,684 torr (99,72486 και 91,19225 Pa). Η αρχική πίεση Pmks ήταν 18 torr (2399,796 Pa). Αρχικά ο αριθμός Knudsen ήταν $Kn= 0,469443$. Ο τελικός αριθμός Knudsen ήταν $Kn= 5,340486$.

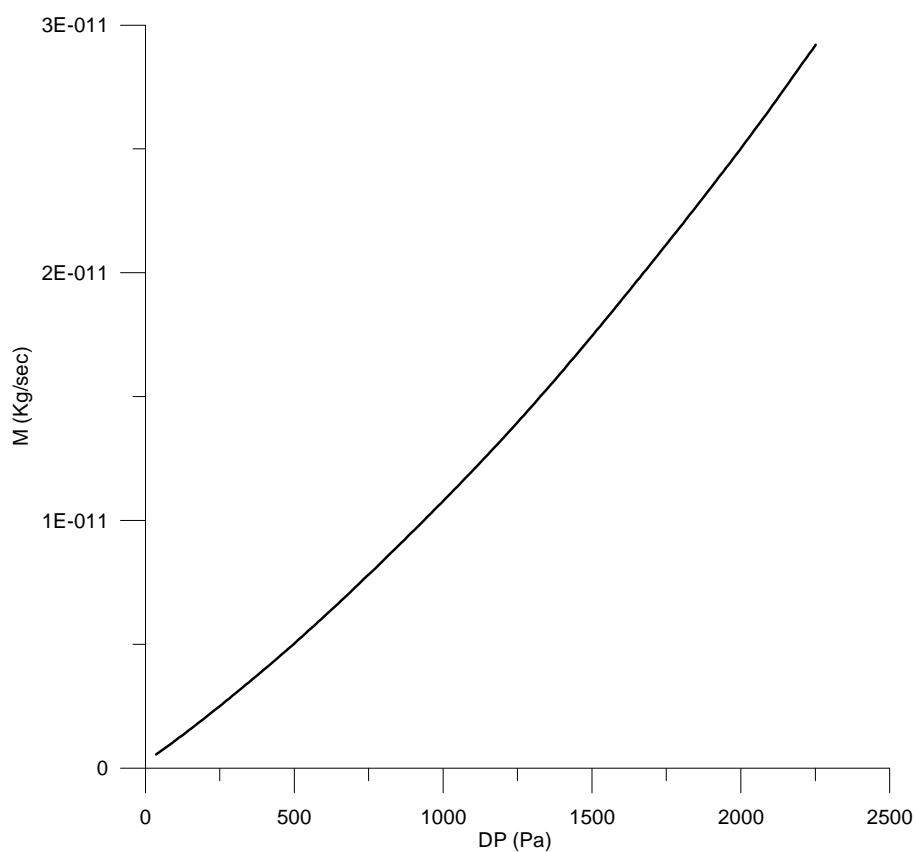
Ακολουθούν τα σχετικά διαγράμματα:



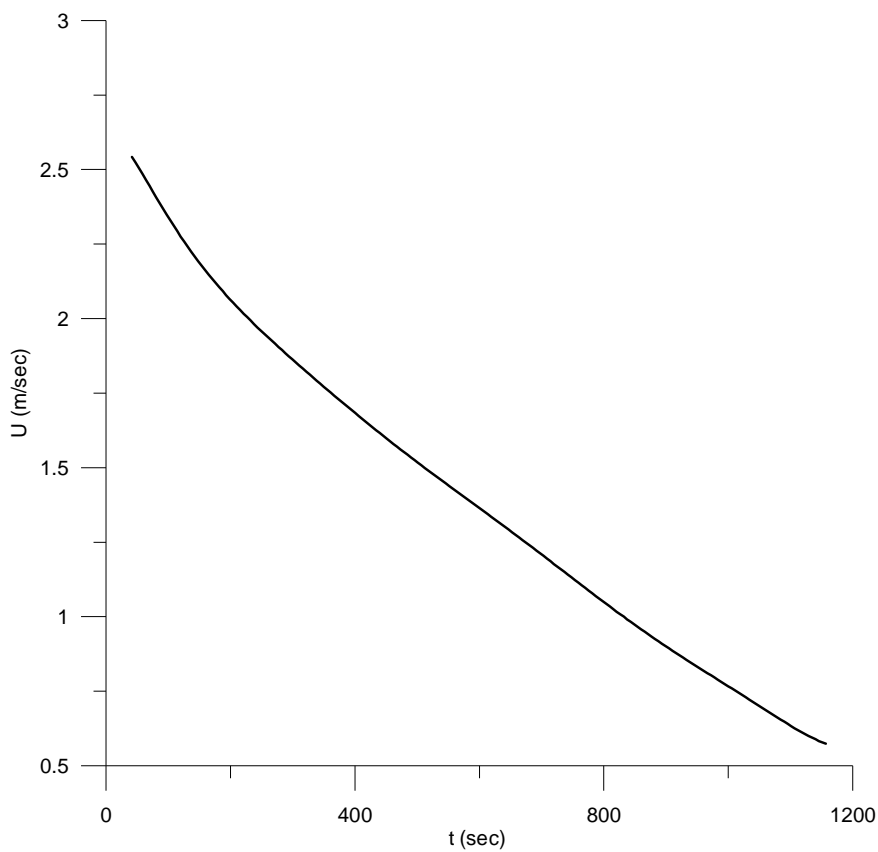
σχήμα 1



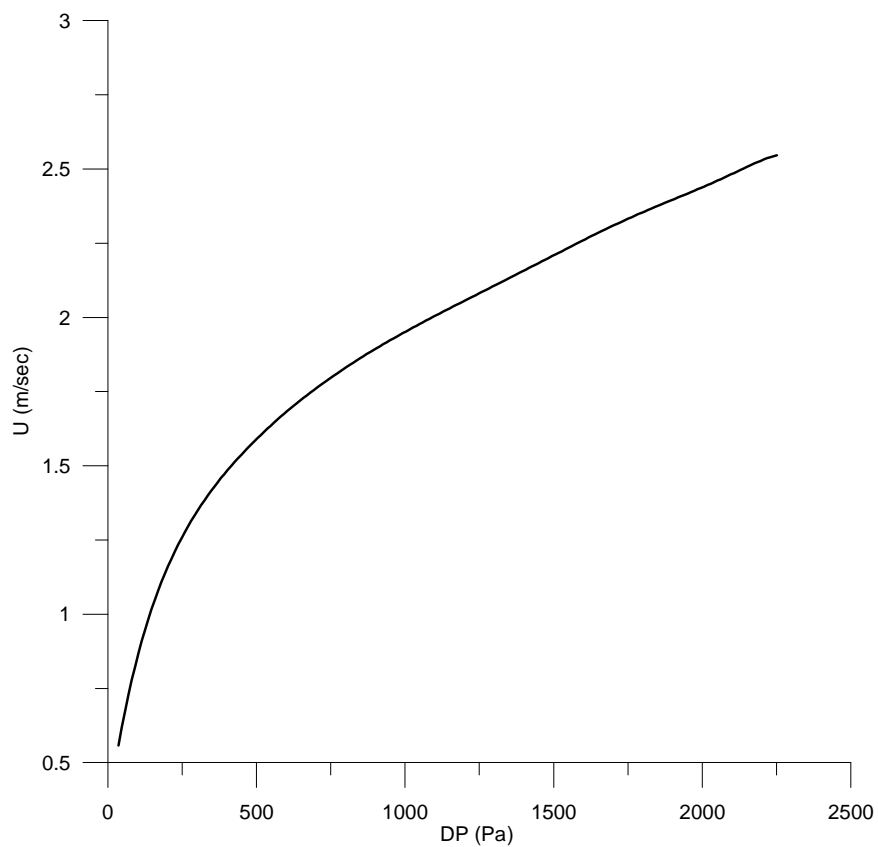
σχήμα 2



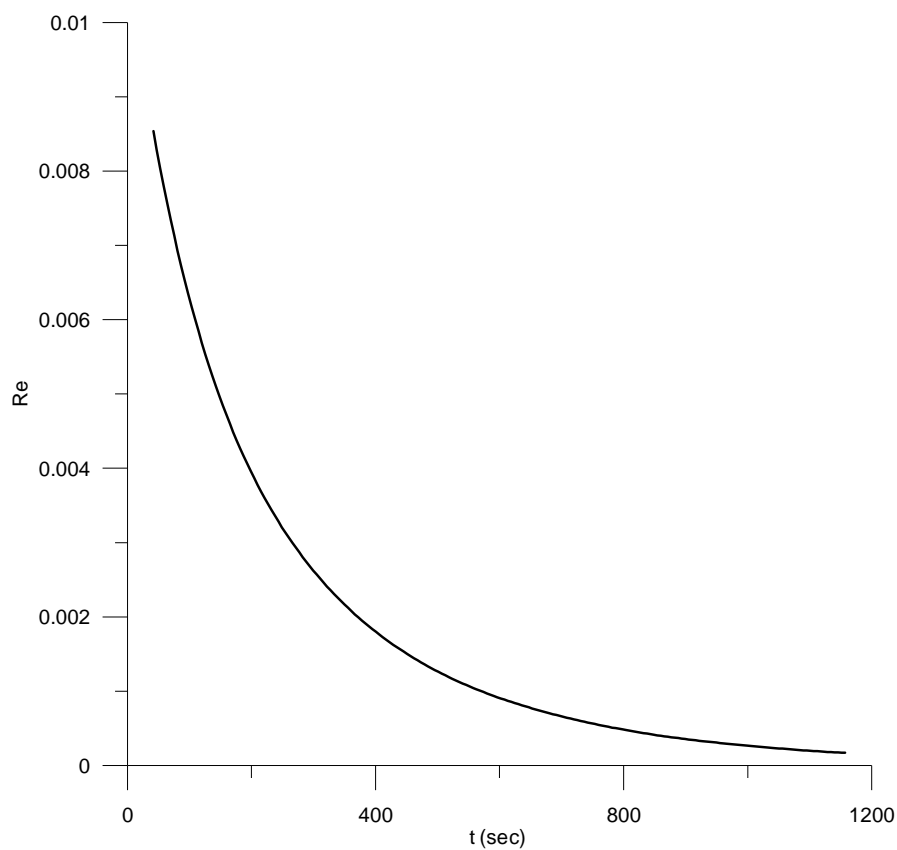
σχήμα 3



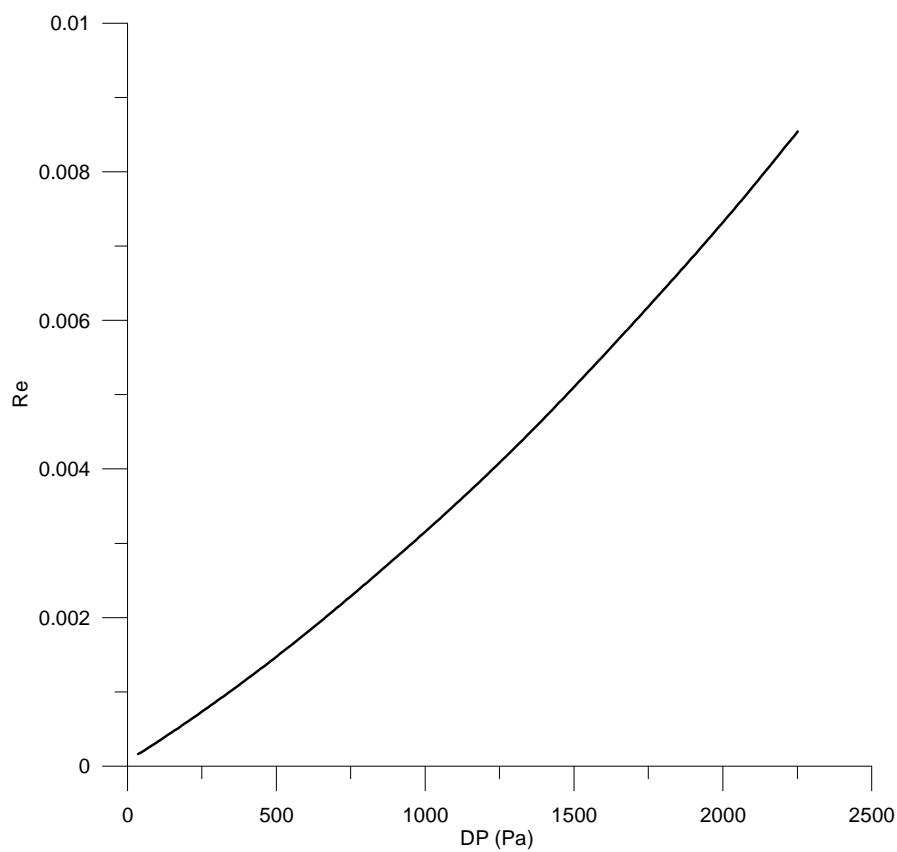
σχήμα 4



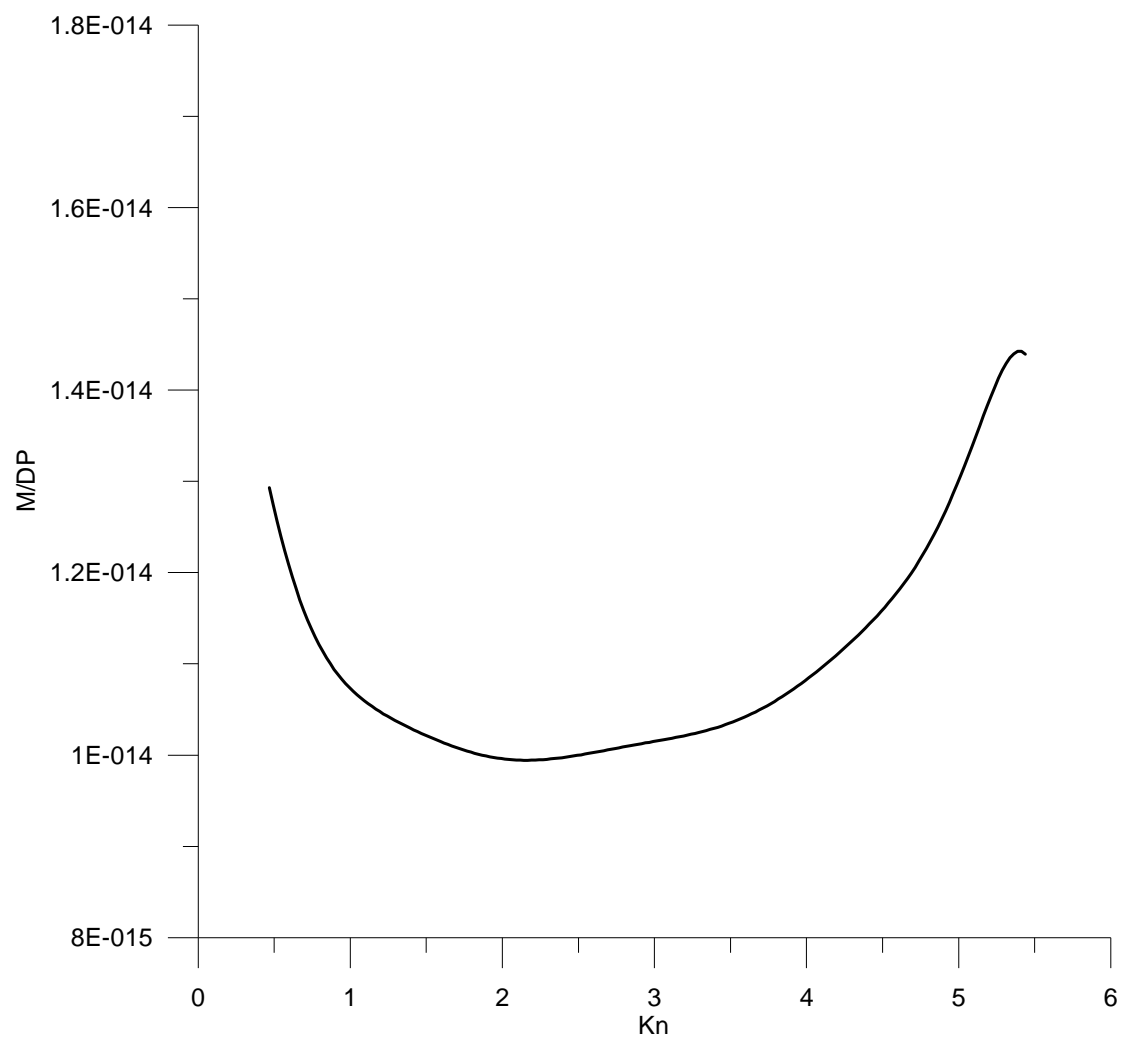
σχήμα 5



σχήμα 6



σχήμα 7



σχήμα 8

Ισχύουν τα ίδια σχόλια όπως και στα προηγούμενα πειράματα.

3.2 Συγκεντρωτικά και συγκριτικά διαγράμματα

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

Στο σχήμα 1, με την διακεκομμένη κόκκινη γραμμή παρουσιάζονται οι τιμές της παροχής μάζας συνάρτηση της διαφοράς πίεσης όπως αυτή υπολογίζεται αναλυτικά από 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 δ , που υπολογίζεται ως :

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

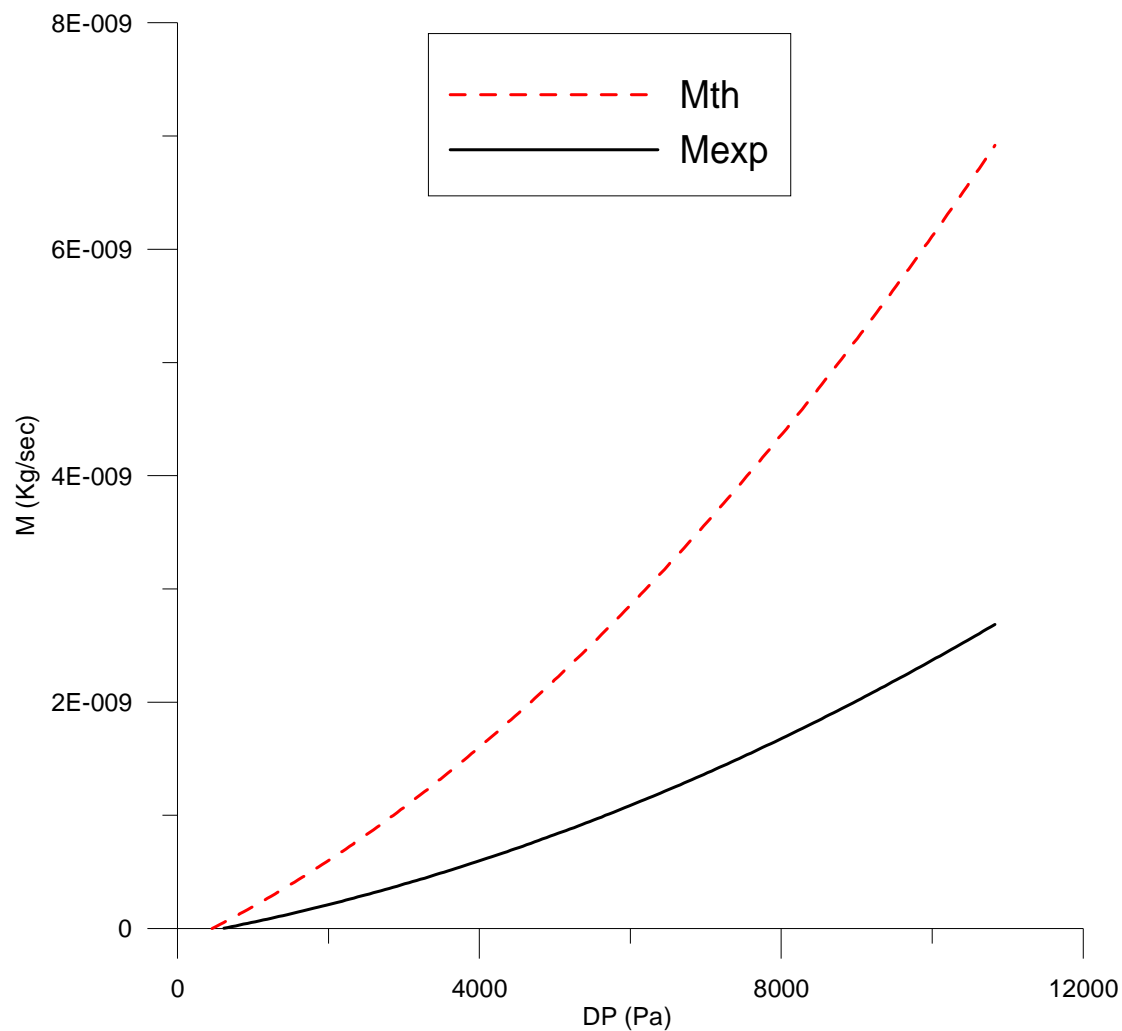
$$\text{όπου: } \delta_{leyb} = \frac{D_h \cdot \bar{P}_{leyb}}{\mu \cdot u_0}$$

και

$$\delta_{mks} = \frac{D_h \cdot \bar{P}_{mks}}{\mu \cdot u_0}$$

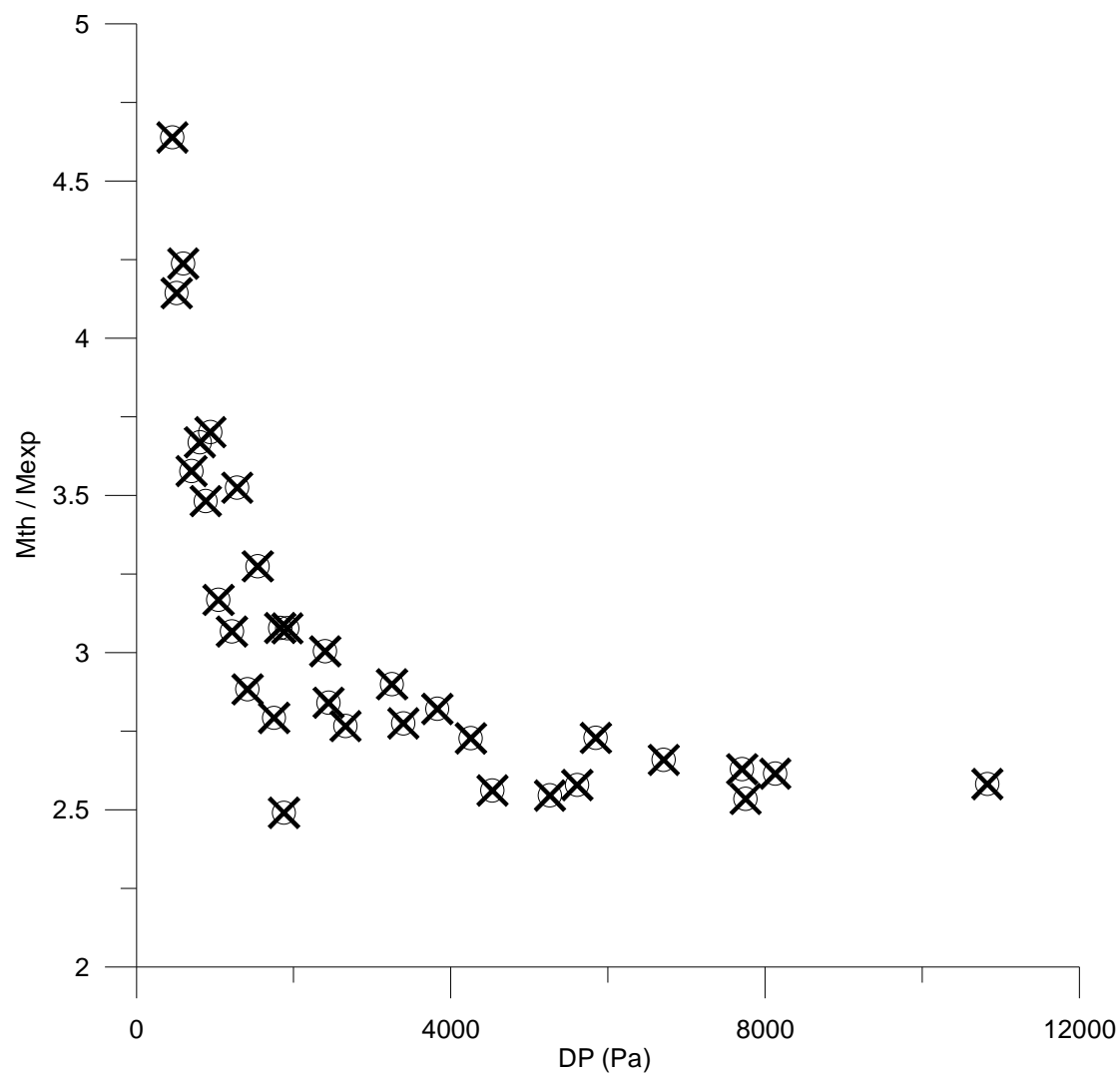
Με την συνεχόμενη μαύρη γραμμή παρουσιάζεται η πειραματικά μετρούμενη παροχή μάζας.

Στο σχήμα 2 παρουσιάζεται ο λόγος M_{th} / M_{exp} .



Σχήμα 1

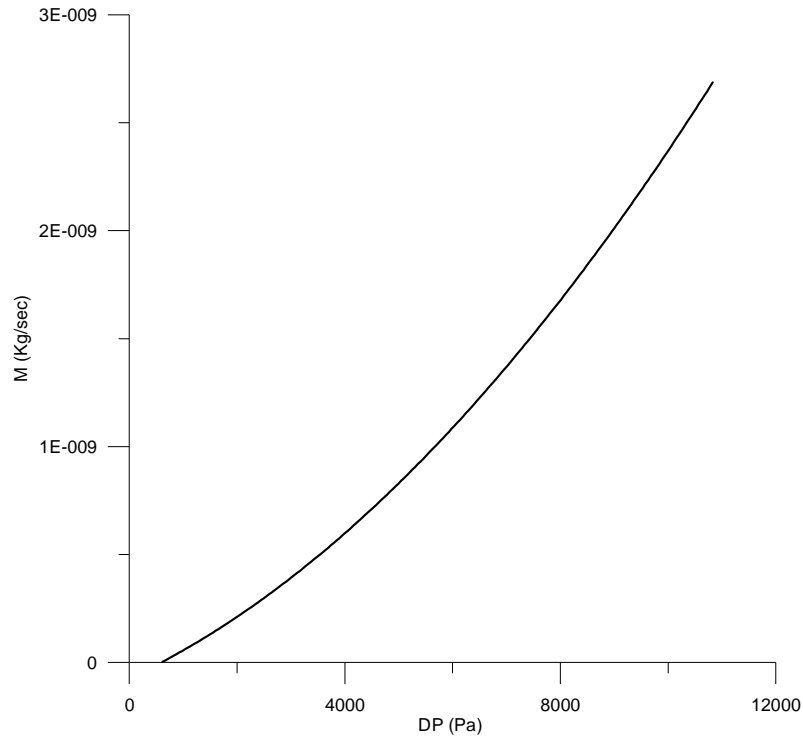
Όπως παρατηρούμε από το σχήμα 1, οι τιμές της μετρούμενης πειραματικής μάζας και της θεωρητικής, σύμφωνα με το μοντέλο του **F.Sharipov**, αποκλίνουν όλο και πιο πολύ καθώς αυξάνεται η διαφορά πίεσης στα άκρα της πλάκας.



Σχήμα 2

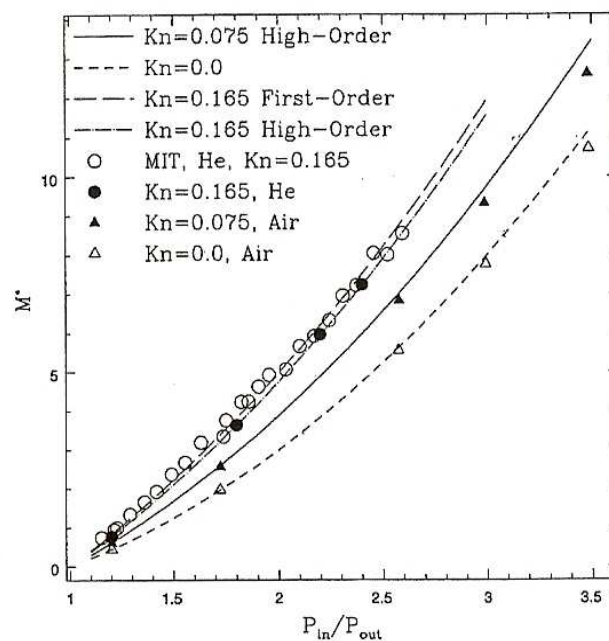
Στο σχήμα 2 παρατηρούμε πως η μετρούμενη παροχή μάζας είναι περίπου 2,75 φορές μικρότερη από τη θεωρητική της τιμή.

Το σχήμα 3, απεικονίζει ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα της παροχής μάζας όπως αυτή μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια και των 12 πειραμάτων που έγιναν στην πλάκα αυτή για ολόκληρο το εύρος DP του πειράματος.



Σχήμα 3

Η μορφή της καμπύλης μπορεί να δικαιολογηθεί από το παρακάτω θεωρητικό διάγραμμα (MICROFLOWS, G.E.Karniadakis,A.Beskok, 2002)



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 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.

Το τελευταίο ενδιαφέρον διάγραμμα (σχήμα 4), αφορά τη μεταβολή της παροχής μάζας με το γινόμενο $DP \cdot P_m$. Θυμίζουμε ότι:

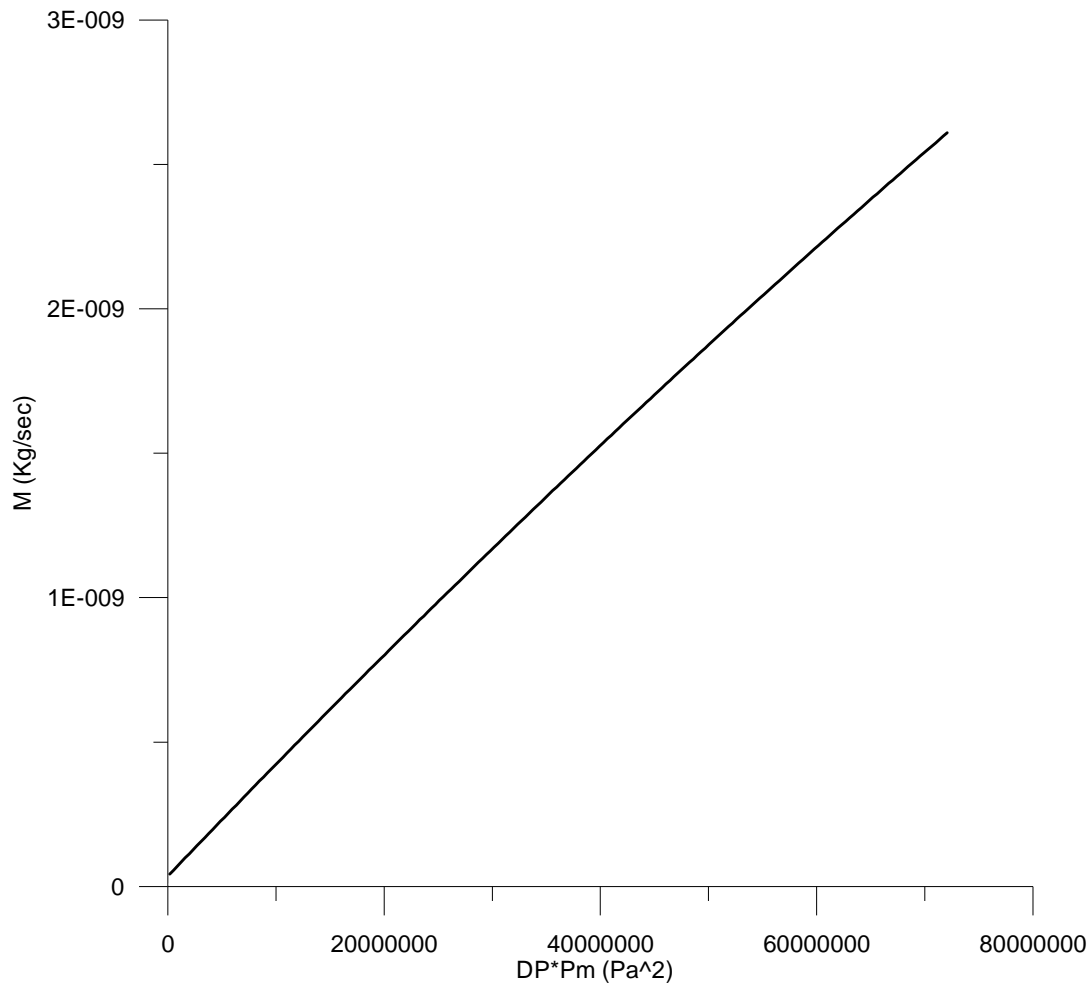
$$P_m = \frac{P_{leyb} + P_{mks}}{2}$$

και

$$DP = P_{leyb} - P_{mks}$$

άρα για το γινόμενο που μας ενδιαφέρει θα ισχύει :

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



Σχήμα 4

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

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

η γραφική παράσταση πρέπει να είναι γραμμική, κάτι που συμβαίνει με ιδιαίτερη ακρίβεια (σχήμα 4) στο πείραμα αυτό.

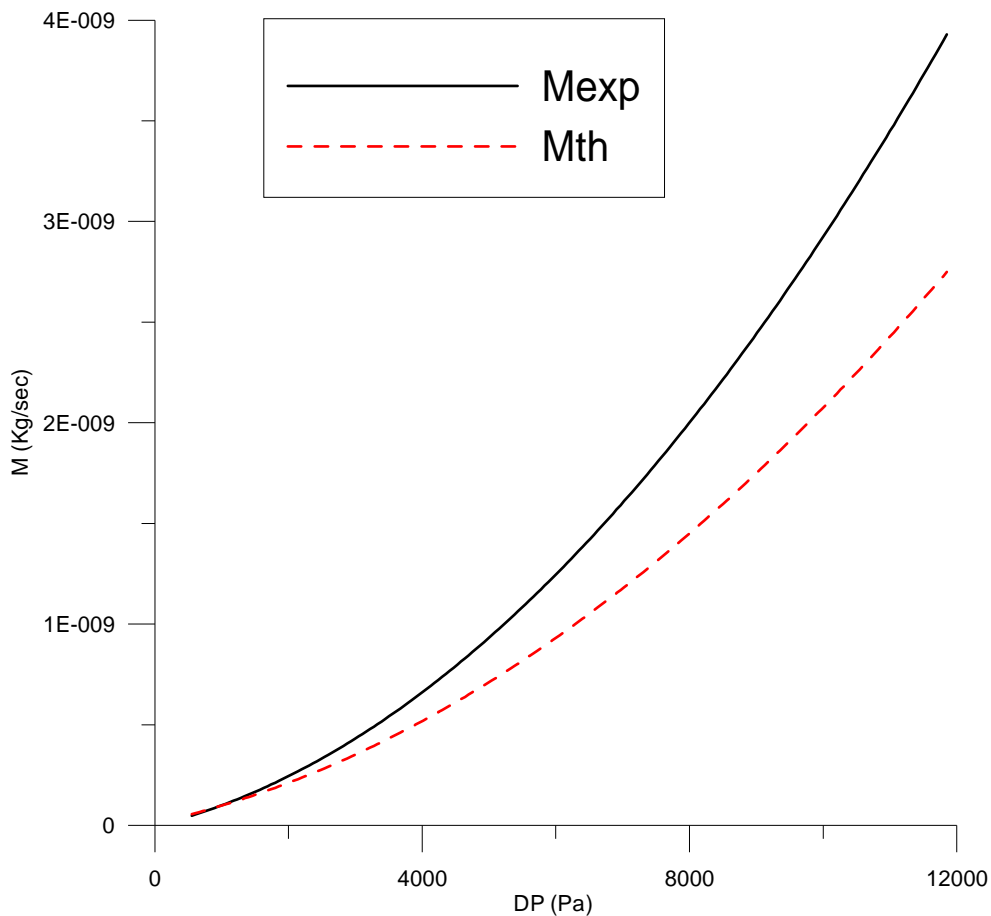
- Πλάκα μικροαγωγών μήκους $L=4880\mu\text{m}$, πλάτους $W=285\mu\text{m}$ και βάθους $H=20\mu\text{m}$. Αριθμός καναλιών $N=19$.

Αργό ως εργαζόμενο μέσο.

1^η Περίπτωση:

Η μεθοδολογία που ακολουθείται και εδώ είναι ακριβώς η ίδια με το προηγούμενο πείραμα.

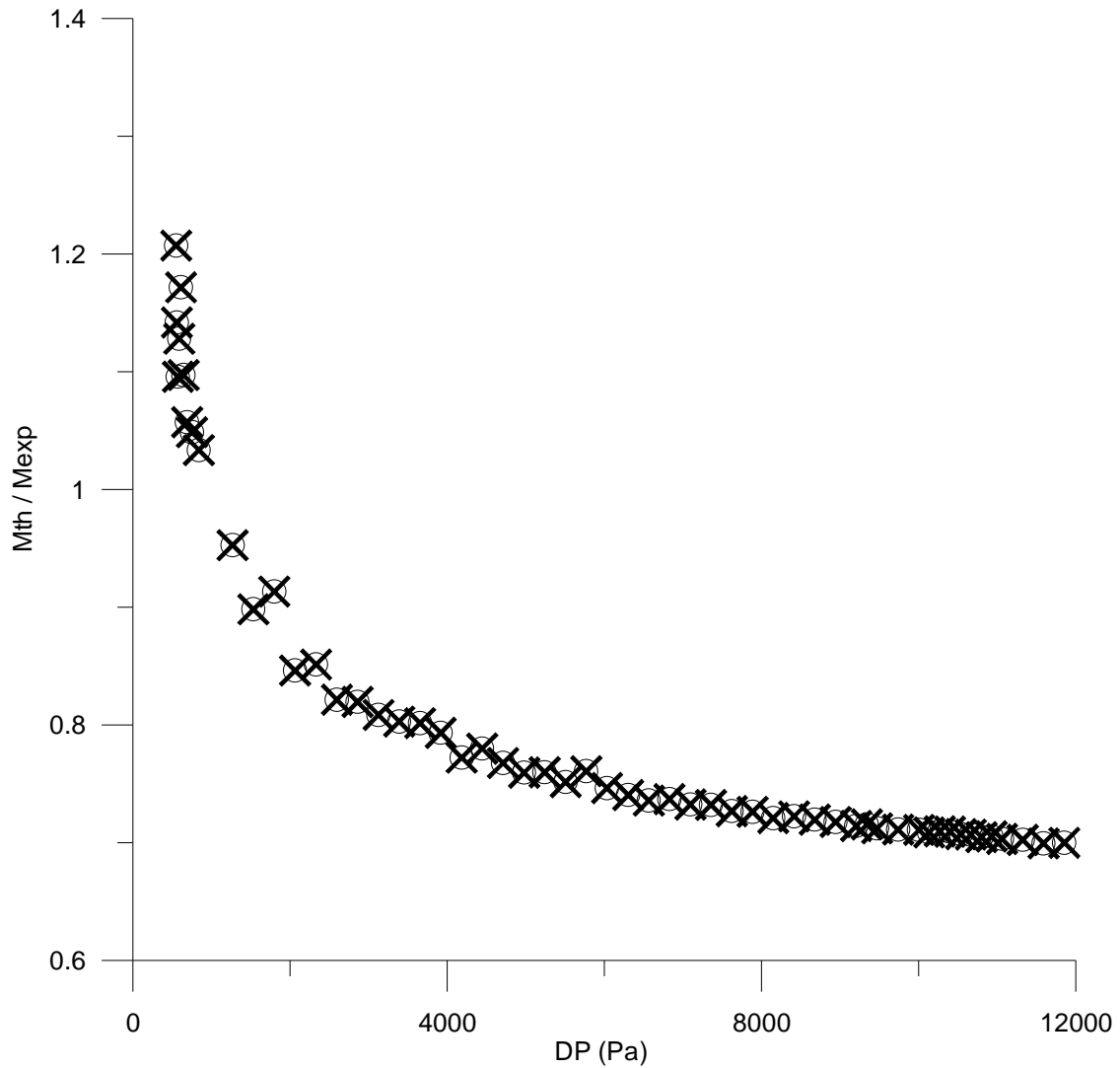
Ακολουθούν τα σχετικά διαγράμματα:



Σχήμα 1

Στο σχήμα 1, με την διακεκομμένη κόκκινη γραμμή παρουσιάζονται οι τιμές της παροχής μάζας συνάρτηση της διαφοράς πίεσης όπως αυτή υπολογίζεται από την θεωρία. Με την συνεχόμενη μαύρη γραμμή παρουσιάζεται η πειραματικά μετρούμενη παροχή μάζας.

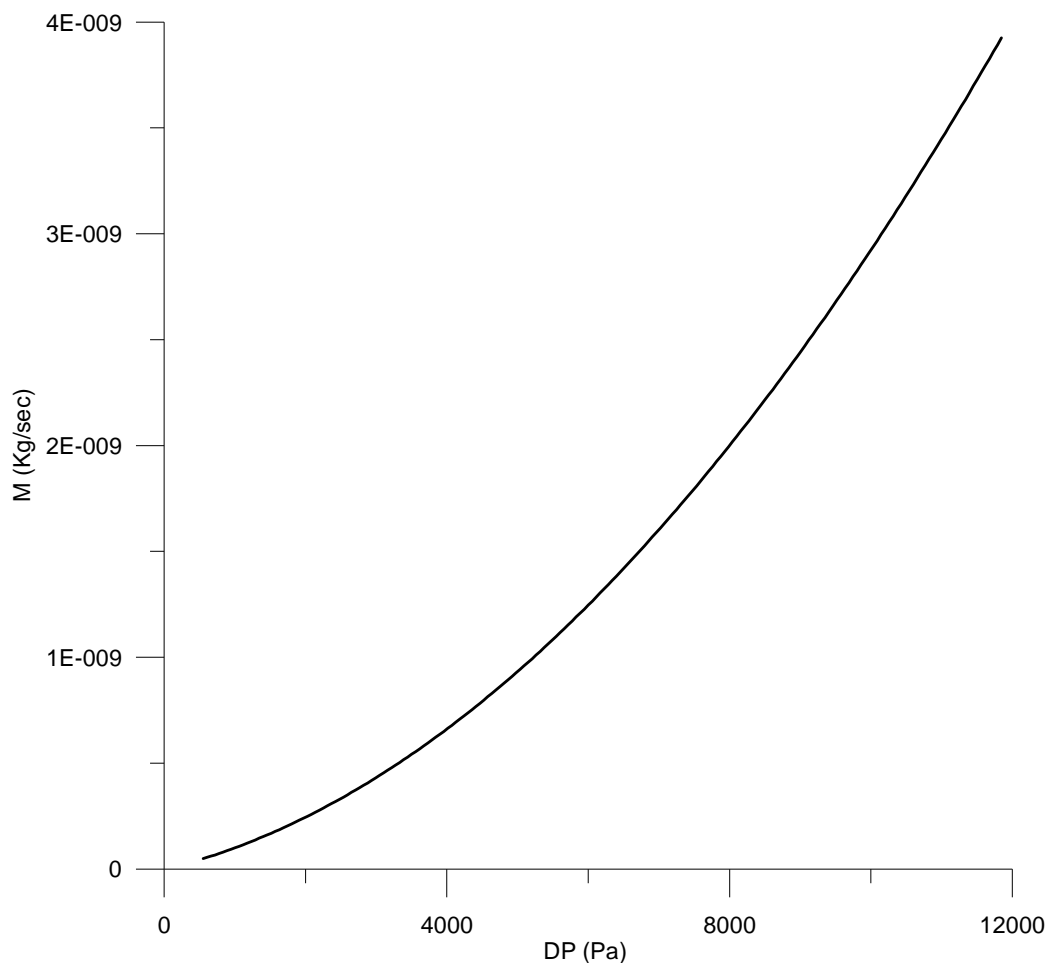
Στο σχήμα αυτό σε αντίθεση με το προηγούμενο πείραμα παρατηρούμε ότι η πειραματικά μετρούμενη παροχή μάζας είναι πάνω από την θεωρητική της τιμή.



Σχήμα 2

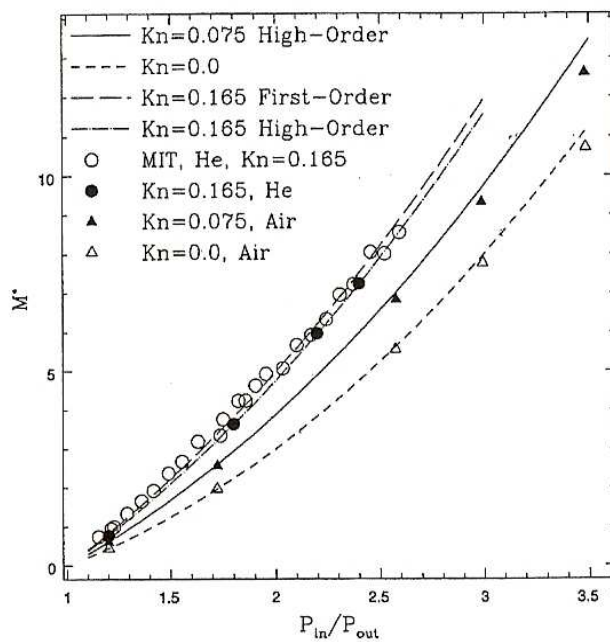
Στο σχήμα 2 παρατηρούμε πως ο λόγος M_{th}/M_{exp} είναι κοντά στο 0,75. Δηλαδή η μετρούμενη παροχή μάζας, σε αντίθεση με το προηγούμενο πείραμα, είναι περίπου 25% μεγαλύτερη από τη θεωρητική της τιμή.

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

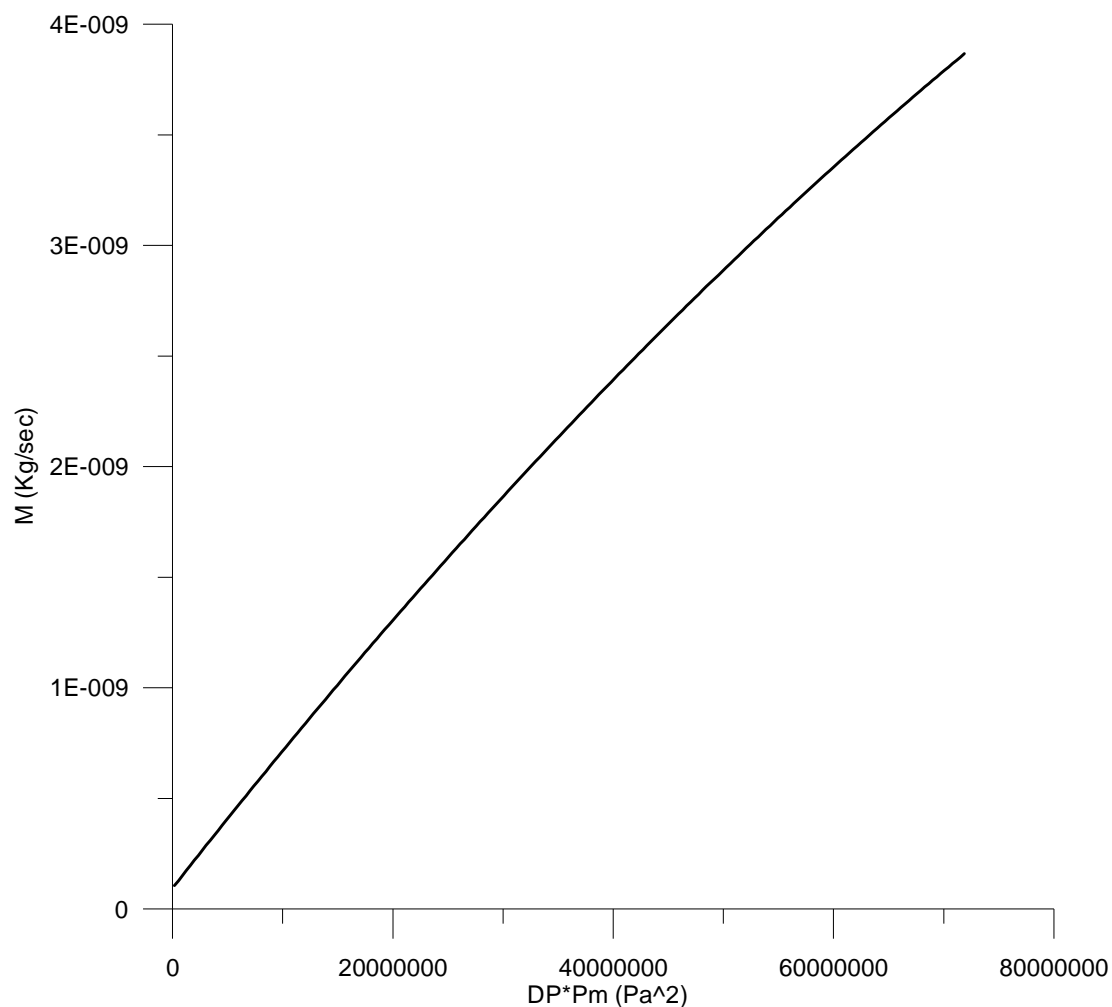


Σχήμα 3

Η μορφή της καμπύλης μπορεί να δικαιολογηθεί και αυτή από το παρακάτω θεωρητικό διάγραμμα (MICROFLOWS, G.E.Karniadakis,A.Beskok, 2002)



Το τελευταίο διάγραμμα (σχήμα 4), αφορά τη μεταβολή της παροχής μάζας με το γινόμενο $DP \cdot P_m$.



Σχήμα 4

Και εδώ, όπως και στο προηγούμενο πείραμα, η μορφή αυτής της γραφικής παράστασης πρέπει να είναι γραμμική. Πράγμα που και εδώ συμβαίνει με ιδιαίτερη ακρίβεια.

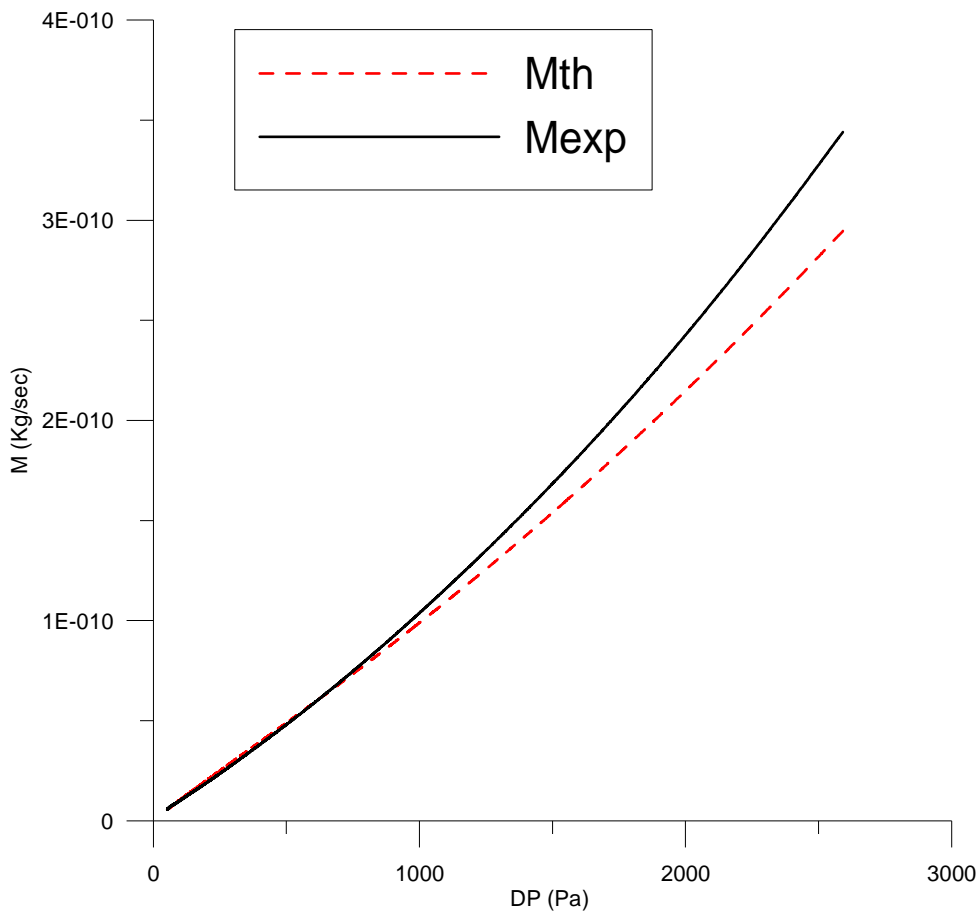
- Πλάκα μικροαγωγών μήκους $L=4880\mu\text{m}$, πλάτους $W=285\mu\text{m}$ και βάθους $H=20\mu\text{m}$. Αριθμός καναλιών $N=19$.

Αργό ως εργαζόμενο μέσο.

2^η Περίπτωση:

Η μεθοδολογία που ακολουθείται και εδώ είναι ακριβώς η ίδια με το πρώτο πείραμα.

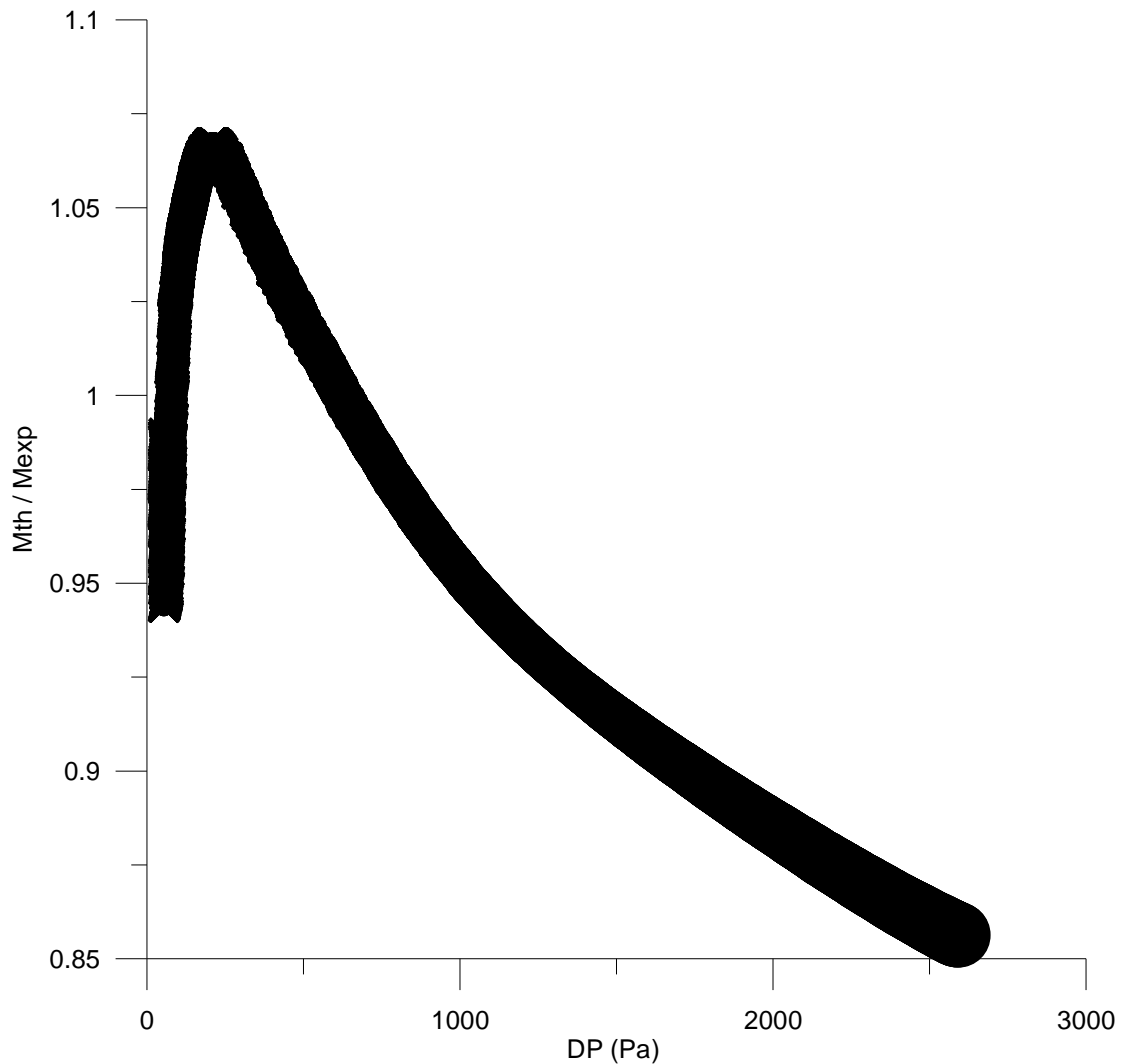
Ακολουθούν τα σχετικά διαγράμματα:



Σχήμα 1

Στο σχήμα 1, με την διακεκομμένη κόκκινη γραμμή παρουσιάζονται οι τιμές της παροχής μάζας συνάρτηση της διαφοράς πίεσης όπως αυτή υπολογίζεται από την θεωρία. Με την συνεχόμενη μαύρη γραμμή παρουσιάζεται η πειραματικά μετρούμενη παροχή μάζας.

Στο σχήμα αυτό παρατηρούμε ότι η πειραματικά μετρούμενη παροχή μάζας είναι λίγο πάνω από την θεωρητική της τιμή.

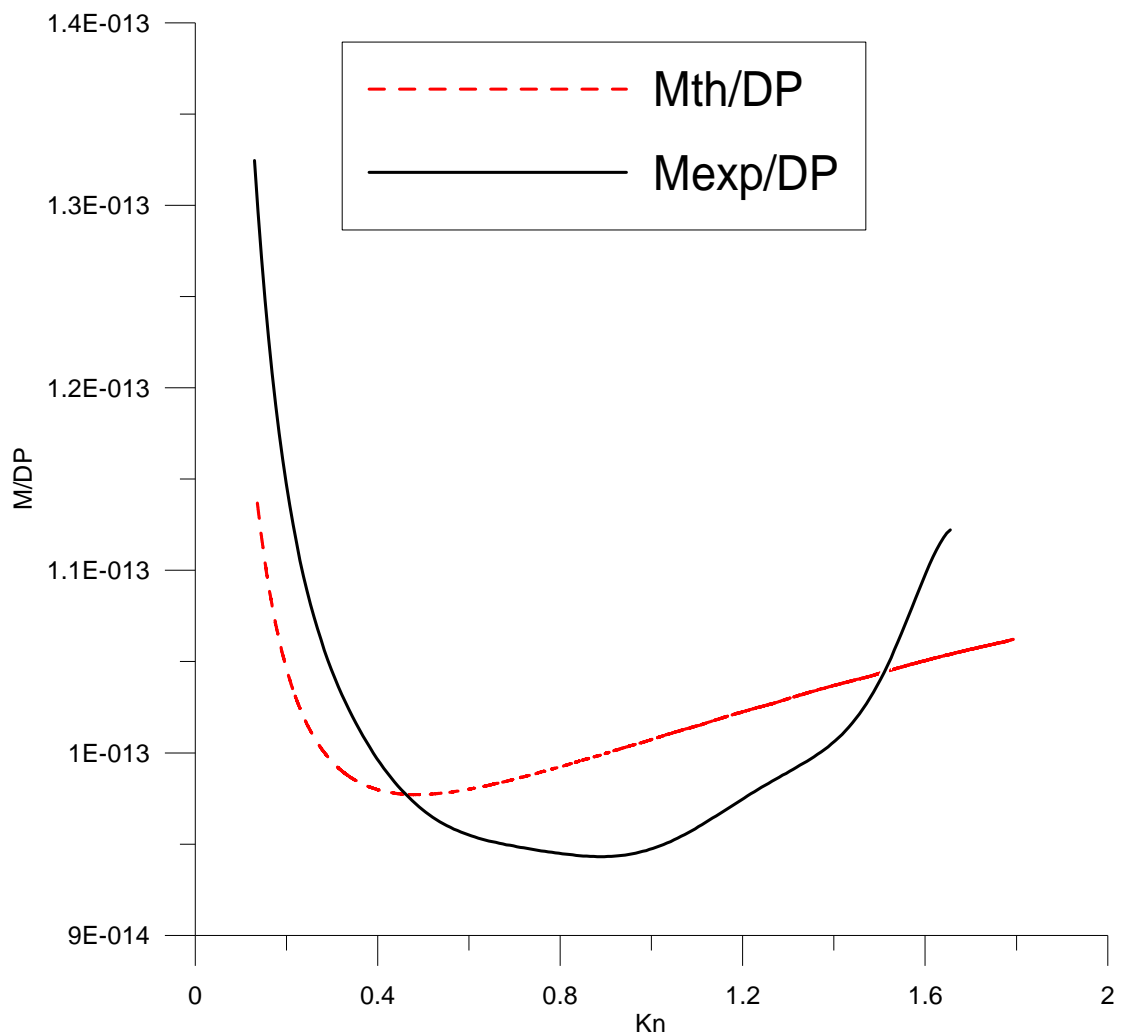


Σχήμα 2

Στο σχήμα 2 παρατηρούμε πως ο λόγος M_{th}/M_{exp} είναι πολύ κοντά στην μονάδα. Για πολύ χαμηλή διαφορά πίεσης είναι πάνω από την μονάδα ενώ όσο αυξάνετε η διαφορά πίεσης ο λόγος M_{th}/M_{exp} μειώνετε και φτάνει μέχρι την τιμή 0,85.

Στο σχήμα 3 που ακολουθεί παρουσιάζεται η παροχή μάζας του ρευστού, αδιαστατοποιημένη με την διαφορά της πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου, συνάρτηση του αριθμού Knudsen.

Με την διακεκομμένη κόκκινη γραμμή παρουσιάζονται οι τιμές της όπως αυτές υπολογίζεται από την θεωρία. Με την συνεχόμενη μαύρη γραμμή παρουσιάζονται η πειραματικά μετρούμενες.

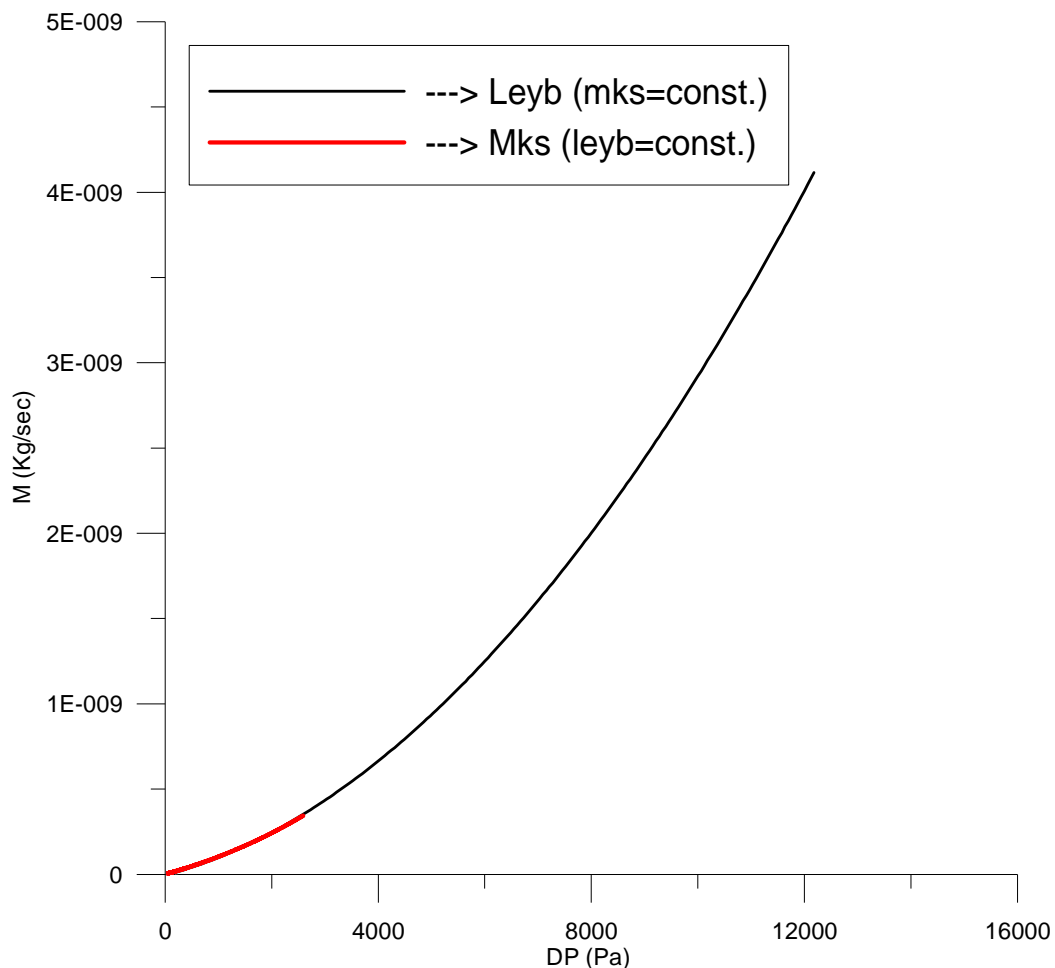


Σχήμα 3

Από το σχήμα 3 παρατηρούμε ότι ο λόγος M/DP παρουσιάζει ελάχιστο για κάποιο Kn και μετά αρχίζει να αυξάνει και πάλι. Η συμπεριφορά αυτή του ρευστού είναι γνωστή ως παράδοξο του Knudsen ή ελάχιστο του Knudsen.

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.

Στο σχήμα 4 που ακολουθεί παρουσιάζεται ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα της παροχής μάζας συνάρτηση της διαφοράς πίεσης και για τις δυο περιπτώσεις του πειράματος που έγιναν στην συγκεκριμένη πλάκα των μικροαγωγών. (**1^η περίπτωση: Πίεση Pmks σταθερή, 2^η περίπτωση: Πίεση Pleyb σταθερή**):



Σχήμα 4

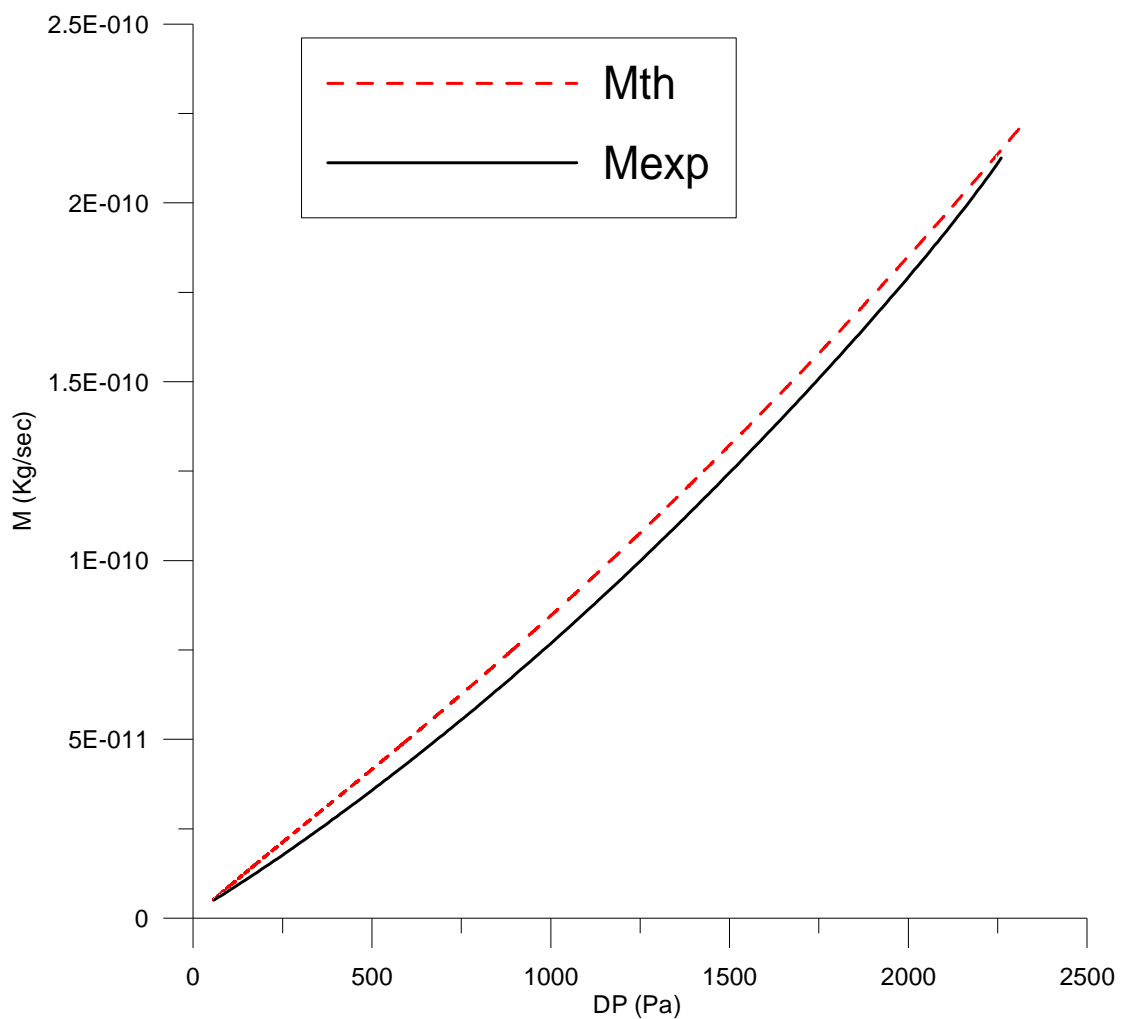
Από το σχήμα 4 βλέπουμε ότι και οι δυο περιπτώσεις του πειράματος συμβαδίζουν πολύ καλά μεταξύ τους.

- Πλάκα μικροαγωγών μήκους $L=4880\mu\text{m}$, πλάτους $W=285\mu\text{m}$ και βάθους $H=20\mu\text{m}$. Αριθμός καναλιών $N=19$.

Αέρας ως εργαζόμενο μέσο.

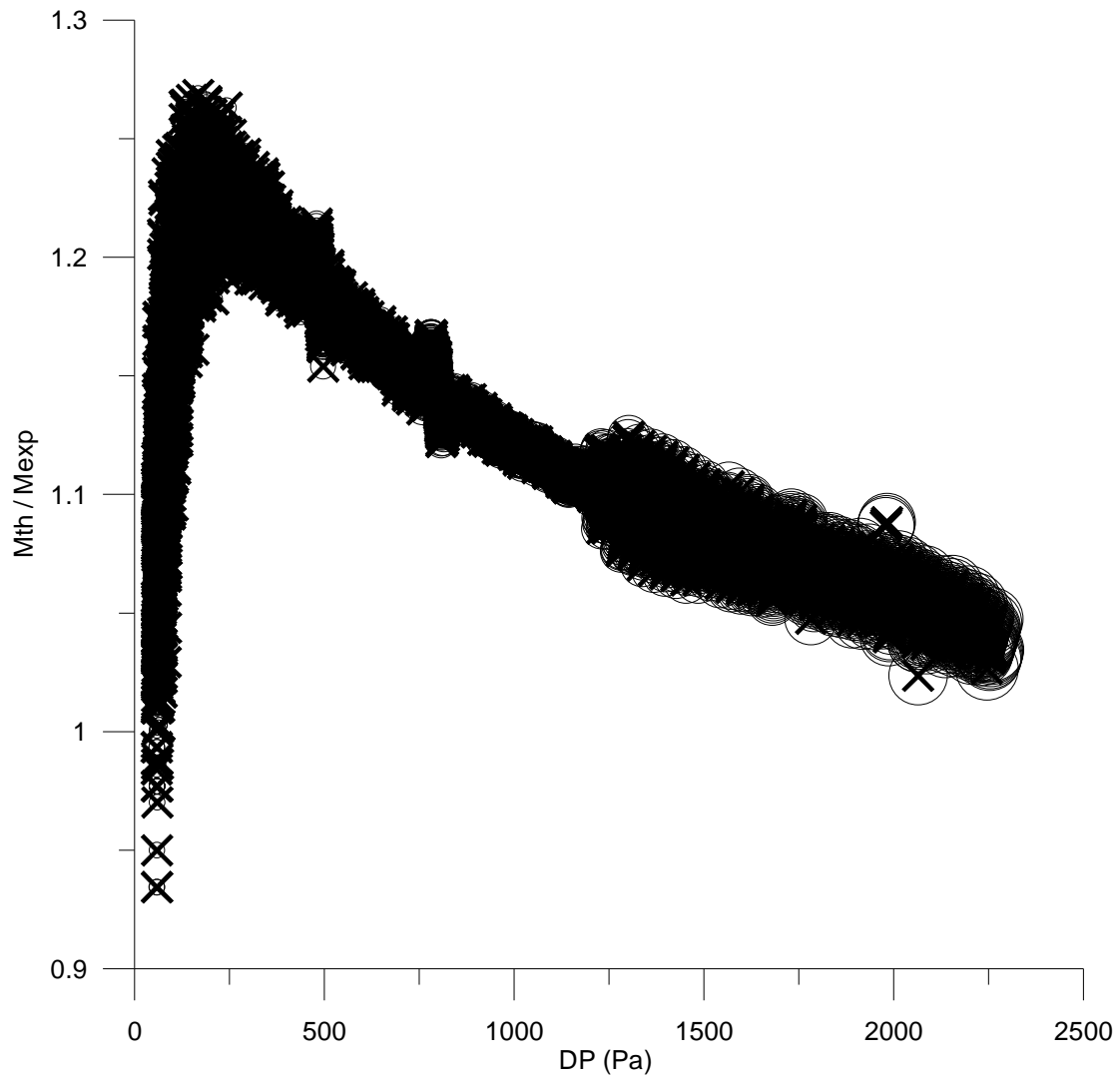
Η μεθοδολογία που ακολουθείται και εδώ είναι ακριβώς η ίδια όπως και στην περίπτωση με το Αργό.

Ακολουθούν τα σχετικά διαγράμματα:



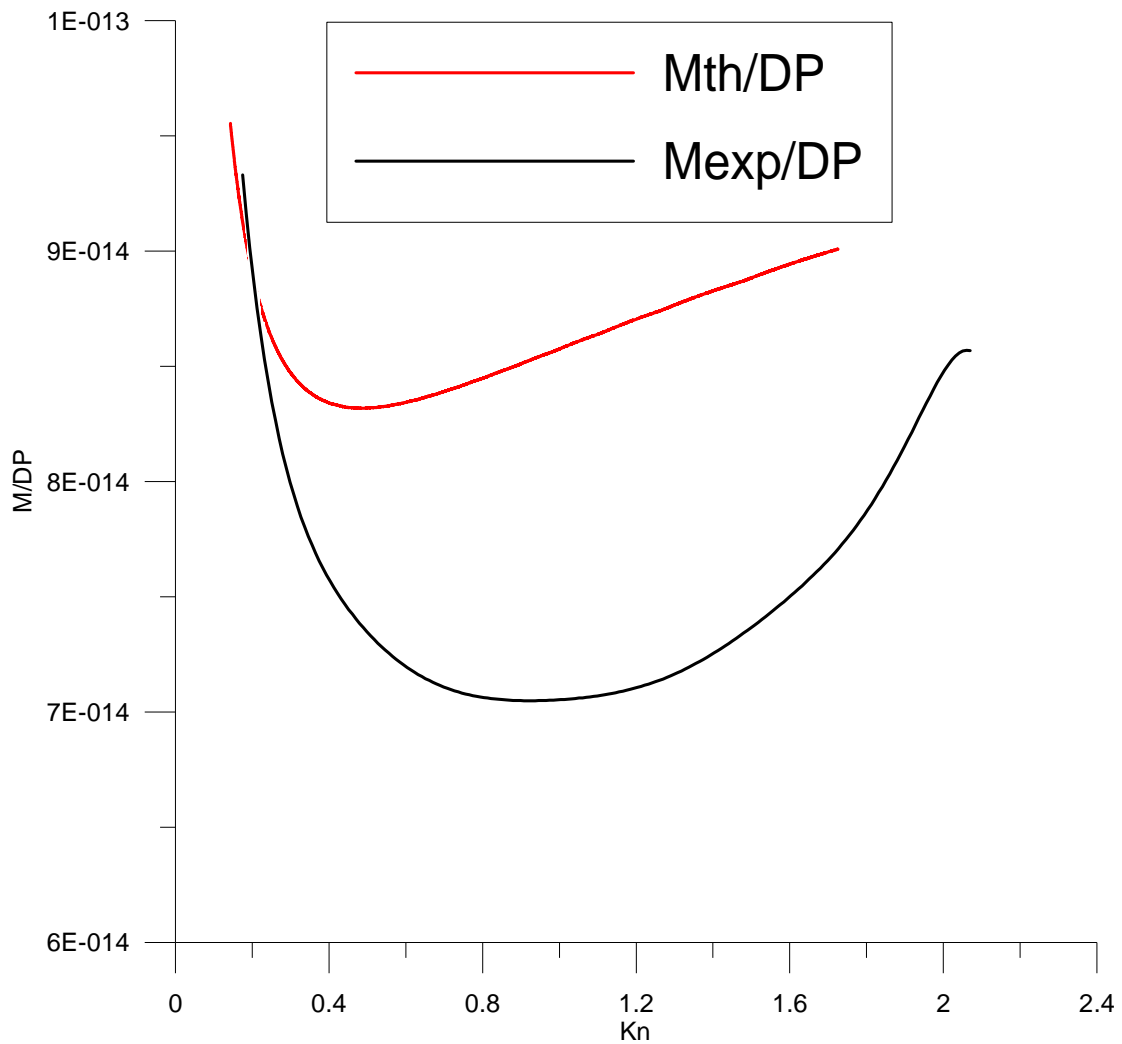
Σχήμα 1

Από το διάγραμμα αυτό βλέπουμε ότι η θεωρητική παροχή μάζας είναι λίγο πάνω από την πειραματικά μετρούμενη.



Σχήμα 2

Στο σχήμα 2 παρατηρούμε πως ο λόγος M_{th}/M_{exp} είναι λίγο πάνω από την μονάδα. Στις πολύ χαμηλές πιέσεις η πειραματικά μετρούμενη παροχή μάζας είναι μέχρι και 25% κάτω από την θεωρητική της τιμή. Στις υψηλές πιέσεις όμως η πειραματικά μετρούμενη παροχή μάζας είναι μόνο 5% με 10% πιο κάτω από την θεωρητική.



Σχήμα 3

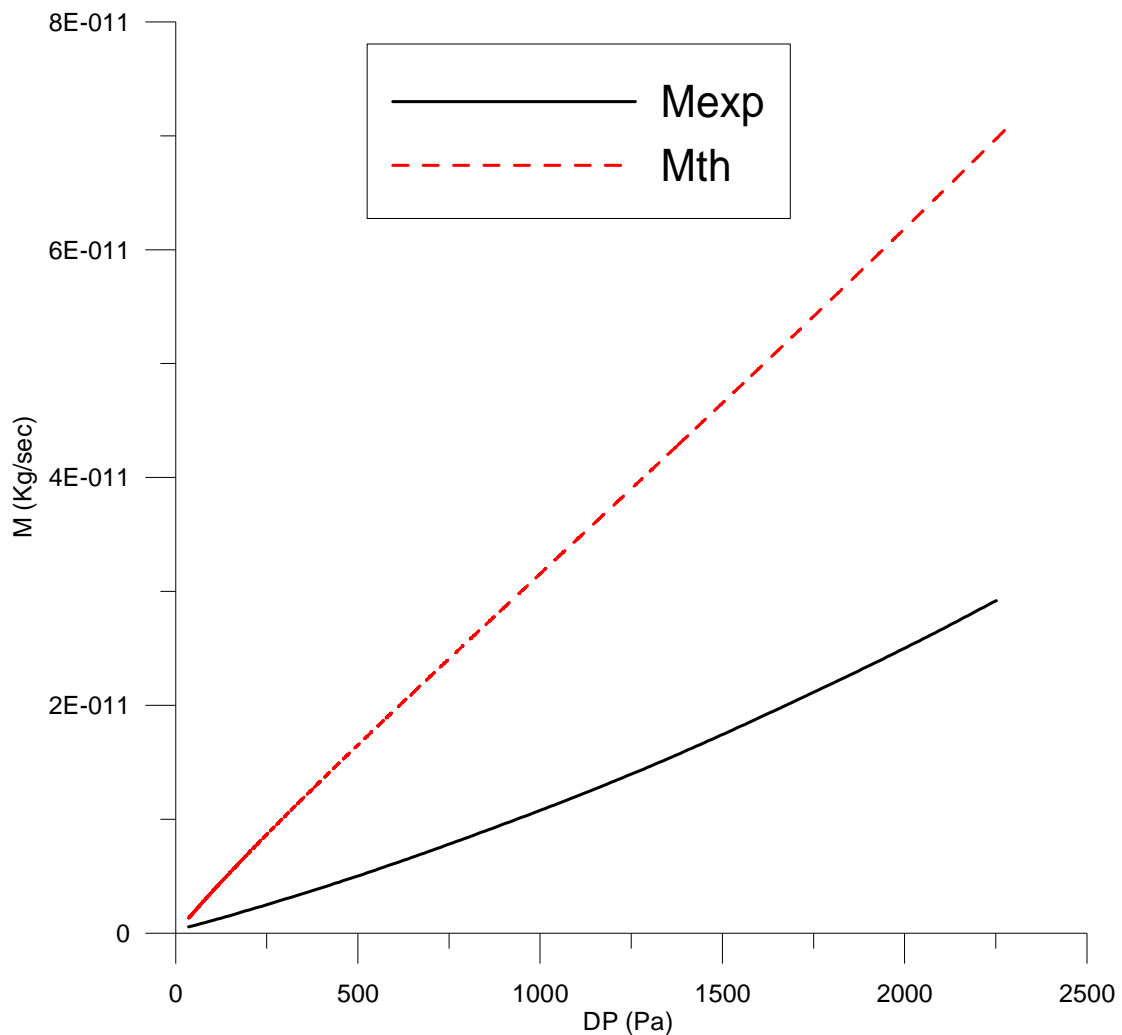
Από το σχήμα 3 παρατηρούμε ότι ο λόγος M/DP παρουσιάζει ελάχιστο για κάποιο Kn και μετά αρχίζει να αυξάνει και πάλι. Το ίδιο παρατηρήσαμε και στο προηγούμενο πείραμα με το Αργό.

- Πλάκα μικροαγωγών μήκους $L=4880\mu\text{m}$, πλάτους $W=285\mu\text{m}$ και βάθους $H=20\mu\text{m}$. Αριθμός καναλιών $N=19$.

Ήλιο ως εργαζόμενο μέσο.

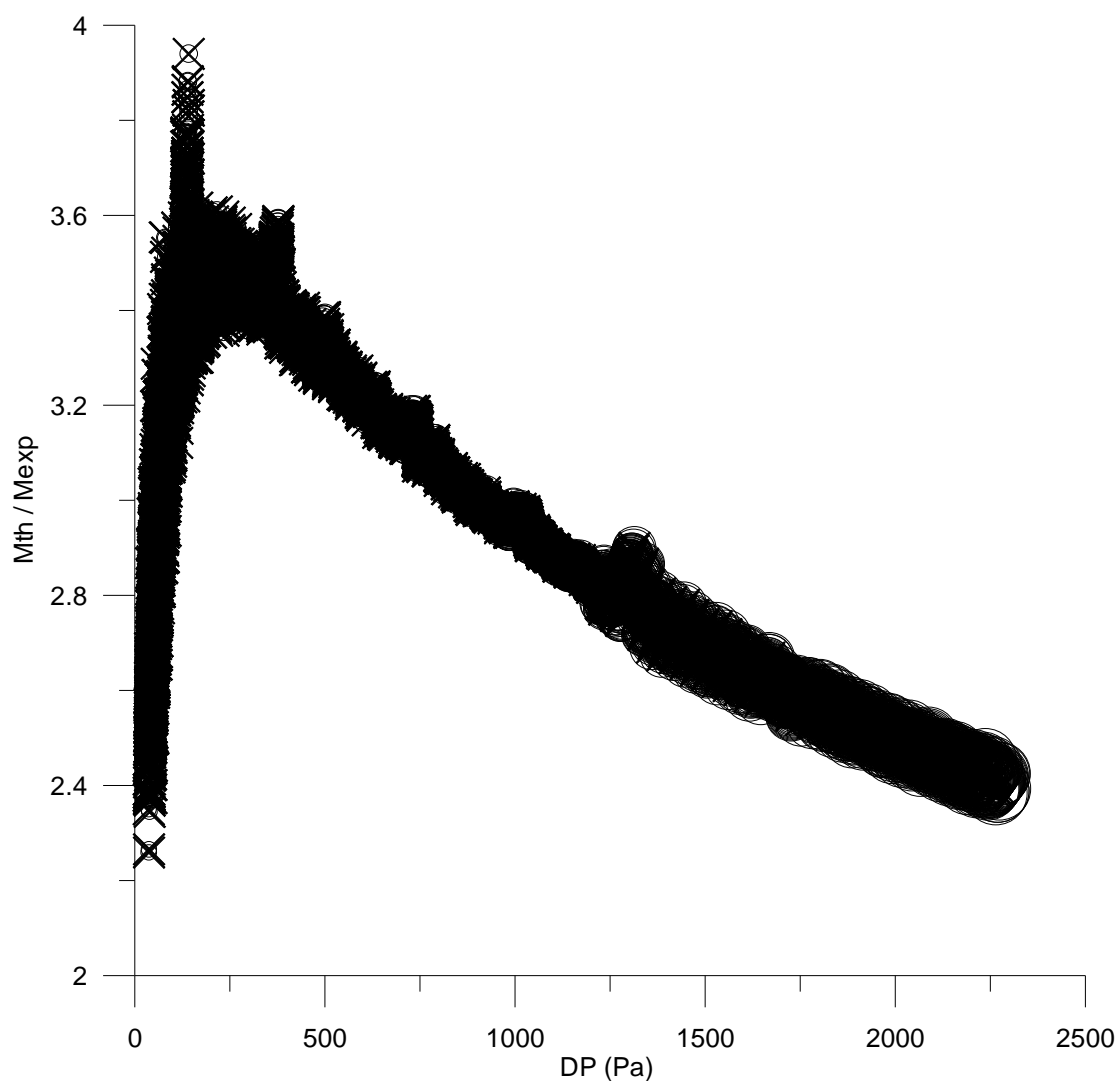
Η μεθοδολογία που ακολουθείται και εδώ είναι ακριβώς η ίδια όπως και στην περίπτωση με το Αργό.

Ακολουθούν τα σχετικά διαγράμματα:



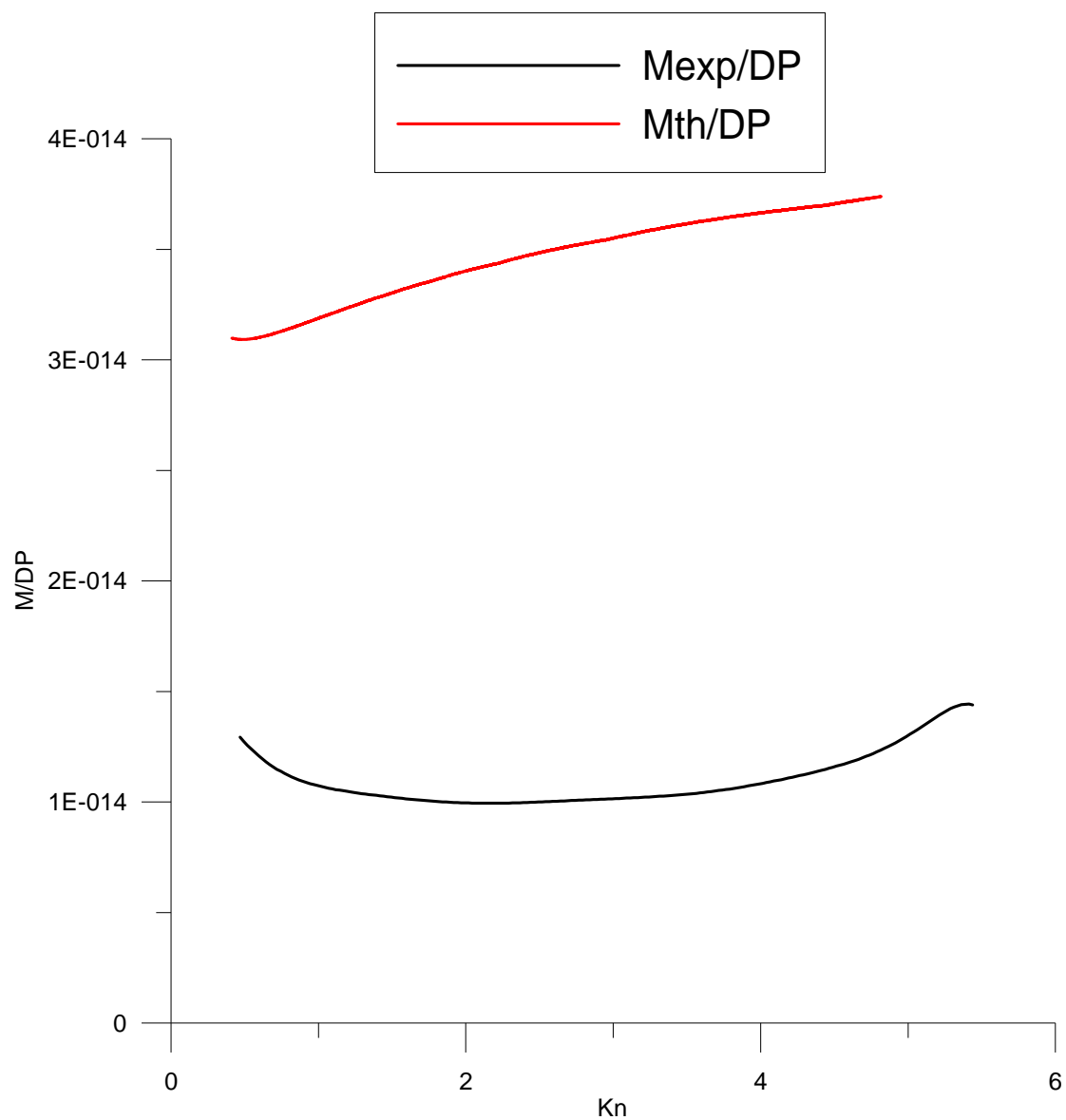
σχήμα 1

Από το διάγραμμα αυτό βλέπουμε ότι η θεωρητική παροχή μάζας είναι μεγαλύτερη από την πειραματικά μετρούμενη.



σχήμα 2

Στο σχήμα 2 παρατηρούμε πως ο λόγος M_{th}/M_{exp} είναι περίπου 2,6. Δηλαδή η θεωρητική παροχή μάζας είναι περίπου 2,6 φορές μεγαλύτερη από την πειραματικά μετρούμενη.



σχήμα 3

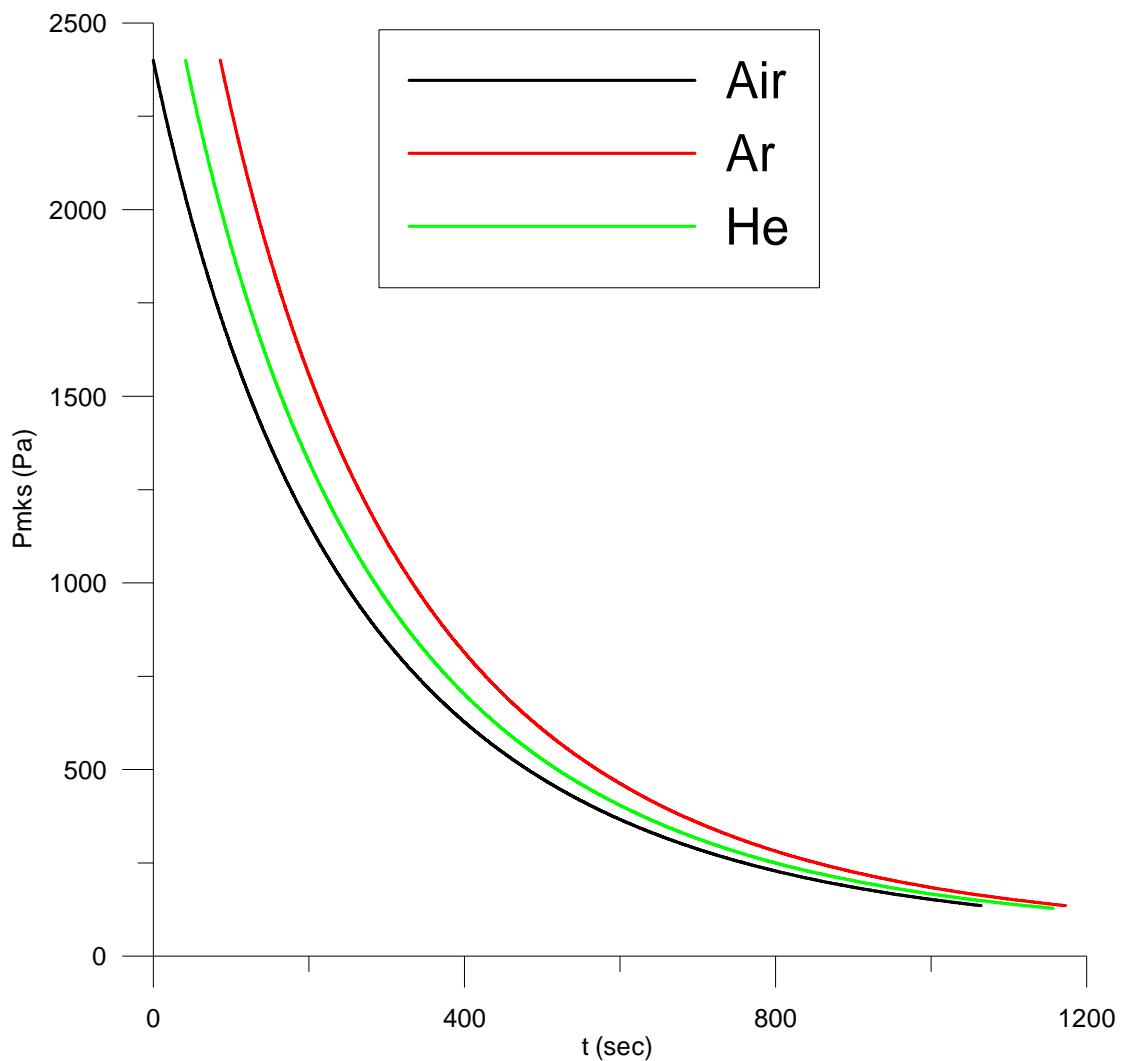
Από το σχήμα 3 παρατηρούμε ότι ο λόγος M/DP παρουσιάζει ελάχιστο για κάποιο Kn και μετά αρχίζει να αυξάνει και πάλι. Το ίδιο παρατηρήσαμε και στα προηγούμενα πειράματα.

■ Σύγκριση των αερίων μεταξύ τους

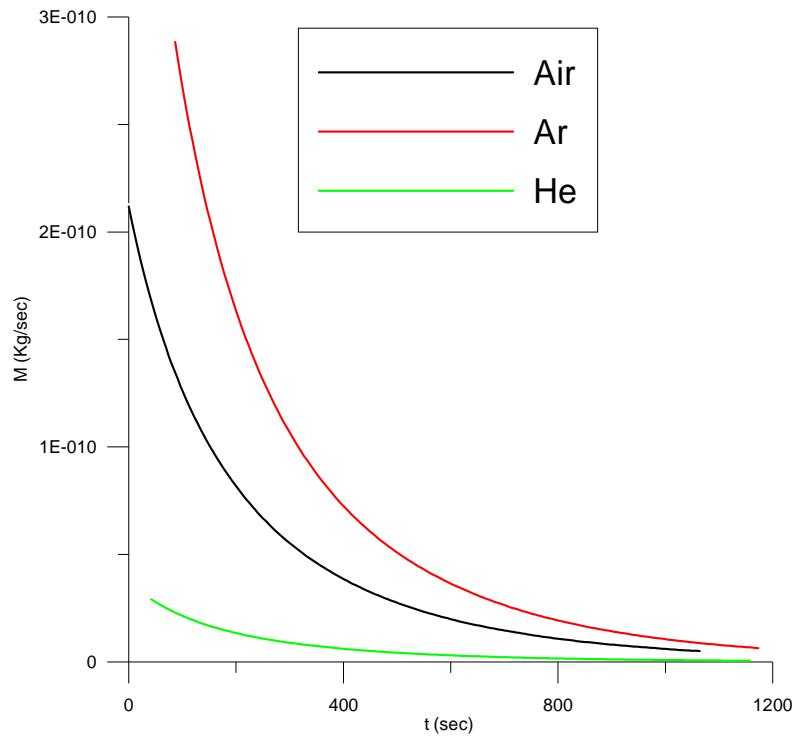
Στο στάδιο αυτό θα συγκρίνουμε το Αργό, τον αέρα και το Ήλιο μεταξύ τους. Η σύγκριση αυτή έγινε για την ίδια πλάκα μικροαγωγών και υπό τις ίδιες συνθήκες πειράματος.

Η πλάκα μικροαγωγών που χρησιμοποιήθηκε είχε τα εξής χαρακτηριστικά: **Μήκος $L=4880 \mu\text{m}$, Πλάτος $W=285 \mu\text{m}$ και Βάθος $H=20 \mu\text{m}$. Αριθμός καναλιών $N=19$.**

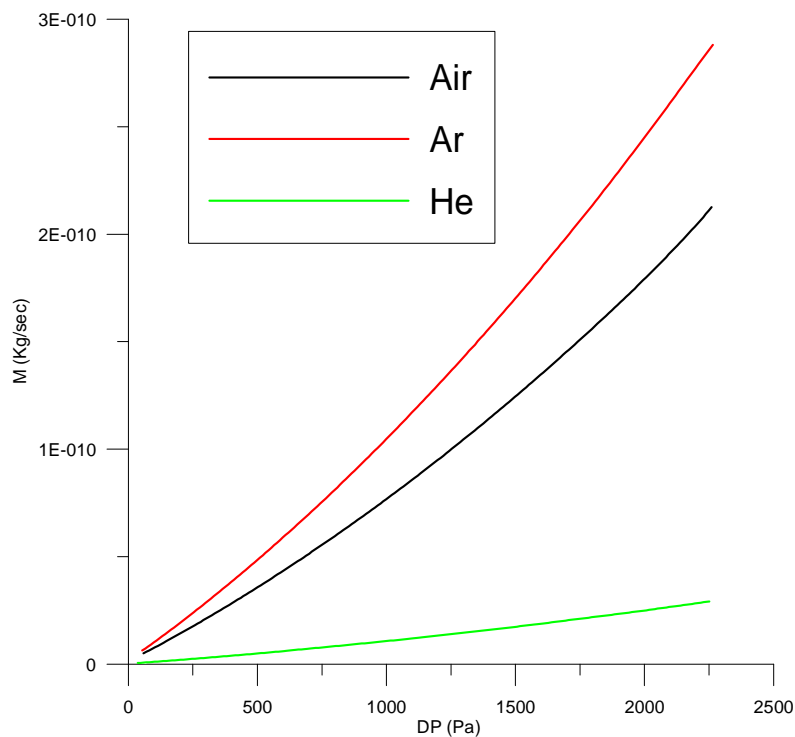
Ακολουθούν τα σχετικά διαγράμματα:



σχήμα 1

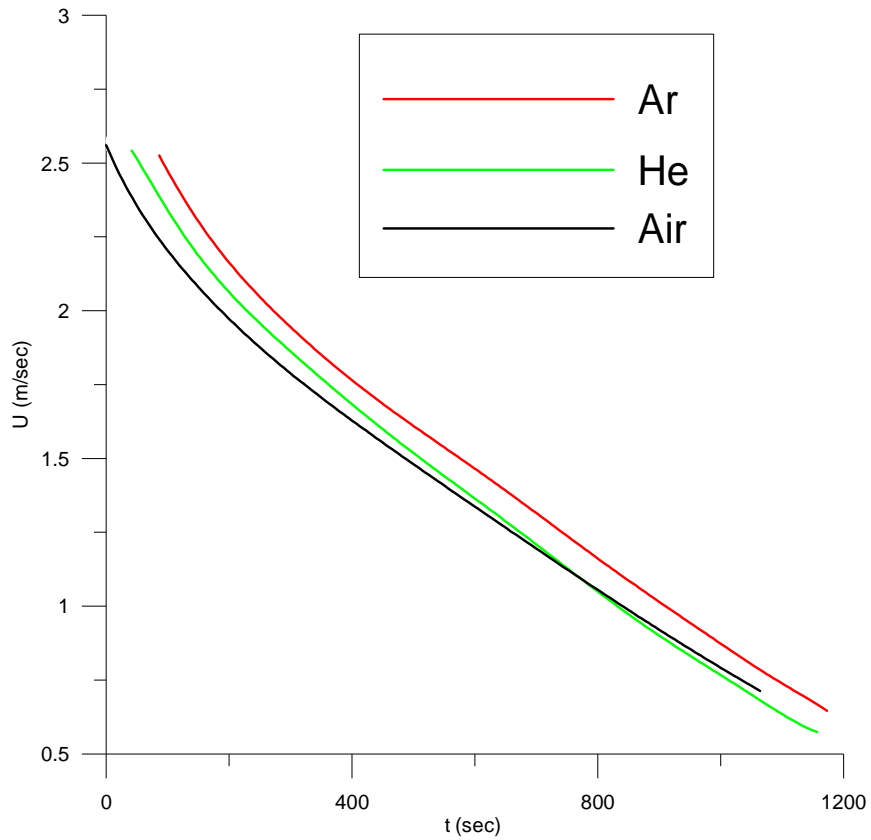


σχήμα 2

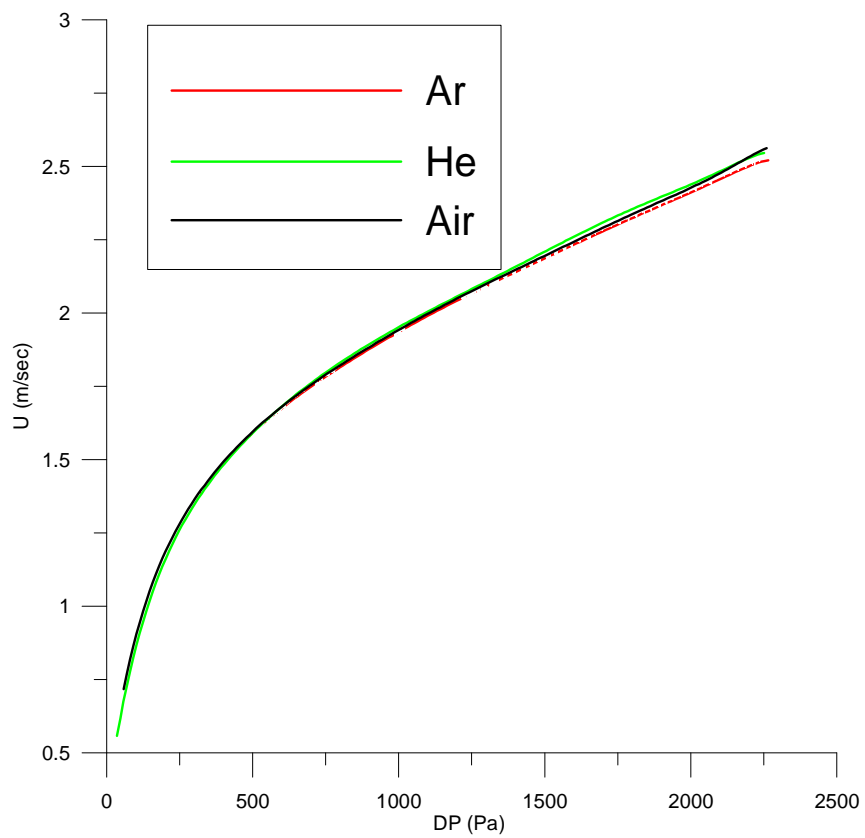


σχήμα 3

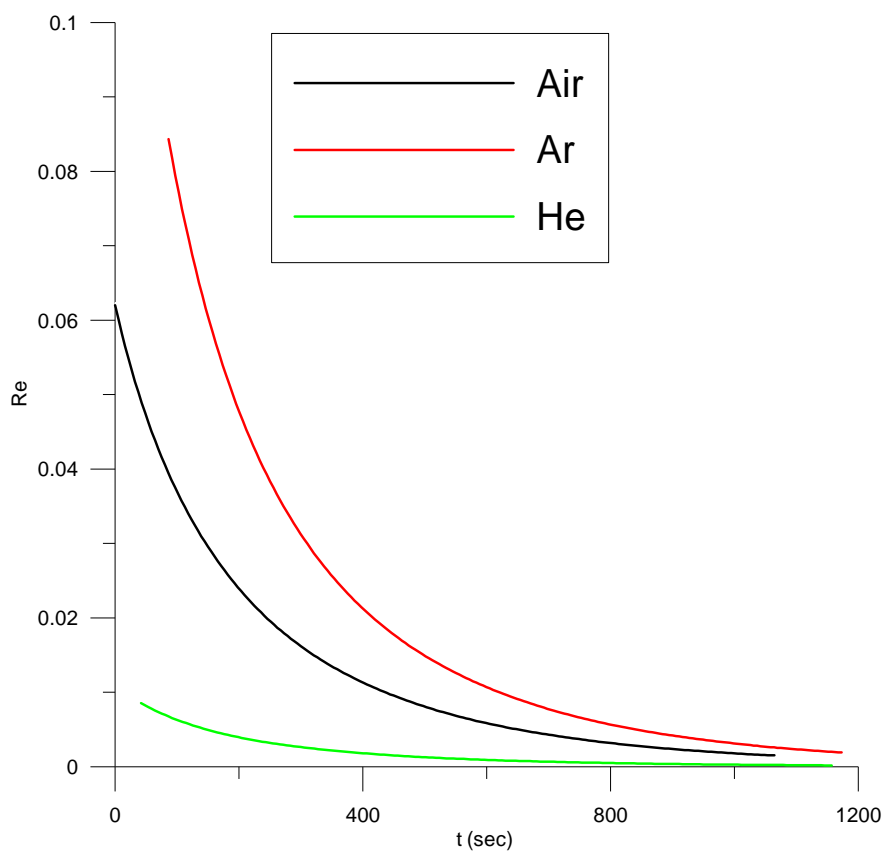
Από το σχήμα 3 παρατηρούμε ότι η παροχή μάζας του Αργού είναι μεγαλύτερη από την παροχή μάζας του αέρα και του Ηλίου. Το Ήλιο έχει την μικρότερη παροχή μάζας.



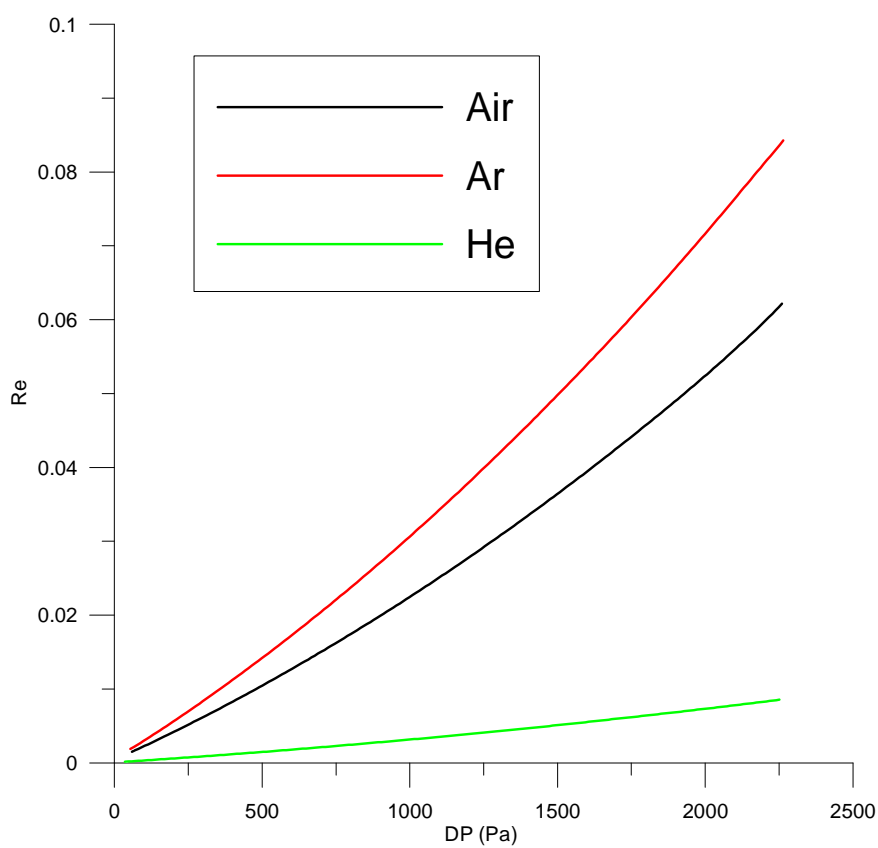
σχήμα 4



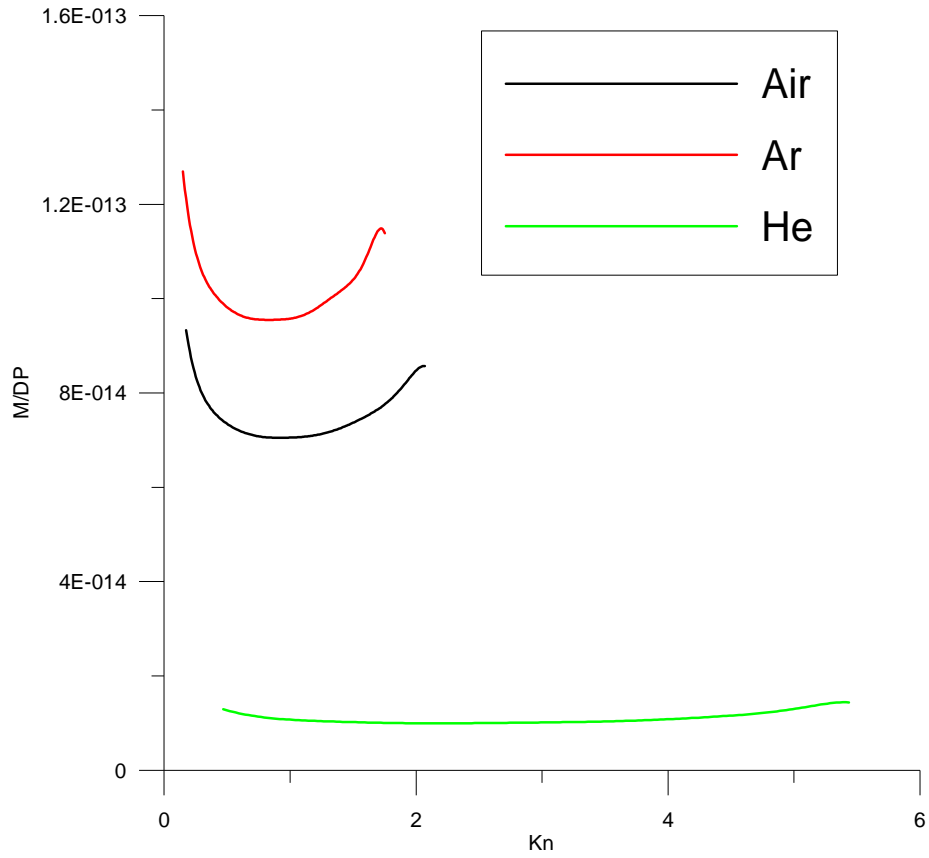
σχήμα 5



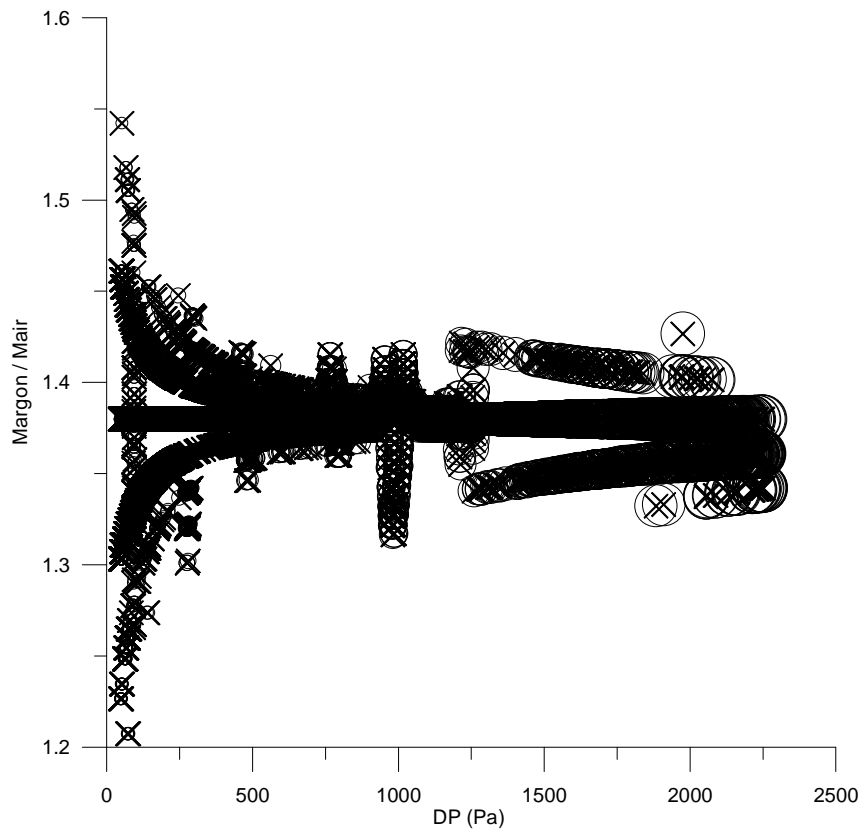
σχήμα 6



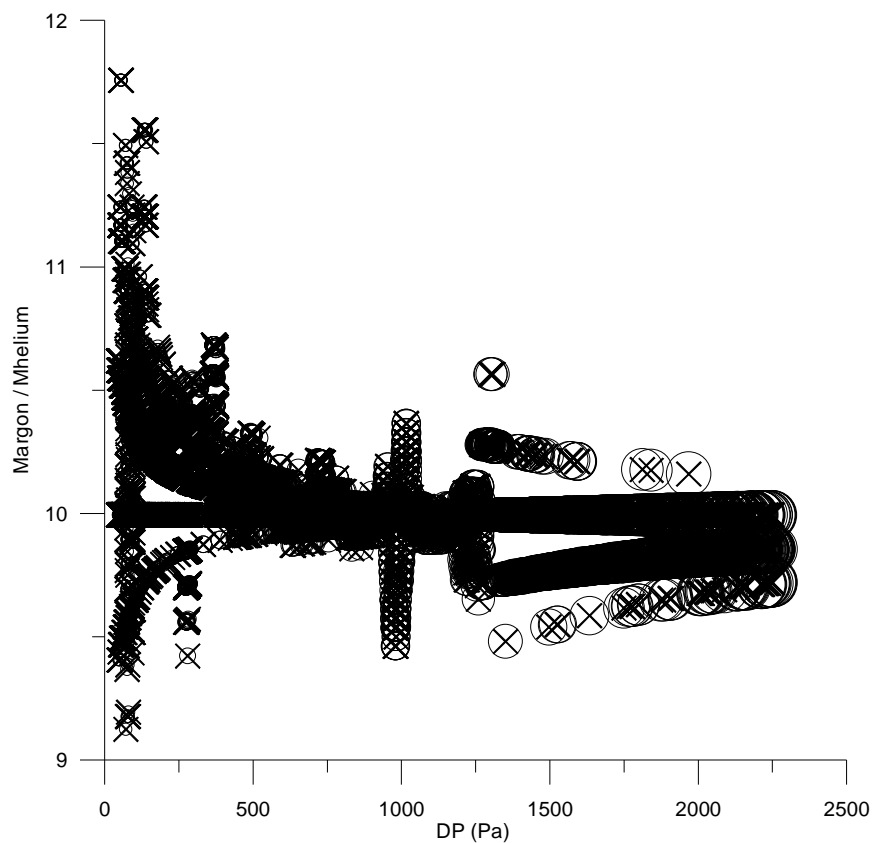
σχήμα 7



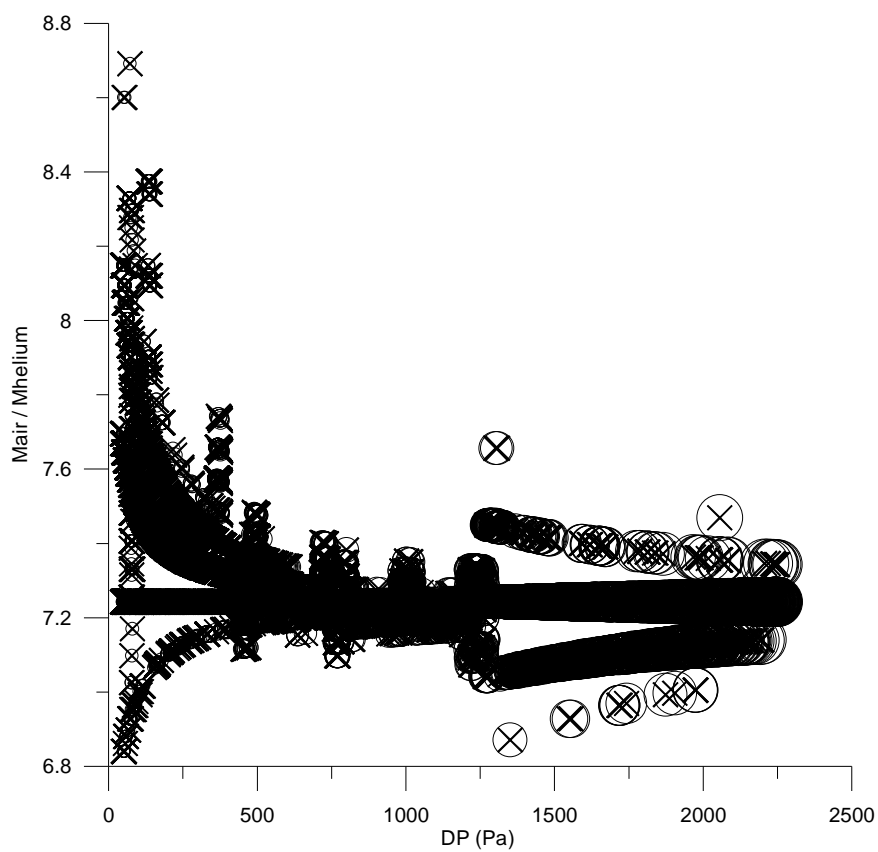
σχήμα 8



σχήμα 9



σχήμα 10



σχήμα 11

Από τα σχήματα 9, 10 και 11 παρατηρούμε τα εξής:

→ Η παροχή μάζας του Αργού είναι 1,38 φορές μεγαλύτερη από την παροχή μάζας του αέρα.

→ Η παροχή μάζας του Αργού είναι 10 φορές μεγαλύτερη από τη παροχή μάζας του Ήλιου.

→ Η παροχή μάζας του αέρα είναι 7,25 φορές μεγαλύτερη από την παροχή μάζας του Ήλιου.

■ Διερεύνηση όγκου δεξαμενών.

Οι δεξαμενές του αερίου, όπως είπαμε και στο Κεφάλαιο 2, είναι κατασκευασμένες από ανοξείδωτο χαλυβδοσωλήνα με πάχος τοιχώματος 0,5 cm.

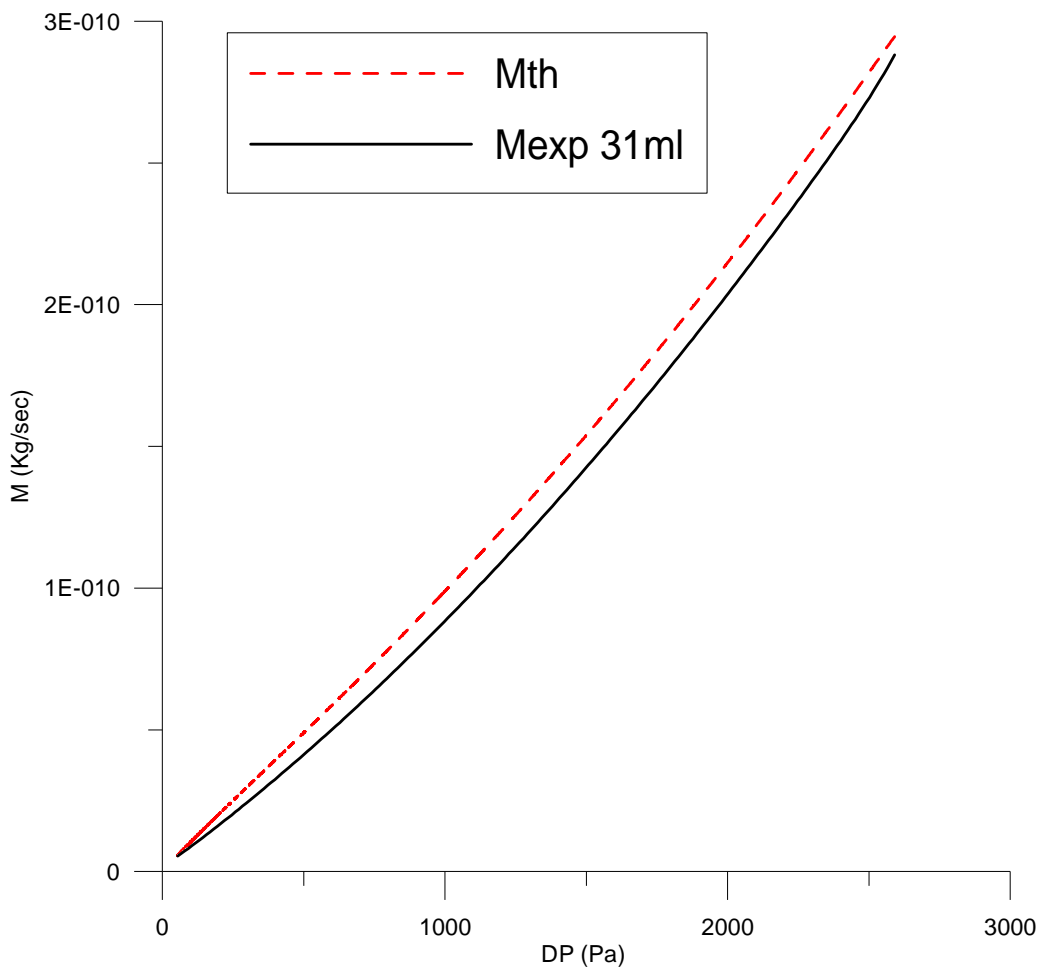
Ο εσωτερικός τους όγκος (χωρητικότητα) έχει υπολογιστεί στα 35 ml, και με βάση τον όγκο αυτό έγιναν όλοι οι υπολογισμοί.

Έτσι, εάν η χωρητικότητα των δεξαμενών δεν έχει υπολογιστεί σωστά, τότε αυτό επηρεάζει πολύ τα αποτελέσματα και συμπεράσματα μας.

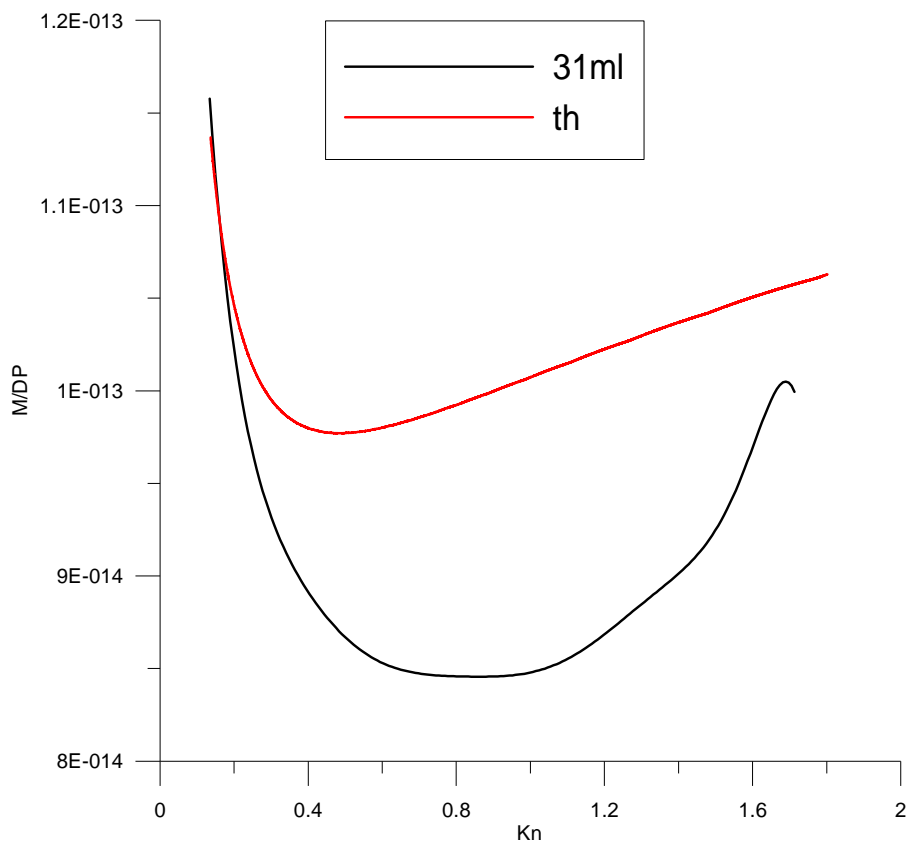
Για το λόγο αυτό, πιο κάτω θα συγκρίνουμε τα πειραματικά αποτελέσματα με τα θεωρητικά, για όγκο δεξαμενών από 31 ml μέχρι τα 38 ml, και θα εξαχθούν τα όποια δυνατά συμπεράσματα.

Ακολουθούν τα σχετικά διαγράμματα:

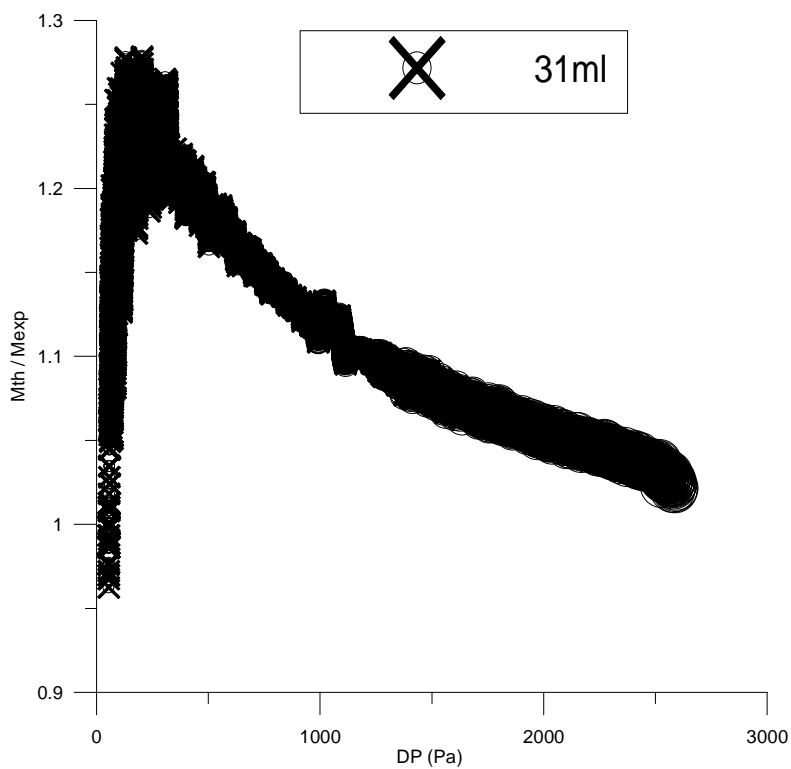
→ Για όγκο δεξαμενών 31 ml:



σχήμα 1

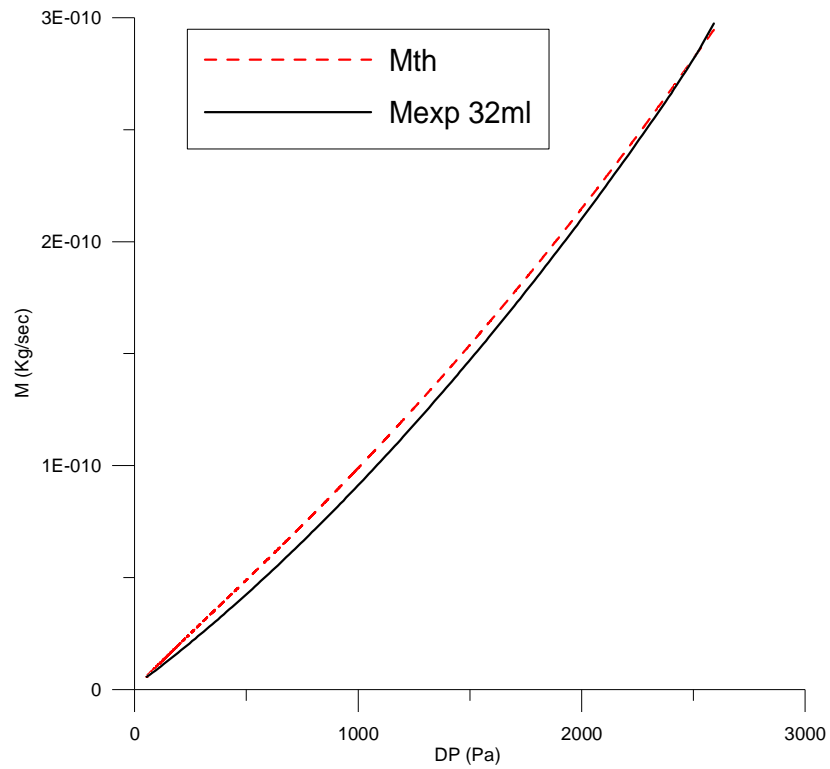


σχήμα 2

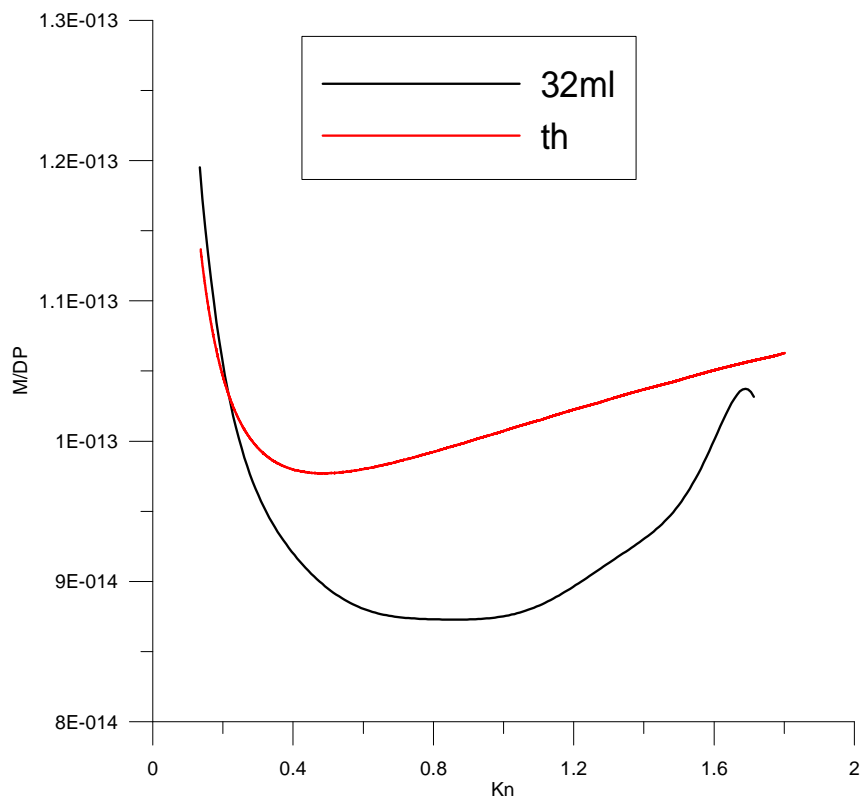


σχήμα 3

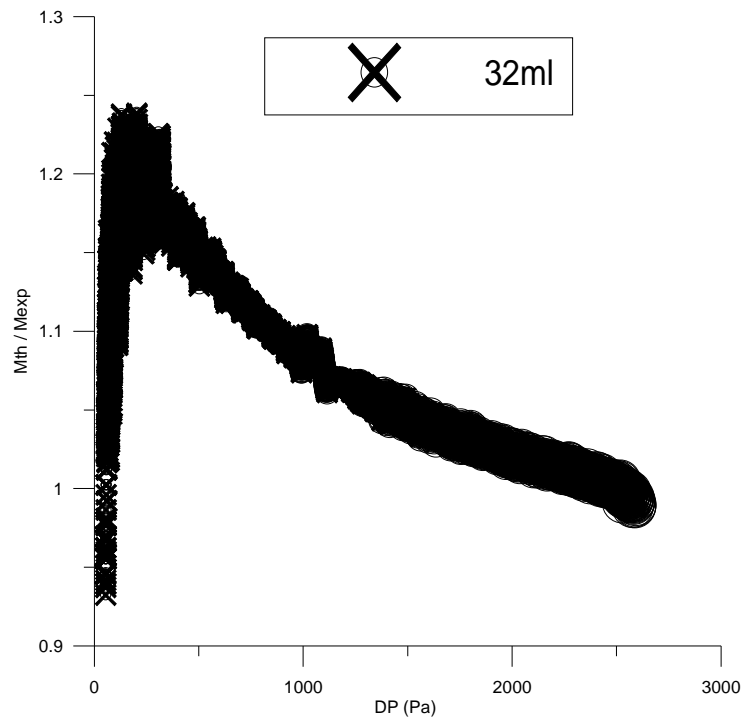
→ Για όγκο δεξαμενών 32 ml:



σχήμα 1

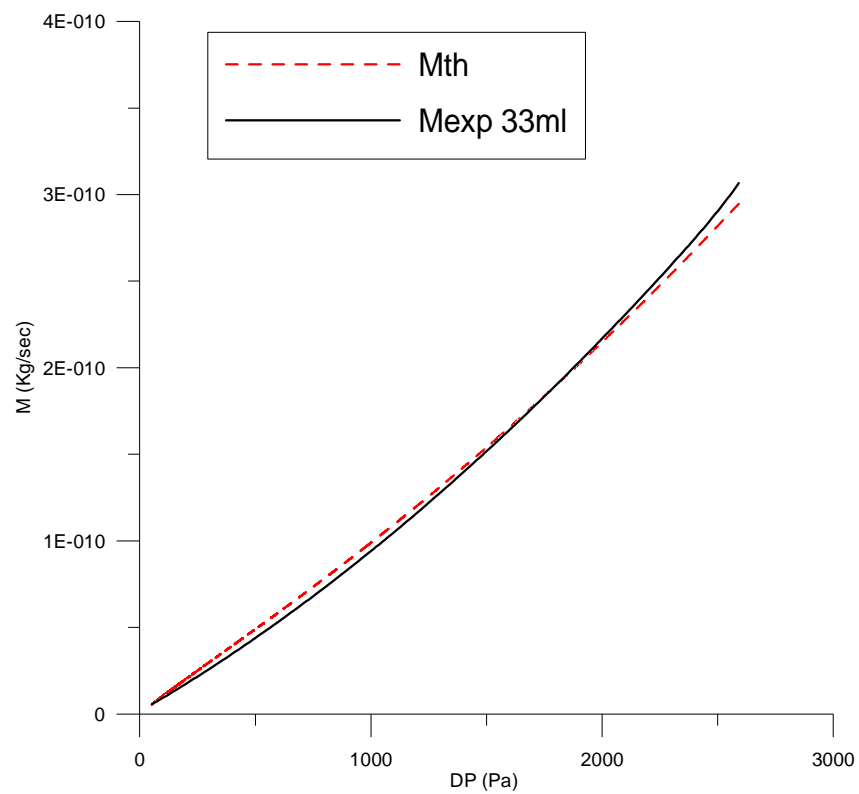


σχήμα 2

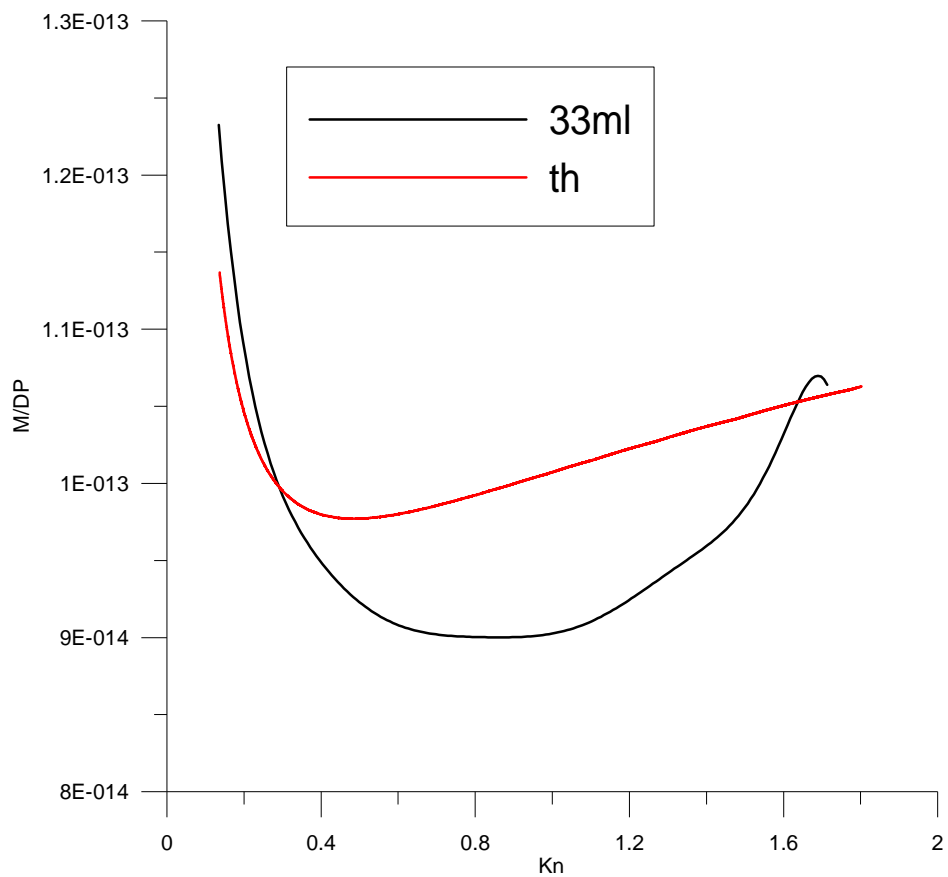


σχήμα 3

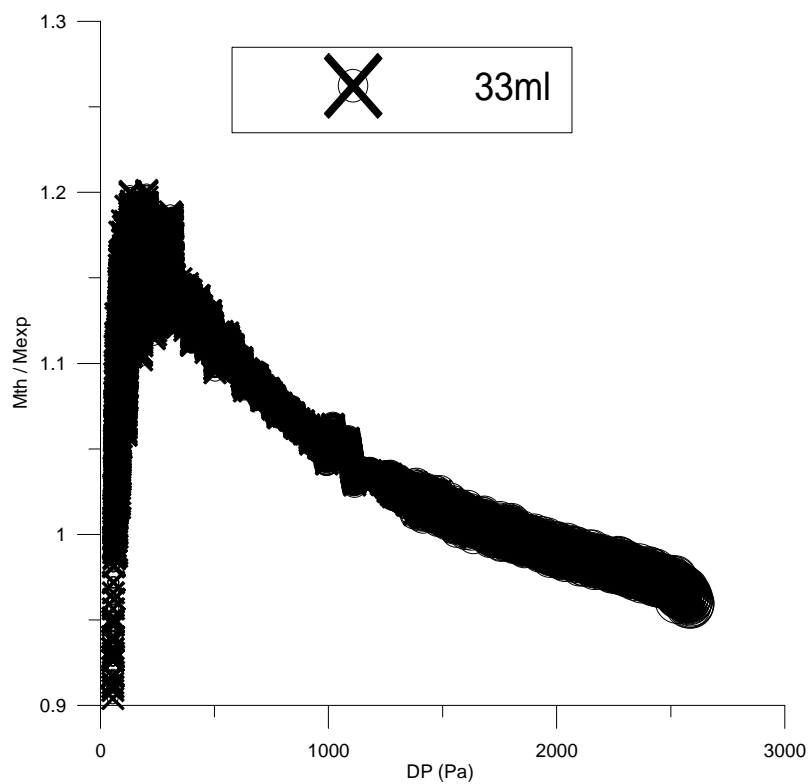
→ Για όγκο δεξαμενών 33 ml:



σχήμα 1

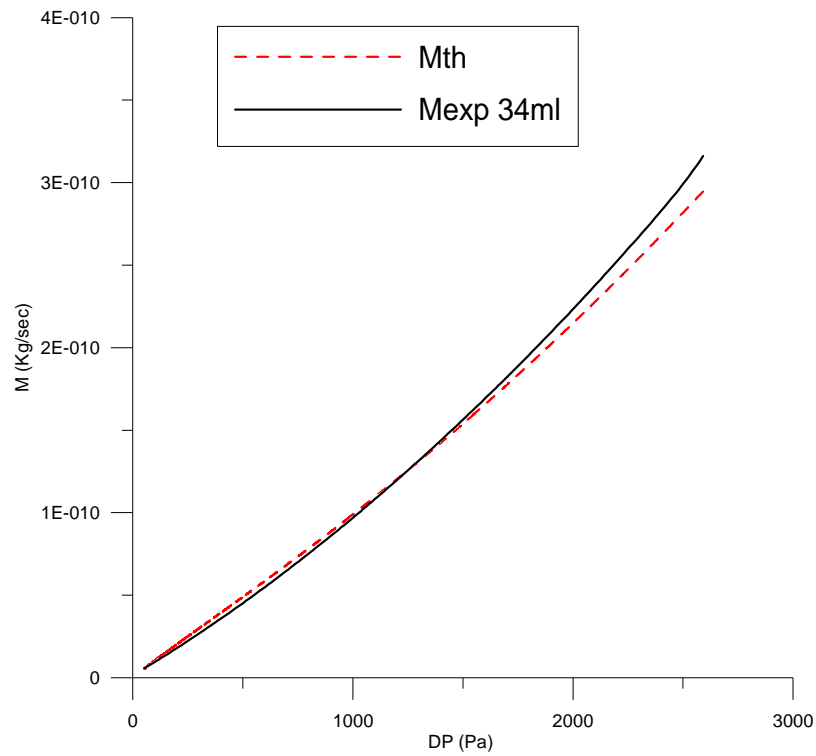


σχήμα 2

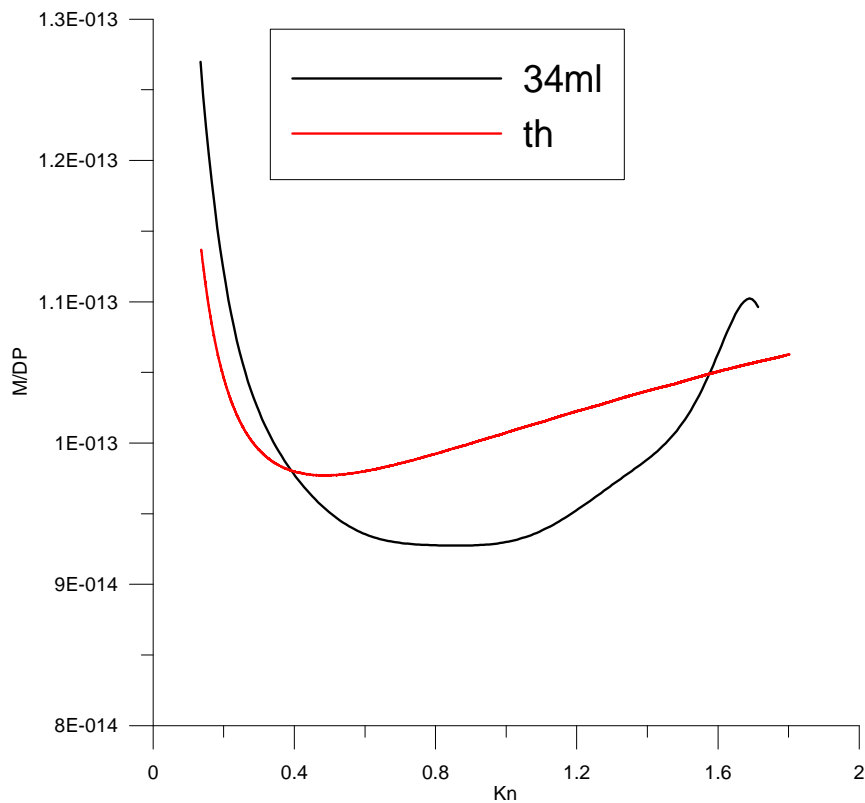


σχήμα 3

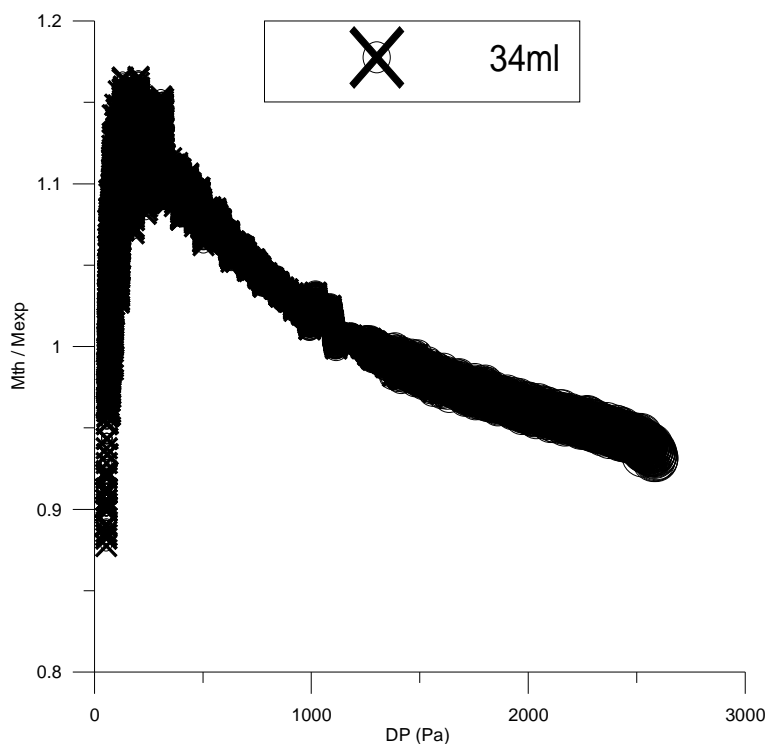
→ Για όγκο δεξαμενών 34 ml:



σχήμα 1

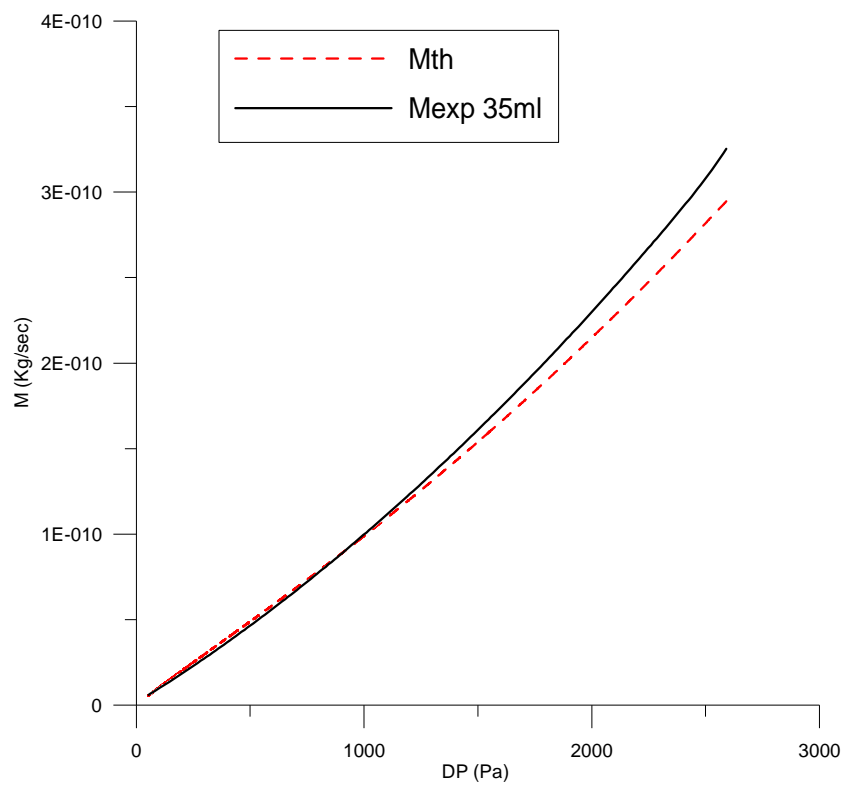


σχήμα 2

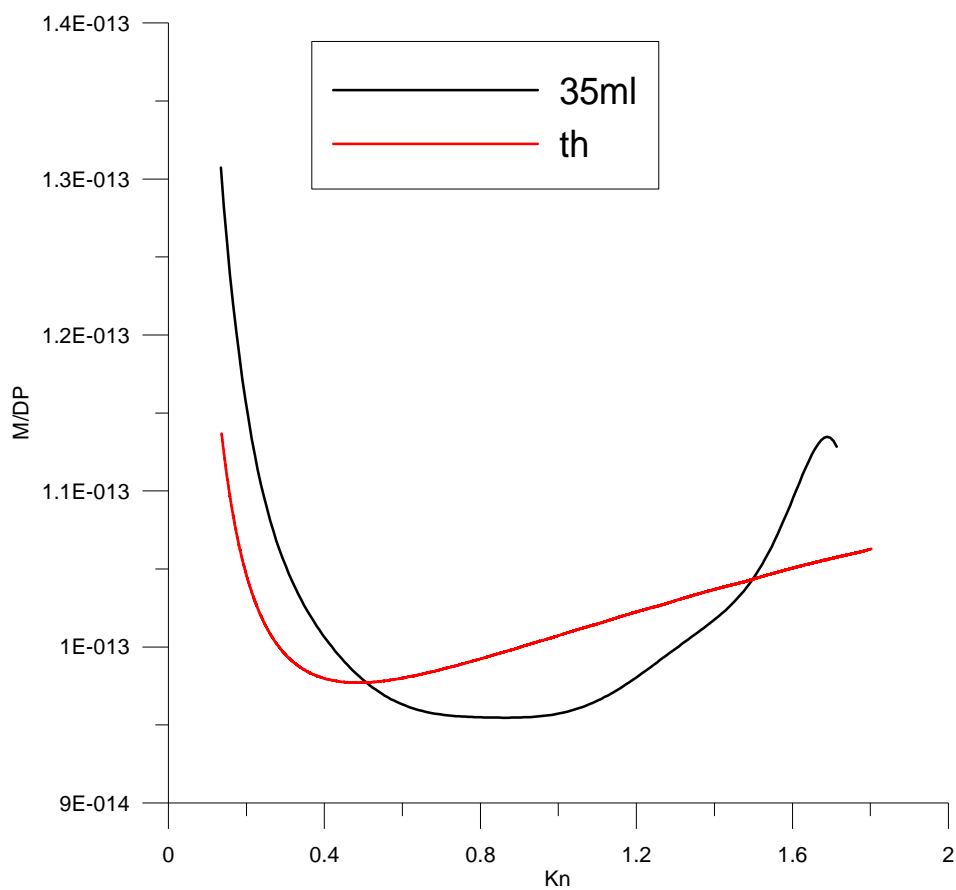


σχήμα 3

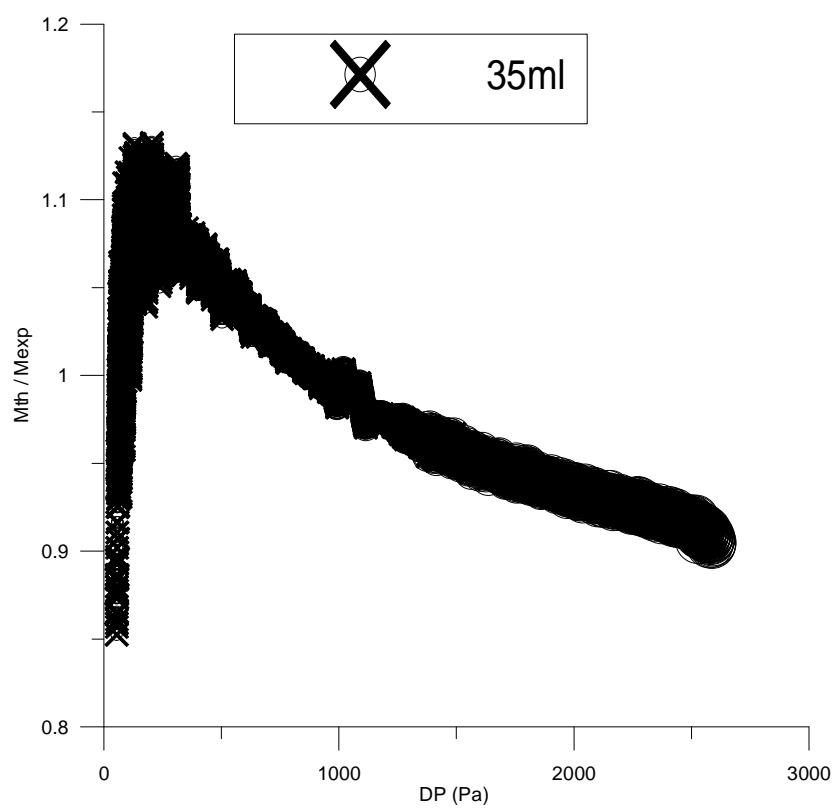
→ Για όγκο δεξαμενών 35 ml:



σχήμα 1

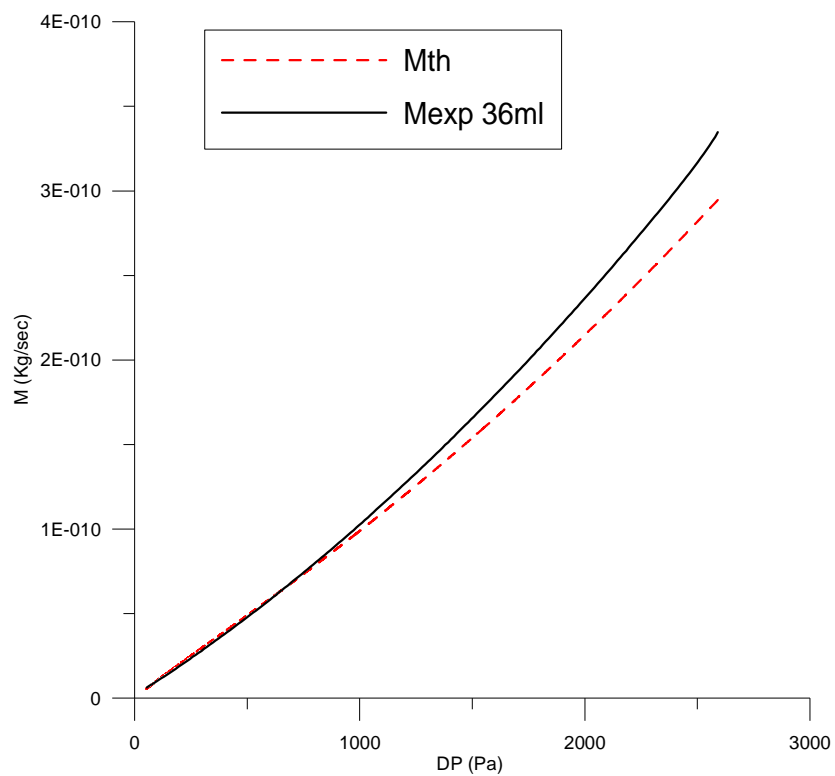


σχήμα 2

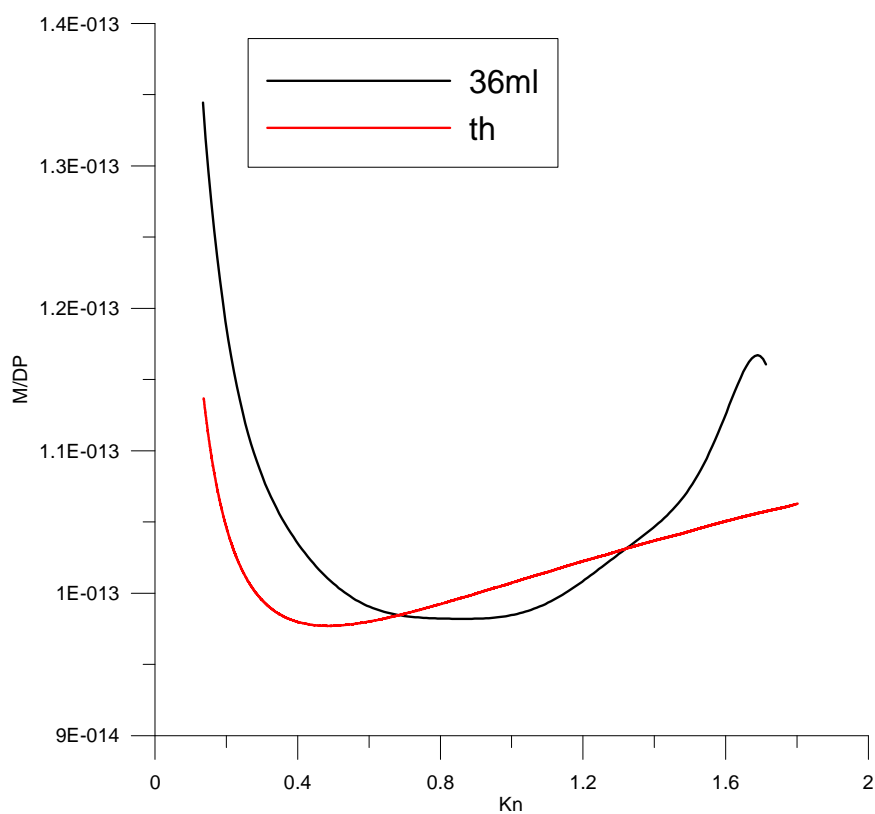


σχήμα 3

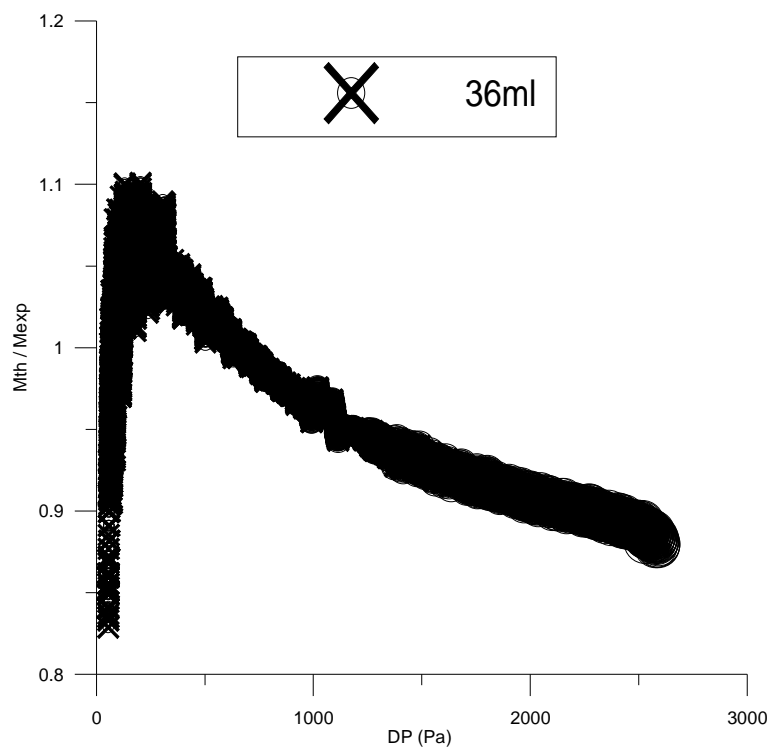
→ Για όγκο δεξαμενών 36 ml:



σχήμα 1

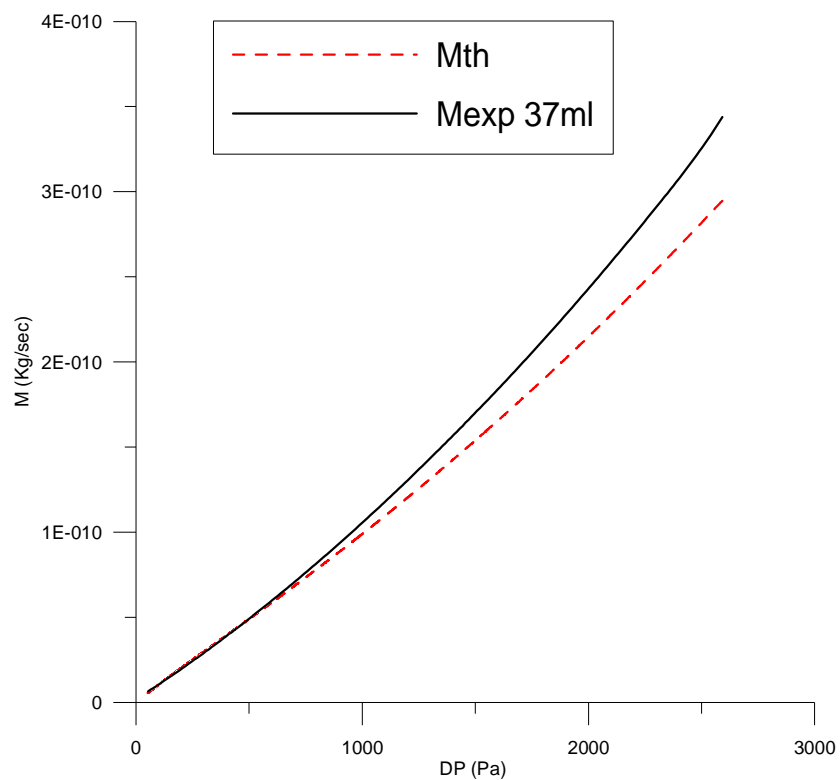


σχήμα 2

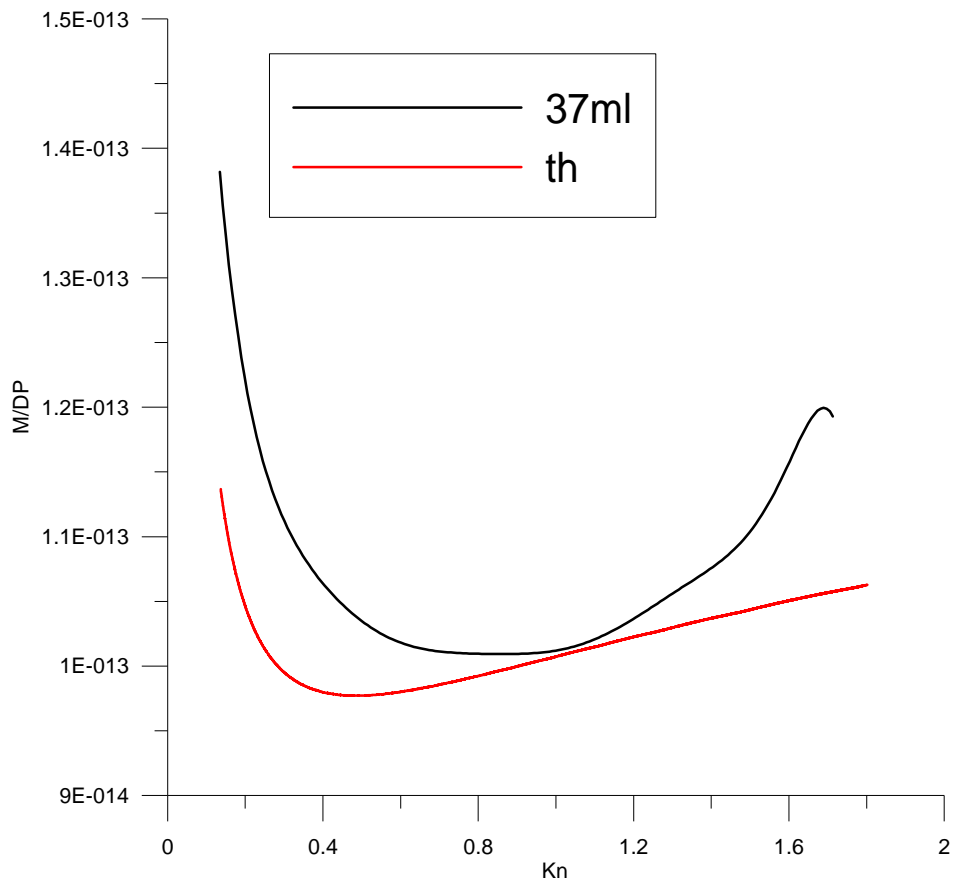


σχήμα 3

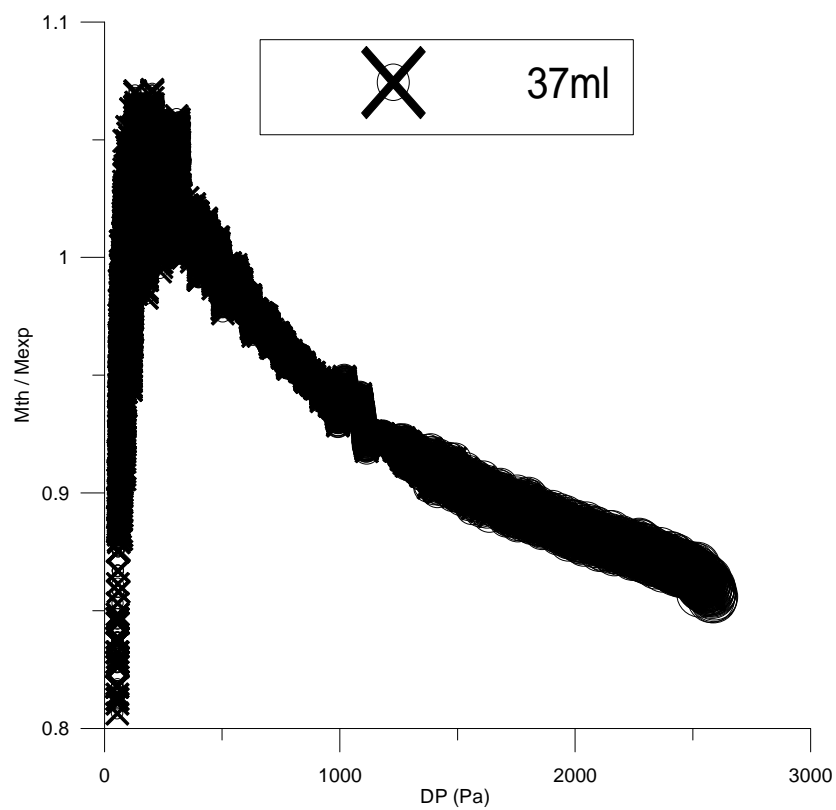
→ Για όγκο δεξαμενών 37 ml:



σχήμα 1

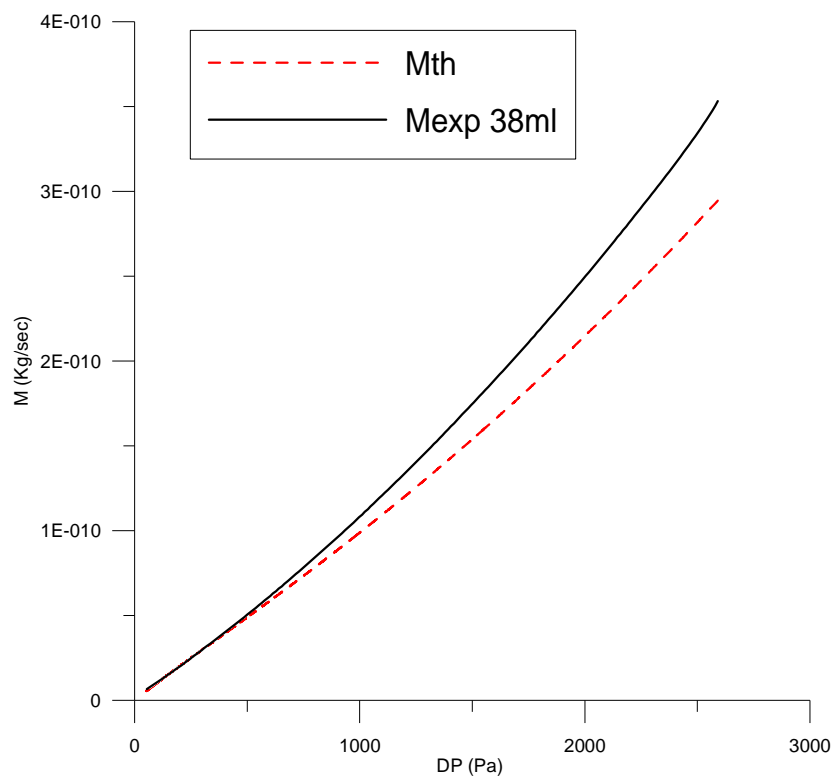


σχήμα 2

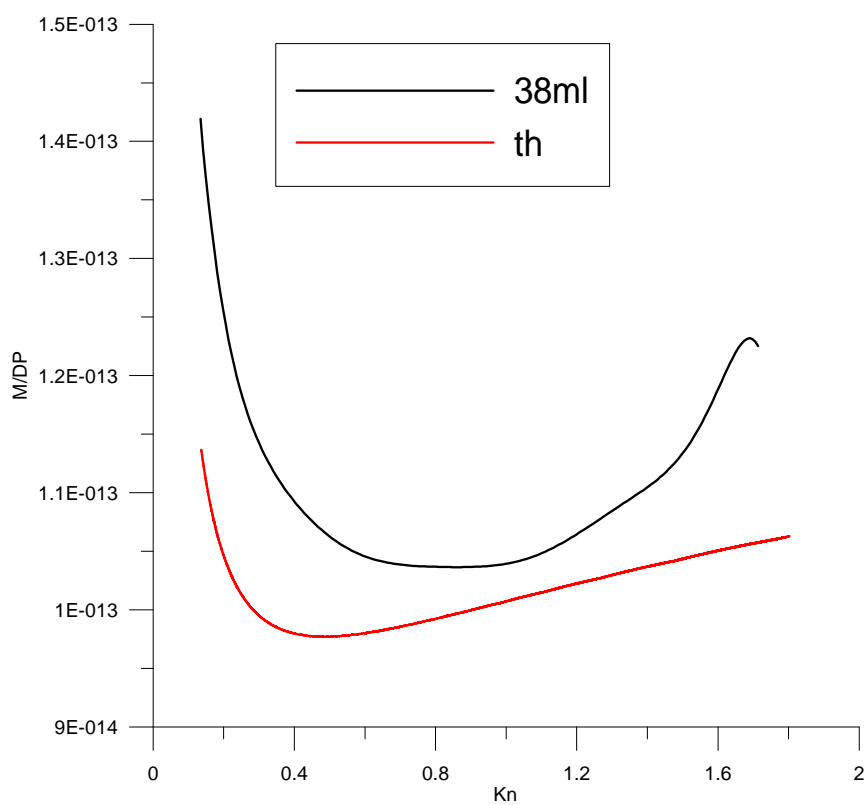


σχήμα 3

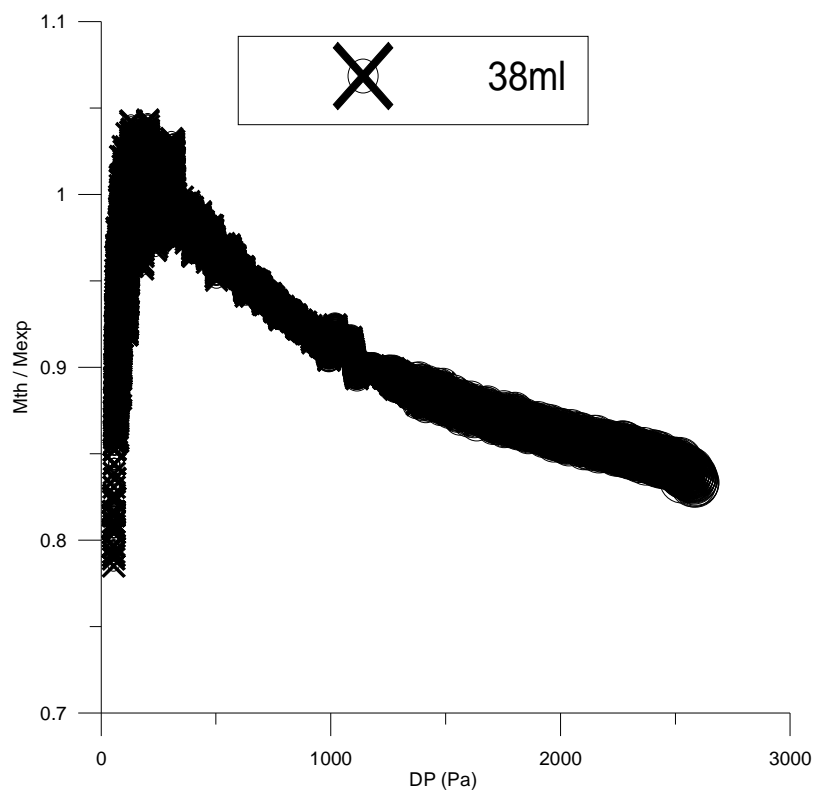
→ Για όγκο δεξαμενών 38 ml:



σχήμα 1



σχήμα 2



σχήμα 3

Από τα πιο πάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι πιο κοντά στις θεωρητικές τιμές είναι οι δεξαμενές με όγκο (χωρητικότητα) 33 ml, όπου ο λόγος M_{th}/M_{exp} είναι πολύ κοντά στην μονάδα.

3.3 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 τεχνοτροπία κατά την οποία κολλάει το γυαλί πάνω στην πλάκα πυριτίου με την ειδική κολλητική ουσία κατόπιν πίεσης, πιθανόν να επηρεάζει αρνητικά τα αποτελέσματα μας. Αφού είναι σχετικά εύκολο το γυαλί να μην κολλήσει καλά πάνω στο πυρίτιο, οπότε θα έχουμε διαρροές, ή ακόμα μπορεί ποσότητα από την κολλητική ουσία να εισχωρήσει μέσα στα μικροκανάλια και να τα φράξει.

Όσον αφορά στα πειραματικά αποτελέσματα:

- Πλάκα μικροαγωγών μήκους $L=4750\mu\text{m}$, πλάτους $W=250\mu\text{m}$ και βάθους $H=30\mu\text{m}$. Αριθμός καναλιών $N=27$. **Αργό** ως εργαζόμενο μέσο.
 - Η διαφορά πίεσης στα άκρα των μικροαγωγών μετρήθηκε από 98 torr έως 5 torr.
 - Η παροχή μάζας ήταν της τάξης των 10^{-11} Kg/sec έως 10^{-9} Kg/sec.
 - Η ταχύτητα της ροής μετρήθηκε από 4,1 m/sec έως 0,35 m/sec.
 - Ο αριθμός Re ήταν από 0,005 έως 1,05.
 - Η θεωρητική παροχή μάζας ήταν 2,5 φορές μεγαλύτερη από την πειραματική.

• Πλάκα μικροαγωγών μήκους $L=4880\mu\text{m}$, πλάτους $W=285\mu\text{m}$ και βάθους $H=20\mu\text{m}$. Αριθμός καναλιών $N=19$. **Αργό** ως εργαζόμενο μέσο.

- Η διαφορά πίεσης στα άκρα των μικροαγωγών μετρήθηκε από 20 torr έως 0,6 torr.
- Η παροχή μάζας ήταν της τάξης των 10^{-12} Kg/sec έως 10^{-10} Kg/sec.
- Η ταχύτητα της ροής μετρήθηκε από 2,65 m/sec έως 0,65 m/sec.
- Ο αριθμός Re ήταν από 0,002 έως 0,095.
- Ο αριθμός Knudsen κυμαίνεται από 0,12 έως 1,65.
- Ο λόγος \dot{M} / DP συναρτήσει του αριθμού Knudsen παρουσιάζει ακρότατο (minimum) για $Kn=0,9$ ενώ η θεωρία λέει για $Kn=0,5$.
- Η πειραματική παροχή μάζας ήταν $\pm 10\%$ της θεωρητικής.

• Πλάκα μικροαγωγών μήκους $L=4880\mu\text{m}$, πλάτους $W=285\mu\text{m}$ και βάθους $H=20\mu\text{m}$. Αριθμός καναλιών $N=19$. **Αέρας** ως εργαζόμενο μέσο.

- Η διαφορά πίεσης στα άκρα των μικροαγωγών μετρήθηκε από 18 torr έως 0,6 torr.
- Η παροχή μάζας ήταν της τάξης των 10^{-12} Kg/sec έως 10^{-10} Kg/sec.
- Η ταχύτητα της ροής μετρήθηκε από 2,58 m/sec έως 0,7 m/sec.
- Ο αριθμός Re ήταν από 0,06 έως 0,0015.
- Ο αριθμός Knudsen κυμαίνεται από 0,17 έως 2,04.
- Ο λόγος \dot{M} / DP συναρτήσει του αριθμού Knudsen παρουσιάζει ακρότατο (minimum) για $Kn=0,9$ ενώ η θεωρία λέει για $Kn=0,5$.
- Η πειραματική παροχή μάζας ήταν $\pm 10\%$ της θεωρητικής.

• Πλάκα μικροαγωγών μήκους $L=4880\mu\text{m}$, πλάτους $W=285\mu\text{m}$ και βάθους $H=20\mu\text{m}$. Αριθμός καναλιών $N=19$. **Ήλιο** ως εργαζόμενο μέσο.

- Η διαφορά πίεσης στα άκρα των μικροαγωγών μετρήθηκε από 18 torr έως 0,7 torr.
- Η παροχή μάζας ήταν της τάξης των 10^{-13} Kg/sec έως 10^{-11} Kg/sec.
- Η ταχύτητα της ροής μετρήθηκε από 2,57 m/sec έως 0,57 m/sec.
- Ο αριθμός Re ήταν από 0,0086 έως 0,00017.
- Ο αριθμός Knudsen κυμαίνεται από 0,47 έως 5,3.
- Ο λόγος \dot{M} / DP συναρτήσει του αριθμού Knudsen παρουσιάζει ακρότατο (minimum) για $Kn=2$ ενώ η θεωρία λέει για $Kn=0,5$.
- Η θεωρητική παροχή μάζας ήταν 3 φορές μεγαλύτερη από την πειραματική.

- ▶ Η παροχή μάζας του Αργού είναι 1,38 φορές μεγαλύτερη από την παροχή μάζας του αέρα.
- ▶ Η παροχή μάζας του Αργού είναι 10 φορές μεγαλύτερη από την παροχή μάζας του Ηλίου.
- ▶ Η παροχή μάζας του αέρα είναι 7,25 φορές μεγαλύτερη από την παροχή μάζας του Ηλίου.

→ Για όγκο δεξαμενών 33 ml έναντι των 35 ml που θεωρήσαμε ως δεδομένο κατά την εκτέλεση των πειραμάτων δίνει αποτελέσματα πολύ πιο κοντά στα θεωρητικά, πράγμα που σημαίνει ότι πρέπει να γίνει ένας πιο ακριβής υπολογισμός του όγκου των δεξαμενών σε περίπτωση άλλης μελλοντικής εργασίας.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1^ο: α) 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' όλα αυτά 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 ισοτόπου 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 λεπτό 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:

- A) Ένα πολύ αδρανές αέριο απαιτείται, ειδικά όπου το δυατομικό άζωτο δεν είναι επαρκώς αδρανές
- B) 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 φθηνό.

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 οξείδωση 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 ανέκαστα να σχηματίζουν ενώσεις. Ωστόσο ενώσεις των πιο βαριών ευγενών αερίων έχουν ήδη συνθεθεί. Τον Αύγουστο 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 40 Kelvin (-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.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1^ο: β) Το Ήλιο (He)

Το χημικό στοιχείο ήλιο είναι το πρώτο μέλος της χημικής ομάδας των ευγενών αερίων, έχει σύμβολο το He και ατομικό αριθμό 2. Είναι αέριο, άχρωμο, άοσμο και άγευστο και έχει το χαμηλότερο σημείο βρασμού από κάθε άλλο χημικό στοιχείο.

Είναι το δεύτερο πιο διαδεδομένο χημικό στοιχείο του σύμπαντος μετά το υδρογόνο (76% H, 23% He). Αντίθετα στην ατμόσφαιρα ανευρίσκεται μόνο σε ίχνη (5,24 ppm) επειδή είναι εξαιρετικά ελαφρύ και δεν μπορεί να συγκρατηθεί από το βαρυτικό πεδίο της γης.

Τη ήλιο παράγεται από την πυρηνική σύντηξη του υδρογόνου στα άστρα, ενώ στη γη από τη ραδιενεργό διάσπαση βαρύτερων στοιχείων.

1.1 Ιστορία

Το ήλιο είναι το μοναδικό χημικό στοιχείο που ανακαλύφθηκε πρώτα έξω από τη γη. Κατά τη διάρκεια μιας έκλειψης ηλίου, στις 18 Αυγούστου 1868, παρατηρήθηκε μία νέα κίτρινη γραμμή στο φάσμα της χρωμόσφαιρας του ήλιου (στα 587,49 nm), κοντά στις αντίστοιχες γραμμές του νατρίου. Αυτό οδήγησε τον Άγγλο αστρονόμο Norman Lockyer και τον Άγγλο χημικό Edward Frankland να προτείνουν την ύπαρξη ενός νέου χημικού στοιχείου, δίνοντάς το όνομα του ήλιου στον οποίο ανακαλύφθηκε.

Στη συνέχεια η ίδια κίτρινη γραμμή παρατηρήθηκε από το L. Palmieri στα 1881 στο φάσμα αερίων ηφαιστειακής προέλευσης από τον Βεζούβιο, ενώ τελικά η ύπαρξή του στη γη επιβεβαιώθηκε οριστικά από τον Βρετανό χημικό William Ramsay στα 1895. Αυτός απομόνωσε και ταυτοποίησε ως ήλιο το αέριο που είχε βρεθεί σε ορυκτό ουράνιο και το οποίο μέχρι τότε θεωρούνταν λανθασμένα ότι ήταν άζωτο.

1.2 Ιδιότητες

Το ήλιο είναι αέριο άχρωμο, άοσμο, άγευστο και μη-τοξικό. Έχει το χαμηλότερο σημείο βρασμού από κάθε άλλο χημικό στοιχείο ενώ είναι το μοναδικό υγρό το οποίο είναι αδύνατο να παγώσει μόνο με την ελάττωση της θερμοκρασίας. Είναι απαραίτητη και η αύξηση της πίεσης. Επίσης είναι το μοναδικό υλικό που δεν διαθέτει τριπλό σημείο, δηλαδή ένα συνδυασμό θερμοκρασίας και πίεσης στον οποίο θα συνυπάρχουν σε ισορροπία οι τρεις καταστάσεις της ύλης – στερεό, υγρό και αέριο.

Στη φύση απαντάται σε δύο σταθερά ισότοπα, ^3He και ^4He , από τα οποία το πρώτο απαντάται σπάνια. Όπως όλα τα ευγενή αέρια έχει σταθερή ηλεκτρονική διαμόρφωση και το άτομό του είναι άπολο και σφαιρικό. Είναι το πιο αδρανές χημικό στοιχείο και οι μόνες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ατόμων είναι ασθενείς δυνάμεις van der Waals.

Έχει τη μικρότερη διαλυτότητα στο νερό από κάθε άλλο γνωστό αέριο, ενώ ο δείκτης διάθλασης είναι πιο κοντά στη μονάδα από κάθε άλλο γνωστό αέριο.

Ίσως η πιο εντυπωσιακή από τις ιδιότητές του είναι η ικανότητά να μετατρέπεται σε υπερρευστό. Όταν το υγρό φυσικό ήλιο (το συνηθισμένο ισότοπο ^4He) ψυχθεί ακόμα περισσότερο στους 2,2 K (γνωστό ως θερμοκρασιακό σημείο λ) μετασχηματίζεται σε μια νέα κατάσταση που έχει αρκετά παράξενες ιδιότητες. Η αρχική «φυσιολογική» κατάσταση ονομάζεται ήλιο-I η οποία μετασχηματίζεται στην κατάσταση ήλιο-II. Στο σημείο που λαμβάνει χώρα ο μετασχηματισμός από την κατάσταση I στην κατάσταση II, η ειδική θερμότητα αυξάνεται απότομα ενώ παρατηρείται και ακόμα πιο απότομη αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας της τάξης του 10^6 . Αντίθετα το ιξώδες του υλικού γίνεται ουσιαστικά μηδέν.

Το υπερρευστό ήλιο έχει την ιδιότητα να περνάει εύκολα πολύ λεπτά τριχοειδή αγγεία και σχισμές, που σχεδόν αποτρέπουν εντελώς τη ροή όλων των άλλων υγρών. Επίσης, η τεράστια θερμική αγωγιμότητα έχει ως αποτέλεσμα το ήλιο-II να μην βράζει με την θέρμανση του αλλά κατευθείαν να εξατμίζεται από υγρό σε αέριο.

Τέλος η πιο «παράξενη» ιδιότητά του, είναι η ικανότητά του να καλύπτει με ένα φιλμ πάχους μερικών εκατοντάδων ατόμων όλες τις στερεές επιφάνειες με τις οποίες έρχεται σε επαφή και βρίσκονται κάτω από το θερμοκρασιακό σημείο λ. Η παραπάνω ιδιότητα μπορεί να παρατηρηθεί κάνοντας το εξής πείραμα: βυθίζουμε τον πυθμένα ενός κατάλληλου δοχείου μέσα σε ένα λουτρό ηλίου-II και περιμένουμε η θερμοκρασία των τοιχωμάτων να πέσει κάτω από το σημείο λ. Τότε θα παρατηρήσουμε το υπερρευστό ήλιο να σκαρφαλώνει, ουσιαστικά χωρίς τριβές και υπερνικώντας την βαρύτητα, τις πλευρές του δοχείου και να το γεμίζει μέχρι να εξισωθούν οι επιφάνειες μέσα και έξω από αυτό.

1.3 Παραγωγή

Όπως αναφέρθηκε το ήλιο είναι το δεύτερο πιο διαδεδομένο χημικό στοιχείο στο σύμπαν και παράγεται στα άστρα από την πυρηνική σύντηξη του υδρογόνου. Κατά την αντίδραση αυτή μόνο ένα 0,7% της αρχικής μάζας μετατρέπεται σε ενέργεια, διατηρώντας έτσι ουσιαστικά σταθερή τη μάζα του άστρου. Χαρακτηριστικά μπορούμε να αναφέρουμε ότι στον ήλιο κάθε δευτερόλεπτο που περνάει μετατρέπονται περίπου 600 εκατομμύρια τόνοι υδρογόνου σε 595,5 εκατομμύρια τόνους ηλίου με τους εναπομείναντες 4,5 εκατομμύρια τόνους να εκπέμπονται ως ενέργεια. Αυτή η ενέργεια, που παράγεται βαθιά στο εσωτερικό του ήλιου με τη μορφή ακτίνων γ υψηλής ενέργειας, αλληλεπιδρά με το αστρικό υλικό και σταδιακά μετατρέπεται σε φωτόνια μεγαλύτερου μήκους κύματος.

Στη γη το ήλιο υπάρχει σε μικρές συγκεντρώσεις στην ατμόσφαιρα αλλά σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις, που φτάνουν μέχρι και το 7%, ανευρίσκεται στο φυσικό αέριο, από το οποίο και παράγεται με κλασματική απόσταξη. Καθώς το ήλιο έχει το χαμηλότερο σημείο βρασμού από κάθε άλλο χημικό στοιχείο, με την εφαρμογή χαμηλών θερμοκρασιών και υψηλών πιέσεων επιτυγχάνεται η υγροποίηση και ο διαχωρισμός των υπόλοιπων αερίων (κυρίως άζωτο και μεθάνιο). Με επιπλέον διαδοχικές υγροποιήσεις των προσμίξεων σε συνεχώς χαμηλότερες θερμοκρασίες και ένα τελικό στάδιο επεξεργασίας με ενεργό άνθρακα επιτυγχάνεται τελική καθαρότητα ηλίου της τάξης του 99,995%.

Οι μεγαλύτεροι παραγωγοί ηλίου σήμερα είναι οι Η.Π.Α., η Αλγερία και, σε μικρότερες ποσότητες, η Ρωσία και η Πολωνία.

1.4 Χρήσεις

Η πιο γνωστή χρήση του είναι ως ανυψωτικό, στην πλήρωση αερόπλοιων και μπαλονιών καθώς είναι ελαφρύτερο από τον αέρα. Προτιμάται από το υδρογόνο γιατί δεν είναι εύφλεκτο ενώ έχει το 92,64% της ανυψωτικής ικανότητας αυτού (περίπου 1 kg/m^3). Παρόλα αυτά η χρήση αυτή δεν είναι πια τόσο σημαντική και χρησιμοποιείται κυρίως σε μετεωρολογικά μπαλόνια.

Η κύρια χρήση είναι ως κρυογενικό ρευστό για την ψύξη σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες διάφορων μετάλλων ή άλλων υλικών, όπως στην περίπτωση της απεικόνισης με μαγνητικό συντονισμό (magnetic resonance imaging). Ήλιο χρησιμοποιεί, επίσης, ως μέσο ψύξης των μαγνητών του, ο επιταχυντής του CERN.

Επίσης, λόγω της πολύ μικρής διαλυτότητάς του στο νερό, χρησιμοποιείται ως υποκατάστατο του αζώτου σε συνθετικό αέρα αναπνευστικών συσκευών για μεγάλα βάθη, για την αντιμετώπιση της λεγόμενης νόσου των δυτών. Χρησιμοποιείται ως ψυκτικό σε ορισμένους πυρηνικούς αντιδραστήρες, στην αέρια χρωματογραφία, για τον εντοπισμό σημείων πιθανής διαρροής σε βιομηχανικό εξοπλισμό και για τη δημιουργία αδρανούς ατμόσφαιρας για την προστασία σημαντικών ιστορικών αντικειμένων. Τέλος, χρησιμοποιείται για την χρονολόγηση ορυκτών που περιέχουν ουράνιο και θόριο, καθώς είναι γνωστό ότι αυτά τα ραδιενεργά υλικά διασπώνται εκπέμποντας σωματίδια α , δηλαδή πυρήνες ηλίου.

Ως πρόσθετο τροφίμων χρησιμοποιείται με τον κωδικό E939.

1.5 Ασφάλεια – Υγεία

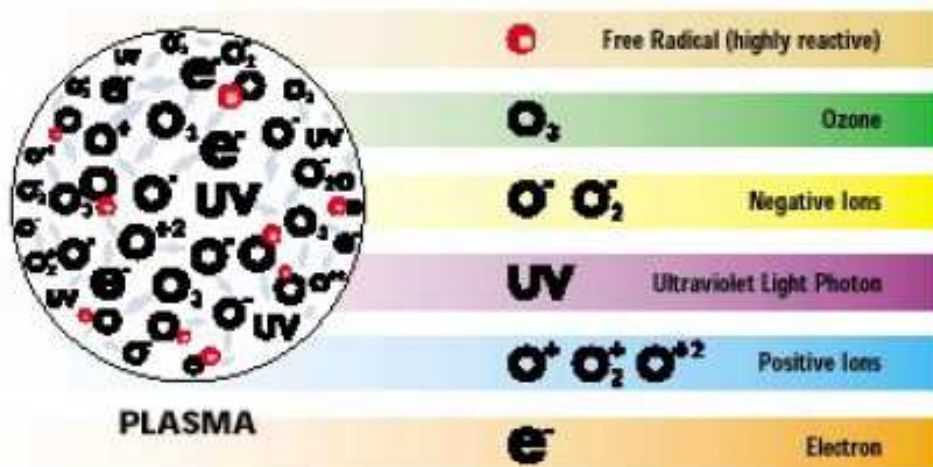
Το ήλιο δεν είναι τοξικό και ανευρίσκεται σε πολύ μικρές ποσότητες στο αίμα των ανθρώπων.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2^ο: 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 είδη γνωστές: την στερεά, την υγρή, και την αέρια. Παρότι βρίσκεται σε αφθονία στο σύμπαν, εμφανίζεται στην 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 στον 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

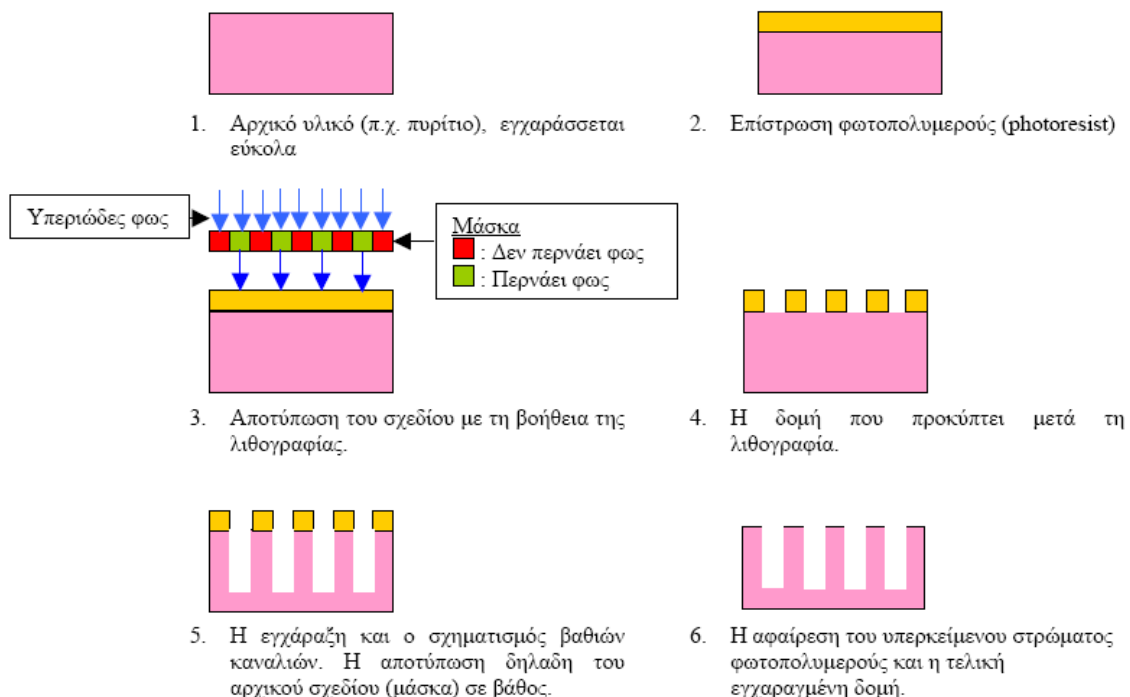
Από τα προϊόντα αυτά, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια είναι αυτά που ξεκινούν την διαδικασία του πλάσματος, επειδή με την κινητική ενέργεια που αποκτούν και σε συνδυασμό με το γεγονός ότι είναι αρκετά ελαφρά, συγκρούονται συνεχώς με άλλα άτομα ή μόρια και αποκτούν μια υψηλή μέση ενέργεια πολλών eV, που αντιστοιχούν 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 απαιτούνταν 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 την συμβατική θερμική διεργασία.

2.2. 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 εγχάρασσεται, μπορεί να είναι οποιοδήποτε υλικό της μικροηλεκτρονικής, που μπορεί με κάποιον 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 εγχάραξουμε, χρησιμοποιούνται ως «μάσκες». Οι μάσκες μας επιτρέπουν να εγχάραξουμε 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.



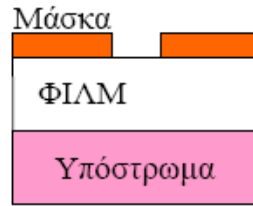
Σχήμα 2: η διαδικασία λιθογραφίας και εγχάραξης

Το πιο χαρακτηριστικό 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, εγχάρασσεται με γρήγορο ρυθμό. Ο λόγος του ρυθμού εγχάραξης του υλικού προς αυτόν της μάσκας ονομάζεται επιλεκτικότητα.

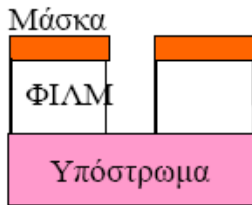
Μια άλλη σημαντική παράμετρος είναι η απόδοση εγχάραξης, η οποία εκφράζει τον αριθμό των ατόμων της επιφάνειας που αφαιρούνται ανά προσπίπτον ιόν του πλάσματος και ορίζεται σαν το λόγο του ρυθμού εγχάραξης προς τη ροή των ιόντων.

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.

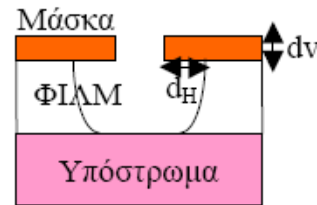
Επιπλέον, η ξηρή εγχάραξη πλεονεκτεί έναντι της υγρής επειδή επιτρέπει τη χρήση αερίων που δεν είναι τοξικά, όπως το O_2 και το CF_4 , έχει ευέλικτες διαδικασίες από πλευράς συνθηκών και παραμέτρων που μπορούν να μεταβληθούν, εύκολη αποβολή απορριμμάτων και χρήση απλών αυτοματισμών στη διαδικασία της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



Σχήμα 1.3α: Αρχικό δείγμα



Σχήμα 1.3β: Ανισοτροπική εγχάραξη



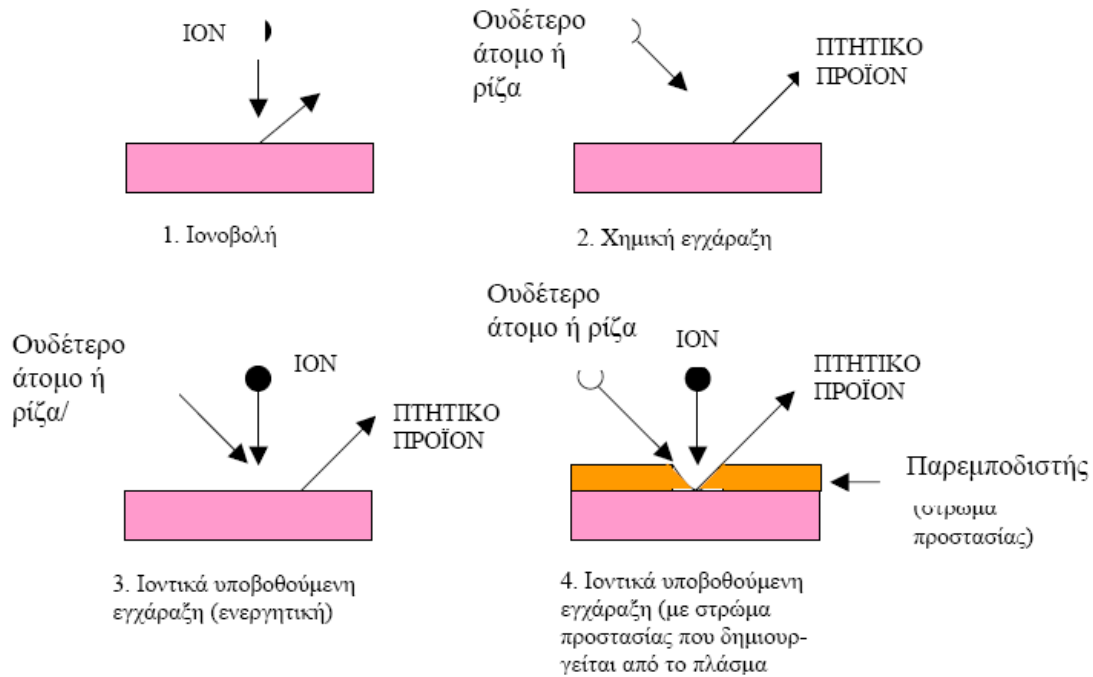
Σχήμα 1.3γ: Ισοτροπική εγχάραξη

Σχήμα 3: ισοτροπική και ανισοτροπική εγχάραξη

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

Η βασική διαφορά της ιονοβολής 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 ισοτροπική, ενώ η υποβοηθούμενη από ιόντα χημική εγχάραξη, που διακρίνεται σε ιοντικά ενεργή (energetic ion), και σε εγχάραξη με στρώμα προστασίας (inhibitor induced), είναι γενικά ανισοτροπική.



Σχήμα 4: 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 εγχαράσσεται.

Στην εγχάραξη με στρώμα προστασίας υπάρχουν δύο ειδών σωματίδια, αυτά που εγχαράσσουν (etchants) και αυτά που προστατεύουν (παρεμποδιστές-inhibitors). Οι παραμποδιστές 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 ανισοτροπική, αφού στις οριζόντιες επιφάνειες η παρεμπόδιση απομακρύνεται με ιόντα.

2.3. Η διεργασία 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.

Μια ειδική υποκατηγορία εγχάραξης με ενεργά ιόντα είναι η βαθιά εγχάραξη με ενεργά ιόντα (deep reactive ion etching-DRIE).

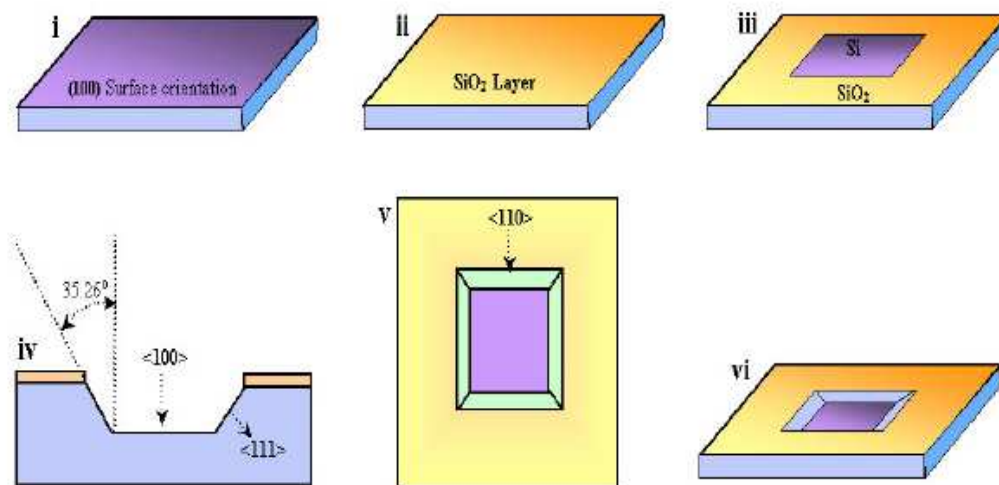
Με αυτή τη διαδικασία μπορούν να επιτευχθούν βάθη εγχάραξης εκατοντάδων μικρομέτρων (μm) με σχεδόν κάθετα τοιχώματα καθώς και δομές υψηλού λόγου ασυμμετρίας (high aspect ratio structures - HARS), κάτι που συνήθως είναι και το ζητούμενο στην κατασκευή των μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων (microelectromechanical systems - MEMS). Ως λόγος ασυμμετρίας ορίζεται ο λόγος του βήθους 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_6 και στη συνέχεια γυρνάει σε έναν κύκλο παθητικοποίησης των τοιχωμάτων με χρήση C_4F_8 (βλ. σχήμα 5). Το C_4F_8 εναποθέτει ένα πολυμερικό φιλμ $(\text{C}_x\text{F}_y)_n$ σε όλες τις δομές του υποστρώματος. Κατά την 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.

Πιο, συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια του βήματος εναπόθεσης, οι εκτεθειμένες επιφάνειες δηλ. ο πυθμένας και τα τοιχώματα καλύπτονται ομοιόμορφα

από 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 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 κυματισμών αυτών, όντας συνάρτηση των συνθηκών λειτουργίας, μπορεί να ελεγχθεί ως ένα βαθμό. 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: η διάρκεια του κύκλου εγχάραξης, ο ρυθμός ροής SF_6 , η ισχύς του πηνίου κατά τη διάρκεια του κύκλου εγχάραξης, η πίεση κατά τη διάρκεια του κύκλου εγχάραξης, η θερμοκρασία του υποστρώματος, η απόσταση του υποστρώματος από την πηγή πλάσματος, η διάρκεια του κύκλου παθητικοποίησης, ισχύς του πηνίου κατά τη διάρκεια του κύκλου παθητικοποίησης, πίεση κατά τη διάρκεια του κύκλου παθητικοποίησης κ.τ.λ.



Σχήμα 5: εγχάραξη με τη μέθοδο Bosch

Για την κατασκευή διαφόρων εφαρμογών MEMS αρκετά από τα παρακάτω θέματα απαιτούν βελτιστοποίηση: κατασκευή δομών με μεγάλο λόγο ασυμμετρίας (high aspect ratio structures - HARS), ο ρυθμός εγχάραξης του πυριτίου, η γωνιά του προφίλ, έλεγχος της κρίσιμης διάστασης (critical dimension - CD), η ταχύτητα των τοιχωμάτων και η επιλεκτικότητα ως προς τη μάσκα. Η φύση της διεργασίας Bosch, και συγκεκριμένα ο μεγάλος αριθμός 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.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3^ο: 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 σε 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. Ειδικότερα, 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 έξοδο 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 συμπύκνωση του ρευστού στις εσωτερικές επιφάνειες της αντλίας.

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

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

3.3. Τύποι αντλιών

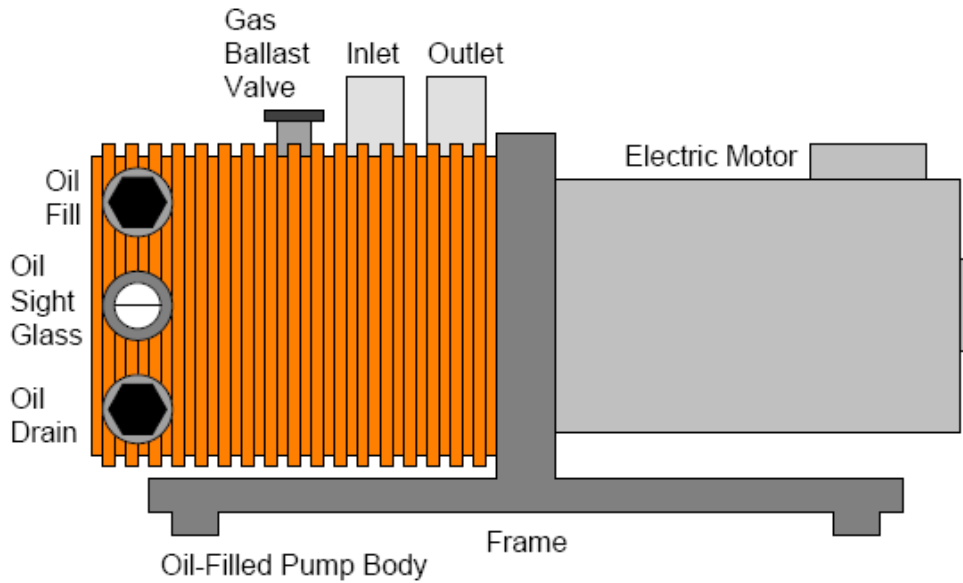
Σε κάθε μια από αυτές τις βασικές κατηγορίες, υπάρχουν διαφορετικά είδη αντλιών, χρησιμοποιούμενα ανάλογα με το επίπεδο κενού που επιθυμούμε να δημιουργήσουμε και φυσικά, τις ανάγκες και δυνατότητες του εγχειρήματος μας.

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

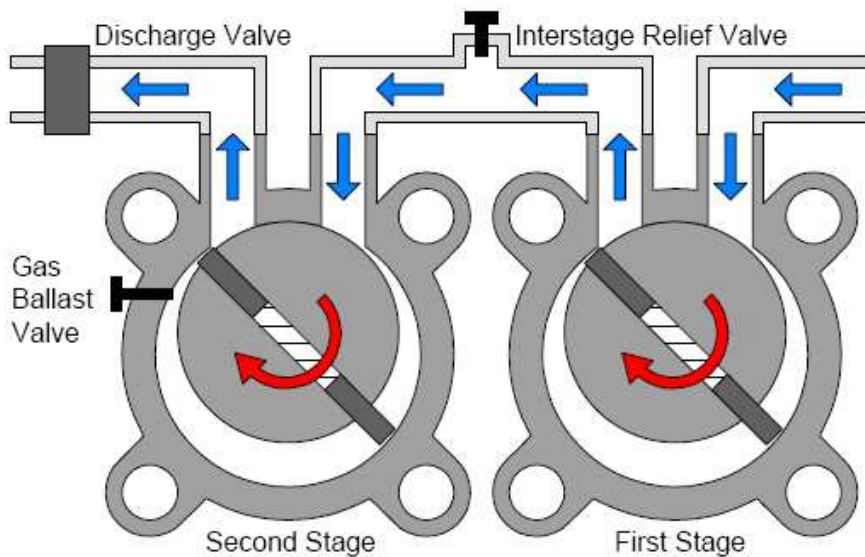
α) Περιστροφικές αντλίες

Για υψηλότερου βαθμού κενό χρησιμοποιούνται περιστροφικοί ακτινικοί συμπιεστές. Οι μονοβάθμιοι ακτινικοί συμπιεστές (ευρέως απαντώμενοι στις κλιματιστικές μονάδες), λειτουργούν ικανοποιητικά στην περιοχή του ενός Torr. Για χαμηλότερες πιέσεις ενδείκνυται η χρήση διβάθμιου ακτινικού συμπιεστή, που πρακτικά μπορεί να υλοποιηθεί και με την εν σειρά σύνδεση δύο μονοβάθμιων.

Ακτινικές αντλίες για βιομηχανική χρήση παράγονται κυρίως από τη Welch και την Alcatel, σε σχετικά υψηλές τιμές. Παρότι (σύμφωνα με τις προδιαγραφές τους) μπορούν να φθάσουν σε κενό επιπέδου 0.1 mTorr, η τιμή αυτή αναφέρεται σε ιδανικές συνθήκες. Σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας φθάνουν ως τα 5-10 mTorr. Για τις λιγότερο απαιτητικές χρήσεις των ερασιτεχνικών πειραματισμών, κ.α., μια οικονομική εναλλακτική λύση μπορούν να προσφέρουν οι περιστροφικές αντλίες επαναφόρτισης των συστημάτων ψύξης, που λειτουργούν ικανοποιητικά για πιέσεις μέχρι 20 mTorr.



Σήμα α1: περιστροφική αντλία



Σχήμα α2: τομή διβάθμιου ακτινικού συμπιεστή

β) Αντλίες εμβόλων

Για τη δημιουργία χαμηλού βαθμού κενού (στην περιοχή μερικών δεκάδων Torr) μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμα και παλινδρομικοί συμπιεστές εμβόλων (όπως αυτοί που βρίσκονται συνήθως στα ψυγεία). Έχουν όμως, βασικά μειονεκτήματα όπως η ύπαρξη νεκρής διαδρομής πάνω στα έμβολα, αλλά και διαρροές από τους κυλίνδρους, που περιορίζουν σημαντικά τις δυνατότητες τους.

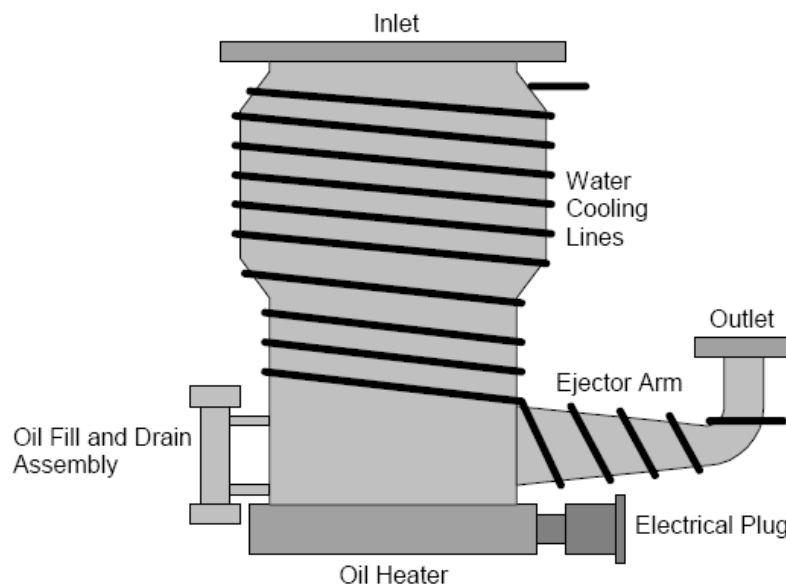
Σε χαμηλότερες πιέσεις (υψηλό κενό), το ρευστό, λόγω πολύ μικρής πυκνότητας, δεν ανταποκρίνεται πια στους μηχανισμούς ροής του συνεκτικού ρευστού, με συνέπεια να μην μπορεί να συμπιεστεί ικανοποιητικά από έμβολα ή στροφείς.

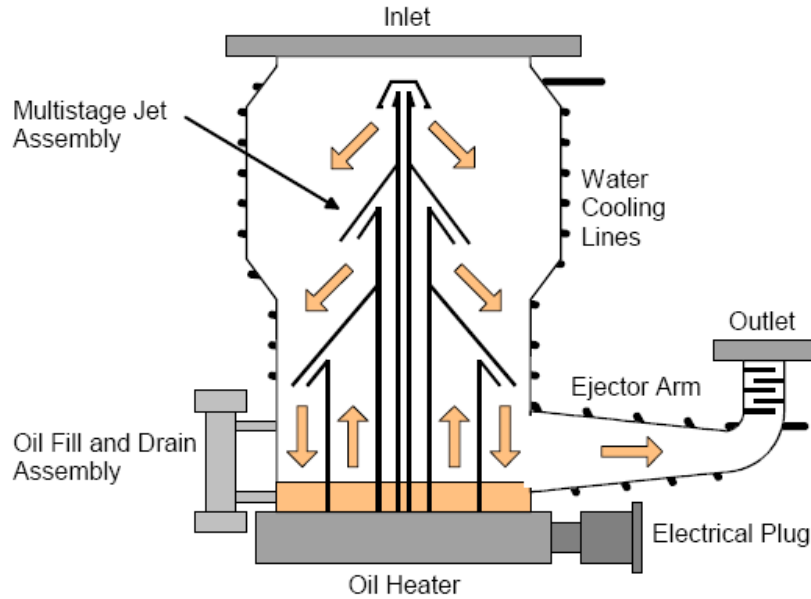
γ) Αντλίες διάχυσης

Στην περιοχή αυτή λειτουργούν καλύτερα οι αντλίες διάχυσης, οι οποίες χρησιμοποιούν μια δέσμη αερίου (συνήθως ατμοί υδρογονάνθρακα ή συνθετικού ελαίου) ως μέσο μετάδοσης ορμής για να ωθήσουν τα μόρια του ρευστού εκτός του θαλάμου που εκκενώνεται. Δεδομένου όμως, ότι λειτουργούν αποκλειστικά σε χαμηλές πιέσεις, πρέπει να συνδέονται στην έξοδο τους με μια συμβατική αντλία, που λειτουργεί ως «βοηθητική».

Οι αντλίες διάχυσης, έχουν απλή λειτουργία, είναι αθόρυβες και απαιτούν απλή (αν και επιμελή) συντήρηση. Τα βασικά τους μειονεκτήματα, είναι αφενός το γεγονός ότι εγκυμονούν κινδύνους για το σύστημα από ενδεχόμενο «οπισθόρευμα» (backstreaming) της προωθητικής δέσμης προς το θάλαμο του κενού (επιπλοκή που μπορεί να αποφευχθεί με τη χρήση κατάλληλων διαφραγμάτων) και αφετέρου είναι ιδιαίτερες ευαίσθητες στην έκθεσή τους σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης, για οποιοδήποτε λόγο.

Στη τυπική τους λειτουργία απαιτούν μια πίεση της τάξης των 100 mTorr στην είσοδο τους, ενώ στην έξοδο μπορούν να επιτύχουν κενό από 0,01 έως 0,001 mTorr.



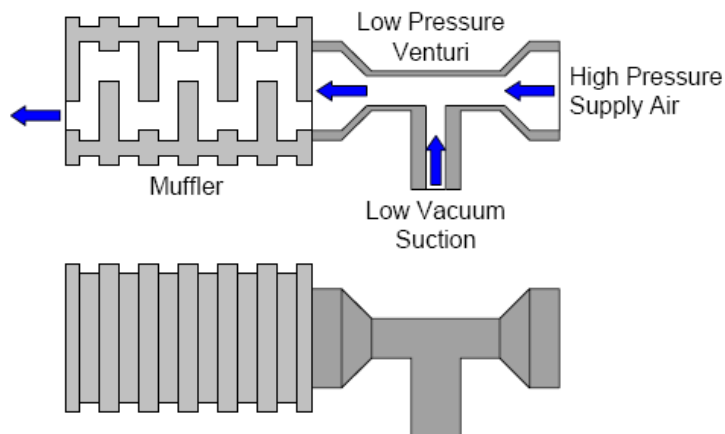


Σχήμα γ1: αντλία διάχυσης

δ) Αντλίες τύπου Venturi

Οι αντλίες Venturi, αξιοποιώντας την αρχή Bernoulli, χρησιμοποιούν μια δέσμη ξηρού αέρα υψηλής πίεσης (μέχρι και 60 psi), που απομαστεύει το ρευστό από την προς εκκένωση δεξαμενή και το οδηγεί στην έξοδο της αντλίας μέσω ενός σιγαστήρα. Η δυνατότητα τους, όσον αφορά τη παραγωγή κενού, φτάνει ως τα 60 Torr.

Βασικό τους πλεονέκτημα είναι ότι δεν διαθέτουν κινούμενα μέρη και συνεπώς δεν απαιτούν λίπανση. Το πρόβλημα του θορύβου που παράγουν (λόγω υψηλής ταχύτητας ροής της δέσμης), λύνεται με την προσαρμογή του σιγαστήρα στην έξοδο τη αντλίας.



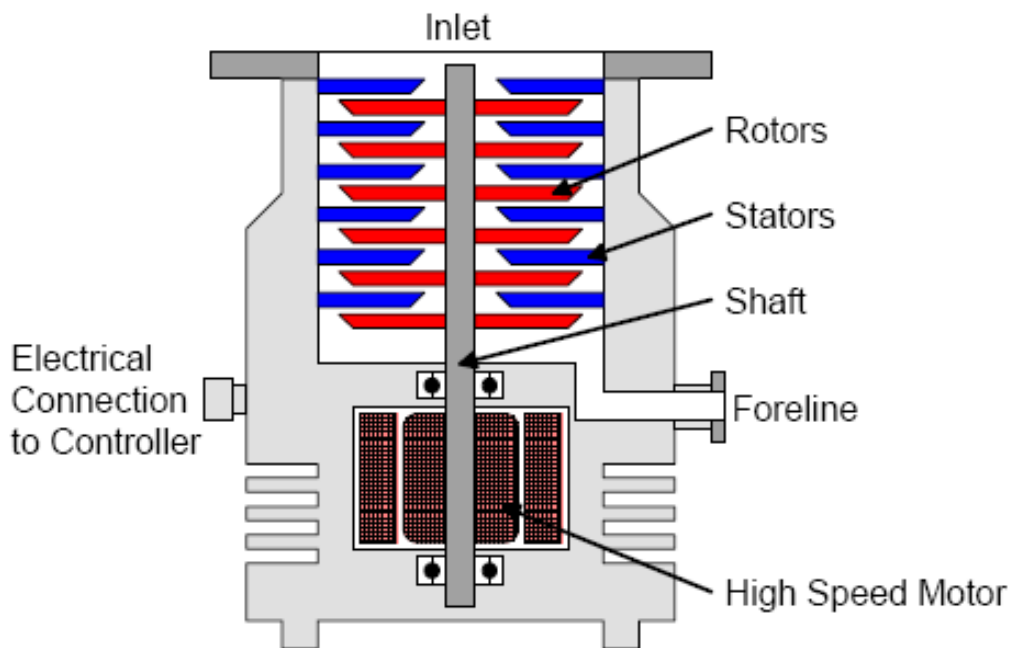
Σχήμα δ1: αντλία τύπου Venturi

ε) Αντλίες του «Turbomolecular»

Για εφαρμογές υπέρ-υψηλού κενού (ultra-high vacuum), ενδείκνυνται αντλίες τύπου «turbomolecular», οι οποίες προωθούν το ρευστό μέσω υψηλής ταχύτητας αξονικών στροφών (ως και 90000 rpm), 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 που κατασκευάζονται και διατίθενται κατά κύριο λόγο, από τις εταιρείες SNECMA και Pfeiffer (σε αρκετά υψηλό κόστος) μπορούν να επιτύχουν πιέσεις της τάξεως των 10^{-10} Torr.

Βασικό τους μειονέκτημα είναι η ευαισθησία των πτερυγίων του συμπιεστή στις αεροδυναμικές δυνάμεις που υφίστανται.



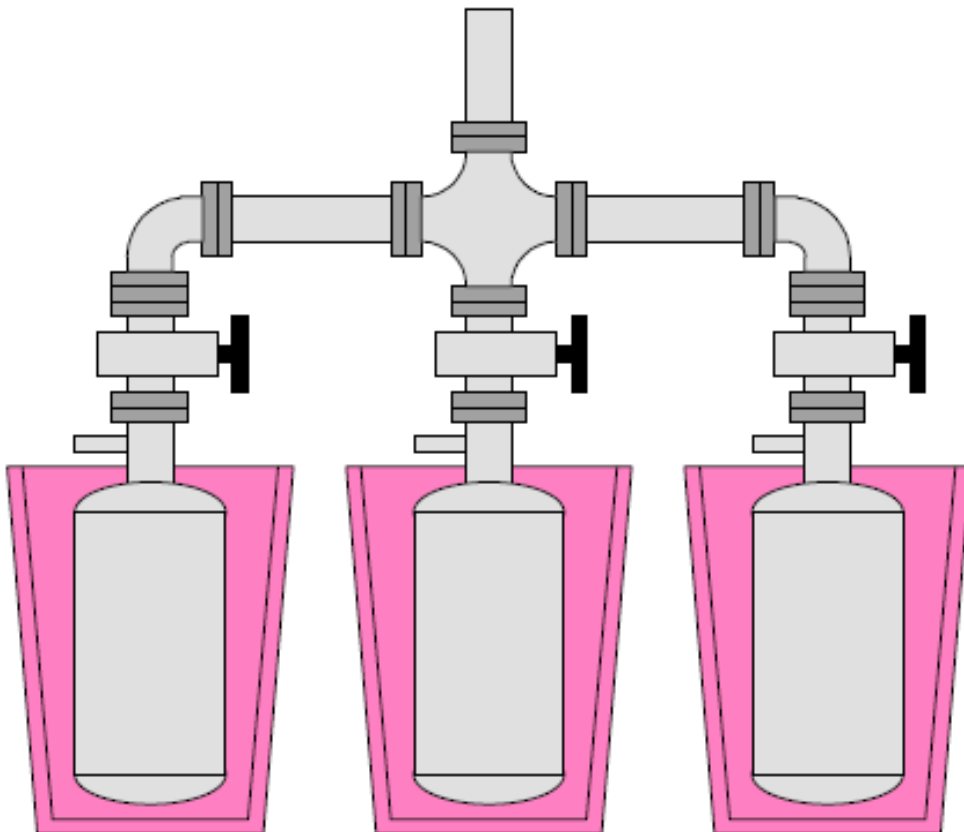
Σχήμα ε1: τομή αντλίας Turbomolecular

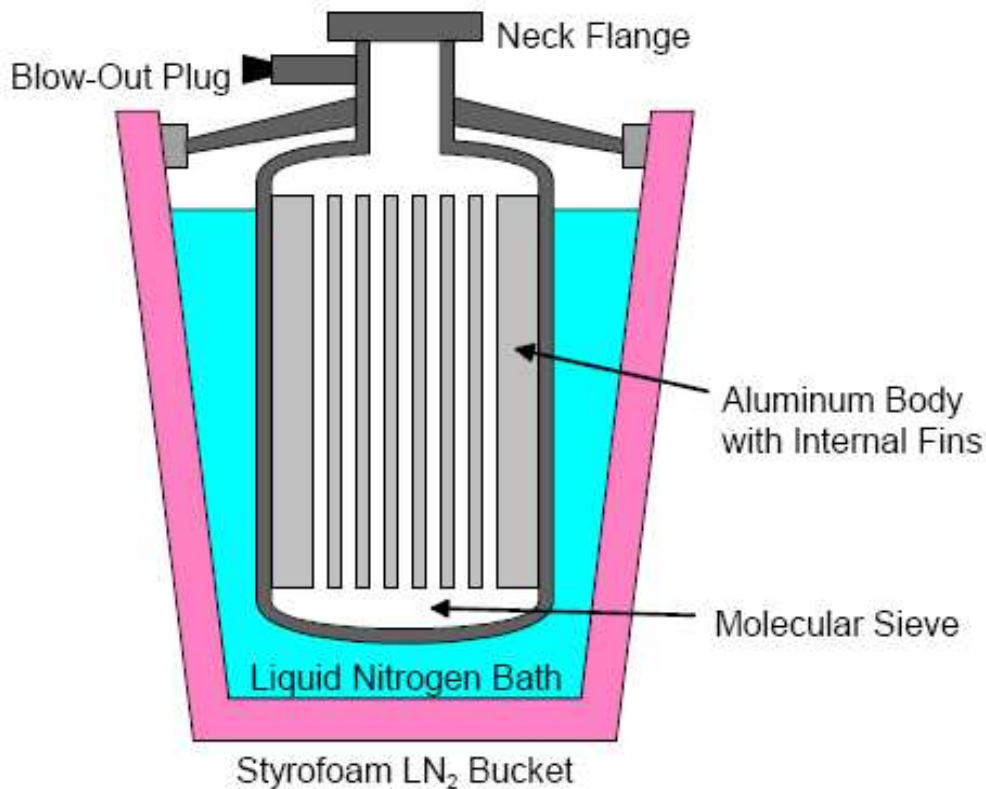
Τυπικότερα παραδείγματα αντλιών παγίδευσης είναι:

στ) Αντλίες προσρόφησης

Οι αντλίες αυτές από δοχεία, που όντας εμβαπτισμένα σε υγρό άζωτο διατηρούν στο εσωτερικό τους πολύ χαμηλή θερμοκρασία (περί τους 77 K ή -196 °C). Μέσα σ' αυτά τα δοχεία το ρευστό που προσκομίζεται, είτε συμπυκνώνεται σε στερεά μορφή (αν βέβαια τα συστατικά του επιτρέπουν κάτι τέτοιο), είτε δεσμεύεται από κατάλληλο πορώδες μέσο.

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 καταστεί ξανά έτοιμη προς χρήση.



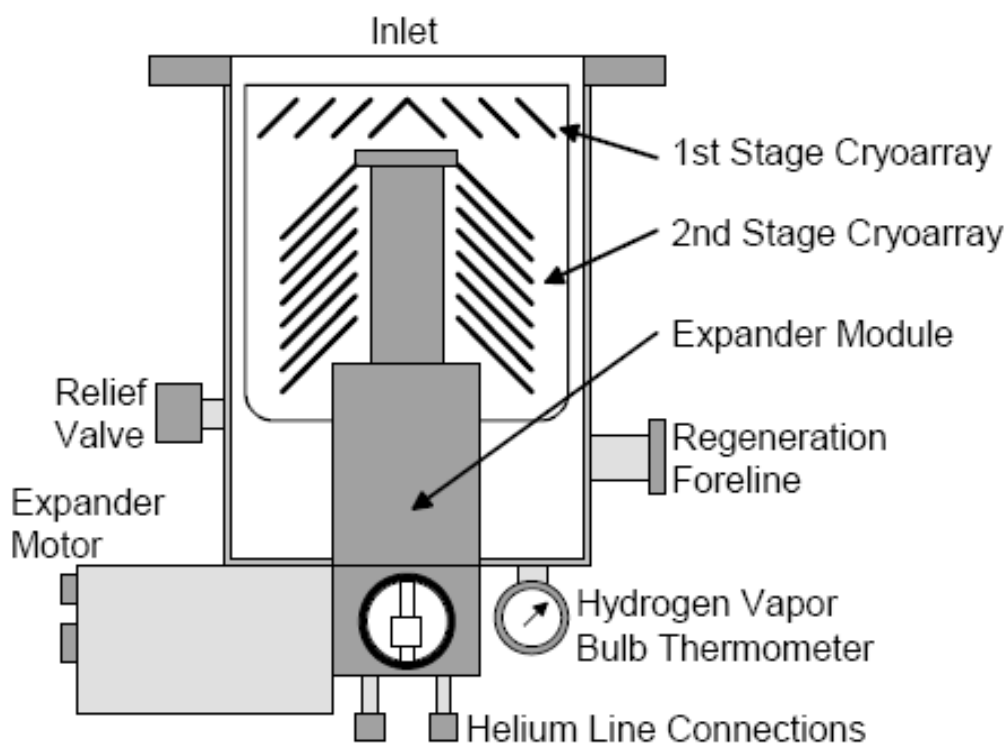
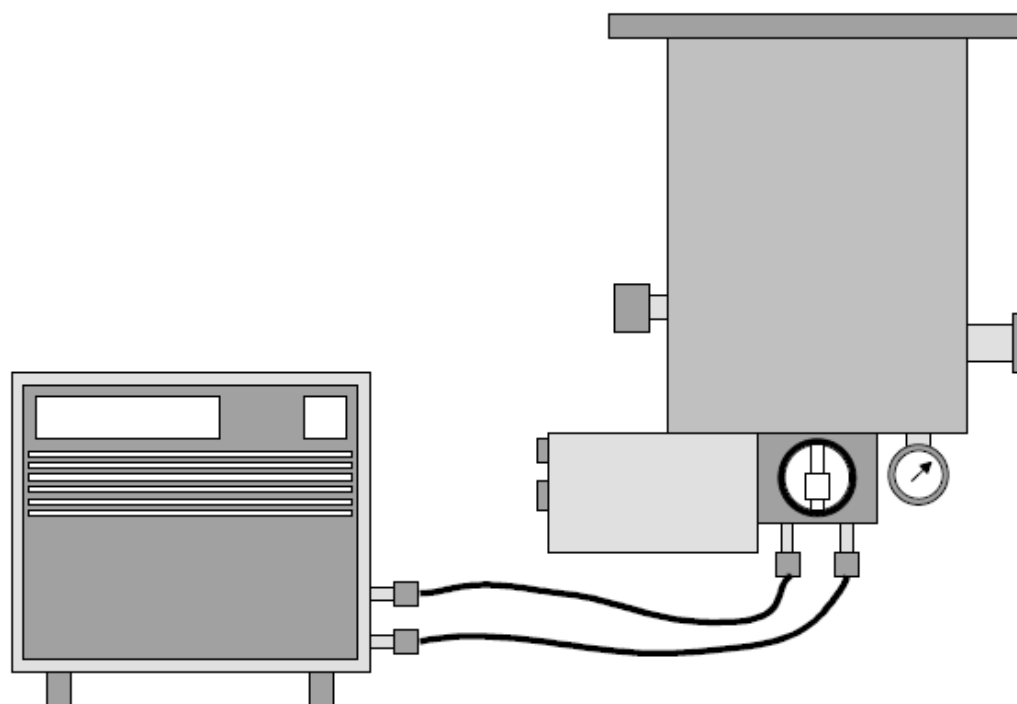


Σχήμα στ1: αντλία προσρόφησης

ζ) Cryopumps

Αυτού του τύπου οι αντλίες δεσμεύουν τα αέρια με μηχανισμό αντίστοιχο με αυτόν των αντλιών προσρόφησης, με τη διαφορά ότι αντί για δοχεία υγρού αζώτου για τη διαδικασία της ψύξης, χρησιμοποιούν έναν κλειστό ψυκτικό κύκλο ηλίου (He), μέσω του οποίου μπορούν να επιτευχθούν θερμοκρασίες μέχρι 20 K ή -253 °C.

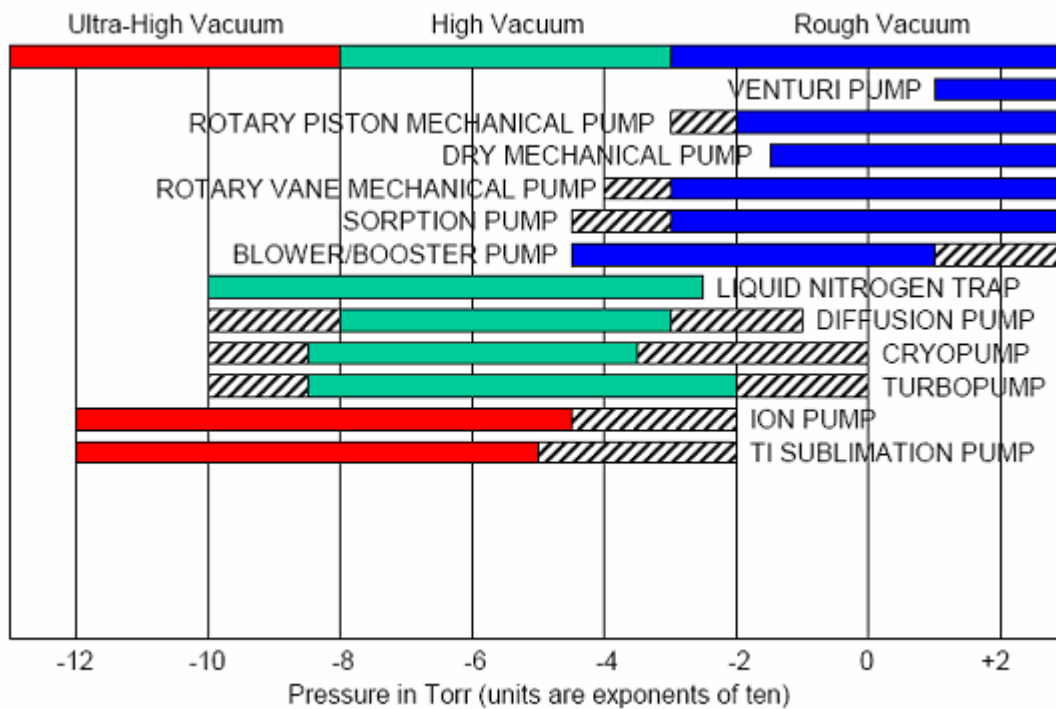
Οι «cryopumps» μπορούν να δημιουργήσουν κενό της τάξεως 10^{-8} Torr, εξαιρετικά υψηλής καθαρότητας και με ταχείς ρυθμούς (100- 1000 1/sec). Βασικά τους μειονεκτήματα είναι: ο χρόνος που απαιτείται να μένουν ανενεργές, προκειμένου να αποδεσμευτούν τα αέρια από το εσωτερικό τους και το γεγονός ότι λειτουργούν αποτελεσματικά σε πιέσεις κάτω των 100 mTorr, με συνέπεια να είναι αναγκαία η σύνδεση μιας μηχανικής αντλίας στην είσοδο τους.



Σχήμα ζ1: Cryopump

Πέραν αυτών των τύπων αντλιών που αναφέρθηκαν παραπάνω (και είναι οι συνηθέστερες και τυπικότερες), κατασκευάζεται και πλήθος άλλων που είτε αποτελούν παραλλαγές ή συνδυασμούς των προηγούμενων, είτε χρησιμοποιούν ριζικά διαφορετικές τεχνολογίες (όπως οι αντλίες ιοντισμού ή οι αντλίες εξάχνωσης τιτανίου), αλλά εκτενέστερη αναφορά σε αυτές θα ξεπερνούσε κατά πολύ το αντικείμενο αυτής της εργασίας.

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται οι βασικότερες κατηγορίες αντλιών κενού, διατεταγμένες ανάλογα με το εύρος πιέσεων στο οποίο λειτουργούν:



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4^ο: Αισθητήρες κενού

4.1. Γενικά

Οι αισθητήρες πίεσης είναι μετρητικά όργανα με τα οποία μπορούμε να προσδιορίσουμε την στάθμη της πίεσης μέσα σε ένα κλειστό ή ανοιχτό σύστημα ή σε ένα συγκεκριμένο σημείο αυτού. Αισθητήρες πίεσης ειδικά διαμορφωμένοι για να μετρούν πολύ χαμηλές πιέσεις (στο φάσμα του κενού), ονομάζονται αισθητήρες κενού.

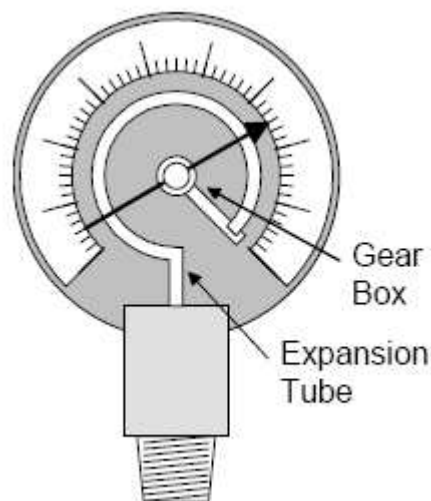
Στην παράγραφο που ακολουθεί, παρουσιάζονται συνοπτικά οι βασικότεροι τύποι αισθητήρων κενού:

4.2. Τύποι αισθητήρων

α) Μηχανικοί αισθητήρες

Η ασκούμενη από το αέριο πίεση συσπειρώνει ή αποσυσπειρώνει ένα ελατήριο, το οποίο μέσω σειράς γραναζιών μεταφέρει τη κίνηση στην ενδεικτική βελόνα που βρίσκεται στην κατάλληλα βαθμονομημένη επιφάνεια του οργάνου.

Οι μηχανικοί αισθητήρες πίεσης είναι εξαιρετικά ανθεκτικοί στις χημικές αλλοιώσεις από την επαφή τους με το αέριο. Μπορούν να μετρούν εξίσου καλά υπερπιέσεις και υποπιέσεις. Η εμβέλεια τους όμως είναι σχετικά περιορισμένη. Φθάνει μέχρι κενό της τάξεως του 0,1 Torr.

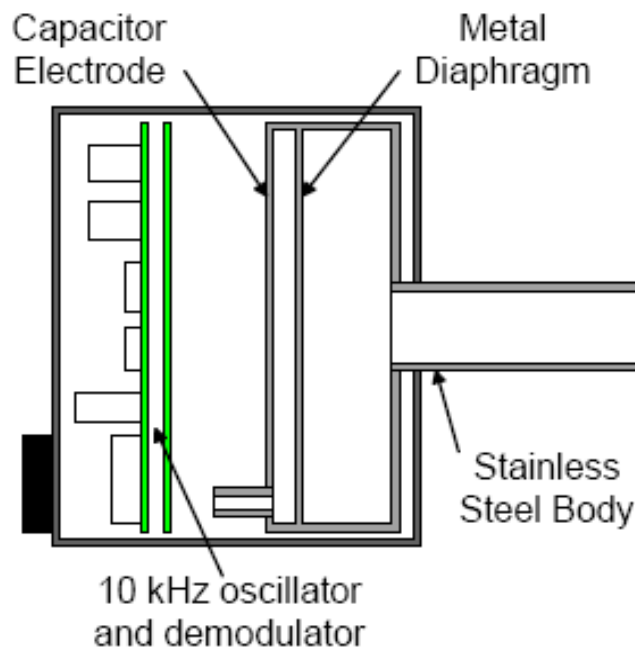


Σχήμα α1: μηχανικός αισθητήρας πίεσης με ενδεικτική βελόνα

β) Χωρητικοί αισθητήρες

Η ασκούμενη από το αέριο πίεση μετατοπίζει ένα μεταλλικό διάφραγμα, το οποίο αποτελεί τον ένα από τους οπλισμούς ενός ηλεκτρικού πυκνωτή. Ο άλλος οπλισμός είναι κατασκευασμένος από ένα σύνολο σταθερών ηλεκτροδίων. Η μετατόπιση αυτή του διαφράγματος προκαλεί μεταβολή της χωρητικότητας του πυκνωτή, η οποία αντιστοιχίζεται στην κατάλληλα βαθμονομημένη κλίμακα πιέσεων.

Έχουν ικανοποιητικά γραμμική συμπεριφορά (γραμμική συσχέτιση μεταξύ πίεσης αερίου και χωρητικότητας πυκνωτή) και δίνουν εξαιρετικά ακριβείς μετρήσεις στη περιοχή κενού μέχρι 10^{-5} Torr.



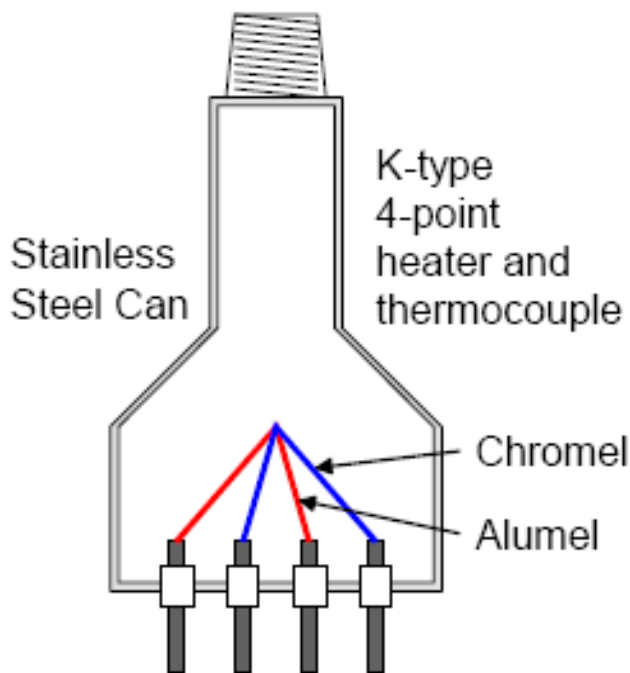
Σχήμα β1: χωρητικός αισθητήρας πίεσης

γ) Αισθητήρες θερμοστοιχείου

Στον αισθητήρα αυτόν, ένα μεταλλικό νήμα που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, είναι εμβαπτισμένο στο αέριο, του οποίου την πίεση θέλουμε να μετρήσουμε. Η μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στην επιφάνεια του νήματος, εξαρτάται από τη θερμική αγωγιμότητα του αερίου που το περιβάλλει (την ικανότητα του

δηλαδή να απάγει τη θερμότητα). Η θερμοκρασία αυτή μετριέται από ένα θερμοστοιχείο και κατόπιν μετατρέπεται στη πίεση αερίου που αντιστοιχεί.

Η εμβέλεια μέτρησης των αισθητήρων αυτού του τύπου είναι από 1 ως 1000 mTorr. Είναι όργανο στιβαρό, αξιόπιστο και σχετικά οικονομικό στην αγορά του. Χρειάζεται προσοχή στην ανάγνωση των ενδείξεων του, καθώς οι τιμές που δίνει εξαρτώνται από την θερμική αγωγιμότητα του εκάστοτε αερίου (δηλαδή για την ίδια πίεση δίνει διαφορετικές τιμές ανάλογα με το μετρούμενο αέριο).

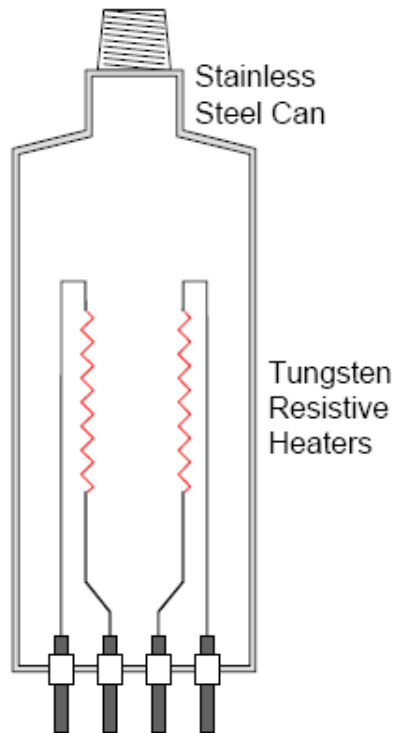


Σχήμα γ1: αισθητήρας θερμοστοιχείου

δ) Οι αισθητήρες Pirani

Ο μηχανισμός λειτουργίας των αισθητήρων αυτού του τύπου, είναι παρόμοιος με τους αισθητήρες θερμοστοιχείου (θερμαινόμενο μεταλλικό νημάτιο που ψήχεται από το αέριο μέσα σε θάλαμο). Η διαφορά είναι ότι στην περίπτωση αυτή, η θερμοκρασία του νήματος μετριέται μέσω της μεταβολής της ωμικής αντίστασης που προκαλεί. Για την μέτρηση της αντίστασης του, το μεταλλικό νημάτιο συνδέεται με μια γέφυρα Wheatstone.

Οι αισθητήρες Pirani είναι πιο εξεζητημένοι στο χειρισμό τους, από τους αισθητήρες θερμοστοιχείου, αλλά δίνουν μετρήσεις με μεγαλύτερη ακρίβεια και ταχύτερη απόκριση.

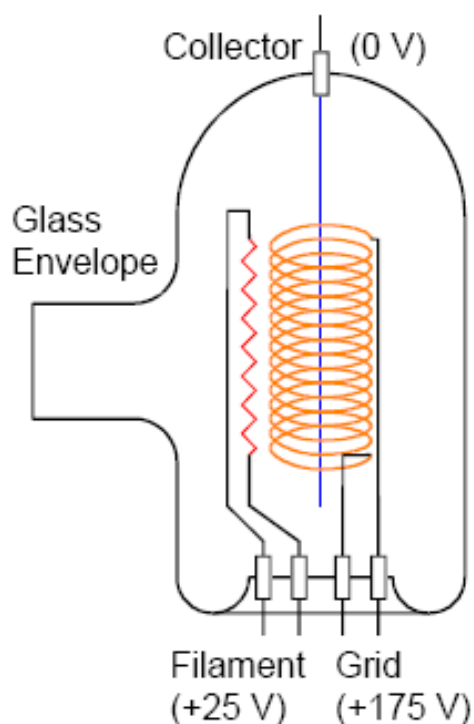


Σχήμα δ1: αισθητήρας Pirani

ε) Αισθητήρες ιονισμού

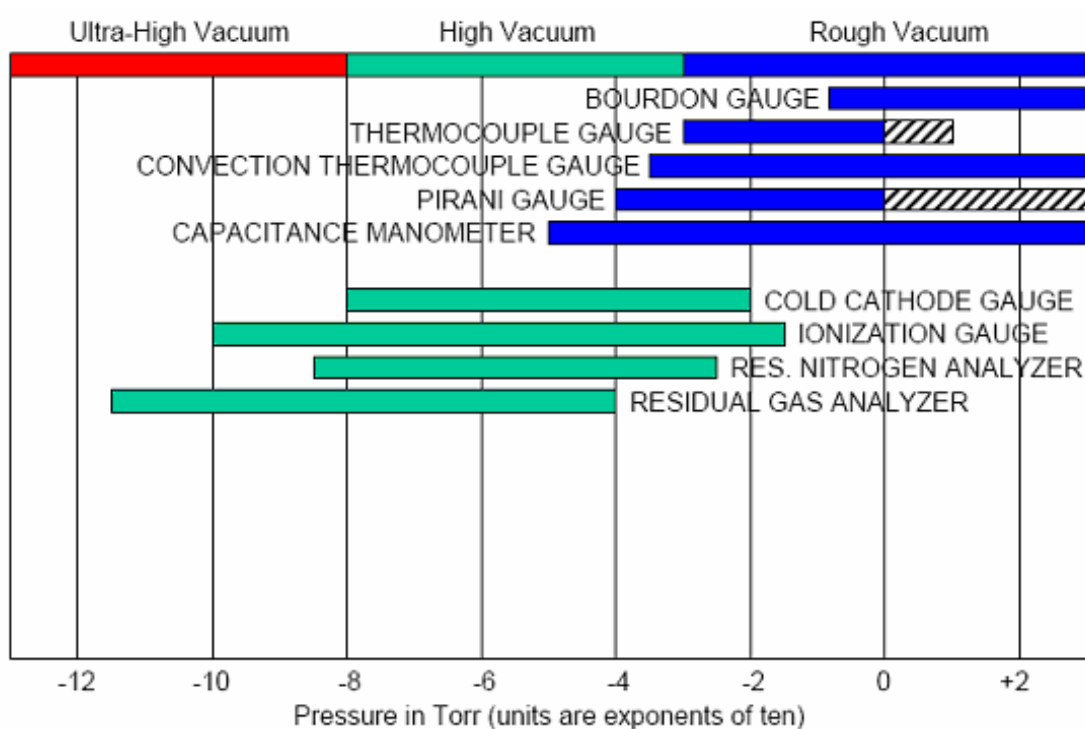
Γνωστοί και ως αισθητήρες Bayerd-Alpert. Στους αισθητήρες αυτούς, ηλεκτρόνια που απελευθερώνονται από ένα θερμό μεταλλικό νήμα, επιταχύνονται από ένα σπειροειδές ηλεκτρόδιο. Τα ενεργοποιημένα αυτά ηλεκτρόνια ιονίζουν τα μόρια του αερίου γύρω από το ηλεκτρόδιο, μετατρέποντας τα σε θετικά φορτισμένα ιόντα, τα οποία με τη σειρά τους επάγουν ηλεκτρικό ρεύμα σε ένα ηλεκτρόδιο-συλλέκτη. Από την ένταση αυτού του ρεύματος, μπορεί μέσω κατάλληλης συνάρτησης, να προσδιοριστεί η πίεση του αερίου.

Οι αισθητήρες ιονισμού είναι ευαίσθητοι στην σύνθεση του αερίου, καθότι διαφορετικής σύνθεσης αέρια έχουν διαφορετικό ρυθμό ιονισμού. Παρέχουν ακριβείς μετρήσεις σε πολύ χαμηλά επίπεδα πίεσης, από το 10^{-3} ως 10^{-11} Torr.



Σχήμα ε1: αισθητήρας ιονισμού

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται σε σύννοψη οι βασικοί αυτοί τύποι αισθητήρων κενού, διατεταγμένοι στην κλίμακα των υποπίεσεων ανάλογα με την εμβέλεια μέτρησης που διαθέτουν:



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 5^ο: Το φαινόμενο «outgassing»

Ακόμα και στα πιο στιβαρά συστήματα, αντιμετωπίζουμε προβλήματα σε χαμηλές τιμές της πίεσης, καθώς μεγάλο μέρος αυτής οφείλετε σε αέρια που απελευθερώνονται από την επιφάνεια των υλικών του συστήματος. Ο παράγοντας αυτός γίνεται σημαντικός για πιέσεις κάτω των 100mTorr.

Το φαινόμενο αυτό θα είναι ο κύριος περιοριστικός παράγοντας, όσον αφορά την απόλυτη πίεση, την οποία ένα ορισμένο σύστημα μπορεί να επιτύχει, αν παραβλέψουμε τις διαρροές. Διαρροές μπορεί να υπάρχουν λόγω: οπών στο θάλαμο, σπειρώματα των τυχόν κοχλιώσεων ή υλικών με πορώδη επιφάνεια.

Η έκταση του –ανεπιθύμητου- φαινομένου ‘outgassing’ μπορεί να περιοριστεί διατηρώντας το σύστημα καθαρό και στεγνό, και βέβαια με την κατάλληλη επιλογή των υλικών κατασκευής του. Σε κατάλληλα διαμορφωμένες διατάξεις οι προσροφόμενοι ατμοί νερού ή άλλων αερίων μπορούν να απομακρυνθούν, θερμαίνοντας το σύστημα σε έναν κλίβανο, ή διοχετεύοντας θερμό αέρα τουλάχιστον 150 °C.

Με το φαινόμενο «outgassing» σχετίζονται και οι τάσεις ατμών των υλικών από τα οποία είναι κατασκευασμένο το σύστημα. Όλα τα υλικά απελευθερώνουν ατμούς από την επιφάνεια τους, και οι ατμοί αυτοί αυξάνουν την πίεση στο σύστημα. Το συχνότερα συναντόμενο από αυτά τα υλικά είναι το νερό. Η τάση ατμών του νερού, σε θερμοκρασία δωματίου, είναι 17,5 Torr και συνεπώς βράζει σε αυτήν την πίεση. Για αυτό σε συστήματα υψηλού κενού το νερό δεν είναι επιθυμητό.

Άλλα υλικά με υψηλή τάση ατμών είναι κάποια πλαστικά, ιδιαίτερα αυτά με ασταθείς πλαστικοποιητές, και μέταλλα όπως ο υδράργυρος, ο μόλυβδος, ο ψευδάργυρος και το κάδμιο.

Υλικά με χαμηλή τάση ατμών είναι το γυαλί, ο χαλκός, το αλουμίνιο, ο ανοξείδωτος χάλυβας, ο άργυρος και ορισμένα συνθετικά πλαστικά.

Καθότι, όμως, η τάση ατμών εξαρτάται από τη θερμοκρασία, κάποια υλικά με υψηλότερη τάση ατμών όπως ο ορείχαλκος, θα μπορούσαν να είναι αποδεκτά σε πολλές εφαρμογές, εφόσον βέβαια δεν εκτίθενται σε υπερβολικά υψηλές θερμοκρασίες.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Σ.Τσαγγάρης, Μηχανική των Ρευστών, εκδ. Συμεών, 1995
2. M.Gad-El-Hak, Handbook of MEMS, CRC Press, 2001
3. Σ.Νάρης, Σ.Βαρούτης, Δ.Βαλουγεώργης, Κ.Χαριτίδης, Ροές και φαινόμενα μεταφοράς σε νάνο- και μικρό-αγωγούς κυκλικής και ορθογώνιας διατομής, τμ. Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, σχ. Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
4. Σ.Νάρης, Δ.Βαλουγεώργης, Ροή σε ορθογώνιους αγωγούς μεγάλου μήκους για όλο το εύρος του αριθμού Knudsen, τμ. Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
5. Σ.Νάρης, Σ.Βαρούτης, Δ.Βαλουγεώργης, Ροές σε νάνο- και μικρό-αγωγούς κυκλικής και ορθογώνιας διατομής, με οριακές συνθήκες διάχυσης-ανάκλασης, τμ. Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
6. Κ.Μπούκουρας, Εγχάραξη επιφανειών πυριτίου σε αντιδραστήρα πλάσματος υψηλής πυκνότητας και μελέτη της επιφανειακής και πλευρικής τραχύτητας, Ιούνιος 2003, Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος»
7. Π.Παπασημάκης, Κατασκευή και προσομοίωση μικρομηχανικών δομών με διεργασίες πλάσματος, Νοέμβριος 2005, Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος»

8. G.E.Karniadakis, A.Beskok, *Micro Flows: Fundamentals and Simulation*, Springer, 2002
9. F.Sharipov, V.Seleznev, *Data on Internal Rarefied Gas Flows*, J. Phys. Chem. Ref. Data, vol.27, No3, 1998
- 10.J.Jang, S.T.Wereley, *Pressure distributions of gaseous slip flow in straight and uniform rectangular microchannels*, *Microfluidies and Nanofluidies*, Springer-Verlag, 2004
- 11.S.Colin, P.Lalonde, R.Caen, *Validation of a Second-Order Slip Flow Model in Rectangular Microchannels*, *Heat Transfer Engineering*, vol.25, No3, 2004
- 12.E.B.Arkilic, M.A.Schmidt, K.S.Breuer, *Gaseous slip flow in long microchannels*, submitted to: *J. Microelectromechanical Systems*, 1995
- 13.J.C.Harley, Y.Huang, H.Bau, J.N.Zemel, *Gas Flow in Microchannels*, *J.Fluid Mech.* vol.284, pp.257, 1995
- 14.S.-S.Hsieh, H.-H.Tsai, C.-Y.Lin, C.-F.Huang, C.-M.Chien, *Gas Flow in a long Microchannel*, *Heat and Mass Transfer*, 2004
- 15.*MicroFabrication, Vacuum Systems*, R.B.Darling/EE-527
- 16.P.Angelikopoulos, *Monte Carlo Simulation of Roughening During Thin Film Plasma Etching*, 2004

17.Γ.Αντωνόπουλος, Τεχνολογία κενού, Ξάνθη 1984

18.Α.Pipko, V.Pliskovsky, B.Korolev, V.Kuznetsov, Fundamentals of Vacuum Techniques, MIR Publisers, Moscow 1984

