



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ  
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»**

**ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΝΑΝΟΕΠΙΣΤΗΜΗΣ  
ΚΑΙ ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΚΑΙ  
ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ**



**Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών**

**«Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές»**

**Προσομοιώσεις και μελέτες παραμέτρων λειτουργίας  
του συστήματος αερίου των ανιχνευτών  
MICROMEGAS του NSW του πειράματος LHC-  
ATLAS στο CERN**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**του Κολυβοδιάκου Ιωάννη**

:Επιβλέπων

Σταύρος Μαλτέζος

Αθήνα, Μάρτιος 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ  
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΝΑΝΟΕΠΙΣΤΗΜΗΣ  
ΚΑΙ ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΚΑΙ  
ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ



ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
Δ.Π.Μ.Σ  
"ΦΥΣΙΚΗ και Τεχνολογικές Εφαρμογές"

Προσομοιώσεις και Μελέτες Παραμέτρων Λειτουργίας του Συστήματος Αερίου των  
Ανιχνευτών Micromegas του NSW του Πειράματος LHC – ATLAS  
στο CERN

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία  
του  
ΙΩΑΝΝΗ ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΚΟΛΥΒΟΔΙΑΚΟΥ

Επιβλέπων: Μαλτέζος Σταύρος  
Αναπληρωτής Καθηγητής, Ε.Μ.Π

:Εγκρίθηκε από τη παρακάτω τριμελή επιτροπή

..... ,  
Σταύρος Μαλτέζος  
ΑΝΑΠΛ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ  
Ε.Μ.Π

..... ,  
Αλεξόπουλος Θεόδωρος  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

.....  
Γαζής Ευάγγελος  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2015



---

**Ιωάννης Ν. Κολυβοδιάκος**  
**Μεταπτυχιακός φοιτητής Σ.Ε.Μ.Φ.Ε Ε.Μ.Π**

Ιωάννης Ν. Κολυβοδιάκος, 2015 COPYRIGHT  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.  
All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η αναδιατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι a) η θεωρητική ανάλυση, b) η πειραματική κατασκευή και c) η πειραματική μέτρηση και η μελέτη του διανομέα ροής αερίου (*manifold*). Στη προκειμένη περίπτωση, θέλουμε να μελετήσουμε τις ιδιότητες της κυκλοφορίας του αερίου στον εσωτερικό χώρο των ανιχνευτών MICROMEGAS του CERN. Ο *διανομέας ροής αερίου* είναι μια πειραματική διάταξη που μας βοηθάει στην μελέτη της κυκλοφορίας του αερίου αργού (*ARGON 100%*) στον εσωτερικό χώρο των ανιχνευτών MICROMEGAS.

Η θεωρητική ανάλυση συνίσταται στην παραγγελία των εξαρτημάτων { a) σωληνώσεων [ *5m blue 3mm, 4mm, 6mm, 10 mm, 12 mm & 14 mm* ], b) εξαρτημάτων Legris [ i) *tee connectors*, ii) *elbow connectors*, iii) *tube connectors*, iv) *single “Y” tube connectors* & v) *double “Y” tube connectors*], c) μανομέτρων, d) βολτομέτρων, e) αμπερομέτρων, f) αισθητήρων OMRON} , στον σχεδιασμό του διανομέα ροής αερίου και στη προσομοίωση του κάθε εξαρτήματος ξεχωριστά αλλά και ολόκληρης της πειραματικής διάταξης του διανομέα ροής αερίου μέσω του προγράμματος COMSOL MULTIPHYSICS 4.4.

Η πειραματική κατασκευή συνίσταται στην τοποθέτηση του κάθε εξαρτήματος στην σωστή θέση μηχανολογικά και στη δημιουργία της λειτουργικής ολότητας του διανομέα ροής αερίου σύμφωνα με τα πλαίσια του σχεδιασμού του.

Η μελέτη των ιδιοτήτων της κυκλοφορίας του εκάστοτε αερίου στον εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου συνίσταται στην πειραματική μέτρηση στο εργαστήριο έξι μεταβλητών του διανομέα ροής αερίου. Οι έξι αυτές μεταβλητές είναι οι εξής: a) η συγκέντρωση του αερίου (*concentration*), b) η δομή του πλέγματος (*mesh*) του διανομέα, c) η ταχύτητα U (*velocity*) του αερίου, d) η παροχή Q (*velocity magnitude*) του αερίου, e) η πίεση P (*pressure*) του αερίου στα τοιχώματα του διανομέα και η χαρακτηριστική αντίσταση ή εμπέδηση Z (*impedance*) του αερίου των σωληνώσεων του διανομέα.

Κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης του διανομέα ροής αερίου παίρνουμε κάποιες θεωρητικές τιμές των παραπάνω έξι μεταβλητών της μελέτης της κυκλοφορίας του αερίου στον εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου.

Στη συνέχεια, συγκρίνουμε τις θεωρητικές με τις πειραματικές τιμές των έξι μεταβλητών του αερίου μας, βλέπουμε αν ταιριάζουν ή όχι και βγάζουμε τα συμπεράσματά μας.

Έπειτα, χρησιμοποιούμε δύο ειδών μείγματα αερίων που διατρέχουν τον εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου: a) καθαρό αργό (*ARGON 100%*) & b) μείγμα 93% αργού (*Ar*) - 7 % διοξειδίου του άνθρακα (*CO2*). Συγκρίνουμε τις θεωρητικές με τις πειραματικές τιμές των έξι μεταβλητών των δυο ειδών μειγμάτων αερίων, βλέπουμε αν ταιριάζουν ή όχι και βγάζουμε τα συμπεράσματά μας για την επιλογή του αερίου που θα τροφοδοτήσει το πείραμά μας.

Στο τέλος, δίνουμε απαντήσεις σε δυο κορυφαία ερωτήματα. Το πρώτο ερώτημα, αφορά ποια είναι η επίδραση μιας ενδεχόμενης διαρροής του αερίου στις σωληνώσεις του *διανομέα ροής αερίου* στην τιμή της *ενίσχυσης* (*Gain*) του σήματος στους ανιχνευτές MICROMEGAS. Το δεύτερο ερώτημα, αφορά ποια είναι η επίδραση της εισαγωγής μιας συνετής ποσότητας κάποιου ηλεκτραρνητικού αερίου (π.χ. οξυγόνου O<sub>2</sub>) στη τιμή της *ενίσχυσης* του σήματος στους ανιχνευτές MICROMEGAS.

## ABSTRACT

The purpose of this assignment is a) the theoretical analysis, b) the experimental construction and c) the experimental measurement and study of the manifold. We are studying the properties of gas transmission in the space inside Micromegas detectors at CERN. The manifold is an experimental setup that help us with the study of the transmission of the gas Argon 100% in the space inside Micromegas detectors.

Theoretical analysis consist of the commission to take all the equipment needed { *a) tubes [ 5m blue 3mm, 4mm, 6mm, 10mm, 12mm, 14mm], b) Legris accessories [i. tee connectors, ii. elbow connectors, iii. tube connectors, iv. single "Y" tube connectors & v. double "Y" tube connectors], c) manometers, d) voltmeters, e) ampere - meter, f) OMRON mass flow meters* }, the design of the manifold and the simulation of every attachment specifically as well as the experimental setup of the manifold with the help of the computer hardware programme COMSOL MULTIPHYSICS 4.4.

The experimental construction consists of the placing of every accessory in the proper mechanical position and the creation of the functional entirety of the manifold in accordance to its design.

The study of the transmission properties of each gas in the space inside the manifold is being done by the experimental measurement of 6 variables. These are: a) the gas concentration, b) the netting structure of manifold (mesh), c) the velocity of gas U, d) the gas velocity magnitude Q, e) the gas pressure P inside the manifold & f) the gas impedance Z inside the manifold.

During the simulation process, we take theoretical values of these 6 variables according to the study of gas transmission in the space inside the manifold.

Afterward, we compare the theoretical with the experimental values of the variables of each gas and we draw conclusions according to whether they match or not.

Following, we use two gas mixtures, which they run through inside the manifold: a) pure argon (Argon 100%) & b) mixture 93% argon -- 7% . We compare the theoretical with the experimental values of six variables of the gas mixtures, and we conclude to the choice of the proper gas for our experiment, according to whether they match or not.

At the end, we answer to two very important questions. The first one, concerns the influence of a possible gas leak inside the tubes of the manifold to the values of the gain signal at Micromegas detectors. The second one, concern the influence of the introduction of a small quantity of an electronegative gas (such as O<sub>2</sub>) to the value of the gain signal at Micromegas detectors.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη .....	5
Abstract .....	6
Περιεχόμενα .....	7
Ευχαριστίες .....	10

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> : ΕΙΣΑΓΩΓΗ — Ο ανιχνευτής Micromegas στο NSW (New Small Wheel)

1.1 Το CERN και ο επιταχυντής αδρονίων LHC .....	12
1.1.1 Σκοπός της πειραματικής διάταξης του CERN .....	12
1.1.2 Τα τμήματα του LHC .....	13
1.2 Πειράματα στον ανιχνευτή LHC .....	14
1.2.1 Ο ανιχνευτής CMS .....	14
1.2.2 Ο ανιχνευτής ALICE .....	15
1.2.3 Ο ανιχνευτής LHC - b .....	15
1.2.4 Ο ανιχνευτής ATLAS .....	15
1.3 Το φασματόμετρο μιονίων .....	20
1.3.1 Ελεγχόμενοι Θάλαμοι Σωλήνων Ολίσθησης MDT .....	20
1.3.2 Οι σωλήνες ολίσθησης MDT .....	21
1.3.3 Επιλογή του αερίου λειτουργίας των σωλήνων ολίσθησης MDT.....	21
1.3.4 Ποιοτικός έλεγχος των σωλήνων ολίσθησης MDT .....	23

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>: ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΤΟΥ ΑΕΡΙΟΥ

2.1 Βασικοί νόμοι της ρευστοδυναμικής .....	25
2.2 Φαινόμενα μεταφοράς στα αέρια .....	28
2.3 Η εξίσωση Poiseuille .....	28
2.4 Στρωτή ροή ( <i>laminar flow</i> ) - τυρβώδης ροή ( <i>turbulent flow</i> ) .....	30
2.5 Συμπιεστή ροή ( <i>compressible flow</i> ) - Ασυμπιεστή ροή( <i>incompressible flow</i> ) .....	31
2.6 Σχέση ροής αερίου με αριθμό Reynolds .....	31
2.7 Φαινόμενο Quenching .....	33

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>: ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ MICROME GAS ΚΑΙ ΤΟΥ ΔΙΑΝΟΜΕΑ ΡΟΗΣ ΑΕΡΙΟΥ (MANIFOLD)

3.1 Μεταβλητές Ενίσχυσης του Αερίου ( <i>Gas Gain Variations</i> ) .....	33
3.1.1 Ατμοσφαιρική Πίεση ( <i>atmospheric pressure</i> ) .....	34
3.1.2 Θερμοκρασία του αερίου ( <i>gas temperature</i> ) .....	34
3.1.3 Περιοχή Πολλαπλασιασμού ( <i>amplification gap size</i> ) .....	34
3.1.4 Αναλογία του μείγματος του αερίου ( <i>gas mixing ratio</i> ) .....	35
3.1.5 Ροή αερίου ( <i>gas flow</i> ) .....	35
3.2 Βασικές ιδιότητες του ανιχνευτή MICROME GAS σε μείγμα Ar 93% - CO <sub>2</sub> 7% - απόδοση του ανιχνευτή MICROME GAS ( <i>efficiency</i> ) .....	36
3.3 Η ενίσχυση συναρτήσκει παραμέτρων του περιβάλλοντος .....	38
3.3.1 Συναρτήσκει της Πίεσης του αερίου ( <i>Gain - Gas Pressure</i> ) .....	38
3.3.2 Συναρτήσκει της Θερμοκρασίας ( <i>Gain - Temperature</i> ) .....	38
3.3.3 Συναρτήσκει της Περιοχής Πολλαπλασιασμού ( <i>Gain - Amplification gap size</i> ) .....	38
3.3.4 Συναρτήσκει του Μείγματος αερίου ( <i>Gain - Gas Mixture</i> ) .....	39

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΔΙΑΝΟΜΕΑ ΡΟΗΣ ΑΕΡΙΟΥ ΓΙΑ ΔΥΟ ΕΙΔΩΝ ΑΕΡΙΑ (Argon 100%, Ar – CO<sub>2</sub> = 93% – 7%)

4.1 Προσομοιώσεις του διπλού “Y” σωλήνα( <i>double “Y”- tube</i> ) .....	40
4.1.1 Προσομοιώσεις του διπλού “Y”- tube για αέριο αργό (Argon 100%) .....	41
4.1.1a Προσομοιώσεις στη περιοχή κυριαρχίας της στρωτής ροής .....	45
4.1.1b Προσομοιώσεις στη περιοχή κυριαρχίας της τυρβώδους ροής .....	59
4.1.2 Προσομοιώσεις του διπλού “Y”- tube για μείγμα Ar 93% - CO <sub>2</sub> 7% .....	71
4.2.1a Προσομοιώσεις στη περιοχής κυριαρχίας της στρωτής ροής .....	71
4.2.1b Προσομοιώσεις στη περιοχή κυριαρχίας της τυρβώδους ροής .....	81
4.2 Προσομοιώσεις του διανομέα ροής αερίου ( <i>manifold</i> ) .....	92
4.2.1 Προσομοιώσεις του διανομέα ροής αερίου για αργό(Argon 100%) .....	92
4.2.1a Προσομοιώσεις της περιοχής κυριαρχίας της στρωτής ροής .....	93
4.2.1b Προσομοιώσεις της περιοχής κυριαρχίας της τυρβώδους ροής .....	100



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΤΡΟΠΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΜΠΕΔΗΣΗΣ ΣΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΔΙΑΝΟΜΕΑ ΡΟΗΣ ΑΕΡΙΟΥ

5.1 Σύγκριση του τρόπου υπολογισμού της Higher Pressure στις προσομοιώσεις του διανομέα ροής αερίου .....	107
5.1a όταν ο εσωτερικός χώρος του διανομέα ροής αερίου διαρρέεται από το ίδιο αέριο ( <i>ARGON 100%, Ar 93 % - CO2 7 %</i> ) .....	107
5.1b όταν το αέριο κυκλοφορεί με τον ίδιο τρόπο ροής αερίου ( <i>laminar flow, turbulent flow</i> ) .....	108
5.2 Σύγκριση του τρόπου υπολογισμού της Average Pressure στις προσομοιώσεις του διανομέα ροής αερίου .....	110
5.2a όταν ο εσωτερικός χώρος του διανομέα ροής αερίου διαρρέεται από τον ίδιο αέριο ( <i>ARGON 100%, Ar 93 % - CO2 7%</i> ) .....	110
5.2b όταν το αέριο κυκλοφορεί με τον ίδιο τρόπο ροής αερίου ( <i>laminar flow, turbulent flow</i> ) .....	111
5.3 Σύγκριση της Higher Pressure με τη Average Pressure στις προσομοιώσεις του διανομέα ροής αερίου .....	112

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΔΙΑΝΟΜΕΑ ΡΟΗΣ ΑΕΡΙΟΥ (*MANIFOLD*) ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

6.1 Περιγραφή της πειραματικής διάταξης του διανομέα ροής αερίου .....	115
6.1.1 Σωλήνες .....	115
6.1.2 Ομοαξονικοί σωλήνες .....	115
6.1.3 Διανομέας ροής του αερίου ARGON .....	116
6.1.4 Αισθητήρας OMRON .....	120
6.1.5 Μανόμετρα .....	121
6.1.6 Βαθμονόμηση της πειραματικής διάταξης του manifold .....	123
6.2 Πειραματικές μετρήσεις του διανομέα ροής αερίου ARGON .....	126
6.3 Ανάλυση των πειραματικών μετρήσεων .....	127
6.4 Υπολογισμός της χαρακτηριστικής αντίστασης .....	129
6.5 Σύγκριση των τιμών της εμπέδησης από τις προσομοιώσεις και από τις πειραματικές μετρήσεις του διανομέα ροής αερίου .....	132

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7° : ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΝΔΕΧΟΜΕΝΩΝ ΔΙΑΡΡΟΩΝ ΑΕΡΙΟΥ ΣΤΟΝ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ MICROMEGAS**

7.1 Μελέτη προσομοιωμένων διαρροών .....	134
7.2 Επίδραση των διαρροών αερίου στην ενίσχυση (Gain) του ανιχνευτή Micromegas .....	138

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8° : ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΑ PROJECTS ΓΙΑ ΤΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΟΥ LHC**

8.1 Πειραματική διάταξη του LHC .....	144
8.1a Πρώτο λειτουργικό run (2010 – 2013) .....	144
8.1b Αναβάθμιση (2013 – 2015) .....	144
8.1c Δεύτερο λειτουργικό run (2015 - ) .....	145
8.2 Μελλοντική αναβάθμιση της πειραματικής διάταξης του LHC σε SLHC (Super Large Hadron Collider) .....	146
8.2a Σχεδιαζόμενη αναβάθμιση της υψηλής φωτεινότητας .....	146
8.2b Αναβάθμιση του LHC σε SLHC .....	147
8.2c Αναβάθμιση του injector .....	147

<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ</b> .....	148
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	158

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία αυτή αποτελεί την πρώτη επαφή μου με εφαρμοσμένα θέματα Ρευστοδυναμικής, τη δεύτερη επαφή με πειραματικά θέματα της φυσικής των ανιχνευτών ιονισμού και της φυσικής των ανιχνευτικών διατάξεων γενικότερα. Επίσης η πειραματική διαδικασία της δημιουργίας, κατασκευής και πειραματικής μέτρησης του διανομέα ροής αερίου (*manifold*) ήταν μια πολύ ενδιαφέρουσα εμπειρία για μένα, από την οποία έμαθα πολλά πράγματα. Δεν θα ήταν εφικτή η ολοκλήρωση της εργασίας αυτής χωρίς την ουσιαστική βοήθεια των ανθρώπων της ομάδας Πειραματικής Φυσικής Υψηλών Ενεργειών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου (Ε.Μ.Π.).

Πρώτα θα ήθελα να ευχαριστήσω από τα βάθη της καρδιάς μου, τον επιβλέποντα Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Σταύρο Μαλτέζο, ο οποίος με τον τρόπο διδασκαλίας του, την ιδιαίτερη αντίληψή του σε θέματα πειραματικής φυσικής και μηχανολογίας, απλοποίησε την πειραματική διαδικασία αλλά και την διαδικασία κατασκευής του διανομέα ροής αερίου. Τον ευχαριστώ επίσης θερμά για την όρεξή του, τη διάθεσή του χρόνου του, την υπομονή του και την αληθινή εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου καθόλη τη διάρκεια της εργασίας. Πολύτιμη ήταν και η καθοδήγηση του Καθηγητή κ. Αλεξόπουλου Θεόδωρου και η εμπιστοσύνη στο πρόσωπό μου.

Άκομα θέλω να ευχαριστήσω τον συνάδελφο τελειόφοιτο Μηχανολόγο Μηχανικό Αντώνη Γιαννόπουλο, για τη βοήθειά του στη κατασκευή της πειραματικής διάταξης του διανομέα ροής αερίου. Στη συνέχεια, ευχαριστώ τον άνθρωπο με το οποίο συνεργαστήκαμε σε κάθε φάση της εργασίας, την διδάκτορα κ. Γκίκα Βιολέττα, που οι συμβουλές και κατευθύνσεις της ήταν πολύτιμες στην εκπόνηση αυτής της εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου που παραμένει ο πνευματικός φάρος και το στήριγμα της ζωής μου και ειδικά την αδελφή μου Νέλλη Κολυβοδιάκου, που μου δίδαξε τις τεχνικές της φωτογραφίας.

Σε αυτό το σημείο της διπλωματικής μου, θα ήθελα από καρδιάς να ευχαριστήσω όλους όσους είτε άμεσα είτε έμμεσα πήραν μέρος σε όλη αυτή τη διαδικασία της δημιουργίας, κατασκευής, ολοκλήρωσης και εκπόνησης αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ — Ο ΑΝΙΧΝΕΥΤΗΣ MICROMEGLAS ΣΤΟ NSW (New Small Wheel)

### 1.1 Το CERN και ο επιταχυντής αδρονίων LHC

Αρχίζοντας αυτό το εισαγωγικό κεφάλαιο, πρέπει να αναφέρουμε το CERN, το μεγαλύτερο ερευνητικό ινστιτούτο πυρηνικής και πειραματικής φυσικής στον κόσμο, όπου γίνονται οι μεγαλύτερες ανακαλύψεις στη σύγχρονη φυσική. Αυτά τα πειράματα γίνονται στην πειραματική διάταξη του μεγάλου επιταχυντή αδρονίων (LHC) όπου συμμετέχει και η ελληνική ομάδα.

Ο επιταχυντής LHC (*Large Hadron Collider*), επιταχύνει δυο δέσμες πρωτονίων σε αντίθετες κατευθύνσεις με σκοπό την κατά μέτωπο σύγκρουσή τους, με αποτέλεσμα την παραγωγή των προϊόντων ύλης του πρώιμου σύμπαντος. Ανάμεσα σε αυτά τα προϊόντα είναι και το γνωστό πλέον μποζόνιο Higgs. Για την ανακάλυψη του μποζονίου Higgs, απονεμήθηκε στον Άγγλο Φυσικό Peter Higgs & στον Ελβετό Φυσικό Francois Englert και την ομάδα τους το βραβείο Νόμπελ Φυσικής για το 2014.

Η ύπαρξη του σωματιδίου Higgs δίνει τη δυνατότητα για εξήγηση του τρόπου που συγκροτείται η ύλη προσδίδοντας τις ιδιότητες όπως για παράδειγμα η μάζα. Το μποζόνιο αυτό φαίνεται να βρίσκεται στο ενεργειακό φάσμα μεταξύ 115 - 127 GeV, (με τα 125 GeV να αντιστοιχούν σε μάζα ίση με 133 πρωτόνια). Η ανακάλυψη του θα βοηθήσει στην καλύτερη κατανόηση της δημιουργίας του σύμπαντος λύνοντας θέματα, στη θεωρία της μεγάλης έκρηξης, αμέσως μετά τα πρώτα κλάσματα του δευτερολέπτου της γέννησης του σύμπαντος. Επίσης, χρησιμεύει στην πειραματική τεκμηρίωση της θεωρίας του Καθιερωμένου Προτύπου (*Standard Model*) καθώς και για την πειραματική τεκμηρίωση άλλων προβλημάτων της σύγχρονης Φυσικής.

#### 1.1.1 Σκοπός της πειραματικής διάταξης του CERN

Οι φυσικοί ελπίζουν ότι ο LHC θα βοηθήσει στο να απαντηθούν πολλά από τα πιο θεμελιώδη ερωτήματα της φυσικής. Τα ερωτήματα αφορούν τους βασικούς νόμους που διέπουν τις αλληλεπιδράσεις και δυνάμεις των στοιχειωδών σωματιδίων, τη βαθιά δομή του χώρου και χρόνου, ιδιαιτέρως αυτά που αφορούν τη διχοτόμηση της κβαντικής μηχανικής και της γενικής σχετικότητας, όπου οι σύγχρονες θεωρίες και η γνώση είναι ασαφείς ή όλες μαζί δεν βγάζουν νόημα. Μερικά θέματα είναι τα παρακάτω:

a. Είναι ο μηχανισμός Higgs γενεσιουργός μαζών στοιχειωδών σωματιδίων από ηλεκτρασθενή συμμετρία χαλώντας αυτό που υπάρχει στη φύση? Υπάρχει η προσδοκία ότι η σύγκρουση θα αποδείξει ή όχι την ύπαρξη του ασύλληπτου μποζονίου Higgs που συμπληρώνει (ή απορρίπτει) το Καθιερωμένο Πρότυπο.

b. Είναι η υπερσυμμετρία, επέκταση του Καθιερωμένου Προτύπου και της συμμετρίας Poincare, που αναπαριστά τη φύση? Αυτό έχει ως συμπέρασμα ότι όλα τα γνωστά σωματίδια έχουν υπερσυμμετρικούς εταίρους.

c. Υπάρχουν επιπλέον διαστάσεις, όπως προβλέπονται από διάφορα μοντέλα που είναι εμπνευσμένα από τη θεωρία string και μπορούμε να τα ανιχνεύσουμε?

d. Ποια είναι η φύση της σκοτεινής ύλης, η οποία εμφανίζεται να αποτελεί το 23% της μάζας του σύμπαντος?

e. Στον ηλεκτρομαγνητισμό, η δυνατή πυρηνική δύναμη και η αδύναμη πυρηνική δύναμη είναι απλώς διαφορετικές εκδηλώσεις της ίδιας ενοποιημένης δύναμης, όπως προβλέπονται από διάφορες Μεγάλες Θεωρίες Ενοποίησης?

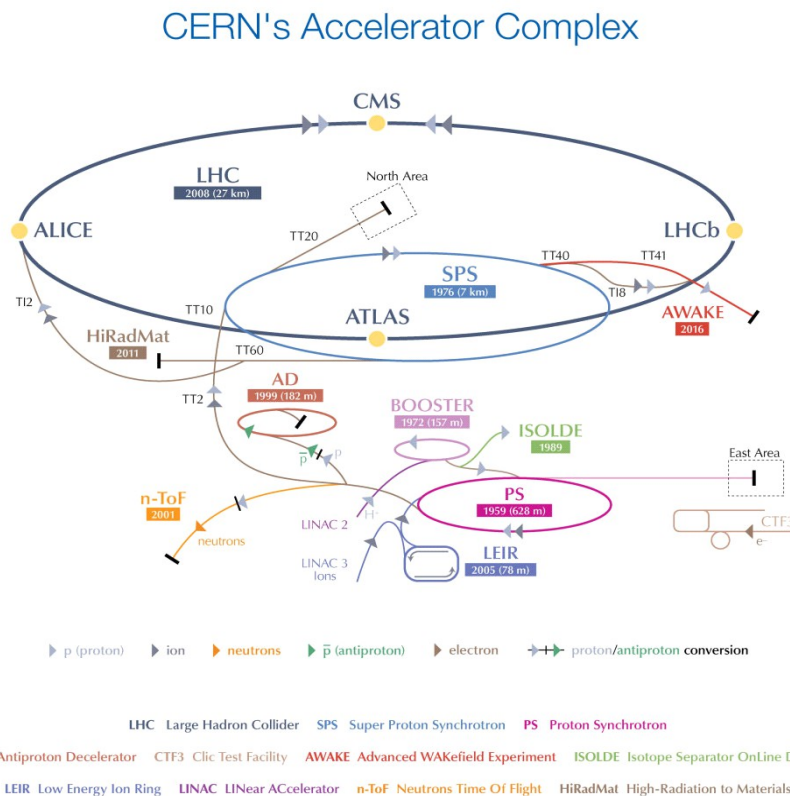
f. Γιατί η βαρύτητα είναι αδύναμη πολλές τάξεις μεγέθους του μαγνητισμού σε σχέση με τις άλλες θεμελιώδεις δυνάμεις? Βλέπε το πρόβλημα του Hierachy.

g. Υπάρχουν επιπρόσθετες πηγές των γεύσεων των quark, εκτός από αυτά που έχουν ήδη προβλεφθεί από το Καθιερωμένο Πρότυπο?

h. Γιατί υπάρχουν φαινομενικά παραβιάσεις της συμμετρίας μεταξύ της ύλης και της αντιύλης? Βλέπε επίσης την CP παραβίαση.

i. Ποιά είναι η φύση του πλάσματος quark – gluon στο αρχικό σύμπαν? Αυτό θα διερευνηθεί από τις συγκρούσεις ιόντων στο πείραμα ALICE.

### 1.1.2 Τα τμήματα του LHC



**Εικόνα 1:** Παρατηρούμε τα έξι εν λειτουργία πειράματα της διάταξης του CERN.

Μέχρι πρότινος υπάρχουν έξι εν λειτουργία πειράματα στον LHC. Ξεκινώντας με τα πιο δεδομένα, έχουμε, το ATLAS και το CMS, οι οποίοι είναι υπερμεγέθεις και σύνθετοι ανιχνευτές με πολύπλευρη παρουσία και χρήση σε διάφορα πειράματα. Ο LHCb, σχεδιάστηκε για την μελέτη της CP violation του B μεσονίου. Το TOTEM, μετράει την ολική ενεργό διατομή της σκέδασης πρωτονίου – πρωτονίου ( $pp$  cross section) ενώ ο LHCf, κατασκευάστηκε για την μελέτη των ιδιοτήτων των ουδέτερων σωματιδίων που εμφανίζονται στην “πρόσοψη” του ανιχνευτή ATLAS. Τέλος, το ALICE δημιουργήθηκε για την μελέτη της συμπεριφοράς του πλάσματος quark – gluons, το οποίο παράγεται από την σύγκρουση ιόντων μολύβδου (*lead ion collisions*).

Η πρώτη σύγκρουση παρατηρήθηκε το 2009, μετά από ένα χρόνο αναμονής λόγω κατασκευών και κυρίως επισκευών εξαιτίας μιας διαρροής ηλίου σε ένα από τα υπεραγώγια μαγνητικά συστήματα του επιταχυντή το 2008. Το Μάρτιο του 2010, η διαδικασία πρωτονίων σε κέντρο μάζας ενέργειας 7 TeV άρχισε ξανά. Μέχρι της 4 Νοεμβρίου του 2010, συνελέγησαν δεδομένα. Αναμενόταν ότι, από τις 7 Νοεμβρίου έως στις 10 Δεκεμβρίου ο LHC θα λειτουργούσε με ιόντα μολύβδου σε κέντρο μάζας ενέργειας 278 TeV. Το 2013 στον LHC πραγματοποιείται ένα από τα σημαντικότερα πειράματα της σύγχρονης Φυσικής, αυτό της ανακάλυψης και ταυτοποίησης του μποζονίου Higgs, που, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το 2014 οδήγησε στην απονομή βραβείου Νόμπελ. Την ίδια χρονιά σταμάτησε το πείραμα και λέγεται ότι θα ξαναρχίσει το 2016 - 2022.

Έξι ανιχνευτικά συστήματα κατασκευάζονται στο LHC, που τοποθετούνται υπογείως σε μεγάλες διατάξεις διασκορπισμένες στα σημεία διχοτόμησης του LHC. Δυο από αυτά, το πείραμα ATLAS και το Compact Muon Solenoid (CMS), είναι μεγάλα γενικού ενδιαφέροντος ανιχνευτικά συστήματα σωματιδίων. Ο A Large Ion Collider Experiment (ALICE) και LHCb έχουν περισσότερους εξειδικευμένους ρόλους και τα δυο τελευταία (TOTEM, LHCf) είναι πολύ μικρότερα και είναι για πολύ εξειδικευμένη έρευνα. Τα κύρια ανιχνευτικά συστήματα βρίσκονται στον παρακάτω πίνακα:

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1.1**

Detectors	Περιγραφή
<b>ATLAS</b>	Ένα από τα δυο γενικού σκοπού ανιχνευτικά συστήματα, το ATLAS θα χρησιμοποιηθεί για να ψάξει για στοιχεία νέας φυσικής, συμπεριλαμβανομένης της προέλευσης της ύλης και των επιπλέον διαστάσεων.
<b>CMS</b>	Το άλλο γενικού σκοπού ανιχνευτικό σύστημα, πρόκειται να ψάξει για το μποζόνιο Higgs και για στοιχεία για τη φύση της σκοτεινής ύλης.
<b>ALICE</b>	Θα μελετήσει το "ρευστό" της ύλης που λέγεται πλάσμα "quark – gluon", το οποίο σχηματίζεται αμέσως μετά την έκρηξη του Big Bang.
<b>LHCb</b>	Κατά την έκρηξη του Big Bang παράγονται ίσες ποσότητες ύλης και αντιύλης. Το LHCb θα προσπαθήσει να διευρενήσει τι συμβαίνει με την χαμένη αντιύλη.

## 1.2 Πειράματα στον επιταχυντή LHC

Κατά μήκος της περιφέρειας του επιταχυντή LHC θα τοποθετηθούν τέσσερις ανιχνευτές για την διεξαγωγή τεσσάρων πειραμάτων φυσικής στοιχειωδών σωματιδίων. Πρόκειται για τα πειράματα ATLAS, CMS, ALICE, LHC - b. Τα πειράματα ATLAS και CMS έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να καλύπτουν όλη την φυσική που μπορεί να προκύψει από την σύγκρουση των δεσμών πρωτονίου - πρωτονίου, ενώ τα πειράματα ALICE και LHC - b είναι πιο ειδικού ενδιαφέροντος. Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των ανιχνευτών του επιταχυντή LHC.

### 1.2.1 Ο ανιχνευτής CMS

Ο ανιχνευτής CMS (Compact Muon Solenoid) σχεδιάστηκε με στόχο τη μελέτη των προϊόντων της σύγκρουσης πρωτονίου - πρωτονίου και επομένως θα είναι ικανός να ανιχνεύει μίονια, ηλεκτρόνια, φωτόνια και αδρόνια, ενώ θα μπορεί ταυτόχρονα να μετρά με ακρίβεια την ενέργειά τους. Θα καταγραφούν επίσης τα παράγωγα που δεν αλληλεπιδρούν με τον ανιχνευτή από τη μέτρηση του ελλείματος στην εγκάρσια συνιστώσα της ορμής. Χαρακτηρίζεται από την ακριβή μέτρηση στην ορμή των μιονίων, από υψηλή διακριτική ικανότητα του θερμιδόμετρου και από ισχυρό ανιχνευτή τροχιών.

### 1.2.2 Ο ανιχνευτής ALICE

Το πείραμα ALICE (A Large Ion Collider Experiment), το οποίο αποτελείται από έναν ανιχνευτή βαρέων ιόντων, έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να εξερευνήσει τις μοναδικές δυνατότητες των αλληλεπιδράσεων πυρήνα - πυρήνα στις ενέργειες του LHC. Στόχος του είναι να μελετήσει την ισχυρή αλληλεπίδραση της ύλης σε τεράστιες ενεργειακές πυκνότητες, όπου και αναμένεται ο σχηματισμός μιας νέας φάσης της ύλης, αυτής του πλάσματος quark - gluon. Η ύπαρξη μιας τέτοιας φάσης και οι ιδιότητες της αποτελούν σημείο κλειδί στην θεωρία QCD για την κατανόηση του περιορισμού και την διατήρηση της χειραλικής συμμετρίας. Για το λόγο αυτό θα γίνει μια εκτεταμένη μελέτη των αδρονίων, ηλεκτρονίων, μιονίων και φωτονίων που παράγονται από τις συγκρούσεις των βαρέων πυρήνων. Επιπλέον το πείραμα ALICE θα μελετήσει τις συγκρούσεις πρωτονίων - πρωτονίων τόσο για σύγκριση με τις συγκρούσεις πυρήνα - πυρήνα, όσο και για σύγκριση με τα υπόλοιπα πειράματα του LHC.

### 1.2.3 Ο ανιχνευτής LHC - b

Σκοπός του πειράματος LHC - b είναι η μελέτη της παραβίασης της συμμετρίας CP καθώς και σπανίων B - διασπάσεων. Το LHC - b διαθέτει πολύ καλή διακριτική ικανότητα στην μέτρηση της μάζας και των χρόνων διάσπασης και καλό σκανδαλισμό και ταυτοποίηση σωματιδίων, με αποτέλεσμα τη δυνατότητα μελέτης πολλών δυνατών τρόπων διάσπασης των B - μεσονίων. Η μελέτη, η οποία μπορεί να γίνει με μεγάλη ακρίβεια, είναι ουσιαστική για την ανακάλυψη φυσικής πέρα από το καθιερωμένο πρότυπο. Μια εκτεταμένη μελέτη γύρω από την παραβίαση της συμμετρίας CP θα μπορούσε να απαντήσει στο θεμελιώδες κοσμολογικό ερώτημα της επικράτησης της ύλης έναντι της αντιύλης στο σύμπαν, γεγονός που αποτελεί το μεγαλύτερο φαινόμενο παραβίασης της CP που έχει παρατηρηθεί.

### 1.2.4 Το πείραμα ATLAS

Το συγκεκριμένο πείραμα (ATLAS, A Toroidal LHC AparatuS) αποτελείται από πολλά στρώματα διαφορετικών ειδών ανιχνευτών, που βρίσκονται στην περιοχή του Barrel αλλά και στην περιοχή του Endcap. Κοντά στην περιοχή που λαμβάνουν χώρα οι συγκρούσεις, βρίσκονται ανιχνευτές ημιαγωγίου στοιχείου “pixel” και λωρίδων “strips” όπως και ανιχνευτές τύπου “straw – tube transition” οι οποίοι ανιχνεύουν και ταυτοποιούν τα παραγόμενα ηλεκτρόνια.

Όπως προαναφέραμε, οι παραπάνω ανιχνευτές αποτελούν τον εσωτερικό ανιχνευτή, ο οποίος βρίσκεται εντός ενός ισχυρού σωληνοειδούς μαγνήτη της τάξης των 2T. Ο συγκεκριμένος μαγνήτης είναι απαραίτητος για την εύρεση της πολικότητας των φορτίων αλλά και για την μέτρηση των ορμών των σωματιδίων. Η ενέργεια που εναποθέτουν τα σωματίδια στον ανιχνευτή, μετράται με την βοήθεια ενός ηλεκτρομαγνήτη υγρού ηλίου και του αδρονικού καλορίμετρου, τα οποία με την σειρά τους βρίσκονται και αυτά στις περιοχές Barrel και Endcap.

Το υψηλής ακρίβειας μιονικό σύστημα, αποτελείται από τέσσερις διαφορετικούς τύπους ανιχνευτών: τους Monitored Drift Tubes (MDT) και Cathode Drift Chambers (CSC), οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τη βέλτιστη δυνατή ακρίβεια ανίχνευσης των σωματιδίων, το λεγόμενο tracking precision. Οι άλλοι δυο είναι οι Resistive plate chambers και οι thin gap chambers, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για να μας δώσουν τη δεύτερη συντεταγμένη της τροχιάς των υπό μελέτη σωματιδίων.

Οι μιονικοί ανιχνευτές (muon drift tube chambers) παρακολουθούνται συνεχώς από ένα σύστημα ευθυγράμμισης, έτσι ώστε να γίνεται άμεση διόρθωση του συστήματος από θερμικές και μηχανικές παραμορφώσεις. Στην περιοχή του Barrel υπάρχουν τρία στρώματα ανιχνευτών MDT, εντός τοροειδούς μαγνητικού πεδίου της τάξης των 0.5T και είναι ικανά να προσδιορίσουν την ορμή των μιονίων ανεξάρτητα από τον εσωτερικό ανιχνευτή (inner tracker). Η καλύτερη δυνατή ακρίβεια που μπορεί να επιτευχθεί στην μέτρηση της ορμής είναι 3% για μόνια ενεργειών. Ακριβώς τα ίδια ισχύουν για το ανιχνευτικό σύστημα Small Wheel αλλά και για τα δύο Big Wheels που βρίσκονται στην περιοχή του Endcap, όπου οι τροχιές των φορτισμένων σωματιδίων καμπυλώνονται λόγω της ύπαρξης ενός τοροειδούς μαγνητικού πεδίου, το οποίο οφείλεται σε μαγνήτες, ισχύος 1T.

Στη συνέχεια, οι Cathode strip chambers, έχουν εγκατασταθεί στην περιοχή με τον υψηλότερο ρυθμό εκπομπής γεγονότων (*high rate background*), στο Small Wheel, μεταξύ του εσωτερικού ανιχνευτή (*inner tracker*) και του endcap τοροειδούς μαγνήτη. Αυτοί οι ανιχνευτές, ανήκουν στην τάξη των Multiwire proportional chambers με μια καθοδική συσκευή λωρίδων (*cathode strip readout*) που χρησιμοποιείται για την ανάγνωση των δεδομένων.

Έπειτα, έπρεπε να αναβαθμίσουμε το Small Wheel σε New Small Wheel, αντικαθιστώντας τους ανιχνευτές MDT με τους ανιχνευτές Micromegas. Οι ανιχνευτές Micromegas, είναι ανιχνευτές με παράλληλα επίπεδα όπου η ενίσχυση πραγματοποιείται σε ένα λεπτό κενό, που διαχωρίζεται από την περιοχή μετατροπής από ένα λείο μεταλλικό πλέγμα (mesh).

Το 2007 πραγματοποιείται η πρώτη μέτρηση φασματοσκοπίου μιονίων με τη βοήθεια των ανιχνευτών Micromegas. Στη συνέχεια, το 2013 αποφασίζεται το project της αναβάθμισης σε NSW (New Small Wheel), αντικαθιστώντας τους ανιχνευτές MDT με τους ανιχνευτές Micromegas λόγω των καλών χαρακτηριστικών τους. Έτσι, η ομάδα του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου (Ε.Μ.Π) συμμετέχει μαζί με πολλές ομάδες από άλλα πανεπιστήμια στο πρόγραμμα της αντικατάστασης των ανιχνευτών MDT με τους ανιχνευτές Micromegas (*Micro – Mesh Gaseous Structure*). Ο ανιχνευτής αυτός συνδυάζει υψηλή χωρική και χρονική διακριτική ικανότητα, σταθερή λειτουργία και χαμηλό κόστος. Από διάφορα εργαστηριακά τεστ πάνω σε μικρούς ανιχνευτές και διάφορες προσομοιώσεις έχουν δείξει εξαιρετικές ιδιότητες: γρήγορη απόκριση, υψηλό κέρδος (το gain πάνω από 10000), γρήγορη εκκένωση του χώρου από ιόντα (της τάξης των  $t = 100$  ns), εξαιρετική ενεργειακή διακριτική ικανότητα και σταθερή λειτουργία.

Η ανάγκη για μελέτη του μεγάλου φάσματος φυσικών διεργασιών που θα προκύψουν από την λειτουργία του LHC οδήγησε στον σχεδιασμό του ανιχνευτή ATLAS έτσι ώστε να πληρεί τα παρακάτω κριτήρια:

a) Πολύ καλό ηλεκτρομαγνητικό θερμιδόμετρο για ταυτοποίηση των ηλεκτρονίων και φωτονίων, το οποίο συμπληρώνεται από ένα πλήρους κάλυψης αδρονικό θερμιδόμετρο για ακριβείς μετρήσεις πιδάκων και ελλειπούσας εγκάρσιας ενέργειας (missing transverse energy  $E^{\text{miss}_T}$ ).

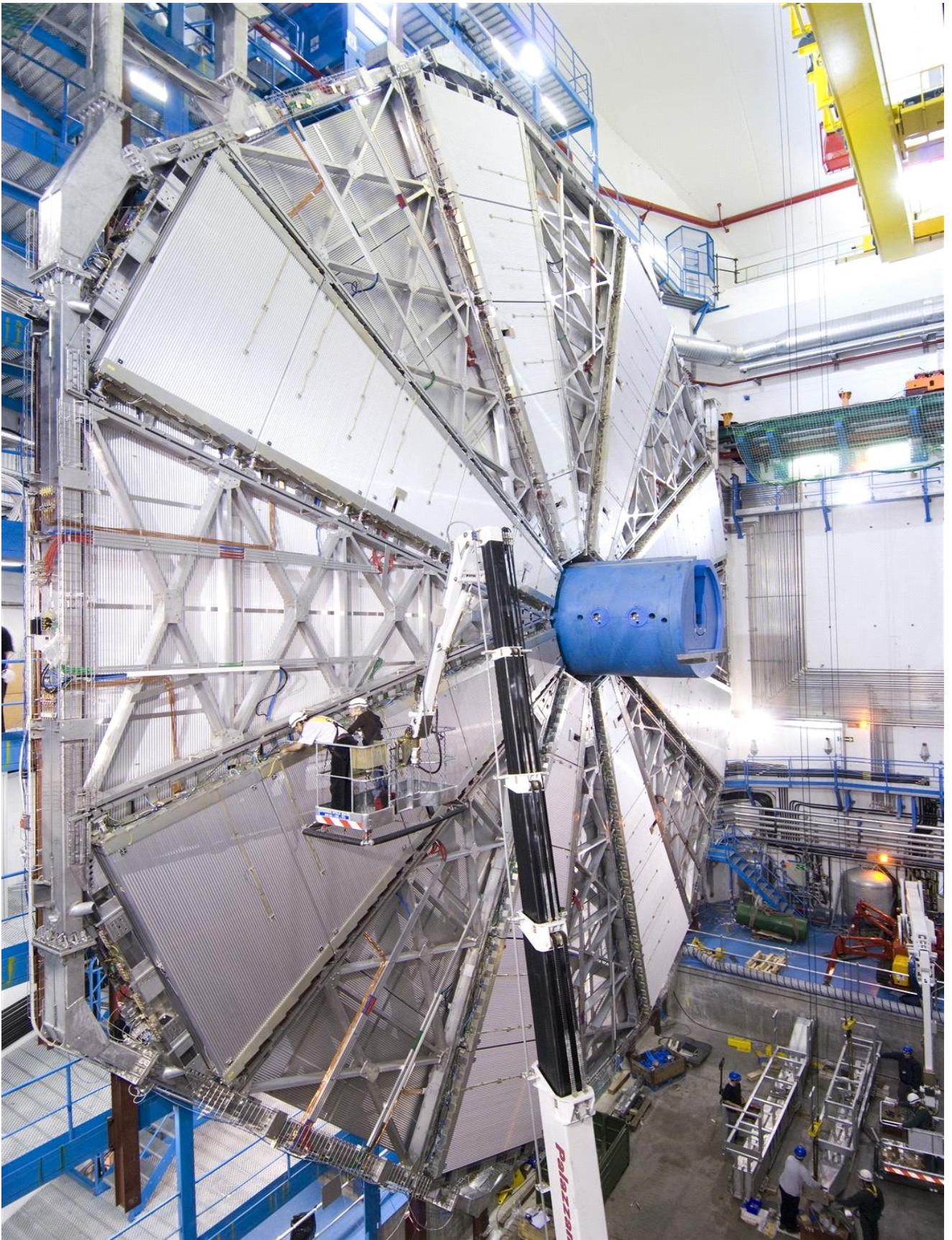
b) Υψηλής ακρίβειας μετρήσεις της ορμής των μιονίων στην υψηλή φωτεινότητα, με χρήση μόνο του εξωτερικού φασματόμετρου μιονίων.

c) Ικανοποιητική καταγραφή των τροχιών στην υψηλή φωτεινότητα για μετρήσεις της ορμής των λεπτονίων με μεγάλη  $p_T$ , ταυτοποίηση ηλεκτρονίων, φωτονίων και  $\tau$ -λεπτονίων και πλήρης ικανότητα ανακατασκευής των γεγονότων στη χαμηλή φωτεινότητα.

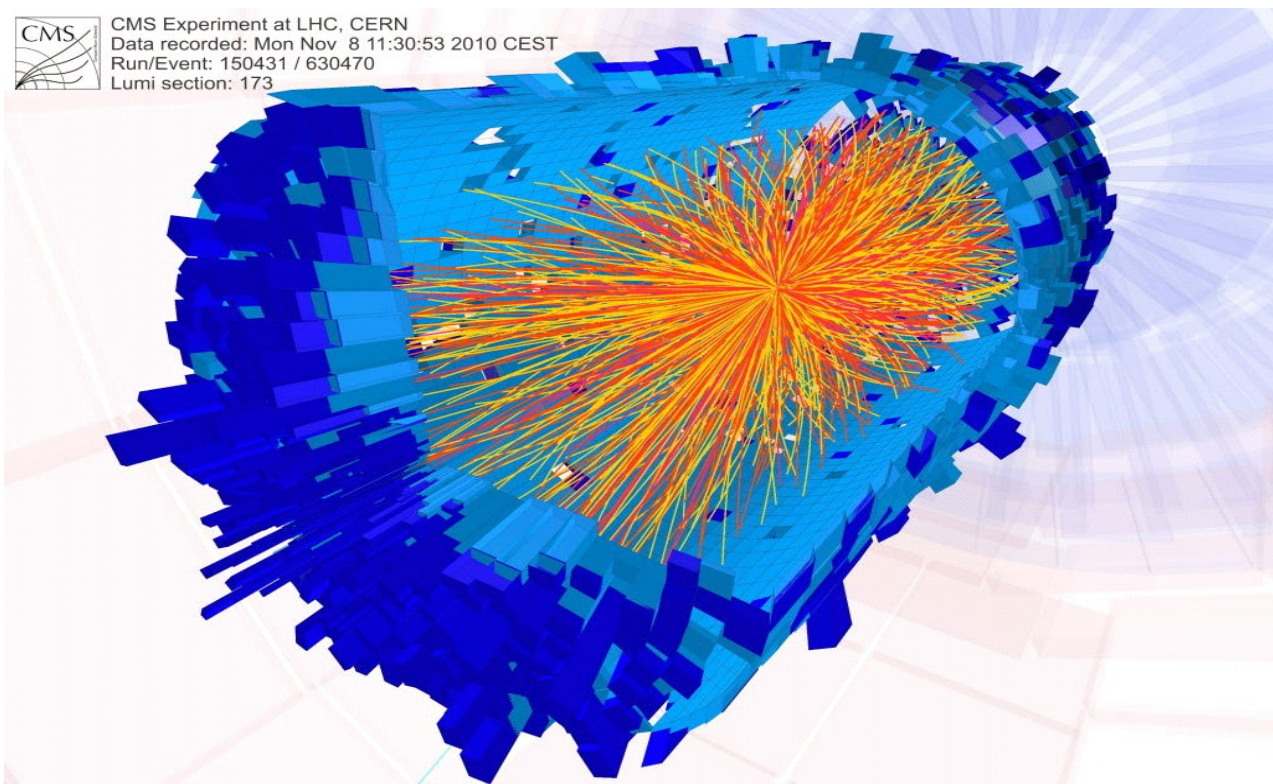
d) Μεγάλη αποδοχή στην ψευδοωκότητα  $\eta^1$  με μεγάλη αζιμουθιακή κάλυψη. Η αζιμουθιακή γωνία μετράται γύρω από τον άξονα της δέσμης, ενώ η ψευδοωκότητα σχετική με την πολική γωνία  $\theta$ , όπου  $\theta$  η γωνία με τον  $z$ -άξονα.

e) Σκανδαλισμός και μετρήσεις σωματιδίων με χαμηλές  $P_T$  για υψηλή αποδοτικότητα στις περισσότερες φυσικές διεργασίες.

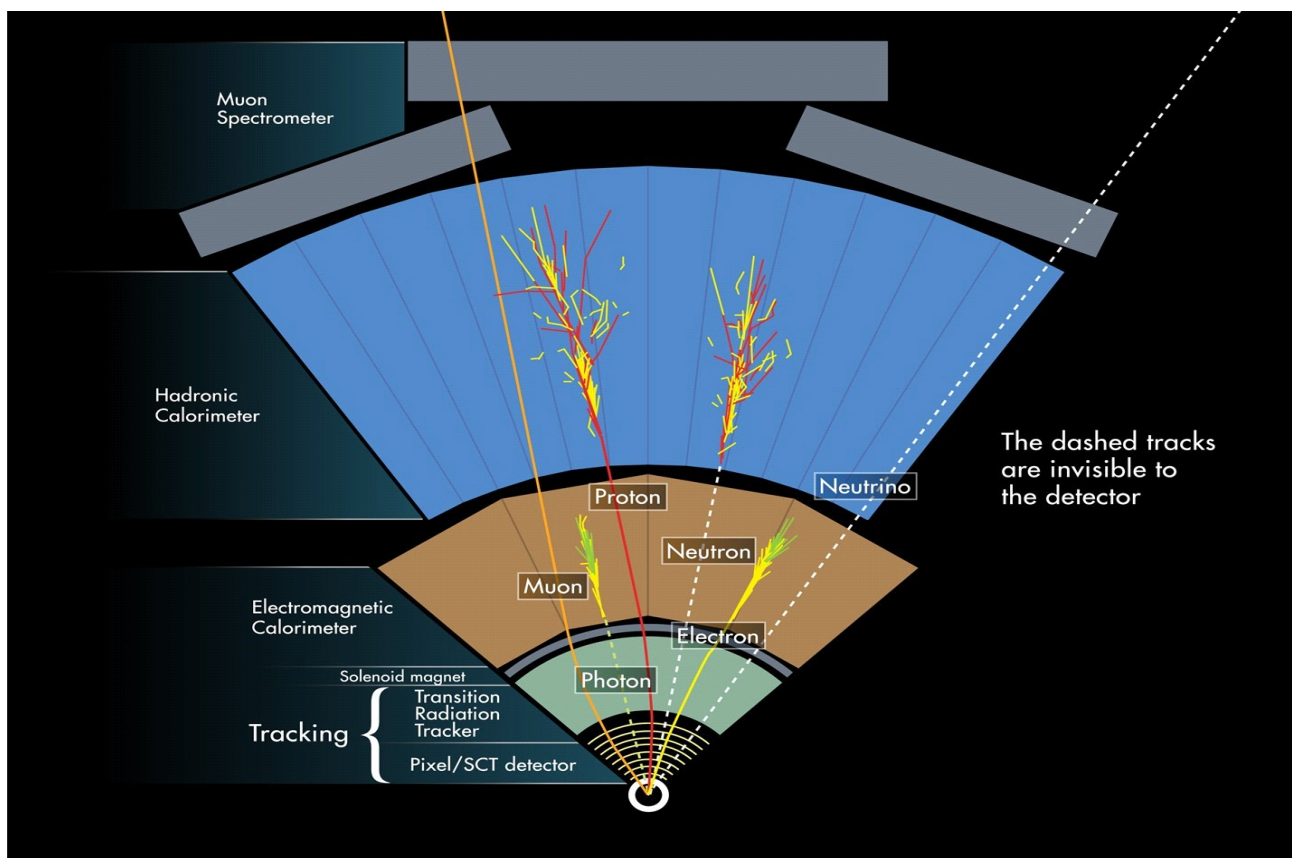




**Εικόνα 2:** Η ανιχνευτική διάταξη του ATLAS. Σε αυτά θα γίνει η αντικατάσταση των ανιχνευτών MDT με τους ανιχνευτές Micromegas.



**Εικόνα 3:** Η συνολική εικόνα των συγκρούσεων που παράγονται εσωτερικά, κάνοντας ένα run στο πείραμα CMS.



**Εικόνα 4:** Η αρχή λειτουργίας στο εσωτερικό χώρο του πειράματος CMS και ο τρόπος ανίχνευσης των σωματιδίων (I.Πρωτόνια, II. Νετρόνια, III. Ηλεκτρόνια, IV. Φωτόνια, V. Μιόνια & VI. Νετρίνο).

Πρωταρχικός στόχος του πειράματος ATLAS είναι να λειτουργήσει στην υψηλή φωτεινότητα  $L = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  με έναν ανιχνευτή που θα παρέχει όσο το δυνατό περισσότερες ταυτοποιήσεις σωματιδίων. Η αφθονία των ταυτοποιήσεων θεωρείται πολύ σημαντική στο ισχυρό περιβάλλον του LHC, για να μπορέσουν να ληφθούν άφθονες, αξιόπιστες και διασταυρωμένες μετρήσεις, ενώ η ίδια η μέτρηση της φωτεινότητας αποτελεί πρόκληση για τον ανιχνευτή.

Ο ανιχνευτής ATLAS είναι κυλινδρικός, με συνολικό μήκος 42m και διάμετρο 22m. Μολονότι παρουσιάζει κυλινδρική συμμετρία, το σύστημα συντεταγμένων του δεν εκφράζεται με κυλινδρικές συντεταγμένες, αλλά από ένα σύστημα συντεταγμένων που περιέχει τον z - άξονα κατά μήκος του επιταχυντή LHC, την αζιμουθιακή γωνία και την ψευδοωκύτητα  $\eta$ , η οποία ορίζεται ως εξής:  $\eta = -\ln[\tan(\theta/2)]$ .

Όπως φαίνεται στο σχήμα ο ανιχνευτής ATLAS μπορεί να διαχωριστεί στα παρακάτω υποσυστήματα:

1. Το σύστημα μαγνητών.
2. Τον εσωτερικό ανιχνευτή (Inner Detector, ID), ο οποίος αποτελείται με την σειρά του:
  - a. τον ανιχνευτή κυψελίδων (pixel detector, PD)
  - b. τον ημιαγώγιμο ανιχνευτή τροχιών (Semiconductor Trackers, SCT)
  - c. τον ανιχνευτή ακτινοβολίας διέλευσης (Transition Radiation Tracker, TRT)
3. Το ηλεκτρομαγνητικό και αδρονικό θερμιδόμετρο.
4. Το φασματόμετρο μιονίων το οποίο αποτελείται με την σειρά του από:
  - a. τους θαλάμους ελεγχόμενης ολίσθησης, MDTs
  - b. τους θαλάμους καθοδικών μικροταινιών, CSC
  - c. τους θαλάμους επιπέδων μεγάλης αντίστασης, RPC
  - d. τους θαλάμους λεπτού χάσματος TGC
5. Τέλος, ο ανιχνευτής έχει ως ειδικό κομμάτι του το σύστημα σκανδαλισμού και λήψης δεδομένων.

Ακριβώς, επειδή οι ανιχνευτές MDT ανήκουν στο φασματόμετρο μιονίων, περιγράψουμε το φασματόμετρο μιονίων.

---

<sup>1</sup> η ωκύτητα ορίζεται ως  $\gamma = 1/2 \ln(E + px)/(E - px) = \ln(E + px) / mT = \tanh^{-1}(pz/E)$  όπου E είναι η ενέργεια ενός σωματιδίου μάζας m, mT, η εγκάρσια μάζα του και pT η συνιστώσα της ορμής του κατά τον άξονα z (άξονα της δέσμης). Η ψευδοωκύτητα ορίζεται ως  $\eta = -\ln \tan(\theta/2)$ , όπου  $\cos(\theta) = pz/p$ . Η ψευδοωκύτητα  $\eta$  είναι προσεγγιστικά ίση με την ωκύτητα για  $\gamma$  για  $p \gg m$  και  $\theta \gg 1/\gamma$ .

## 1.3 Το φασματόμετρο μιονίων

### 1.3.1 Ελεγχόμενοι Θάλαμοι Σωλήνων Ολίσθησης, MDT

Οι ελεγχόμενοι θάλαμοι σωλήνων ολίσθησης (Monitored Drift Tube Chambers, MDT) είναι υπεύθυνοι για την ακριβή μέτρηση των συντεταγμένων των τροχιών στη διεύθυνση εκτροπής λόγω του μαγνητικού πεδίου και επομένως παρέχουν τη μέτρηση της ορμής των μιονίων. Καλύπτουν όλη σχεδόν την επιφάνεια των 5500 m<sup>2</sup> που απαιτείται για τον ακριβή προσδιορισμό των ορμών των μιονίων με ωκύτητες μεταξύ -2.7 και 2.7. Το κάθε ανοδικό σύρμα των θαλάμων MDT έχει χωρική διακριτική ικανότητα ~ 80 μm για απόλυτη οίση αερίου ίση με 3 atm. Λόγω της μηχανικής απομόνωσης μεταξύ των ανοδικών συρμάτων οι θάλαμοι παρέχουν σταθερή και αξιόπιστη λειτουργία.

Προκειμένου να αυξηθεί η χωρική διακριτική ικανότητα των θαλάμων MDT πέραν από το όριο του ενός ανιχνευτικού σωλήνα και να εξασφαλισθεί επαρκής αριθμός σημείων για την ανακατασκευή τροχιών, οι θάλαμοι MDT συνίσταται από 2 x 3 ή 2 x 4 επίπεδα σωλήνων ολίσθησης (εσωτερικός σταθμός του φασματόμετρου μιονίων, ενδιάμεσος και εξωτερικός σταθμός αντίστοιχα).

Οι σωλήνες διευθετούνται σε πολυεπίπεδα των τριών ή τεσσάρων επιπέδων εκατέρωθεν ενός άκαμπτου πλαισίου στήριξης. Το πλαίσιο αυτό εξασφαλίζει την επακριβή τοποθέτηση των ανιχνευτικών σωλήνων και την μηχανική σταθερότητα ενάντια στις επιδράσεις της θερμοκρασίας και της βαρύτητας. Επιπλέον, στηρίζει κάποια στοιχεία του οπτικού συστήματος ευθυγράμμισης. Το πλαίσιο αποτελείται από τρεις εγκάρσιες ράβδους στήριξης στις οποίες προσαρτώνται τα πολυεπίπεδα των σωλήνων ολίσθησης και οι οποίες συνδέονται με δυο εγκάρσιες ράβδους. Όταν ο θάλαμος τοποθετηθεί στην τελική του θέση, τυχούσες μηχανικές παραμορφώσεις ελέγχονται από το οπτικό σύστημα ευθυγράμμισης. Έτσι προκύπτει και η ονομασία ελεγχόμενοι θάλαμοι σωλήνων ολίσθησης. Οι κατασκευαστικές προδιαγραφές των θαλάμων MDT φαίνονται στον πίνακα 2.

Οι ανιχνευτικού θάλαμοι MDT πρέπει να πληρούν τις ακόλουθες προϋποθέσεις:

a. Αξιόπιστη λειτουργία για πολλά χρόνια σε περιβάλλον υψηλού υποβάθρου. Το υπόβαθρο προέρχεται τόσο από τα προϊόντα αυτής της πρωτογενούς αλληλεπίδρασης πρωτονίου - πρωτονίου στο κέντρο του ανιχνευτή ATLAS, όσο και από τα φωτόνια και νετρόνια υποβάθρου, τα οποία παράγονται από δευτερογενείς αλληλεπιδράσεις στα εσωτερικά τμήματα του ανιχνευτή.

b. Ακρίβεια στη μέτρηση της εγκάρσιας συντεταγμένης της ορμής. Για το λόγο αυτό η διακριτική ικανότητα της ορμής πρέπει να είναι της τάξης του 10% για  $p_T \sim 1 \text{ Teu/c}$ . Η διακριτική ικανότητα του φασματόμετρου περιορίζεται από την εσωτερική διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή, τα σφάλματα στη βαθμονόμηση των MDT, τις αβεβαιότητες στη θέση των θαλάμων, την πολλαπλή σκέδαση και τις στατιστικές διακυμάνσεις στην απώλεια ενέργειας. Στην περιοχή των μικρών ορμών  $30 < p_T < 300 \text{ GeV}$  η διακριτική ικανότητα περιορίζεται από την πολλαπλή σκέδαση, ενώ σε μεγαλύτερες ορμές  $p_T > 300 \text{ GeV}$  επικρατεί η ευθυγράμμιση των θαλάμων και η ακρίβεια στην μέτρηση της μαγνητικής εκτροπής.

c. Απόδοση της ανακατασκευής των τροχιών, η οποία εξαρτάται από την ικανότητα στην να γνώριση και την ανακατασκευή των τροχιών των μιονίων με μεγάλη αξιοπιστία, λαμβανομένου υπόψη και του υψηλού υποβάθρου.

### 1.3.2 Οι σωλήνες ολίσθησης MDT

Η βασική ανιχνευτική μονάδα των θαλάμων MDT, οι σωλήνες ολίσθησης, αποτελούνται από τρία βασικά στοιχεία: τον καθοδικό σωλήνα, το ανοδικό σύρμα και τα πώματα εγκλεισμού (end - plugs). Λειτουργούν με αέριο μείγμα Ar - CO<sub>2</sub> (93% - CO<sub>2</sub> 7%) υπό απόλυτη πίεση 3atm και σε υψηλή τάση 3080V. Οι συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας εξασφαλίζουν τη γραμμικότητα της σχέσης  $r - t$  (απόστασης ολίσθησης - χρόνου), μικρό χρόνο κατάληψης (μέγιστο χρόνο ολίσθησης περίπου 700ns) και μικρή γωνία Lorentz (γωνία μεταξύ της διεύθυνσης του ηλεκτρονίου σε συνδυασμό ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου). Η ενίσχυση του αερίου είναι μικρή, της τάξης των  $2 \cdot 10^4$ , για ελαχιστοποίηση των φαινομένων γήρανσης.

### 1.3.3 Επιλογή του αερίου λειτουργίας των σωλήνων ολίσθησης MDT

Για την ορθή επιλογή του αερίου λειτουργίας των σωλήνων MDT πρέπει να ληφθούν υπόψη οι ακόλουθες παράμετροι.

a. *Χωρική διακριτική ικανότητα:* Η διακριτική ικανότητα ενός ανιχνευτικού σωλήνα συνδέεται άμεσα με τη διακριτική ικανότητα της ορμής για μόνια μεγάλης ενέργειας. Απαιτείται μια μέση διακριτική ικανότητα  $\sim 80 \mu\text{m}$ . Τέτοια επίπεδα χωρικής διακριτικής ικανότητας επιτυγχάνονται με την χρήση αερίων με συντελεστές χαμηλής διάχυσης και υψηλής πίεσης. Η ταλάντωση του ανοδικού σύρματος μπορεί επίσης να περιορίσει τη χωρική διακριτική ικανότητα του σωλήνα ολίσθησης και μπορεί να οφείλεται είτε σε δονήσεις του πλαισίου στήριξης, είτε σε αλληλεπίδραση με τα θετικά φορτισμένα ιόντα που δημιουργούνται κατά τη διαδικασία της χιονοστοιβάδας.

b. *Απόδοση σωλήνων ολίσθησης:* Η ικανότητα ανακατασκευής των τροχιών συνδέεται άμεσα με την απόδοση των σωλήνων ολίσθησης. Η απόδοση που απαιτείται είναι μεγαλύτερη του 99% που σημαίνει ότι, απουσία θορύβου, ένα μόνιο που διασχίζει ένα σωλήνα ολίσθησης πρέπει να μετρηθεί με ακρίβεια 80 $\mu\text{m}$  σε περισσότερες από το 99% των περιπτώσεων. Αυτή επιτυγχάνεται με την χρήση αερίου υψηλής ενίσχυσης ή χαμηλού κατωφλίου.

c. *Φαινόμενα φορτίων χώρου.* Οι μεγάλοι ρυθμοί υποβάθρου προκαλούν σημαντικές ποσότητες φορτίων χώρου στον όγκο του σωλήνα ολίσθησης. Καθως το ηλεκτρικό πεδίο μεταβάλλεται, η σχέση  $r - t$  μετατοπίζεται (αλλαγή κλίσης) και επομένως χειροτερεύει η χωρική διακριτική ικανότητα του ανοδικού σύρματος. Το φαινόμενο αυτό θέτει αυστηρές απαιτήσεις στην επιλογή του αερίου μείγματος και στην ενίσχυση του. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί αυτή η αρνητική επίδραση στη διακριτική ικανότητα προτιμάται η χρήση ενός αερίου μείγματος στο οποίο η ταχύτητα ολίσθησης του ηλεκτρονίου εξαρτάται ασθενώς από το ηλεκτρικό πεδίο, παρέχοντας έτσι μια γραμμική σχέση  $r - t$ .

d. *Εξάρτηση της σχέσης  $r - t$  από το μαγνητικό πεδίο.* Η ολίσθηση των ηλεκτρονίων επηρεάζεται από την ύπαρξη του μαγνητικού πεδίου με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση διαφορετικών σχέσεων απόστασης - χρόνου ολίσθησης για τις περιοχές διαφορετικής έντασης του μαγνητικού πεδίου του ανιχνευτή. Η σχέση απόστασης - χρόνου ολίσθησης εξάγεται από μια διαδικασία γνωστή ως αυτοβαθμονόμηση. Για αυτή την διαδικασία λαμβάνουμε υπόψη τροχιές από μια ορισμένη περιοχή του θαλάμου, έτσι ώστε αν το πεδίο αλλάζει πολύ σε αυτήν την περιοχή προκύπτει μια σχέση  $r - t$  και η διακριτική ικανότητα μειώνεται. Για την ελαχιστοποίηση αυτού του φαινομένου είναι προτιμότερη η επιλογή ενός αερίου για το οποίο η σχέση απόστασης χρόνου ολίσθησης εξαρτάται ασθενώς από το μαγνητικό πεδίο. - 21 -

e. *Γύραση*. Οι μεγάλοι ρυθμοί υποβάθρου και η επίτευξη καλής λειτουργίας διακριτικής ικανότητας της ορμής αποτελούν βασικά στοιχεία κατά τη λειτουργία των σωλήνων ολίσθησης. Μια από τις βασικότερες ανησυχίες είναι η πιθανή μείωση της απόδοσης των σωλήνων ολίσθησης εξαιτίας της εναπόθεσης μεγάλου φορτίου στο ανοδικό σύρμα. Η διαρκής εναπόθεση φορτίου στο ανοδικό σύρμα και στην κάθοδο κατά την δεκάχρονη λειτουργία του LHC σε υψηλή φωτεινότητα μπορεί να προκαλέσει φαινόμενα γήρανσης, που είναι δυνατό να μειώσουν την απόδοση του σωλήνα ολίσθησης ή και να τον καταστρέψουν εντελώς. Το φαινόμενο της γήρανσης οφείλεται σε διαδικασίες πολυμερισμού και σε εναποθέσεις μορίων και ριζών στην κάθοδο και στην άνοδο που προέρχονται από τις διασπάσεις των μορίων και ριζών του αερίου κατά τη λειτουργία του ανιχνευτή. Για την ελαχιστοποίηση των φαινομένων αυτών ο ανιχνευτής πρέπει να λειτουργεί με την χαμηλότερη δυνατή ενίσχυση του αερίου, η οποία όμως θα πληρεί τις απαιτήσεις σε διακριτική ικανότητα. Το πρόβλημα λοιπόν αυτό θέτει σοβαρούς περιορισμούς στην επιλογή του αερίου.

Καταλήγουμε λοιπόν στο ότι το αέριο που θα χρησιμοποιηθεί από τους MDT πρέπει να είναι αρκετά γρήγορο ώστε να λειτουργεί ικανοποιητικά σε μεγάλη ροή γεγονότων. Επιπλέον, πρέπει να είναι γραμμικό ώστε να μην επηρεάζονται οι ιδιότητες ολίσθησης από τυχούσες μεταβολές στη θερμοκρασία, την πίεση, την υψηλή τάση, από φαινόμενα φορτίου χώρου και μετατοπίσεις συρμάτων. Επίσης, είναι σημαντικό το αέριο να εμφανίζει μεγάλη ενίσχυση στην αναλογική περιοχή λειτουργίας του ανιχνευτή, να επιτρέπει τη λειτουργία του ανιχνευτή σε σχετικά χαμηλές τιμές της υψηλής τάσης και να έχει μικρό συντελεστή διάχυσης.

Στους ανιχνευτές ιονισμού αερίου χρησιμοποιούνται κυρίως τα ευγενή αέρια, διότι είναι μονοατομικά, με λίγες ηλεκτρονικές στοιβάδες, οπότε μπορούν να ιονιστούν εύκολα. Έτσι η δημιουργία του φαινομένου της χιονοστοιβάδας σε αυτά είναι εφικτή για μικρές τιμές υψηλής τάσης. Μεταξύ των ευγενών αερίων προτιμώνται τα Ar, Kr και Xe εξαιτίας του χαμηλού δυναμικού ιονισμού και κυρίως το Ar λόγω του χαμηλού κόστους. Μολαταύτα, ένας ανιχνευτής αερίου που λειτουργεί μόνο με αργό δεν μπορεί να παράσχει ενίσχυση μεγαλύτερη από το εύρος  $10^3$  με  $10^4$  χωρίς να μεταβεί σε μια κατάσταση μόνιμης εκφόρτισης. Αυτό συμβαίνει για τον εξής λόγο: κατά την δημιουργία την χιονοστοιβάδας σχηματίζονται διεγερμένα και ιονισμένα άτομα. Τα διεγερμένα ευγενή αέρια μπορούν να επανέλθουν σε κατάσταση ισορροπίας μόνο μέσω εκπομπής φωτονίου. Η ελάχιστη ενέργεια του εκπεμπόμενου φωτονίου (για το αργό 11.6eV) είναι πάνω από το δυναμικό ιονισμού κάθε πιθανού μετάλλου που αποτελεί την κάθοδο, με αποτέλεσμα την εξαγωγή φωτοηλεκτρονίων από αυτή και τη δημιουργία δεύτερης χιονοστοιβάδας αμέσως μετά την πρώτη. Τα ιόντα αργού από την άλλη προχωρούν προς την κάθοδο και ξαναγίνονται ουδέτερα εξάγοντας ένα ηλεκτρόνιο. Η περίσσεια ενέργειας διαφεύγει είτε ως φωτόνιο, είτε ως δευτερεύουσα εκπομπή, π.χ. εξαγωγή ενός ακόμα ηλεκτρονίου από την κάθοδο. Και οι δυο διαδικασίες έχουν σαν αποτέλεσμα μια αργοπορημένη ψευδή χιονοστοιβάδα. Ακόμα και για μέτρια ενίσχυση αερίου, η πιθανότητα δημιουργίας του πιο πάνω φαινομένου είναι αρκετά υψηλή ώστε να προκαλεί μια μόνιμη κατάσταση εκφόρτισης.

Για το λόγο αυτό, απαραίτητο συστατικό σε έναν ανιχνευτή ιονισμού αερίου είναι το αέριο απόσβεσης. Το ρόλο αυτό παίζουν τα πολυατομικά αέρια τα οποία λόγω του μεγάλου αριθμού διεγερμένων καταστάσεων που διαθέτουν, μπορούν να απορροφήσουν φωτόνια σε ένα μεγάλο εύρος ενεργειών. Αυτή είναι μια κοινή ιδιότητα των αερίων στις οικογένειες των υδρογονανθράκων και των αλκοολών (τα οποία όμως είναι εύφλεκτα) καθώς και αρκετών ανόργανων αερίων όπως φρεον, CO<sub>2</sub> και BF<sub>3</sub>.

Τα μόρια των αερίων αυτών αποβάλλουν την επιπλέον ενέργεια είτε μέσω ελαστικών συγκρούσεων, είτε μέσω διαχωρισμού τους σε απλούστερες ρίζες. Η ίδια συμπεριφορά παρατηρείται όταν ένα ιονισμένο πολυατομικό μόριο ξαναγίνεται ουδέτερο στην κάθοδο. Η πιθανότητα δευτερεύουσας εκπομπής είναι απίθανη. Κατά την ουδετεροποίηση οι ρίζες επανενώνονται είτε σχηματίζοντας απλούστερα μόρια (διαχωρισμός), είτε μεγαλύτερα σύμπλοκα (πολυμερισμός). Έτσι, η προσθήκη έστω και ενός μικρού αριθμού ποσοστού πολυατομικού αερίου απόσβεσης σε ένα ευγενές αέριο αλλάζει τελείως τη συμπεριφορά ενός θαλάμου ιονισμού. Λαμβάνοντας υπόψη όλες τις παραπάνω παραμέτρους για την ορθή επιλογή του αερίου για τους σωλήνες MDT έχει επιλεγεί το μείγμα Ar - CO<sub>2</sub> σε ποσοστώςη 93 % - 7%.

### 1.3.4 Ποιοτικός Έλεγχος των σωλήνων ολίσθησης

Ο ποιοτικός έλεγχος των σωλήνων ολίσθησης έγινε στο εργαστήριο Υψηλών Ενεργειών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκαν μια σειρά από διατάξεις υπεύθυνες για τον ποιοτικό έλεγχο καθώς και τα αντίστοιχα λογισμικά για την λήψη των δεδομένων και την αυτοματοποίηση των μετρήσεων. Περιληπτικά αυτοί οι έλεγχοι είναι:

*a. Μέτρηση της μηχανικής τάσης του ανοδικού σύρματος:* Η αποδεκτή τιμή είναι 350gf σε θερμοκρασία 20°C με ανοχή της τάξης του 5%. Σκοπός της μέτρησης ήταν ο περιορισμός της βαρυτικής κάμψης του ανοδικού σύρματος και των ταλαντώσεών του λόγω ηλεκτροστατικών δυνάμεων.

*b. Μέτρηση του ρεύματος διαρροής:* Η μέγιστη αποδεκτή τιμή είναι 2nA/m όταν ο σωλήνας ολίσθησης λειτουργεί υπό υψηλή τάση 3 - 4 kV με αέριο μείγμα Ar - CO<sub>2</sub> (93% - 7%) σε απόλυτη πίεση 3bar. Η μέτρηση ήταν απαραίτητη για τον περιορισμό του ρεύματος διαρροής από το ανοδικό σύρμα προς την κάθοδο μέσω των πωμάτων, προκαλεί ηλεκτρονικό θόρυβο και μακροπρόθεσμα, καταστροφή του ανιχνευτικού σωλήνα.

*c. Μέτρηση της θέσης του ανοδικού ρεύματος:* Μέτρηση της θέσης του ανοδικού σύρματος σε σχέση με τον άξονα συμμετρίας του κυλινδρικού σωλήνα, η οποία πρέπει να είναι μικρότερη από 25μm και για τις δυο εγκέρσιες συντεταγμένες, με στόχο τον περιορισμό των αποκλίσεων του ανοδικού σύρματος από την σωστή θέση, που επιδρούν στην ανακατασκευή των τροχιών.

*d. Μέτρηση του βαθμού στεγανότητας:* Μέτρηση του βαθμού στεγανότητας του σωλήνα μέσω του προσδιορισμού της διαρροής του αερίου μείγματος, με μέγιστη αποδεκτή τιμή τα 10<sup>-8</sup> bar/s. Η κεντρική ιδέα είναι η διατήρηση σταθερής πίεσης στον ανιχνευτικό σωλήνα και η αποφυγή εισροής O<sub>2</sub> και N<sub>2</sub>.

Το project της αναβάθμισης του New Small Wheel αναμένεται να πραγματοποιηθεί τα επόμενα χρόνια στις εγκαταστάσεις του CERN στη Γενεύη της Ελβετίας.

---

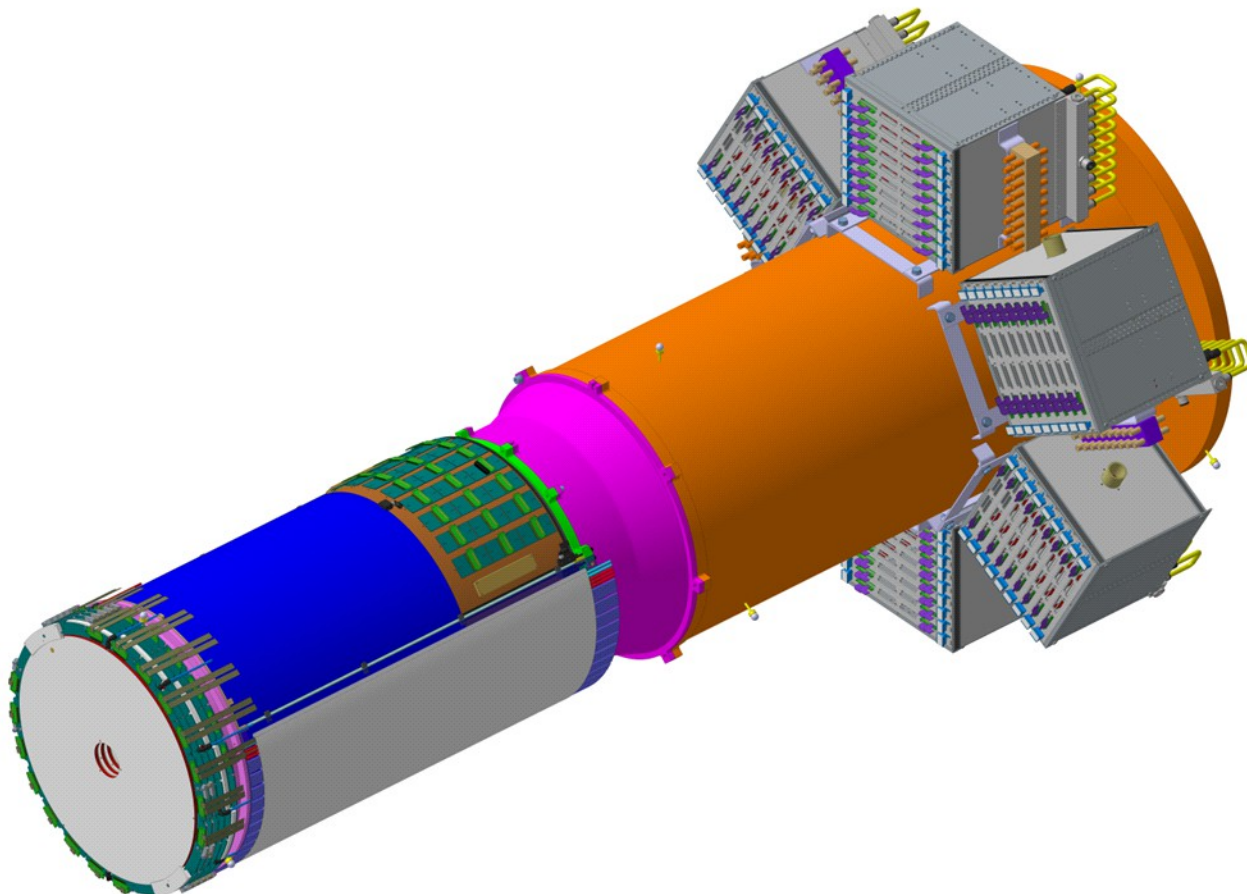
<sup>2</sup> Όλες αυτές οι πληροφορίες παίρνονται από τα paper:

[1] I.Giomataris et al., NIM A 376 (1996)

[2] Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 640 (2011) 110 - 118, A spark - resistant bulk - micromegas chamber for high - rate applications, T. Alexopoulos, J.Burnens, R. de Oliveira, G. Glonti, O.Pizzirusso, V.Polychronakos, G.Sekhniaidze, G. Tsipolitis, J. Wotschack

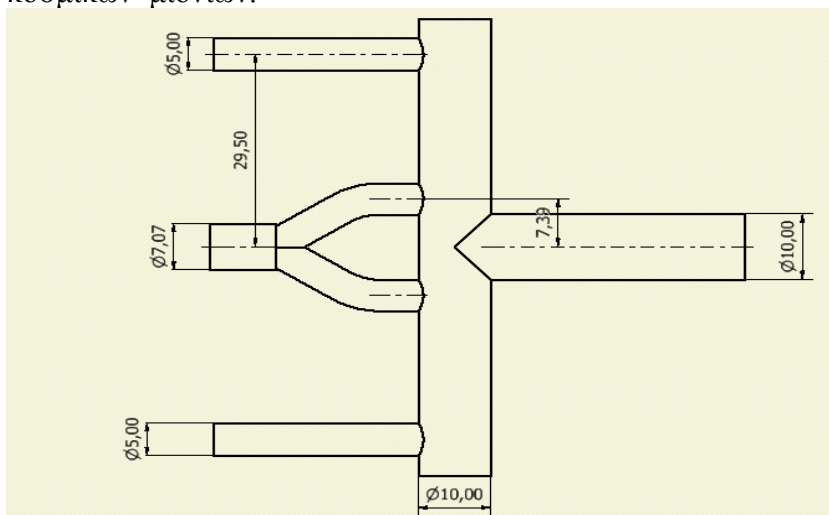
[3] Καρέντζος Στάθης, "Μελέτη της παροχής του αερίου στους ανιχνευτές Micromegas", Master's thesis, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο(Ε.Μ.Π), Αθήνα 2013

Ο τελικός σκοπός είναι η αναβάθμιση του Small Wheel σε New Small Wheel (NSW), αντικαθιστώντας τους ανιχνευτές MDT με τους ανθεκτικότερους ανιχνευτές Micromegas. Στη παρακάτω εικόνα (εικόνα 5) παραθέτουμε την πειραματική διάταξη του NSW, το οποίο βρίσκεται στο εσωτερικό του ATLAS cavern, όπου βρίσκεται το σύστημα διανομέα ροής αερίου(manifold) + ανιχνευτή Micromegas.



**Εικόνα 5:** Παρατίθεται η πειραματική διάταξη του New Small Wheel σε προσομοίωση όπου είναι τοποθετημένο στην άκρη το σύστημα του διανομέα ροής αερίου (κίτρινο χρώμα) + δοκιμαστικό ανιχνευτή Micromegas.

Στη συνέχεια, παραθέτουμε τον διανομέα ροής αερίου όπως το σχεδιάσαμε στο εργαστήριο κοσμικών μιονίων.



**Εικόνα 6:** Ο διανομέας ροής αερίου όπως σχεδιάστηκε στο εργαστήριο.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### ΘΕΩΡΙΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ του ΑΕΡΙΟΥ

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, θα θυμηθούμε κάποια βασικά χαρακτηριστικά της διάδοσης των αερίων με βάση την δυναμική των ρευστών και της κινητικής θεωρίας των αερίων και θα αναπτυχθεί η θεωρία των φαινομένων μεταφοράς στα αέρια που είναι απαραίτητη για να γίνει κατανοητή η κυκλοφορία του υπό μελέτη αερίου μέσα στον εσωτερικό χώρο του ανιχνευτή Micromegas. Αναφέρεται μόνο η θεωρία εκείνη που είναι χρήσιμη για την κατανόηση και κατασκευή αυτής της πειραματικής διαδικασίας.

#### 2.1 Βασικοί νόμοι της Ρευστοδυναμικής

Συνήθως περιγράφουμε τη δυναμική των ρευστών, παρακολουθώντας την κίνηση ενός μόνο σωματιδίου του ρευστού, που το ορίζουμε σαν ένα δείγμα με μέγεθος αρκετά μικρό, ώστε οι μακροσκοπικές ιδιότητες του ρευστού να αλλάζουν κατά συνεχή τρόπο από σωματίδιο σε σωματίδιο αλλά και αρκετά μεγάλο ώστε να μην επηρεάζεται από τη χαώδη θερμική κίνηση των μορίων του.

Καταρχήν, α) η τροχιά ενός σωματιδίου του ρευστού καθώς αυτό κινείται σύμφωνα με τους νόμους του Νεύτωνα, ονομάζεται *τροχιακή γραμμή*. Ας δώσουμε ένα παράδειγμα. *Στρωτή ροή* (στη διεθνή ορολογία: laminar flow) θα ονομάσουμε την κατάσταση εκείνη της ροής, όπου κάθε σωματίδιο του αερίου που διέρχεται από συγκεκριμένο σημείο, ακολουθεί την ίδια *τροχιακή γραμμή*. Αντιθέτως, *τυρβώδης ροή* (στη διεθνή ορολογία: turbulent flow) θα ονομάσουμε την κατάσταση εκείνη της ροής ενός αερίου, όπου κάθε σωματίδιο του αερίου που διέρχεται από συγκεκριμένο σημείο, ακολουθεί διαφορετικές *τροχιακές γραμμές*.

β) Θα ορίσουμε το πεδίο ταχυτήτων ενός αερίου (ή ρευστού γενικότερα). Οι ταχύτητες όλων των σωματιδίων ενός ρευστού σε δεδομένη χρονική στιγμή, ορίζουν ένα πεδίο ταχυτήτων του αερίου. Πεδίο ταχυτήτων ή πεδίο ροής, ονομάζουμε το χώρο σε κάθε σημείο του οποίου η ταχύτητα του αερίου (ή ρευστού) παίρνει μια συγκεκριμένη τιμή. Στο κεφάλαιο 4, έχουμε κάνει προσομοιώσεις της ταχύτητας ροής των υπό μελέτη αερίων (*Argon 100% & Ar 93% - CO<sub>2</sub> 7%*) στο διπλό “Y” – σωλήνα (*double “Y” tube*). Ας δώσουμε και εδώ ένα παράδειγμα. Στη *στρωτή ροή (laminar flow)*, κάθε σωματίδιο του αερίου, διέρχεται από το σημείο P(T) με την ίδια ταχύτητα, *V*. Συνεπώς, για την *στρωτή ροή* η ταχύτητα της ροής του αερίου είναι ανεξάρτητη του χρόνου. Αντιθέτως, στη *τυρβώδη ροή (turbulent flow)*, κάθε σωματίδιο του αερίου, διέρχεται από το σημείο P(T) με διαφορετική ταχύτητα (*V*). Επομένως, στη *τυρβώδη ροή* η ταχύτητα της ροής του αερίου εξαρτάται από το χρόνο.

γ) Η κατάσταση ενός ρευστού σε ηρεμία, περιγράφεται από την πίεση *P* και την πυκνότητα  $\rho$  που μπορεί να είναι συναρτήσεις της θέσης και του χρόνου.

δ) Επειδή τα υγρά τα θεωρούμε πρακτικά *ασυμπίεστα*, θέτουμε,  $\rho =$  σταθερό. Μπορούμε να θεωρήσουμε και τα αέρια με σταθερή πυκνότητα  $\rho$ , αν αποφύγουμε τα φαινόμενα μεγάλης κλίμακας (μετεωρολογικά) και περιοριστούμε σε ταχύτητες μικρότερες από το μισό της ταχύτητας του ήχου στον αέρα υπό κανονικές συνθήκες.

ε) Μια σημαντική δύναμη που επηρεάζει την κίνηση των ρευστών, είναι η δύναμη της τριβής, η οποία ονομάζεται εσωτερική τριβή και οφείλεται στην διατμηματική τάση που ασκεί κάθε στοιβάδα του αερίου (ή ρευστού) στην αμέσως γειτονική της, καθώς η μια γλιστρά πάνω στην άλλη.

f) Οι *ρευματικές γραμμές* χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν το πεδίο ταχυτήτων σε ένα ρευστό (ή αέριο) που κινείται. Κατά μήκος της ρευματικής γραμμής, η εφαπτόμενη σε κάθε σημείο της γραμμής δείχνει την διεύθυνση της ταχύτητας του ρευστού σε κάθε σημείο. Κατά αντιστοιχία με τη δυναμική γραμμή του ηλεκτρικού και βαρυτικού πεδίου, εδώ έχουμε τις ρευματικές γραμμές, των οποίων η πυκνότητα ανά μονάδα επιφάνειας εκφράζει το μέτρο της ταχύτητας, όπως με τον ίδιο τρόπο η πυκνότητα των δυναμικών γραμμών εκφράζει το μέτρο της έντασης του πεδίου.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να σημειώσουμε ότι η *τροχιακή γραμμή*, αναφέρεται στην διαδρομή ενός μόνο σωματιδίου ενώ η *ρευματική γραμμή* απεικονίζει σε δεδομένη χρονική στιγμή τις διευθύνσεις των ταχυτήτων ενός πλήθους σωματιδίων. Κάθε διακριτό σωματίδιο ρευστού πρέπει να κινείται κατά μήκος μιας τροχιάς της οποίας η εφαπτόμενη έχει την ίδια διεύθυνση με αυτή της ταχύτητας του ρευστού σε κάθε σημείο. Συνεπώς, η τροχιακή γραμμή ενός σωματιδίου συμπίπτει με τη ρευματική γραμμή για την περίπτωση της *στρωτής ροής*. Αντιθέτως, η τροχιακή γραμμή ενός σωματιδίου ενός ρευστού δεν συμπίπτει με την ρευματική γραμμή του στη περίπτωση της *τυρβώδους ροής*. Ένα ουσιώδες χαρακτηριστικό της *στρωτής ροής* είναι ότι οι ρευματικές γραμμές είναι ανεξάρτητες του χρόνου. Ενώ ένα χαρακτηριστικό της *τυρβώδους ροής* είναι ότι οι ρευματικές γραμμές δεν είναι ανεξάρτητες του χρόνου.

g) Μια έννοια στενά συνδεδεμένη με τη ρευματική γραμμή είναι η φλέβα ροής. Είναι ένας σωλήνας, όχι κατ' ανάγκη σταθερής διατομής, του οποίου η παράπλευρη επιφάνεια θεωρείται ότι σχηματίζεται από ρευματικές γραμμές. Υποθέτουμε ότι η πυκνότητα του ρευστού στο σημείο 1 είναι  $\rho_1$  και στο σημείο 2 είναι  $\rho_2$  αντίστοιχα. Συνεπώς, κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος  $\Delta t$ , μια ποσότητα ρευστού μάζας έχει περάσει από την επιφάνεια  $\Delta A_2$ , εγκαταλείποντας τον περικλειόμενο όγκο και μια ποσότητα ρευστού μάζας διέρχεται από την επιφάνεια  $\Delta A_1$ , εισερχόμενη στον περικλειόμενο όγκο. Αν υποθέσουμε ότι, μέσα στον περικλειόμενο όγκο δεν υπάρχουν πηγές ρευστού ή καταβόθρες, θα πρέπει  $\Delta m_1 = \Delta m_2$ . Οπότε έχουμε:

$$\Delta m_1 = (\rho_1 v_1 v_1 \Delta A_1) \Delta t \quad , \quad \Delta m_2 = (\rho_2 v_2 v_2 \Delta A_2) \Delta t \quad (2.1\alpha, \beta)$$

Για ασυμπίεστα ρευστά όπως είναι τα υγρά ισχύει  $\rho_1 = \rho_2$ , οπότε η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$(\rho_1 v_1 v_1 \Delta A_1) + (\rho_2 v_2 v_2 \Delta A_2) = 0 \rightarrow v_1 v_1 \Delta A_1 + v_2 v_2 \Delta A_2 = 0 \quad (2.1\gamma)$$

Οι παραπάνω σχέσεις εκφράζουν τη συνθήκη συνέχειας η οποία διαφορετικά διατυπώνεται ως εξής: Το γινόμενο της ταχύτητας ροής του ρευστού  $V$  επί το εμβαδό  $A$  της διατομής της φλέβας ροής δίνεται από το τύπο:

$$V A = \text{σταθερό} \quad (2.1\delta)$$

Ας θεωρήσουμε στη συνέχεια ένα σωματίδιο ρευστού υπό τη μορφή μιας λεπτής φλέβας ροής μήκους  $\Delta s$  κατά μήκος της κεντρικής γραμμής:

$$\Delta m = \rho \Delta s \Delta A \quad (2.1\epsilon)$$

Φαίνεται ότι η συνιστώσα της δύναμης κατά τη διεύθυνση της ρευματικής γραμμής λόγω της διαφοράς είναι:

$$F_{πίεσης} = P \Delta A - \left(-P + \frac{dP}{ds} \Delta s\right) \Delta A = \frac{-dP}{ds} \Delta s \Delta A \quad (2.2)$$

Η συνιστώσα του βάρους κατά τη διεύθυνση της ρευματικής γραμμής, δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$F = \left(\frac{-dP}{ds} + \rho g \frac{dh}{ds}\right) \Delta s \Delta A \quad (2.3)$$

Για την επιτάχυνση  $a$ , μπορούμε να γράψουμε την παρακάτω σχέση:

$$a = \frac{(du(s, t))}{dt} = \frac{(\partial u)}{(\partial s)} \frac{ds}{dt} + \frac{(\partial u)}{(\partial t)} \frac{dt}{ds} \quad (2.4a)$$

Επειδή μελετούμε την περίπτωση της στρωτής ροής & γνωρίζουμε ότι στη στρωτή ροή, η ταχύτητα είναι ανεξάρτητη του χρόνου  $\frac{(\partial u)}{(\partial \tau)} = 0$ , έχουμε:

$$a = \frac{(du(s, t))}{dt} = \frac{(\partial u)}{(\partial s)} \frac{ds}{dt} = v \frac{dv}{ds} \quad (2.4b)$$

Ο θεμελιώδης νόμος της μηχανικής  $F = a \Delta m$ , λόγω των σχέσεων (2.3) & (2.4β) γράφεται στη μορφή:

$$\left(\frac{-dP}{ds} + \rho g \frac{dh}{ds}\right) \Delta s \Delta A = \rho \Delta s \Delta A v \frac{dv}{ds} \rightarrow \frac{dP}{ds} + \rho g \frac{dh}{ds} + \rho v \frac{dv}{ds} = 0 \rightarrow dP + \rho g dh + \rho v dv = 0 \quad (2.5)$$

Ολοκληρώνοντας τη σχέση (2.5) κατά μήκος της ρευματικής γραμμής μεταξύ των σημείων 1 και 2 και κάνοντας τις πράξεις, βγαίνει η τελική σχέση:

$$(P_2 - P_1) + \rho g (h_2 - h_1) + \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) = 0 \quad (2.6)$$

όπου  $h_1$  &  $h_2$  είναι τα ύψη των σημείων 1 και 2 πάνω από μια αυθαίρετη στάθμη αναφοράς.

Τελικά η παραπάνω σχέση παίρνει τη τελική της μορφή:

$$P + \rho g h + \frac{1}{2} \rho v^2 = constant \quad (2.7)$$

Οι σχέσεις (5), (6) & (7) είναι ισοδύναμες εκφράσεις του νόμου του Bernoulli, με τον περιορισμό ότι οι ολοκληρωμένες εκφράσεις (6) & (7) εφαρμόζονται για ασυμπιεστα ρευστά. Η ποσότητα  $P + \rho g h$ , αναφέρεται σαν στατική πίεση (εξωτερική + υδροστατική) και η  $\frac{1}{2} \rho v^2$ , ως δυναμική πίεση.

## 2.2 Φαινόμενα μεταφοράς στα αέρια

Φαινόμενα μεταφοράς είναι οι διεργασίες εκείνες κατά τις οποίες ένα φυσικό μέγεθος, όπως η μάζα, η ενέργεια, η ορμή ή το ηλεκτρικό φορτίο μεταφέρεται από μια περιοχή ενός συστήματος σε μια άλλη περιοχή, π.χ. η μεταλλική ράβδος, η οποία συνδέει δυο αποθήκες θερμότητας διαφορετικών θερμοκρασιών. Στην περίπτωση αυτή, έχουμε μεταφορά ενέργειας μεταξύ των δυο αποθηκών, επίσης, μεταφορά μάζας ρευστού ή αερίου, που γίνεται κατά την ροή εντός σωλήνα λόγω διαφοράς βαθμίδας πίεσεως μεταξύ των άκρων του. Στην παρούσα εργασία, θα ασχοληθούμε με το τελευταίο παράδειγμα.

Προτού αναλύσουμε την συμπεριφορά των φορτίων στα αέρια, θα πρέπει να έχουμε υπόψη μας κάποιες βασικές “ιδέες” για όλα τα φαινόμενα μεταφοράς φυσικών μεγεθών, από τις οποίες προέρχονται οι σχέσεις που θα παρουσιάσουμε παρακάτω.

Γενικά όταν αναφερόμαστε σε ροή, εννοούμε την ποσότητα του φυσικού μεγέθους που μεταφέρεται ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα επιφανείας κάθετης προς την διεύθυνση της ροής, η οποία είναι ανάλογη της βαθμίδας μιας άλλης φυσικής ποσότητας, όπως η θερμοκρασία, η πίεση, το ηλεκτρικό δυναμικό ή η συγκέντρωση.

## 2.3 Η εξίσωση Poiseuille

Αντίθετα απ' ό,τι δέχεται κανείς για τα ιδανικά ρευστά, στα πραγματικά ρευστά κυριαρχούν δυνάμεις συνοχής ανάμεσα στα επιμέρους στρώματα του ρευστού και δυνάμεις συνάφειας ανάμεσα στο ρευστό και στα τοιχώματα του δοχείου, με αποτέλεσμα αυτές να καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την ροή του ρευστού.

Η ταχύτητα ροής ενός ρευστού εντός σωλήνα, εξαρτάται από τις διαστάσεις του (ακτίνα και μήκος), το ιξώδες του ρευστού και την διαφορά πίεσεως μεταξύ των άκρων του σωλήνα. Η εύρεση της σχέσης που συνδέει αυτά τα μεγέθη, προϋποθέτει τον υπολογισμό του όγκου του ρευστού που διέρχεται από κάθε σημείο στη μονάδα του χρόνου. Η ταχύτητα του ρευστού, έχει μέγιστη τιμή στον άξονα του σωλήνα και σχεδόν μηδενική τιμή στα στρώματα του ρευστού που εφάπτονται με τα τοιχώματά του.

Για σχετικά μικρές ταχύτητες, μπορεί κανείς να θεωρήσει ότι, νοητοί κυλινδρικοί όγκοι του ρευστού, αυξανόμενης ακτίνας από τον άξονα προς την περιφέρεια, γλιστρούν ο ένας μέσα στον άλλον χωρίς να δημιουργούνται δίνες, ενώ ανάμεσα στις επιφάνειες τους αναπτύσσονται δυνάμεις τριβής. Η ροή, αν θεωρήσουμε τον κυλινδρικό σωλήνα στενό, προσεγγίζεται με καλή ακρίβεια από τη στρωτή ροή ή ομαλή ή παράλληλη ροή (διεθνής όρος: laminar flow).

Κατά τη στρωτή ροή, το ρευστό, ρέει σε παράλληλες προς τον άξονα του αγωγού γραμμές δίνοντας έτσι την εικόνα της ομαλής ή στρωτής ροής. Η πιο συνηθισμένη εικόνα παράλληλης ροής, είναι εκείνη του νερού από τις βρύσες. Σ' αυτή την περίπτωση, η δύναμη της τριβής σύμφωνα με τον νόμο του Νεύτωνα, είναι ανάλογη της βαθμίδας ταχύτητας του εμβαδού  $A$  των επιφανειών που εφάπτονται και μιας σταθεράς, δηλαδή του *συντελεστή εσωτερικής τριβής ή ιξώδες του ρευστού*:

$$F_f = -\eta A \frac{\Delta u}{\Delta r} \quad (2.3.1)$$

Ο συντελεστής εσωτερικής τριβής ή το ιξώδες του ρευστού, είναι μια σταθερά που χαρακτηρίζει το ίδιο το ρευστό ως προς την ευκολία του να ρέει σε δεδομένο πεδίο ροής. Εξαρτάται από το υλικό και αποτελεί επίσης μια συνάρτηση της θερμοκρασίας  $T$  ( $\eta = f(T)$ ). Μονάδα μέτρησης του ιξώδους είναι το 1 Poise:

$$1 P = 10^2 cP = 1 \text{ gr cm}^{-1} \text{ sec}^{-1} = 10^{-1} \text{ kg m}^{-1} \text{ sec}^{-1}$$

Στο διεθνές σύστημα μονάδων (σύστημα S.I.), χρησιμοποιείται το Pascal \* sec [P\*s]. Άλλη μια μονάδα, είναι το poise (P) στο σύστημα CGS. Υπάρχει και η αντίστοιχη ισοδυναμία: 1 P s = 10 Poise.

Η μέθοδος που ακολουθείται στην μελέτη του νόμου του Poiseuille, είναι η ακόλουθη: θεωρούμε έναν σωλήνα κυλινδρικής διατομής, ακτίνας R, γεμάτο με ρευστό. Κάθε νοητός κύλινδρος του ρευστού, με ακτίνα r, κινείται προς την κατεύθυνση της πτώσης της πίεσης ΔP που δέχονται οι δύο επιφάνειές του ΔS.

Κινητήρια δύναμη F για την ροή του ρευστού κατά μήκος του σωλήνα, αποτελεί η πίεση του ρευστού και μάλιστα η διαφορά πίεσης ΔP στην είσοδο ως προς την έξοδό του.

$$\Delta P = P_2 - P_1, F = A \Delta P = \pi \Delta P r^2 \quad (2.3.2)$$

Η τριβή που εμφανίζεται κατά την ροή του ρευστού, που είναι η δύναμη αντίστασης στην κίνηση αυτή, απορρέει από την αλληλεπίδραση των στρωμάτων του ρευστού και είναι σύμφωνα με το νόμο του Νεύτωνα, ανάλογη της βαθμίδας της ταχύτητας της επιφάνειας A και μιας σταθεράς η, δηλαδή του συντελεστή εσωτερικής τριβής ή του ιξώδους του ρευστού:

$$F_R = -\eta A \frac{\Delta u}{\Delta r} = -\eta 2\pi r \frac{\Delta u}{\Delta r} \quad (2.3.3)$$

Ο συντελεστής εσωτερικής τριβής, χαρακτηρίζει το ίδιο το ρευστό, ως υλικό και η τιμή του εξαρτάται από την θερμοκρασία ( $\eta = f(T)$ ).

Σε συνθήκες σταθερής κατάστασης, οι δυο δυνάμεις, η κινητήρια δύναμη εξαιτίας της διαφοράς πίεσης F ΔP και η δύναμη της τριβής είναι ίσες και αντίθετες. Ως εκ τούτου, αντικαθιστώντας τις δύο παραπάνω σχέσεις, έχουμε:

$$\eta 2\pi r \frac{du}{dr} = \pi \Delta P r^2 \quad (2.3.4)$$

Λύνοντας την σχέση αυτή ως προς u και ολοκληρώνοντας τα δυο μέρη της προκύπτει η παρακάτω σχέση, η οποία μας δίνει το προφίλ της ταχύτητας στο πεδίο ροής, μέσα σε κυκλικής διατομής σωλήνα:

$$u(r) = \int_r^R \left( \frac{P_1 - P_2}{2\eta l} \right) r dr = \frac{(P_1 - P_2)}{4\eta l} (R^2 - r^2) \quad (2.3.5)$$

Όπως φαίνεται και στο σχήμα και απορρέει και από την παραπάνω σχέση, η κατανομή της ταχύτητας έχει σχήμα παραβολής εκ περιστροφής. Θα μπορούσαμε ενδεχομένως να πούμε ότι η κίνηση του αερίου, όπως το βλέπουμε από μακριά ως παρατηρητές, έχει σπειροειδή μορφή.

Ένα σημαντικό μέγεθος για την ροή ενός ρευστού σε σωλήνα, είναι το μέγεθος της παροχής. Ως παροχή Π, ορίζεται το γινόμενο της ταχύτητας ροής του ρευστού επί το εμβαδόν της επιφάνειας, δηλαδή, της διατομής του σωλήνα από την οποία διέρχεται το ρευστό και ισούται με:

$$\Pi = \frac{dV}{dt} = u(R) dS \quad (2.3.6)$$

Ολοκληρώνοντας τη παραπάνω σχέση και λαμβάνοντας υπόψη, όπως φαίνεται και στο σχήμα, ότι το εμβαδόν της στοιχειώδους επιφάνειας στη διατομή, είναι:

$$dS = r \, d\varphi \, dr \quad (2.3.7)$$

αντικαθιστώντας την προηγούμενη σχέση (2.3.7) στη (2.3.6), προκύπτει:

$$\Pi = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^P u(R) r \, dr = \frac{(\pi \Delta P)}{(2\eta l)} \left( \int_0^R R^2 r \, dr - \int_0^P r^3 \, dr \right) \quad (2.3.8)$$

Μετά από αντικατάσταση της  $u(R)$  στην σχέση αυτή και λαμβάνοντας υπόψη ότι η ταχύτητα στα τοιχώματα του σωλήνα είναι περίπου μηδενική, δηλαδή  $u(R) = 0$ , η παροχή τελικά παίρνει τη μορφή:

$$\Pi = \frac{(\pi \Delta P R^4)}{8\eta l} \quad (2.3.9)$$

Η σχέση αυτή είναι γνωστή ως “νόμος *Hagen – Poiseuille*”, που εφαρμόζεται για τον υπολογισμό της παροχής ρευστού σε κυκλικής διατομής σωλήνα, με την προϋπόθεση ότι το ρευστό ρέει ακολουθώντας τους νόμους της στρωτής ροής (*laminar flow*).

## 2.4 Στρωτή ροή (*laminar flow*) – τυρβώδης ροή (*turbulent flow*)

Στην ρευστοδυναμική, στρωτή ροή (ή αλλιώς ροή ρευματικής γραμμής) έχουμε όταν ένα ρευστό ρέει σε παράλληλες στρώσεις, χωρίς κανένα εμπόδιο να βρίσκεται ανάμεσα στα στρώματα. Σε χαμηλές ταχύτητες, το ρευστό τείνει να ρέει χωρίς παράπλευρη ανάμειξη και τα γειτονικά στρώματα γλιστρούν το ένα πάνω στο άλλο, όπως οι κάρτες που παίζουμε. Δεν υπάρχουν διασταυρώσεις ροών ειδικότερα στην κατεύθυνση της ροής, ούτε παρουσιάζουν στροβίλους ή δίνες τα ρευστά. Στη στρωτή ροή, η κίνηση των σωματιδίων των ρευστών είναι σε σειρά με όλα τα σωματίδια να κινούνται σε ευθείες γραμμές παράλληλες προς τα τοιχώματα του σωλήνα. Η *στρωτή ροή* μπορεί να περιγραφεί ως ένα σύνταγμα από τα μόρια του ρευστού, που χαρακτηρίζεται από υψηλής ορμής διάχυση (*diffusion*) και χαμηλής ορμής μεταφορά θερμότητας (*convection*).

Όταν ένα ρευστό διαρρέει μέσα σε ένα κλειστό κανάλι όπως, ας πούμε σε ένα σωλήνα ή μεταξύ δυο επίπεδων πιάτων, μπορεί η κυκλοφορία του αερίου να συμβεί με δυο τρόπους: α) στρωτή ροή (*laminar flow*) ή β) τυρβώδης ροή (*turbulent flow*). Η *τυρβώδης ροή* μπορεί να περιγραφεί σαν ένα σύνταγμα μορίων του ρευστού με όχι καλή σειρά, που χαρακτηρίζεται από στοβιλισμούς ή μικρές δίνες των σωματιδίων του ρευστού, τα οποία οδηγούνται σε παράπλευρη ανάμειξη. Αν χρησιμοποιήσουμε μη επιστημονικούς όρους, η στρωτή ροή είναι απαλή ενώ η τυρβώδης ροή είναι σκληρή κίνηση σωματιδίων.

## 2.5 Συμπιεστή ροή (compressible flow) – Ασυμπιεστή ροή (incompressible flow)

Συμπιεστή ροή (δυναμική αερίου) είναι ο κλάδος της ρευστοδυναμικής που ασχολείται με ροές που έχουν σημαντικές αλλαγές στην πυκνότητα του ρευστού. Στα αέρια και όχι στα υγρά παρατηρείται αυτή η συμπεριφορά. Για να ξεχωρίσουμε την συμπιεστή και ασυμπιεστή ροή στα αέρια, ο αριθμός Mach (το πηλίκο της ταχύτητας της ροής του αερίου προς την ταχύτητα του ήχου) πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 0.3 πριν συμβεί η χαρακτηριστική συμπίεστικότητα. Η μελέτη της συμπιεστής ροής σχετίζεται με τα αεροσκάφη υψηλής ταχύτητας, με μηχανές πιδάκων, με αέρια σωληνώσεων, με εφαρμογές όπως την εκτόνωση αερίων λόγω τριβής και πολλά άλλα πεδία.

Όταν οι μεταβολές της θερμοκρασίας στη ροή είναι μικρές, ένα μονοφασικό ρευστό μπορεί να χαρακτηριστεί ασυμπιεστό όταν το  $\rho$  είναι σταθερό ή σχεδόν σταθερό. Αυτή η περίπτωση αναφέρεται για όλα τα υγρά κάτω από φυσιολογικές συνθήκες και για τα αέρια σε χαμηλές ταχύτητες.

## 2.6 Σχέση ροής αερίου με αριθμό Reynolds

Ο τρόπος ροής ενός ρευστού που βρίσκεται μέσα σε ένα κανάλι είναι σημαντικό στα προβλήματα της ρευστοδυναμικής. Ο χωρίς διαστάσεις αριθμός *Reynolds* είναι μια σημαντική παράμετρος στις εξισώσεις που περιγράφουν τις συνθήκες της ροής που τείνουν στην στρωτή ή στη τυρβώδη ροή. Ο αριθμός *Reynolds* που οριοθετεί τη στρωτή ή τη τυρβώδη ροή εξαρτάται από τη συγκεκριμένη γεωμετρία ροής και επιπλέον, η μετατόπιση από τη στρωτή ροή στην τυρβώδη ροή μπορεί να είναι ευαίσθητη από τα επίπεδα διαταραχών και από τις ατέλειες που παρουσιάζονται στην συγκεκριμένη μορφή.

Στην περίπτωση της ροής διαμέσου ενός ευθέως σωλήνα με μια κυκλική ενεργή διατομή, αν ο αριθμός Reynolds προσεγγίζει την κριτική τιμή του 2040, η κίνηση του ρευστού γίνεται τελικά στρωτή, ενώ σε μεγαλύτερους αριθμούς, η ροή μπορεί να γίνει τυρβώδης. Όταν ο αριθμός Reynolds είναι πολύ μικρότερος από 1, τότε συμβαίνει η ροή Stokes. Αυτή είναι μια υπερβολική περίπτωση της στρωτής ροής όπου οι παχύρρευστές επιδράσεις (δηλαδή της εσωτερικής τριβής) είναι πολύ μεγαλύτερες από τις δυνάμεις αδρανείας.

Μπορούμε να φέρουμε ένα παράδειγμα. Στην περίπτωση μιας μετακινούμενης πλάκας σε ένα ρευστό, έχει βρεθεί ότι υπάρχει μια στρώση που μετακινείται με το πιάτο και μια στρώση μετά τη στάσιμη πλάκα όπου είναι στάσιμη. Οι τροχιακές γραμμές που σχετίζονται με τη στρωτή ροή μοιάζει με σκέπαστρο από κάρτες. Αυτό το προφίλ ροής ενός ρευστού μέσα σε σωλήνα δείχνει ότι το ρευστό δρα σε στρώσεις όπου πέφτει η μια πάνω στην άλλη. Μια κοινή εφαρμογή της στρωτής ροής είναι η ευαίσθητη ροή ενός παχύρρευστου ρευστού διαμέσου ενός σωλήνα. Σε αυτή τη περίπτωση, η ταχύτητα της ροής ποικίλλει από το 0 στο τοίχωμα μέχρι το μέγιστο κατά μήκος της ενεργούς διατομής του κέντρου του σωλήνα. Το προφίλ ροής της στρωτής ροής μέσα σε ένα σωλήνα μπορεί να υπολογιστεί χωρίζοντας τη ροή σε λεπτά κυλινδρικά κομμάτια και εφαρμόζοντας τις δυνάμεις τριβής σε αυτά.

Άλλο παράδειγμα είναι η ροή του αέρα πάνω από τα πτερύγια ενός αεροσκάφους. Η συνοριακή στρώση είναι ένα πολύ λεπτό φύλλο αέρα που διαχέεται πάνω από την επιφάνεια του φτερού (και όλων των επιφανειών των αεροσκαφών). Επειδή ο αέρας έχει ιξώδες, αυτή η στρώση του αέρα τείνει να προσκολληθεί στο πτερύγιο. Όπως το πτερύγιο μετακινείται διαμέσου του αέρα, η συνοριακή στρώση αρχικά ρέει απαλά από το τροχιακής γραμμής σχήμα των αερολυμάτων. Εδώ, η ροή είναι στρωτή και η συνοριακή στρώση είναι στρωτή. Ο Prandtl εφαρμόζει τις αρχές της στρωτής συνοριακής στρώσης μέχρι τα αερολύματα το 1904.

Θεμελιώδες για την ανάλυση της ροής του ρευστού είναι ο αριθμός Reynolds. Παρακάτω παραθέτουμε τον θεωρητικό τύπο:

$$N_{\text{R}} = \frac{(\rho U L)}{\mu} \quad (2.6.1)$$

όπου  $\rho$ : η πυκνότητα του υλικού (σε μονάδες S.I.: kg / m )

όπου  $\mu$ : ο συντελεστής ιξώδους (σε μονάδες S.I.: m / kg )

όπου  $U$ : η κατανομή των ταχυτήτων (σε μονάδες S.I.: m / s )

όπου  $L$ : το αντιπροσωπευτικό μήκος (σε μονάδες S.I.: m )

Ο αριθμός Reynolds αναπαριστά τη σχέση μεταξύ της αδράνειας και των δυνάμεων του ιξώδους. Υπάρχουν τρεις περιπτώσεις στη φύση. Η πρώτη περίπτωση είναι ο αριθμός Reynolds να είναι μικρότερος από 2040 ( $N_{\text{Re}} < 2040$ ), τότε οι δυνάμεις του ιξώδους κυριαρχούν και τείνουν να εξαλείψουν όλες τις διαταραχές. Αποτέλεσμα αυτού είναι η ροή του αερίου να συμπεριφέρεται σύμφωνα με τις αρχές της λεγόμενης στρωτής ροής (*laminar flow*). Σε αυτή την περίπτωση, το προφίλ της ταχύτητας του ρευστού παραμένει σταθερό.

Η δεύτερη περίπτωση είναι ο αριθμός Reynolds να είναι μεγαλύτερος από 2040 και μικρότερος από 10000 ( $2040 < N_{\text{Re}} < 10000$ ), τότε αρχίζουν να αναπτύσσονται οι δυνάμεις αδράνειας σε σχέση με τις δυνάμεις του ιξώδους. Με αυτό τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα να αναπτυχθούν διαταραχές από μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις. Σε αυτή την περίπτωση, μελετούμε τη ροή του ρευστού τοπικά ανάλογα με τί τιμές παίρνουν οι παράμετροι του μήκους  $L$  και του διανύσματος της ταχύτητας  $u$ . Η συνολική εικόνα της συμπεριφοράς της ροής είναι απροσδιόριστη.

Οι εξισώσεις Navier - Stokes υπολογίζουν αυτόματα το τοπικό κελί του αριθμού Reynolds (*cell Reynolds number*) μέσω του τύπου:

$$N_{((\text{R})^c)} = \frac{(\rho (|u|) h)}{2\mu}, \quad (2.6.2)$$

χρησιμοποιώντας το μήκος  $h$  αντί για το αντιπροσωπευτικό μήκος και την απόλυτη τιμή του διανύσματος της ταχύτητας  $u$  αντί για την κατανομή των ταχυτήτων  $U$ . Το cell Reynolds number είναι μια ορισμένη εκ των προτέρων ποσότητα διαθέσιμη για οπτικοποίηση και εκτίμηση της αριθμητικής τιμής.

Τέλος, η τρίτη περίπτωση είναι ο αριθμός Reynolds να είναι μεγαλύτερος από 10000 ( $N_{\text{Re}} > 10000$ ). Τότε το πεδίο ροής του ρευστού τείνει σε μια χαωτική κατάσταση που ονομάζεται τυρβώδης διαταραχή (*turbulence*). Σε αυτή τη περίπτωση, το προφίλ της ταχύτητας του ρευστού είναι ευμετάβλητο και αλλάζει συνεχώς. Επομένως, η ονομασία της ροής αυτής είναι τυρβώδης ροή (*turbulent flow*).

Η ροή ενός ρευστού λέγεται *ασυμπίεστη* όταν η πυκνότητα του ρευστού μπορεί να θεωρηθεί σταθερή στο πεδίο ροής δηλαδή όταν:

a) το ρευστό είναι ασυμπίεστο (*incompressible*) (π.χ. υγρά) ή

b) όταν το ρευστό είναι συμπιεστό (*compressible*) (π.χ. αέρια) αλλά οι διαφορές πίεσης που οφείλονται στην ροή είναι αμελητέες σε σχέση με την πίεση του ρευστού.

Μπορεί να αποδειχτεί ότι το δεύτερο κριτήριο, ισχύει για τα αέρια σε ταχύτητες μέχρι και το 30% της ταχύτητας του ήχου. Έτσι για όλες τις πρακτικές εφαρμογές, η ροή των αερίων μπορεί να θεωρηθεί ως συμπιεστή, παρόλο που αυτά είναι συμπιεστά.



## 2.8 Φαινόμενο Quenching

Το φαινόμενο Quenching, αναφέρεται στη διαδικασία κατά την οποία έχουμε μείωση της έντασης της ακτινοβολίας (π.χ. ακτινοβολία φθορισμού, fluorescence) κάποιου δεδομένου υλικού. Πολλοί είναι οι μηχανισμοί, οι οποίοι μπορούν να προκαλέσουν το συγκεκριμένο φαινόμενο. Τέτοιοι μηχανισμοί είναι οι διεγερμένες καταστάσεις, η μεταφορά ενέργειας, το complex – formation quenching, οι συγκρούσεις (*collisional quenching*) κ.λ.π. Εν γένει, το φαινόμενο εμφανίζει ισχυρή εξάρτηση στην πίεση και στη θερμοκρασία. Το μοριακό οξυγόνο, τα ιωδιούχα ιόντα και η acrylamide είναι χαρακτηριστικοί χημικοί *quenchers*. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην περίπτωση μας χρησιμοποιούμε συνήθως το διοξείδιο του άνθρακα, το ισοβουτάνιο και άλλα χημικά στοιχεία.

Αν μας ζητούσαν μια πιο λεπτομερή ανάλυση, για την περιγραφή της κίνησης των φορτίων κάτω από την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου, θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε την “*φόρμουλα του Langevin*”. Για μια πιο αναλυτική παρουσίαση μπορείτε να διαβάσετε το υποκεφάλαιο 3.4.9 της μεταπτυχιακής εργασίας του Στάθη Καρέντζου, που έχει τίτλο “*Μελέτη της παροχής του αερίου στους ανιχνευτές Micromegas*”.

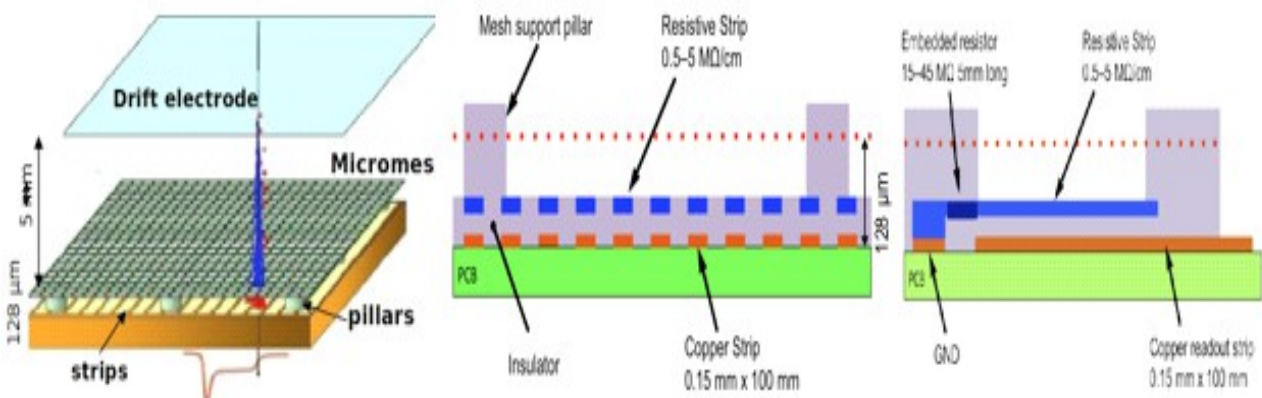
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3°

### ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ MICROMEGAS ΚΑΙ ΤΟΥ ΔΙΑΝΟΜΕΑ ΡΟΗΣ ΑΕΡΙΟΥ (MANIFOLD)

#### 3.1 Μεταβλητές Ενίσχυσης του Αερίου (Gas Gain Variations)

Στο εργαστήριο παρατηρήσαμε ότι υπάρχει εξάρτηση του Gain του ανιχνευτή α) από περιβαλλοντικές παραμέτρους (*πίεση, θερμοκρασία*), β) από μεταβλητές που σχετίζονται με το ίδιο το αέριο ή με τη ροή του αερίου (*gas flow*), γ) από μεταβλητές που σχετίζονται με την αναλογία του μείγματος των αερίων (*mixing ratio*) και δ) από την γεωμετρία του ανιχνευτή μας (*amplification gap size*).

Οι μεταβολές αυτές του Gain, μπορούν να μετρηθούν σχετικά εύκολα από την μελέτη του σήματος που προέρχεται από τη μετατροπή των κβάντων της πηγής (π.χ. πηγή *σιδήρου Fe<sup>55</sup>*) του αερίου.



**Εικόνα 5a,b,c:** Στην παραπάνω εικόνα, παρατίθενται τα μέρη που αποτελούν τον ανιχνευτή Micromegas. (*amplification gap, consersion gap, pillars, strips, drift electrode*).

### 3.1.1 Ατμοσφαιρική πίεση (*atmospheric pressure*)

Για σταθερή ροή αερίου, όσο η πίεση μειώνεται, τόσο μειώνεται και η πυκνότητα των μορίων του αερίου, δηλαδή, τα ηλεκτρόνια της χιονοστοιβάδας αποκτούν μεγαλύτερη ενέργεια μεταξύ των συγκρούσεων με τα μόρια του αερίου και κατ' αντιστοιχία αυξάνεται το κλάσμα των συγκρούσεων ιονισμού. Παράλληλα, έχουμε αύξηση της μέσης ελεύθερης διαδρομής των σωματιδίων (η ενεργός διατομή ιονισμού και η πυκνότητα του αερίου μειώνονται). Σαν αποτέλεσμα, υπάρχει μέγιστο του Gain συναρτήσει της πίεσης, για δεδομένη θερμοκρασία (T) και μέγεθος της περιοχής πολλαπλασιασμού (*εξάρτηση της πίεσης p από την T και το amplification gap size, AGS*).

### 3.1.2 Θερμοκρασία του αερίου (*gas temperature*)

Παρομοίως με την πίεση, έτσι και η θερμοκρασία επηρεάζει την πυκνότητα των μορίων του αερίου και κατ' επέκταση το Gain. Η πυκνότητα των μορίων του αερίου με τη βοήθεια του νόμου των ιδανικών αερίων θα είναι:

$$n = \frac{P}{kT} (V=1) \quad (3.1.2a)$$

### 3.1.3 Περιοχή Πολλαπλασιασμού (*amplification gap size*)

Μεταβολές στο *amplification gap*, επηρεάζουν την ομοιομορφία του Gain στην περιοχή του *mesh* και βασίζονται στην κατασκευή του ίδιου του ανιχνευτή (*bulk Micromegas*). Για δεδομένη τάση πλέγματος (*grid voltage* ή *mesh voltage*), πίεση, θερμοκρασία και αέριο, ο αριθμός των ιονιστικών συγκρούσεων ανά μονάδα μήκους (*Townsend coefficient, a*) εξαρτάται από την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, E. Βλέπουμε ότι το Gain εξαρτάται από το πεδίο και από το εύρος της περιοχής πολλαπλασιασμού, x, βάσει της σχέσης:

$$G = e^{(ax)} \quad (3.1.3a)$$

x : περιοχή πολλαπλασιασμού (*amplification gap size*),  
a : αριθμός Townsend, αριθμός ιονιστικών συγκρούσεων ανά μονάδα μήκους.

Συνέπεια αυτού, είναι η εμφάνιση μέγιστου του Gain συναρτήσει του gap. Στα μείγματα του αερίου αργού, το διάστημα αυτό είναι περίπου ίσο με 55 μm. Πάνω από αυτή την τιμή, το *Gain* είναι φθίνουσα συνάρτηση του *gap(x)*, καθώς το χαμηλότερο πεδίο δεν μπορεί να αντισταθμίσει την μεγάλη απόσταση για την δημιουργία της χιονοστοιβάδας.

---

από το paper των C.Adloff, M. Chefdeville, A. Espargiliere, R.Gaglione

### 3.1.4 Αναλογία του μίγματος του αερίου (*gas mixing ratio*)

Λόγω της αναλογικότητας του ανιχνευτή μας, έχουμε ένα μείγμα αερίου που αποτελείται από ένα ευγενές αέριο (μη ηλεκτραρνητικό) και από ένα μοριακό αέριο που χρησιμοποιείται σαν *quencher*. Τα αέρια που χρησιμοποιούνται σαν *quencher*, απορροφούν την ενέργεια των ηλεκτρονίων, λόγω των ταλαντωτικών και περιστροφικών τους κινήσεων (και σταθμών) που εμφανίζονται στις χαμηλές ενέργειες (μερικά keV). Βλέπουμε ότι το gain μειώνεται όσο αυξάνεται η συγκέντρωση του *quencher*.

### 3.1.5 Ροή αερίου (*gas flow*)

Όταν έχουμε χαμηλή ροή αερίου, η συγκέντρωση των ηλεκτραρνητικών προσμίξεων (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>) είναι πιθανό να ευθύνονται για την απώλεια σήματος, λόγω ηλεκτρονιακών συλλήψεων (*electron attachment*). Άρα, η ενεργός διατομή σύλληψης συγκεκριμένου ηλεκτραρνητικού είδους, εξαρτάται από την ενέργεια των ηλεκτρονίων και από την ένταση του πεδίου. Γι' αυτό το λόγο, η σύλληψη μπορεί να συμβεί είτε στην περιοχή ολίσθησης (*drift region*) είτε στην περιοχή πολλαπλασιασμού (*amplification gap*).

Όπως έχουμε ήδη επισημάνει (σχέση 3.1.3α), το Gain είναι ανάλογο του αριθμού των ιονισμών που παράγονται από το αρχικό ηλεκτρόνιο της χιονοστοιβάδας, όπου το  $\alpha$  είναι ο συντελεστής Townsend και το  $x$  είναι το *amplification gap size*. Μια συνηθισμένη παραμετροποίηση του  $\alpha$ , δίνεται από τους **Rose – Korff**:

$$\frac{\alpha}{n} = A_0 e^{(-i \frac{B_0 n}{E})} \quad (3.1.5a)$$

όπου το  $n$  είναι η πυκνότητα του αερίου και  $A_0$ ,  $B_0$  σταθερές του αερίου. Αν συνδυάσουμε αυτές τις δύο μαζί με την σχέση των ιδανικών αερίων (3.1.5b),(3.1.5c):

$$n = \frac{(N_A P)}{RT} \quad (3.1.5b)$$

$$V_{mesh} = E x \quad (3.1.5c)$$

έχουμε λοιπόν:

$$G = \exp\left(\frac{APx}{T} \exp\left(\frac{-BPx}{TV}\right)\right) \quad (3.1.5d)$$

$$\left(\frac{Px}{T}\right)^* = \frac{V}{B} \quad (3.1.5e)$$

που είναι μια από τις ιδιότητες ενός ανιχνευτή Micromegas αλλά και γενικότερα κάθε ανιχνευτικού συστήματος με παράλληλες επιφάνειες που δουλεύει στην αναλογική περιοχή.

Ισχύουν επίσης:

$$\frac{\Delta G}{G} = C_P \Delta P + C_T \Delta T + C_g \Delta g \quad (3.1.5f)$$

$$C_P = \frac{1}{G} \frac{(\partial G)}{(\partial P)} = \exp\left(\frac{-BPg}{TV}\right) \left(\frac{Ag}{T} - \frac{ABPg^2}{(T^2V)}\right) \quad (3.1.5fa)$$

$$C_T = \frac{1}{G} \frac{(\partial G)}{(\partial T)} = \exp\left(\frac{-BPg}{TV}\right) \left(\frac{ABg^2P^2}{(T^3V)} - \frac{APg}{T^2}\right) \quad (3.1.5fb)$$

$$C_g = \frac{1}{G} \frac{(\partial G)}{(\partial g)} = \exp\left(\frac{-BPg}{TV}\right) \left(\frac{AP}{T} - \frac{ABgP^2}{(T^2V)}\right) \quad (3.1.5fc)$$

### 3.2 Βασικές ιδιότητες του ανιχνευτή Micromegas σε μίγματα αερίου Ar 93% : CO2 7% – απόδοση (*efficiency*)

Ως απόδοση (*efficiency*), ορίζεται ένα σωματίδιο ή μια ακτινοβολία συγκεκριμένης ποσότητας, η οποία προσδιορίζεται από το λόγο του αριθμού των ανιχνεύσιμων σωματιδίων προς το συνολικό αριθμό των σωματιδίων που πέρασαν από τον ενεργό όγκο του ανιχνευτή και θα έπρεπε να μετρηθούν.

Συγκρίνοντας τον αριθμό των γεγονότων που “βλέπει” ο ανιχνευτής Micromegas, με τον αριθμό των γεγονότων που θα έπρεπε να “δει”, μπορούμε να βρούμε την απόδοση από την ακόλουθη σχέση:

$$\varepsilon = \frac{(\# M\Omega)}{(\# Sc * f_{geom})} \quad (3.2a)$$

όπου  $\# M\Omega$ : είναι ο αριθμός των τριπλών (*threefold*) γεγονότων, δηλαδή των τριών σημάτων από τον Micromegas & τους δυο scintillators, που βρίσκονται σε σύμπτωση,

$\# Sc$ : είναι ο αριθμός των διπλών γεγονότων από τους scintillators &

$f_{geom}$ : είναι ένας διορθωτικός παράγοντας, ο οποίος αναφέρεται στην επιφάνεια που καλύπτουν οι δυο scintillators, συγκρινόμενη με την επιφάνεια του Micromegas.

Όπως αναμένεται, η κατανομή των μιονίων ακολουθεί την ασύμμετρη κατανομή Landau, μιας και ο ανιχνευτής Micromegas, συγκαταλέγεται στην κατηγορία των *λεπτών ανιχνευτών* (*thin detectors*). Αυτό που παρατηρούμε από μια κατανομή μιονίων, είναι η πλάτυνση στην κατανομή της ενέργειας συγκρινόμενη με την κατανομή *Landau*. Αυτή η πλάτυνση, οφείλεται σε τέσσερις παραμέτρους:

**A.** Την ασύμμετρία της ενεργειακής απώλειας, λόγω της παραγωγής των δ – ηλεκτρονίων.

**B.** Την κατανομή της ορμής των κοσμικών μιονίων.

**Γ.** Την γωνιακή κατανομή των τροχιών των κοσμικών μιονίων στον ανιχνευτή MicroMeGaS.

**Δ.** Την ενεργειακή διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή MicroMeGaS.

Η απόδοση (*efficiency*) ενός ανιχνευτή, είναι η πιθανότητα της διελεύσεως ενός σωματιδίου από την περιοχή μετατροπής μέσω του micromesh στην περιοχή ενίσχυσης. Εξαρτάται κυρίως, από την διαμόρφωση του πεδίου αλλά και κατά ένα μικρότερο ποσοστό από την εγκάρσια διάχυση των ηλεκτρονίων. Στους ανιχνευτές Micromegas, η συλλογή των ηλεκτρονίων βελτιώνεται με την συμπίεση των δυναμικών γραμμών στην περιοχή του micromesh. Ο παράγοντας “συμπίεσης” (*compression factor*), για να είμαστε πιο ακριβείς, ο λόγος της επιφανειακής ενεργού διατομής (*funnel cross section areas*) του ηλεκτροδίου της καθόδου και της ανόδου, είναι ίσος με το λόγο των πεδίων σε αυτά. Επομένως, για δοσμένη τάση στο mesh η απόδοση βελτιώνεται με τη μείωση του ηλεκτρικού πεδίου στο drift. Πάνω από μια συγκεκριμένη τιμή του λόγου των πεδίων, η απόδοση προσεγγίζει την τιμή 1, αφού σχεδόν όλα τα ηλεκτρόνια θα περάσουν στην περιοχή ενίσχυσης.

Παρατηρούμε ότι, στην αρχή το centroid αυξάνεται με την αύξηση του λόγου των πεδίων, όσο η ικανότητα συλλογής φορτίου βελτιώνεται. Έπειτα έχουμε, φθίνουσα πορεία με αύξηση του *field ratio* (*FR*) μέχρι ένα τοπικό ελάχιστο και μετά αυξάνεται ξανά με περαιτέρω αύξηση του *field ratio*. Αυτή η “ανωμαλία”, μπορεί να εξηγηθεί από το ποσοστό των προσμίξεων του αερίου (αναλογία 80% - 20%). Γενικά, η ενίσχυση (*gain*) μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού του CO<sub>2</sub> στο μίγμα Ar 93% – CO<sub>2</sub> 7%.

Η απόδοση, αυξάνεται με την αύξηση του ποσοστού του διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>, *quencher*), λόγω της δυνατότητας μέτρησης μεγαλύτερου ύψους παλμών, επειδή έχουμε μεγαλύτερο ποσοστό “κατάσβεσης”. Μεγαλύτερο ποσοστό quencher στο μείγμα του αερίου μας, μας επιτρέπει να χρησιμοποιήσουμε υψηλότερες τιμές τάσης, λόγω επιτυχούς καταστολής των *sparks*.

Βεβαίως, αυτό που πρέπει να θυμόμαστε είναι ότι το ύψος του παλμού των μιονίων είναι ένας περιοριστικός παράγοντας (*limiting factor*) στην απόδοση του Micromegas. Μίονια, τα οποία αφήνουν ενέργεια μικρότερη από το κατώφλι του discriminator, δεν ανιχνεύονται.

Η απόδοση του ανιχνευτή μας, για τα MIP's, μειώνεται όσο μειώνεται η διαφάνεια (*electron transparency*) του ανιχνευτή μας. Αυτό συμβαίνει γιατί, όσο τα σήματα που μετράμε μικραίνουν όλο & περισσότερα χάνονται στην περιοχή του θορύβου (*noise baseline*).

Γνωρίζοντας ότι, η παραγωγή των πρωταρχικών ηλεκτρονίων λόγω ιονισμού, είναι μια στατιστικής φύσεως διαδικασία, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την κατανομή Poisson, με αποτέλεσμα η θεωρητική απόδοση του ανιχνευτή (*theoretical efficiency*), αν αυτός ήταν τέλειος, να είναι:

$$\varepsilon = 1 - e^{(-n_p [cm^{-1}] \cdot x [cm])} \quad (3.2b)$$

όπου,  $n_p$ : είναι ο αριθμός των ζευγών ιόντων – ηλεκτρονίων ανά εκατοστό (cm), που παράγονται από τον αρχικό ιονισμό &

X: είναι το μήκος των σωματιδιακών τροχιών του ανιχνευτή.

Για το αέριο αργό, που χρησιμοποιούμε στο εργαστήριο, η τιμή είναι: [K. Nakamura et al. (Particle Data Group), 2010]. Η περιοχή ενίσχυσης στον Micromegas, είναι αρκετά μεγάλη έτσι ώστε να μην έχουμε τέτοιου είδους θέματα. Η θεωρητική απόδοση ενός τέλει φτιαγμένου ανιχνευτή Micromegas, με 2mm περιοχή ολίσθησης, είναι  $\varepsilon = 0.993$  ενώ για ένα αντίστοιχο ανιχνευτή με περιοχή ολίσθησης 6mm, είναι:  $\varepsilon = 10^{-7} - 3.7 \cdot 10^{-7}$ . Τα pillars, τα οποία στηρίζουν το mesh, αποτελούν το 1.1% της επιφάνειας και περιορίζουν την απόδοση του ανιχνευτή.

Η πειραματική απόδοση μπορεί να υπολογιστεί αν συγκρίνουμε τον ρυθμό καταμέτρησης (*counting rate*) των συμπτώσεων από τους δυο scintillators με τον ρυθμό καταμέτρησης των πραγματικών triggers, που δίνονται από τον FADC (*fast analog to digital converter*). Αυτά τα triggers (σκανδαλισμοί), δημιουργούνται όταν το σήμα από τους δύο scintillators συμπίπτει με το σήμα από τον ανιχνευτή Micromegas. Από τη στιγμή που οι δυο scintillators, καταλαμβάνουν τη μεγαλύτερη επιφάνεια από την ενεργό επιφάνεια (*sensitive area*) του Micromegas, για να υπολογίσουμε την πειραματική απόδοση, θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε την τεχνική Monte Carlo. - 37 -

### 3.3 Η Ενίσχυση (*Gain*) συναρτήσεων παραμέτρων του περιβάλλοντος

#### 3.3.1 Συναρτήσεις της πίεσης του αερίου (*Gain – Gas Pressure*)

Η εξάρτηση του *Gain* από την πίεση, προσδιορίζεται με σταθερή θερμοκρασία (εύρος,  $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ ). Με τη βοήθεια της σχέσης (3.1.5d) μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την παραμετροποίηση:

$$G(P) = \exp[A_1 P \exp(-B_1 P)] \quad (3.3.1a)$$

όπου οι σταθερές είναι ίσες με:

$$A_1 = \frac{Ax}{T} \text{ και } B_1 = \frac{Bx}{TV} \rightarrow A = 0.11 \text{ K mbar} / \mu\text{m} \text{ και } B = 2.34 \text{ KV mbar} / \mu\text{m} \quad (3.3.1b)$$

Άρα, η σχετική μεταβολή του *gain* για αλλαγή της πίεσης 1 mbar, είναι: = 0.63% / mbar, που είναι μια καλή προσέγγιση με βάση την τιμή που παίρνουμε από την *Gain Curve*, δηλαδή, - 0.46% / mbar.

#### 3.3.2 Συναρτήσεις της Θερμοκρασία (*Gain – Temperature*)

Η εξάρτηση του *Gain* από τη θερμοκρασία, προσδιορίζεται με σταθερή πίεση (εύρος,  $\Delta P = 1 \text{ mbar}$ ). Με τη βοήθεια της σχέσης (3.1.5d) μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την παραμετροποίηση:

$$G(T) = \exp\left[\frac{A_1}{T} \exp\left(\frac{-B_1}{T}\right)\right] \quad (3.3.2)$$

με τιμές  $A_1 = 0.11 \text{ K mbar} / \mu\text{m}$  και  $B_1 = 2.33 \text{ KV mbar} / \mu\text{m}$ , βρίσκουμε ότι η σχετική μεταβολή του *gain* συναρτήσεων των μεταβολών της θερμοκρασίας είναι: = 2.01 % / K, το οποίο είναι καλή προσέγγιση της τιμής 1.5 % / K, που παίρνουμε από το *gain curve*.

#### 3.3.3 Συναρτήσεις της Περιοχής Πολλαπλασιασμού (*Gain – Amplification gap size*)

Για να μετρήσουμε την μεταβολή του *gain*, λόγω διαφορετικού μεγέθους του *amplification gap* χρειάζονται ανιχνευτές διαφορετικού μεγέθους. Από πειράματα, βρέθηκε ότι για τιμή του λόγου  $(Px/T)^* = 268 \text{ mbar} / \mu\text{m}$  και για  $V_{\text{mesh}} = 570 \text{ V}$ , το *gap* έχει μήκος  $x = 83 \mu\text{m}$  ( $B = 2.12 \text{ KV mbar} / \mu\text{m}$ ). Για τη δική μας περίπτωση που έχουμε  $x = 128 \mu\text{m}$ , για θερμοκρασία δωματίου και πίεση 635 mbar πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τάση:  $V_{\text{mesh}} = 880 \text{ V}$ . Η τάση αυτή του *mesh*, είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθεί πειραματικά, διότι στο ανιχνευτή μας μετά τα 655 - 658 V, ξεκινούν τα *sparks!* Συνεπώς, θα πρέπει να αλλάξουμε κάποιες άλλες παραμέτρους για να πετύχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα. Τέλος, για πίεση 963 mbar, θερμοκρασία δωματίου 298 K, *grid voltage*, και  $x = 128 \mu\text{m}$  βρίσκουμε,  $C_g = 3.5 - 4.7\% / \mu\text{m}$ .

### 3.3.4 Συναρτήσεις του μίγματος αερίου (*Gain – Gas Mixture*)

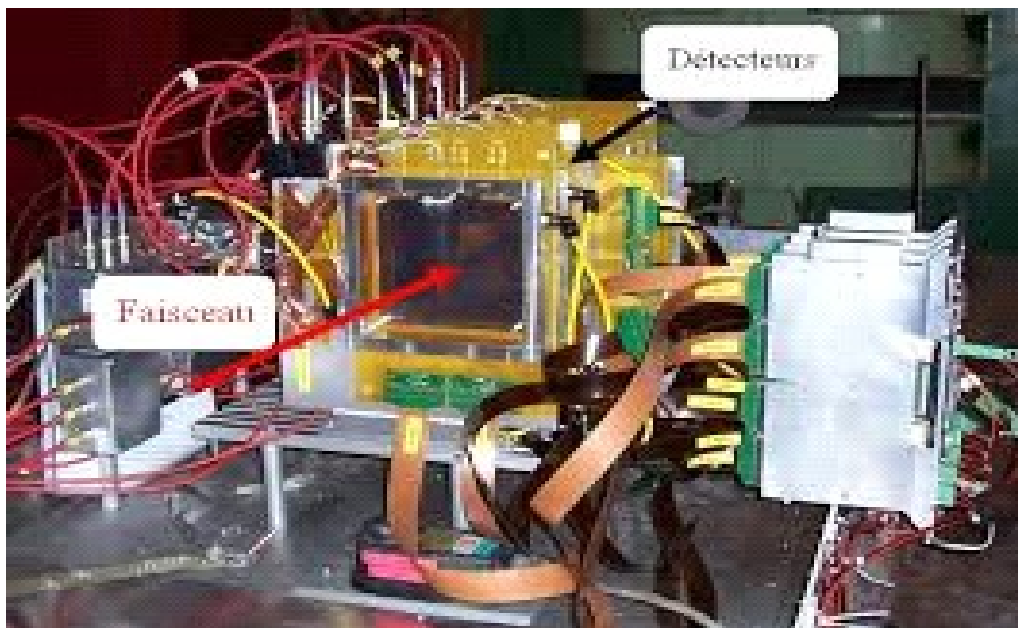
Για να δούμε την εξάρτηση του gain από την αναλογία του μείγματος, αλλάζουμε την αναλογία του quencher με βήμα π.χ. 2%. Αυτό επιτυγχάνεται αν διοχετεύσουμε το αέριο από δυο διαφορετικές μπουκάλες, η μια με Ar και η άλλη με CO<sub>2</sub> με αρχικό λόγο Ar : CO<sub>2</sub>, για παράδειγμα 80 % : 20 % και τελικό 88 % : 12 %. Η πίεση είναι 958 mbar και η θερμοκρασία 298 K. Βρέθηκε ότι η μεταβολή της συγκέντρωσης του αερίου κατά 1% προκαλεί μεταβολή του gain κατά 18%.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο

### ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΔΙΑΝΟΜΕΑ ΡΟΗΣ ΑΕΡΙΟΥ (*MANIFOLD*) ΓΙΑ ΔΥΟ ΕΙΔΩΝ ΑΕΡΙΑ (Argon 100%, Ar 93% – CO<sub>2</sub> 7%)

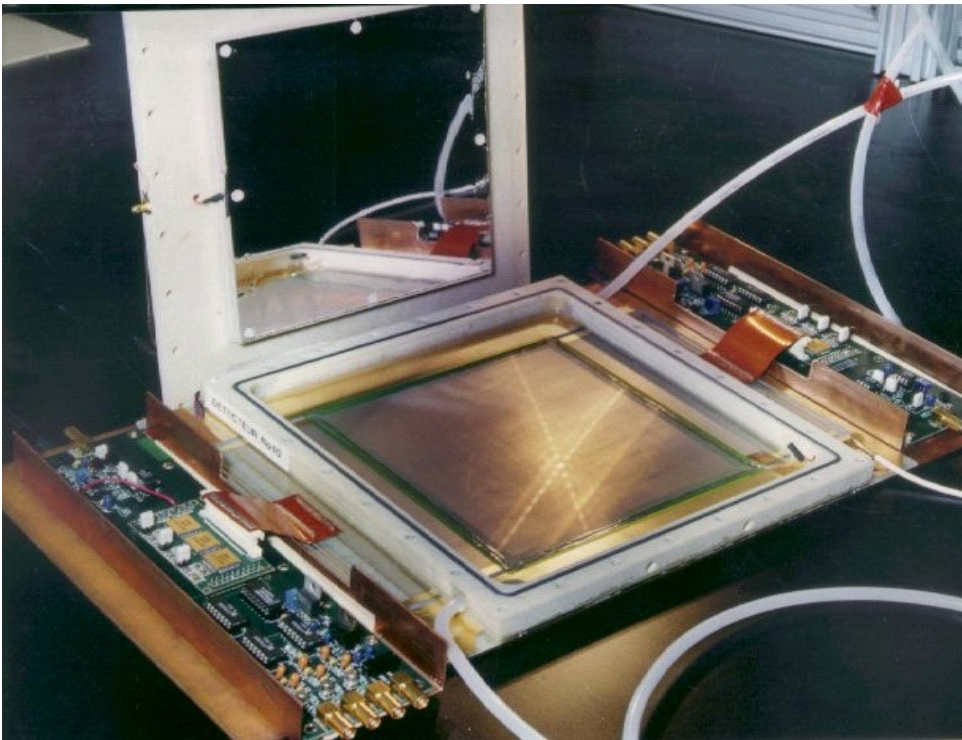
Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, θα παρουσιάσουμε τις προσομοιώσεις που έγιναν για το διανομέα ροής αερίου και τα διάφορα εξαρτήματά του. Η πραγματοποίηση αυτών των προσομοιώσεων έγινε με σκοπό την επαλήθευση των γενικών αρχών λειτουργίας και ροής του διανομέα ροής αερίου και των εξαρτημάτων του αλλά και για να αποτυπωθεί το πόσο καλά λειτουργούν αυτές οι τεχνικές.

Στην αρχή θα πρέπει να δείξουμε την γενική εικόνα που θα απεικονίζει το σύστημα με όλα τα εξαρτήματα του διανομέα ροής αερίου μαζί με τους ανιχνευτές Micromegas. Η γενική αυτή εικόνα είναι η εικόνα 5. Ο διανομέας ροής αερίου είναι το εξιδεικευμένο εξάρτημα που τροφοδοτεί με αέριο τους ανιχνευτές Micromegas. Ενώνεται με τα τρία βύσματα (1: in, 2: out, 3: gap) του ανιχνευτή Micromegas και το τροφοδοτεί με αέριο αργό στην προκειμένη περίπτωση. Έτσι γλιτώνουμε την διασύνδεση του ανιχνευτή μας από τρία ασύνδετα καλώδια και εξοικονομούμε χώρο. Η εικόνα 6 απεικονίζει έναν ανιχνευτή Micromegas στο εργαστήριο.



**Εικόνα 5:** Η

παραπάνω εικόνα απεικονίζει συνδεδεμένο το σύστημα του διανομέα ροής αερίου + ανιχνευτών Micromegas στο εργαστήριο. Παρατηρούμε τις τέσσερις διακλαδώσεις του διανομέα ροής αερίου που συνδέονται με τα τρία βύσματα του ανιχνευτή Micromegas.



**Εικόνα 6:** Η παραπάνω εικόνα απεικονίζει έναν ανιχνευτή *Micromegas*.

Στη συνέχεια, θα μελετήσουμε αποκλειστικά τον διανομέα ροής αερίου και το πως κυκλοφορεί το αέριο στον εσωτερικό του χώρο με τη βοήθεια των προσομοιώσεων.

Όλες οι προσομοιώσεις έγιναν με το πρόγραμμα COMSOL MULTIPHYSICS 4.4. Τα συγκεκριμένα προγράμματα χρησιμοποιούν την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, με βασική αρχή λειτουργίας, τον διαχωρισμό της γεωμετρίας του εκάστοτε προβλήματος, σε επιμέρους μικρότερα τμήματα (*στοιχεία*). Η γενική λύση του προβλήματος, αποτελεί τη μέση τιμή των επιμέρους λύσεων, με βάση πάντα τις συνοριακές συνθήκες. Ο διαχωρισμός της γεωμετρίας, γίνεται με την κατασκευή ενός πλέγματος (*mesh*) από κόμβους (*nodes*), το οποίο είναι πυκνότερο στα σημεία εφαρμογής των συνοριακών συνθηκών και πιο αραιό σε περιοχές που επηρεάζουν ελάχιστα τη λύση μας.

#### 4.1 Προσομοιώσεις του διπλού “Y” – σωλήνα (*double Y – tube*)

Σε αυτό το σημείο θα παραθέσουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του διανομέα ροής αερίου με τη χρησιμοποίηση του προγράμματος COMSOL MULTIPHYSICS 4.4. Αρχικά ξεκινήσαμε με την τρισδιάστατη προσομοίωση κάθε εξαρτήματος του διανομέα ξεχωριστά έτσι ώστε να μελετήσουμε σταδιακά την παροχή του υπό μελέτη αερίου στο κάθε εξάρτημα και στη συνέχεια συνολικά σε ολόκληρη την πειραματική διάταξη του διανομέα.

Στη συγκεκριμένη παράγραφο θα παρουσιάσουμε τις τρισδιάστατες απεικονίσεις του διπλού Y σωλήνα (*double “Y” tube*) και του διανομέα ροής αερίου (*manifold*) και τα διαγράμματα (*plots*) τους. Αυτά αναφέρονται στα διαγράμματα I. ροής αερίου (*gas flow*), II. πλέγματος (*mesh*), III. ταχύτητας στο κέντρο (*slice velocity*), IV. παροχής (*velocity magnitude*), V. εσωτερικής πίεσης της ροής του αερίου (*pressure*) και τον υπολογισμό της εμπέδησης Z (*impedance*) του υπό μελέτη αερίου.

Οι προσομοιώσεις (*simulations*) γίνονται για να υπολογίσουμε την ταχύτητα στο κέντρο, την εσωτερική πίεση και την εμπέδηση Z του υπό μελέτη αερίου. Η γνώση των τιμών των μεταβλητών αυτών, είναι χρήσιμη για την μελέτη της συμπεριφοράς του υπό μελέτη αερίου στον εσωτερικό χώρο του διπλού Y σωλήνα και στη συνέχεια στον εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου.

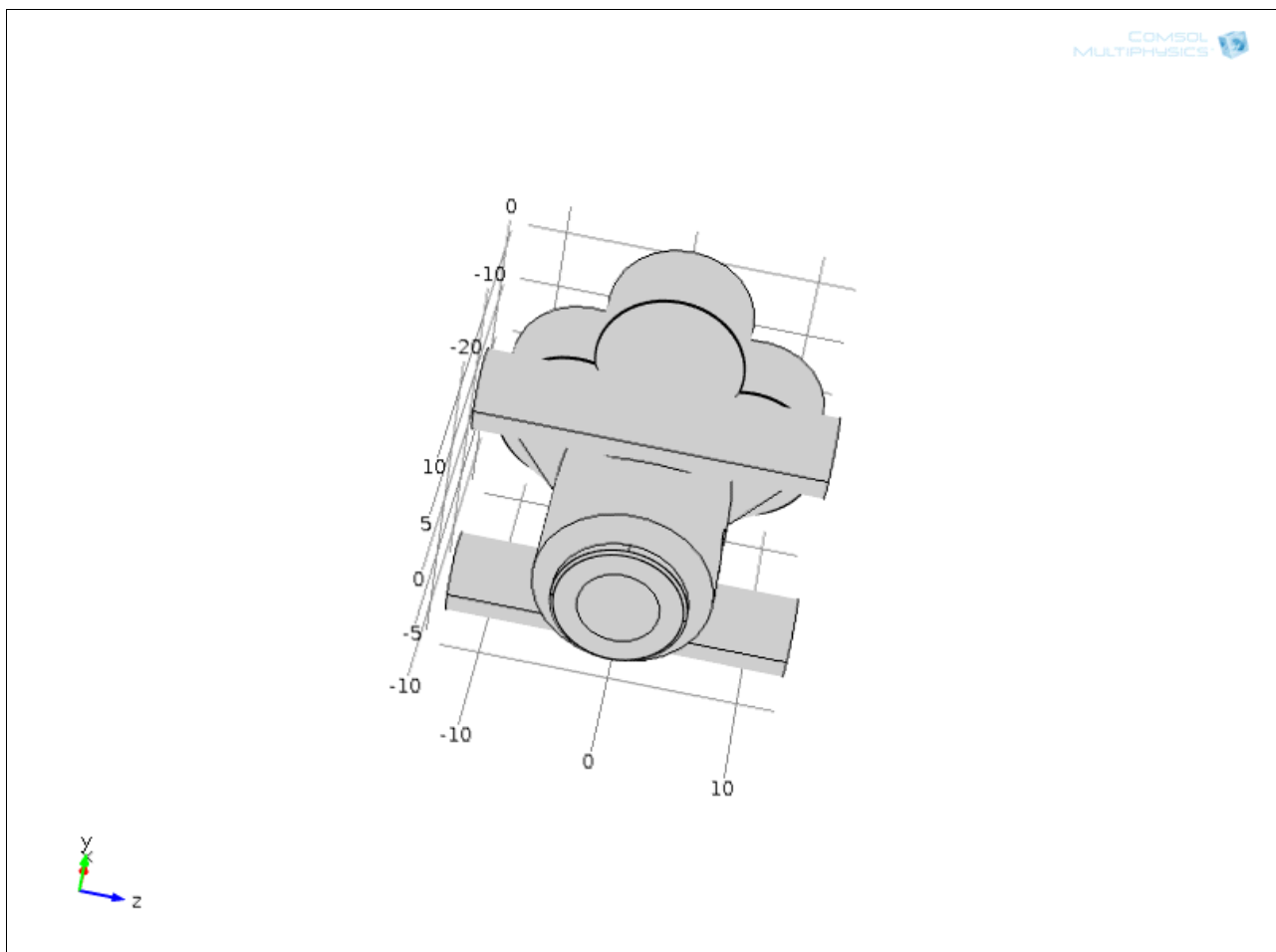


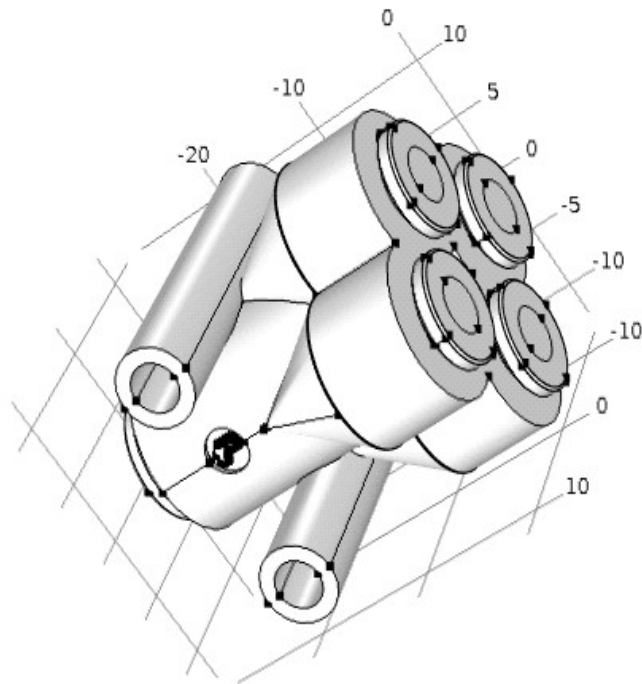
#### 4.1.1 Προσομοιώσεις του διπλού “Y”– σωλήνα (double “Y” – tube), όταν στο εσωτερικό του διαρρέεται από αέριο αργό

Για να δούμε αν λειτουργούν σωστά τα εξαρτήματα προσομοιώνουμε το κάθε εξάρτημα ξεχωριστά με τη χρήση του προγράμματος COMSOL MULTIPHYSICS 4.4. Επιλέγουμε ένα εξάρτημα τυχαία. Έστω ότι είναι το *double “Y” piece equal & unequal*. Στη συνέχεια, παραθέτουμε την τρισδιάστατη απεικόνιση του συγκεκριμένου εξαρτήματος.

Αρχικά, στην πρώτη προσομοίωση χρησιμοποιούμε κάποιο αέριο που έχει συγκεκριμένες προδιαγραφές (συγκεκριμένη τιμή *viscosity*, *atmospheric pressure*, *βρίσκεται σχετικά εύκολα στη φύση*) που μας κάνουν για την προσομοίωση του σωλήνα και επιπλέον έχει ένα σημαντικό πλεονέκτημα, το ότι είναι φθηνό. Ύστερα από κάποια σχετική έρευνα, καταλήγουμε στο αέριο αργό.

Στη συνέχεια, παραθέτουμε την τρισδιάστατη γεωμετρία του εξαρτήματός μας με τη βοήθεια του προγράμματος COMSOL MULTIPHYSICS 4.4 σε διαφορετικές γωνίες, ώστε να παρατηρήσουμε τις ιδιότητες ροής (*Fluid properties*) του double “Y” tube.



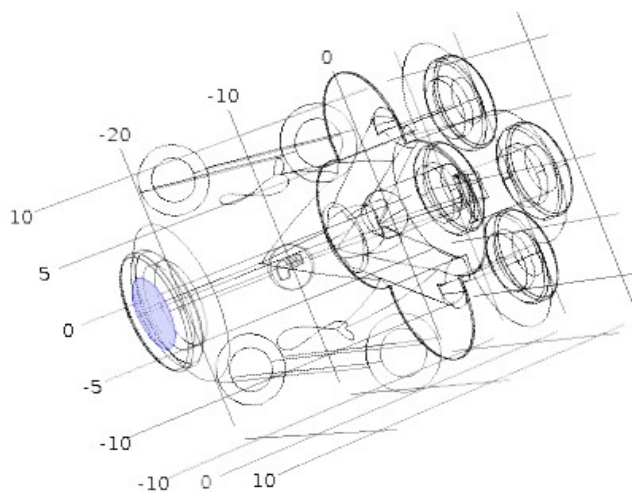


**Εικόνα 7a, 7b:** Το τρισδιάστατο μοντέλο του double “Y” – tube. Η τρισδιάστατη γεωμετρία του μοντέλου μας σε διαφορετικές γωνίες.

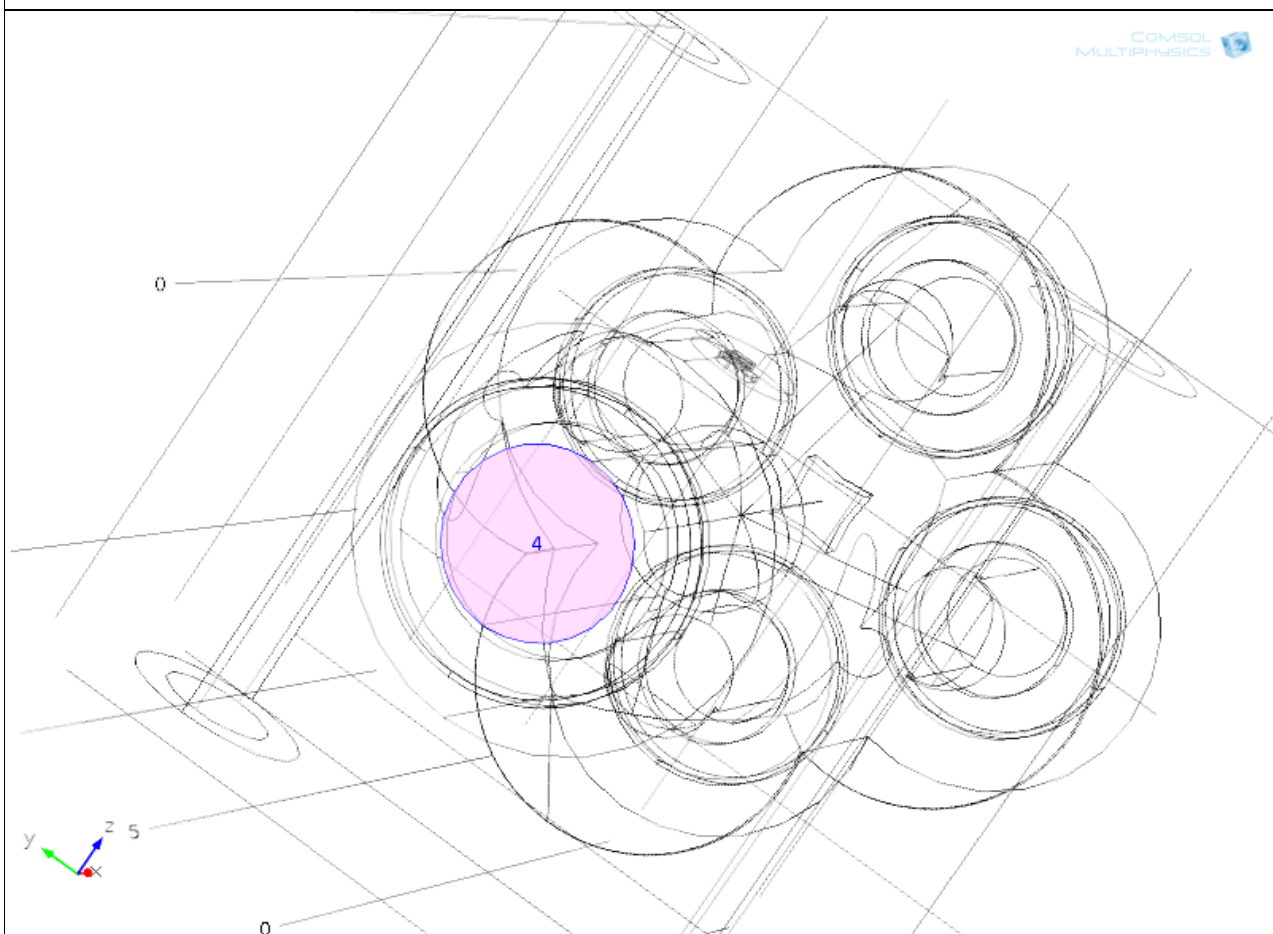
Στο επόμενο βήμα της προσομοίωσης είναι να βρούμε την περιοχή *inlet* στην τρισδιάστατη γεωμετρία του διπλού “Y” σωλήνα. Η περιοχή *inlet* είναι η περιοχή εισόδου του αερίου αργό μέσα στο εσωτερικό του διπλού “Y” σωλήνα. Στο παρακάτω σχήμα (εικόνα 8a,8b), παρατηρούμε την μπλε επιφάνεια που είναι ο χώρος εισόδου του αερίου αργό. Στα προηγούμενα σχήματα (εικόνες 7a, 7b), φαίνεται η γεωμετρία του διπλού “Y” σωλήνα σε γωνία 45 μοίρες και 135 μοίρες αντίστοιχα. Το σημείο στο κέντρο της περιοχής αυτής, είναι το σημείο που μετράμε το *input velocity*, δηλαδή την ταχύτητα ροής του αερίου, όταν το αέριο αργό αρχίζει να διέρχεται στο εσωτερικό του διπλού “Y” σωλήνα.

## Images INLET (double “Y” – tube)

COMSOL  
MULTIPHYSICS

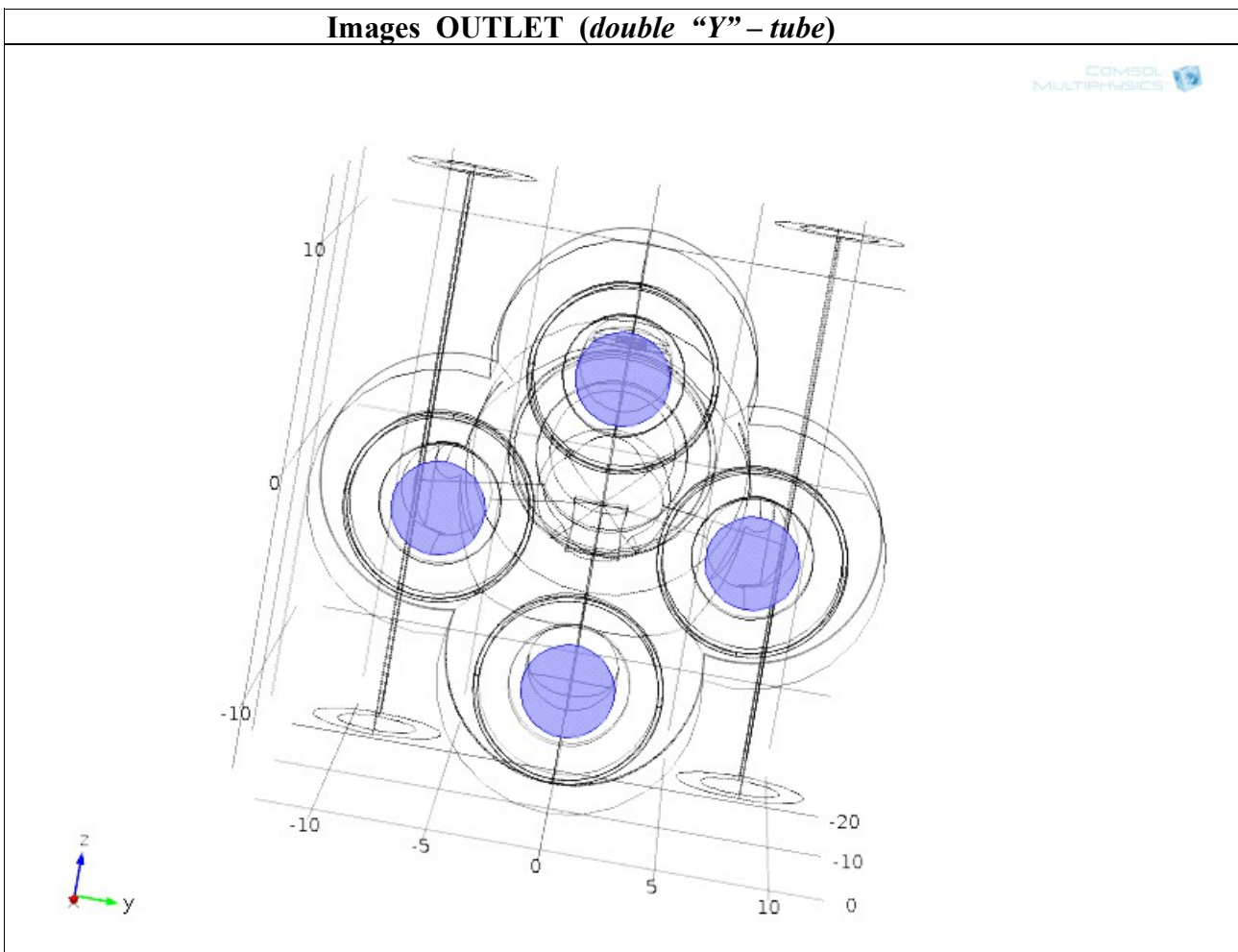


COMSOL  
MULTIPHYSICS



**Εικόνα 8a,8b:** Η μπλε περιοχή της εισόδου του double “Y” – tube, αποτελεί την περιοχή εισόδου του συγκεκριμένου σωλήνα. Στο δεύτερο σχήμα, η περιοχή έχει πάρει χρώμα ροζ και έχει μεγενθυθεί κατά 200%

Επόμενο βήμα της προσομοίωσης είναι να βρούμε την *περιοχή εξόδου* του αερίου αργού στη τρισδιάστατη γεωμετρία του *double “Y” tube*. Όπως παρατηρούμε από τα παρακάτω σχήματα (εικόνα 9), η περιοχή εξόδου του αερίου, αποτελείται από τέσσερις κλάδους της επιφάνειάς της. Έτσι, το αέριο αργό εισέρχεται από μια περιοχή εισόδου στο εσωτερικό του διπλού “Y” σωλήνα και εξέρχεται από τέσσερις περιοχές εξόδου. Στα τέσσερα σημεία, που βρίσκονται στο κέντρο των τεσσάρων περιοχών εξόδου (*περιοχές outlet*) του αερίου μετράμε τις τέσσερις *output velocities*, δηλαδή τις τέσσερις τιμές της ταχύτητα ροής του αερίου, όταν το αέριο αρχίζει να εξέρχεται από τον εσωτερικό χώρο του διπλού “Y” σωλήνα. Στα σχήματα (εικόνες 10α, 10b), η 3D γεωμετρία του διπλού “Y” σωλήνα βρίσκεται σε γωνία 45 μοιρών σε σχέση με την κανονική θέση της 3D γεωμετρίας του σωλήνα.



**Εικόνα 9:** Οι 4 μπλε περιοχές της εξόδου του *double “Y” – tube*, αποτελούν τις *output περιοχές* του συγκεκριμένου σωλήνα. Στο δεύτερο σχήμα, η περιοχή έχει μεγενθυθεί κατά 200% για να είναι καλύτερά αντιληπτή.

Το επόμενο βήμα της προσομοίωσης είναι να παρατηρήσουμε τη γεωμετρία του διπλού “Y” σωλήνα σε διαφορετικές γωνίες, για να δούμε αν υπάρχει εξάρτηση μεταξύ της ροής αερίου και της βαρύτητας του σωλήνα. Από την παρατήρησή των παρακάτω σχημάτων (εικόνες 11α, 11b), αντιλαμβανόμαστε ότι η βαρύτητα του σωλήνα δεν περιορίζει τη ροή του αερίου στο εσωτερικό του σωλήνα. Αυτό μπορεί να οφείλεται λόγω της μεγάλης ταχύτητας ροής που παρατηρούμε στο εσωτερικό του σωλήνα ( $0.55 \text{ m/s}$ ) αλλά και λόγω του μικρού μεγέθους των μορίων του αερίου.

Το επόμενο βήμα της προσομοίωσης είναι να βρούμε το χώρο που κινείται το αέριο στο εσωτερικό χώρο του διπλού “Y” σωλήνα και να βρούμε πως κατανέμεται η ροή του αερίου. Έχοντας το μυαλό στην θεωρία της Ρευστοδυναμικής, διερευνούμε τους τρόπους ροής του αερίου στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Y” σωλήνα και έτσι μπορούμε να βρούμε απαντήσεις στα παρακάτω ερωτήματα:

a) ποιος είναι ο χώρος όπου επικρατεί μόνο η στρωτή ροή (*laminar flow*) του αερίου αργού στο εσωτερικό του διπλού “Y” σωλήνα?

b) ποιος είναι ο χώρος όπου επικρατεί μόνο η τυρβώδης ροή (*turbulent flow*) του αερίου στο εσωτερικό του διπλού “Y” σωλήνα?

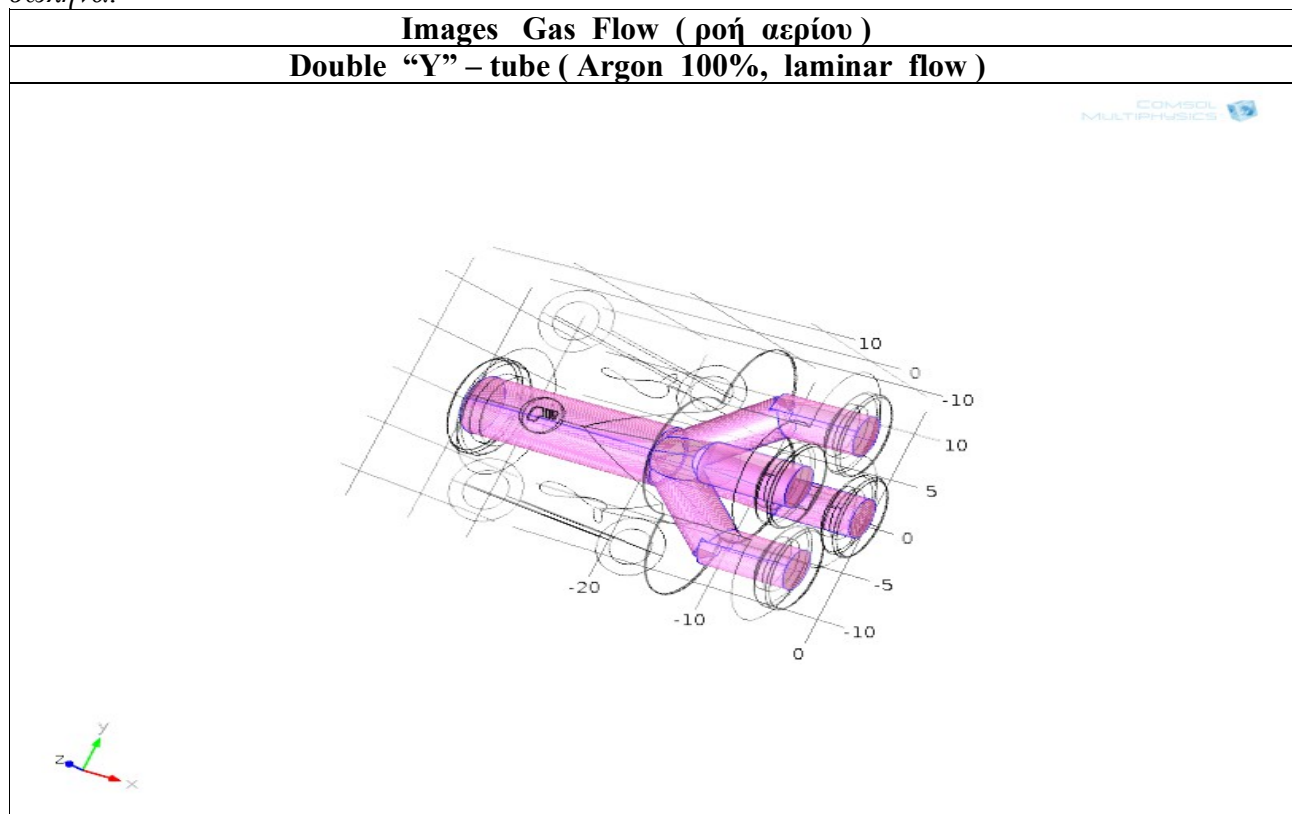
c) ποιος είναι ο χώρος όπου κυριαρχεί η στρωτή ροή (*laminar flow*) του αερίου αλλά σε κάποια σημεία σε τοπικό επίπεδο υπάρχει και η τυρβώδης ροή (*turbulent flow*) στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Y” σωλήνα?

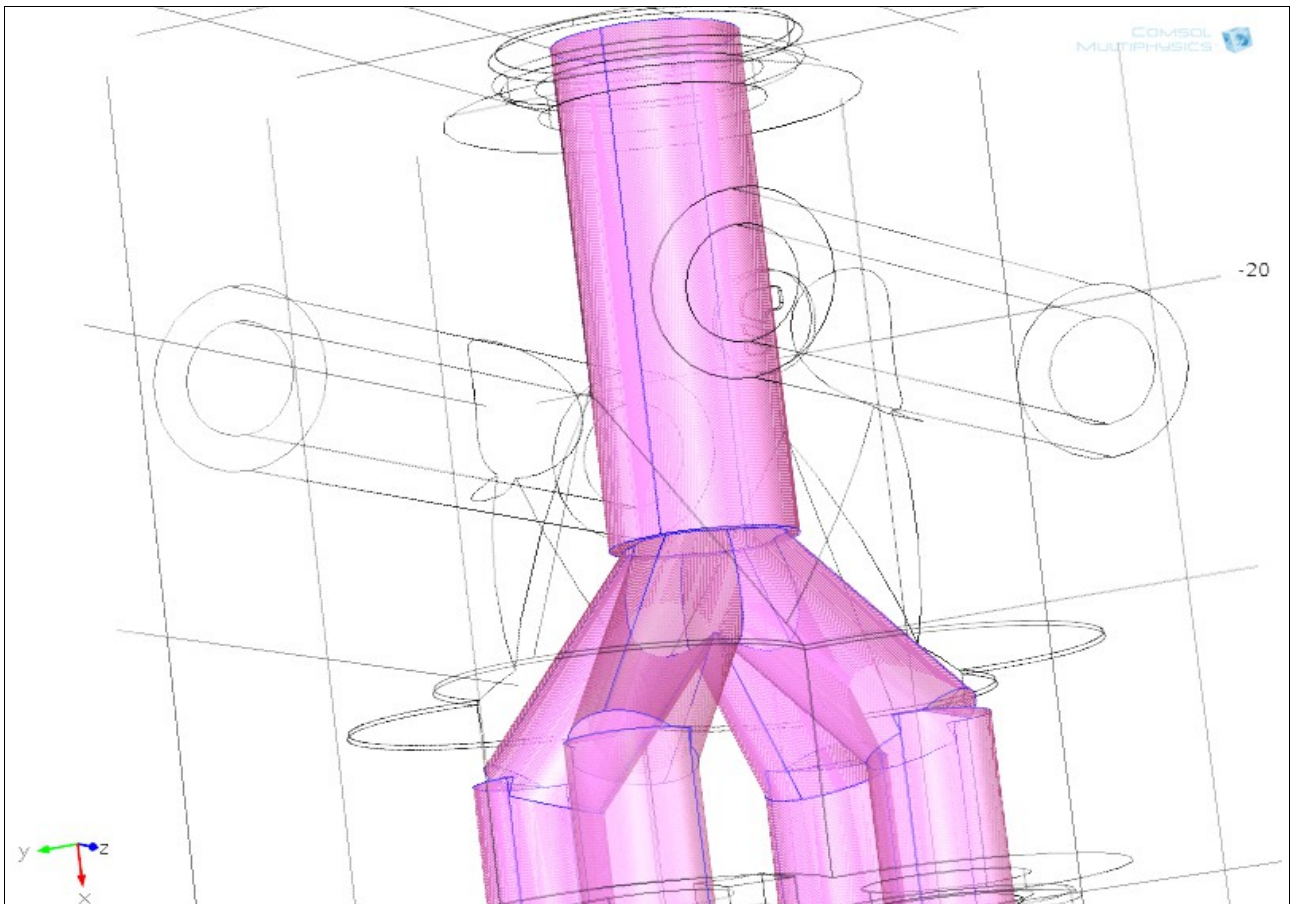
d) ποιος είναι ο χώρος όπου κυριαρχεί η τυρβώδης ροή (*turbulent flow*) του αερίου αλλά σε κάποια σημεία σε τοπικό επίπεδο υπάρχει και η στρωτή ροή (*laminar flow*) στο εσωτερικό του διπλού “Y” σωλήνα?

#### 4.1.1a Αποτελέσματα στην περιοχή κυριαρχίας της στρωτής ροής (*laminar flow*)

Όλα τα παραπάνω ερωτήματα θα προσπαθήσουμε να τα απαντήσουμε από την παρατήρηση και από την μελέτη των παρακάτω σχημάτων. Τα σχήματα αυτά παράγονται κατά τη διαδικασία πραγματοποίησης της προσομοίωσης (διεθνής όρος: *simulation*) του διανομέα ροής αερίου. Σκοπός είναι να μελετήσουμε την κυκλοφορία του αερίου στον εσωτερικό χώρο του *double “Y” tube*.

a) από την παρατήρηση των παρακάτω σχημάτων ροής στο εσωτερικό του διπλού “Y”-σωλήνα, αντιλαμβανόμαστε ότι η περιοχή που κυριαρχεί η στρωτή ροή του αερίου, είναι αυτή η περιοχή με το μωβ χρώμα που βρίσκεται κοντά στο κεντρικό χώρο του διπλού “Y”-σωλήνα.





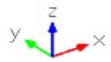
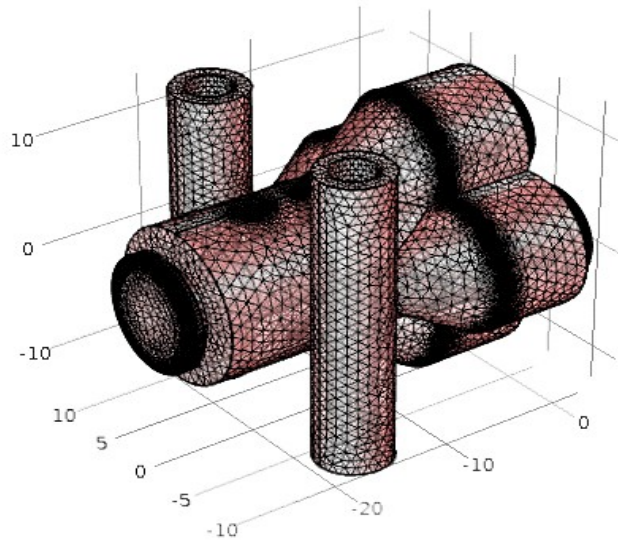
**Εικόνα 10a, 10b:** Η περιοχή με το μωβ χρώμα είναι η περιοχή όπου κυριαρχεί η στρωτή ροή για τη μεταφορά του αερίου αργού στο εσωτερικό του double “Y” – tube. Στο δεύτερο σχήμα, η περιοχή έχει μεγενθυθεί για να είναι καλύτερά αντιληπτή.

Στα παραπάνω σχήματα, φαίνονται τα τρισδιάστατα μοντέλα που κατασκευάσαμε για το διπλό “Y”- σωλήνα. Το επόμενο βήμα είναι να χρησιμοποιήσουμε ένα πλέγμα για να επιλύσουμε το πρόβλημα. Ακολουθώντας την ίδια πορεία με το δισδιάστατο μοντέλο, παραθέτουμε τα αποτελέσματά μας στα επόμενα σχήματα. Επειδή αναφερόμαστε σε ένα τρισδιάστατο μοντέλο, για την παράθεση των αποτελεσμάτων μας, δουλέψαμε με επιφάνειες κάθετες αλλά και παράλληλες στην επιφάνεια του πλέγματος. Παραθέτουμε τα αποτελέσματά της προσομοίωσης μας για το μοντέλο του διπλού “Y”- σωλήνα.

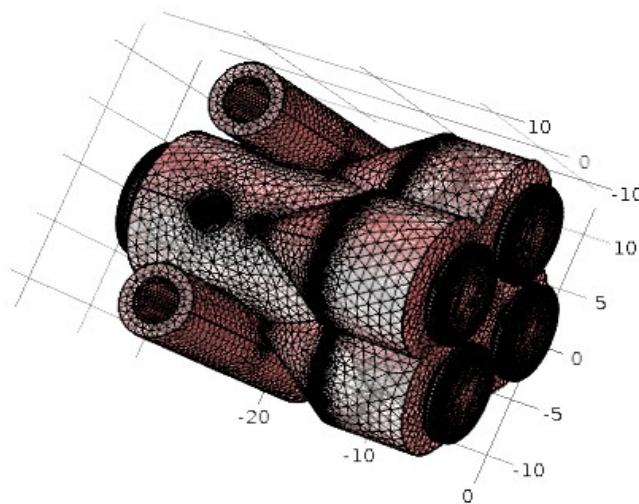
Στον πρώτο πίνακα, παραθέτουμε τη τρισδιάστατη γεωμετρία του διπλού “Y”- σωλήνα σε διάφορες κατευθύνσεις (45 και 135 μοίρες) για να δούμε αν υπάρχει εξάρτηση από την βαρύτητα. Αυτό που παρατηρούμε είναι ότι η βαρύτητα δεν επηρεάζει καθόλου την υφή ή την πυκνότητα του πλέγματος, εξαιτίας της μεγάλης πυκνότητας του πλέγματος που έχει το τρισδιάστατο μοντέλο μας.

**Images Πλέγματος (mesh)**  
**Double “Y” - tube (Argon 100%, laminar flow)**

COMSOL  
MULTIPHYSICS



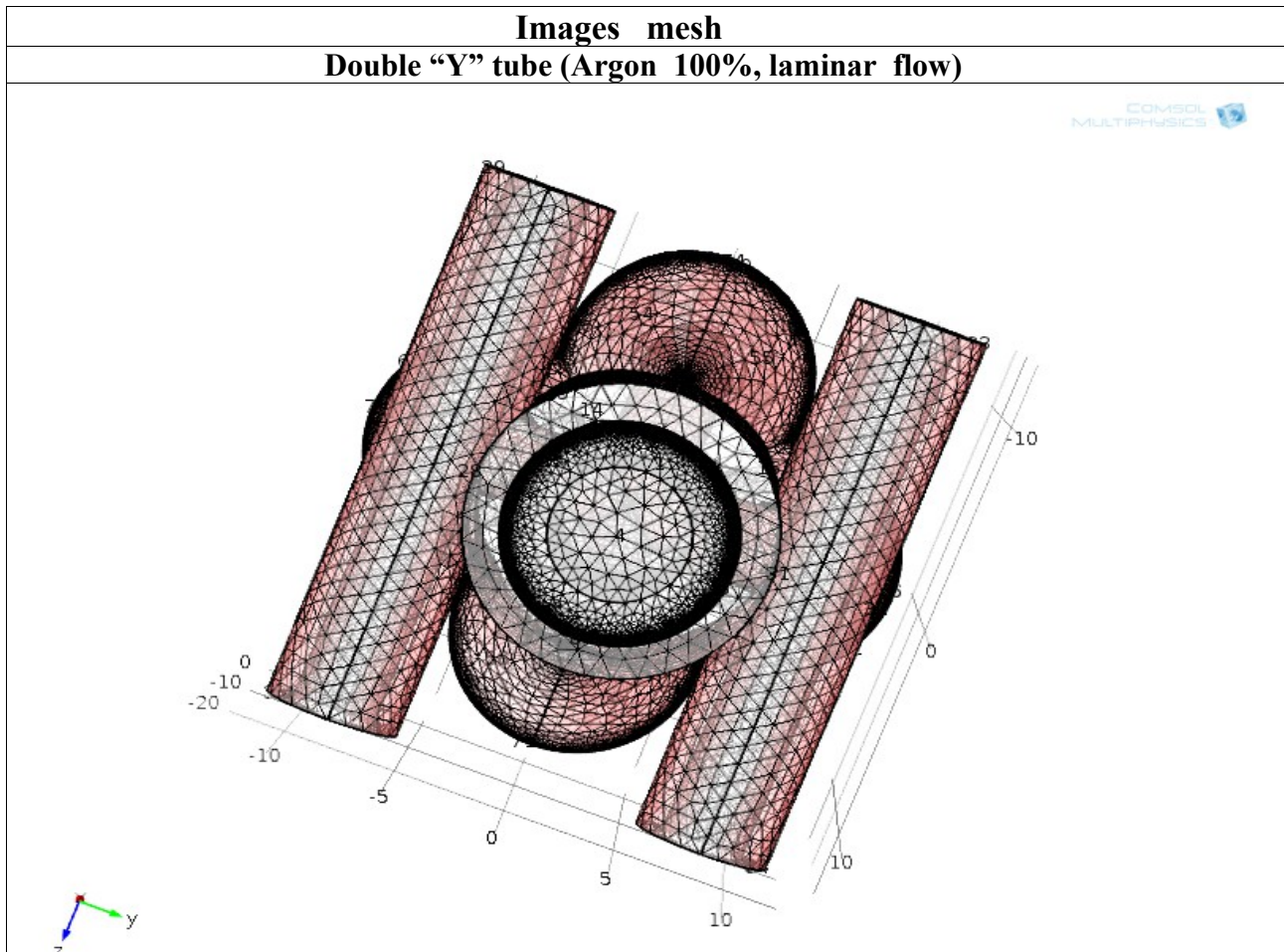
COMSOL  
MULTIPHYSICS



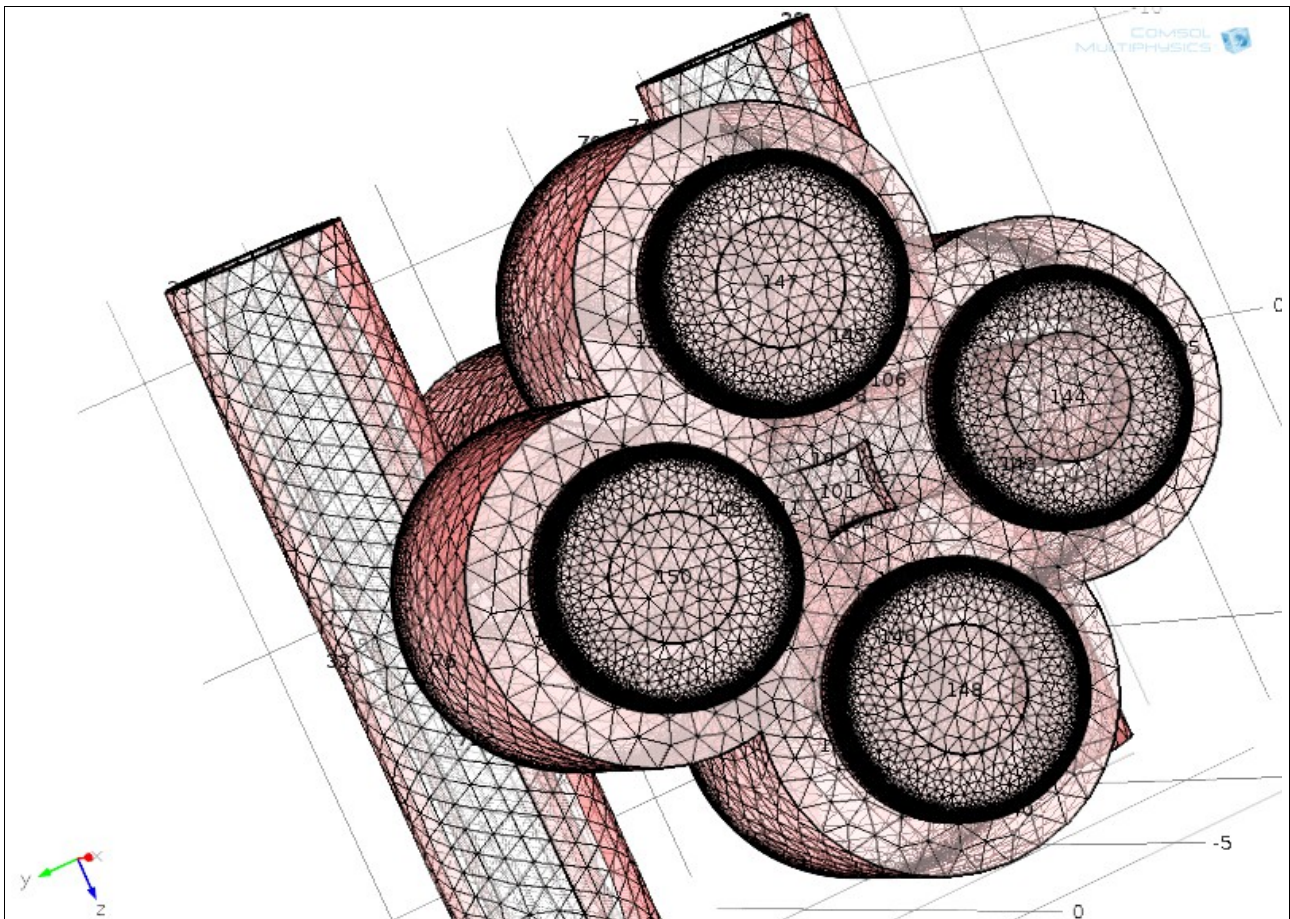
**Εικόνα 11a, 11b:** Στα παραπάνω σχήματα, παραθέτουμε σε διάφορες γωνίες τη τρισδιάστατη γεωμετρία του πλέγματος (mesh) του double “Y” – tube για να επιλύσουμε το πρόβλημά μας.

Στον δεύτερο πίνακα, παραθέτουμε τη τρισδιάστατα γεωμετρία του πλέγματος του *double “Y” tube* για να επιλύσουμε το πρόβλημα. Τα παραθέτουμε μεγενθύνοντας τα ώστε να παρατηρήσουμε καλύτερα τη δομή της υφής και της πυκνότητας του πλέγματος.

Στην *πρώτη* και *τρίτη* σειρά του πίνακα παραθέτουμε τη 3D γεωμετρία του *mesh* του μοντέλου μας καθώς και τη περιοχή εισόδου του αερίου στο εσωτερικό του διανομέα για τη περίπτωση που το αέριο μεταφέρεται σύμφωνα με τους νόμους της *στρωτή ροής*. Στην *δεύτερη* σειρά του πίνακα παραθέτουμε τη 3D γεωμετρία του πλέγματός του μοντέλου καθώς και τις τέσσερις *περιοχές εξόδου* του αερίου αργού στον εσωτερικό χώρο του για τη περίπτωση που το αέριο μεταφέρεται σύμφωνα με τους νόμους της *στρωτής ροής*.







**Εικόνα 12a, 12b:** Στα παραπάνω σχήματα, παραθέτουμε τη τρισδιάστατη γεωμετρία του πλέγματος του double “Y” – tube στην περιοχή εισόδου και στην περιοχή εξόδου για να επιλύσουμε το πρόβλημά μας. Τα μεγενθύνουμε για να παρατηρήσουμε καλύτερα τη δομή της υφής και τη πυκνότητα του πλέγματός μας.

Το επόμενο βήμα της προσομοίωσης είναι να μελετήσουμε το πώς κατανέμεται η ταχύτητα της ροής του αερίου σε ένα κεντρικό κομμάτι (*slice*) στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Y” σωλήνα, όταν γνωρίζουμε ότι η μεταφορά του αερίου γίνεται σύμφωνα με τους νόμους της στρωτής ροής.

Επομένως μετά την ολοκλήρωση των προσομοιώσεων, παραθέτουμε τα 3D διαγράμματα των ταχυτήτων της ροής του αερίου σε ένα κεντρικό κομμάτι στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Y” σωλήνα και τον αντίστοιχο πίνακα τιμών των ταχυτήτων σε σχέση με την απόσταση. Όπως βλέπουμε στον παρακάτω πίνακα, αρχικά παραθέτουμε το πεδίο τιμών της ταχύτητας της ροής του αερίου που εισέρχεται στο χώρο του διπλού “Y”- σωλήνα, η οποία ονομάζεται ταχύτητα εισόδου και την κατανομή τιμών των τεσσάρων ταχυτήτων που εξέρχονται από το διπλό “Y” σωλήνα, οι οποίες ονομάζονται ταχύτητες εξόδου.

Παρατηρώντας το 3D διάγραμμα των ταχυτήτων της ροής του αερίου αργού σε ένα κεντρικό κομμάτι στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Y” σωλήνα και τον αντίστοιχο πίνακα της κατανομής τιμών των ταχυτήτων της ροής του αερίου, καταλήγουμε στα παρακάτω συμπεράσματα:

α) Παρατηρούμε το χώρο που κατανέμεται το αέριο αργό, όπου είναι ο χώρος με την εσωτερική διάμετρο (*input diameter*) του διπλού “Y” σωλήνα. Για το συγκεκριμένο κομμάτι η εσωτερική διάμετρος είναι 2.5 mm.

b) Διαπιστώνουμε ότι η μέγιστη κατανομή τιμών της ταχύτητας της ροής του αερίου αργού παρατηρείται στο κέντρο του διπλού “Y” σωλήνα ενώ η ελάχιστη κατανομή τιμών της ταχύτητας της ροής του αερίου αργού παρατηρείται στα άκρα του. Στον ενδιάμεσο χώρο η κατανομή τιμών της ταχύτητας της ροής του αερίου παίρνει ενδιάμεσες τιμές. Το φαινόμενο αυτό είναι πολύ φυσιολογικό γιατί στο κέντρο του σωλήνα έχουμε την βέλτιστη ροή του αερίου σε σχέση με τα ακρά του σωλήνα, όπου η ροή παίρνει την ελάχιστη τιμή της.

c) Η ταχύτητα εισόδου, δηλαδή η κατανομή τιμών της ταχύτητα της ροής του αερίου αργού όταν εισέρχεται στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Y” σωλήνα, είναι εκτενέστερη σε σχέση με τη κατανομή τιμών της ταχύτητας εξόδου, δηλαδή της κατανομής τιμών της ταχύτητας ροής του αερίου όταν το αέριο εξέρχεται από έναν από τους τέσσερις κλάδους της περιοχής εξόδου του σωλήνα.

d) Τέλος, θα πρέπει να παρατηρήσουμε ότι η κατανομή τιμών της ταχύτητα ροής του αερίου αργού που εξέρχεται από ένα κλάδο της περιοχής εξόδου του εσωτερικού χώρου του διπλού “Y” σωλήνα είναι ίδια με τις κατανομές τιμών της ταχύτητας της ροής του αερίου που εξέρχονται από τους υπόλοιπους τρεις κλάδους της περιοχής εξόδου του εσωτερικού χώρου του σωλήνα.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να τονίσουμε ότι τα παρακάτω σχήματα είναι τομές της κατανομής τιμών της ταχύτητας ροής του αερίου αργού στη κεντρική περιοχή του εσωτερικού χώρου του διπλού “Y” σωλήνα, όπου το αέριο παίρνει τη βέλτιστη δυνατή ταχύτητα.

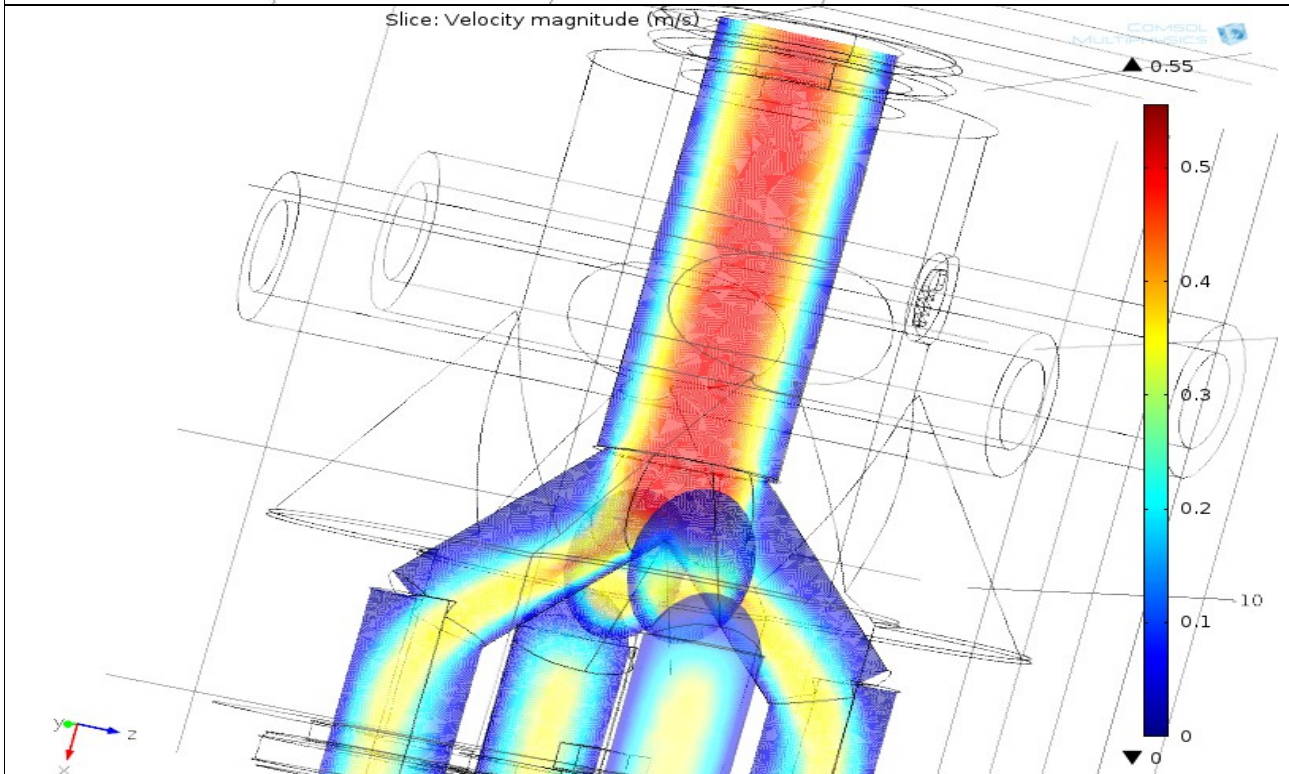
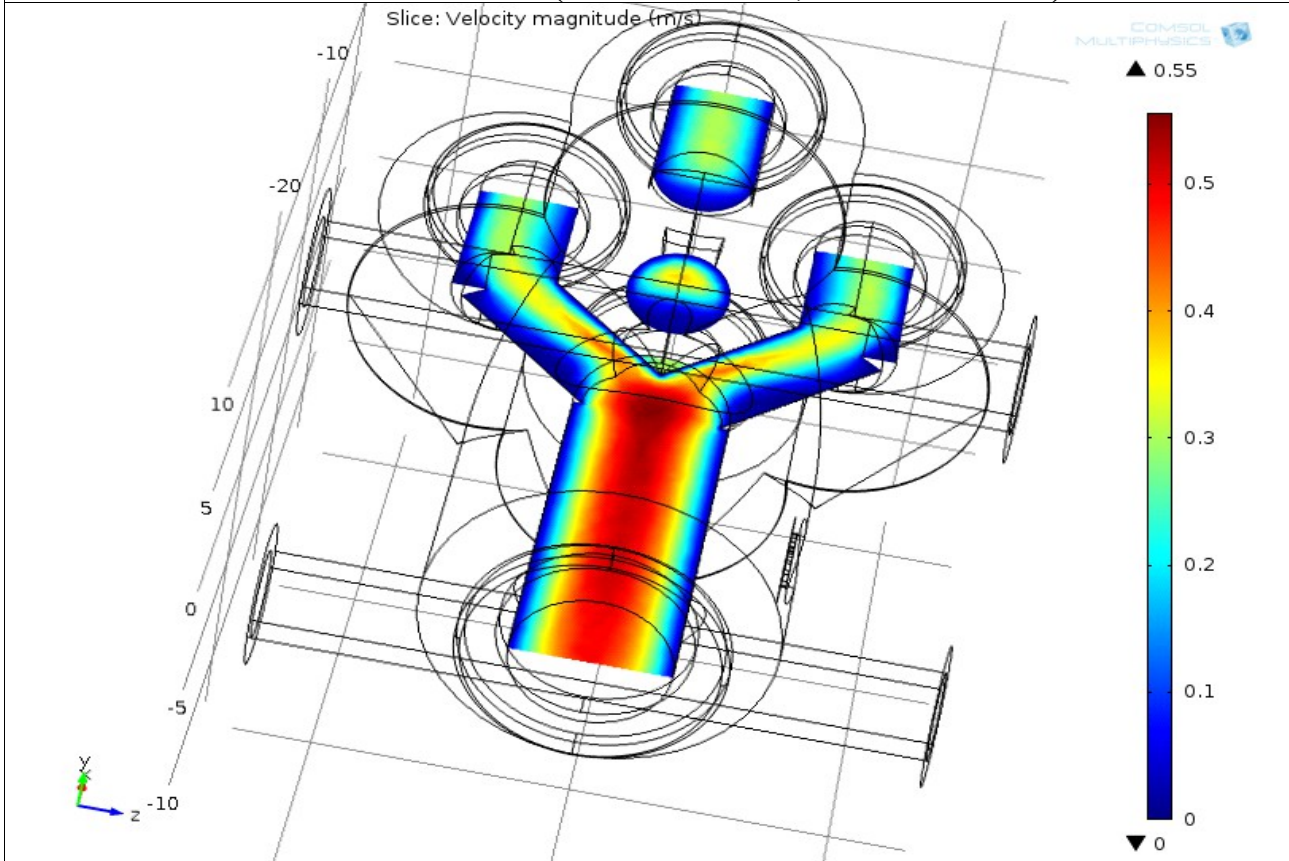
Τα παραπάνω τέσσερα συμπεράσματα μπορούν να επαληθευτούν και πειραματικά κατά την πειραματική διαδικασία της διάταξης του διανομέα ροής αερίου. (βλέπε το 6ο κεφάλαιο).

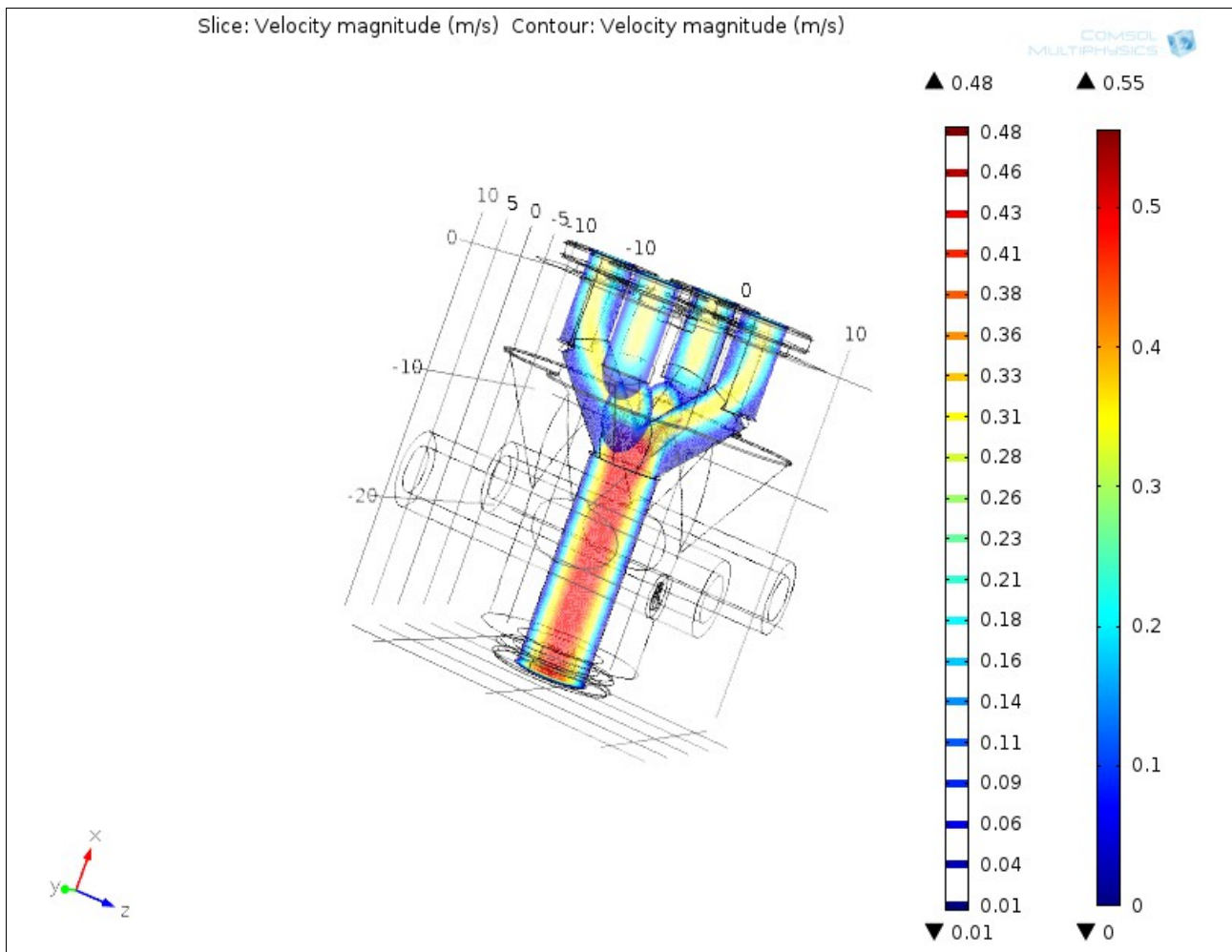
## **I. ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΙΜΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΡΟΗΣ ΑΕΡΙΟΥ ARGON 100%**

(x,y) (mm,mm)	Velocity (m/s) input	Velocity (m/s) output 1	Velocity (m/s) output 2	Velocity (m/s) output 3	Velocity (m/s) output 4
Ένα σημείο	1	1	2	3	4
Στο κέντρο	0.52	0.3	0.3	0.3	0.3
Ενδιάμεσα	0.42	0.25	0.25	0.25	0.25
Ενδιάμεσα	0.32	0.2	0.2	0.2	0.2
Ενδιάμεσα	0.22	0.15	0.15	0.15	0.15
Ενδιάμεσα	0.12	0.1	0.1	0.1	0.1
Στα άκρα	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

# Images slice velocity

## Double "Y" – tube (ARGON 100%, Laminar Flow)





**Εικόνες 12a, 12b, 12c:** Στα παραπάνω σχήματα, παραθέτουμε τη 3D γεωμετρία της κατανομής των ταχυτήτων ροής του αερίου αργού στο εσωτερικό χώρο του double “Y” – tube. Παρατηρούμε ότι η βαρύτητα δεν επηρεάζει την κατανομή των ταχυτήτων ροής του αερίου. Τέλος, παρατηρούμε ότι η μέγιστη τιμή της ταχύτητας ροής του αερίου διαμορφώνεται στο κεντρικό χώρο ενώ η ελάχιστη τιμή της ταχύτητας ροής του αερίου διαμορφώνεται στο ακριανό χώρο του double “Y” – tube.

Το προτελευταίο βήμα της προσομοίωσης είναι να μελετήσουμε πώς κατανέμεται εσωτερικά η πίεση της ροής του αερίου αργού σε όλο τον εσωτερικό χώρο του διπλού “Y” σωλήνα, όταν η μεταφορά του αερίου γίνεται σύμφωνα με τους νόμους της στρωτής ροής.

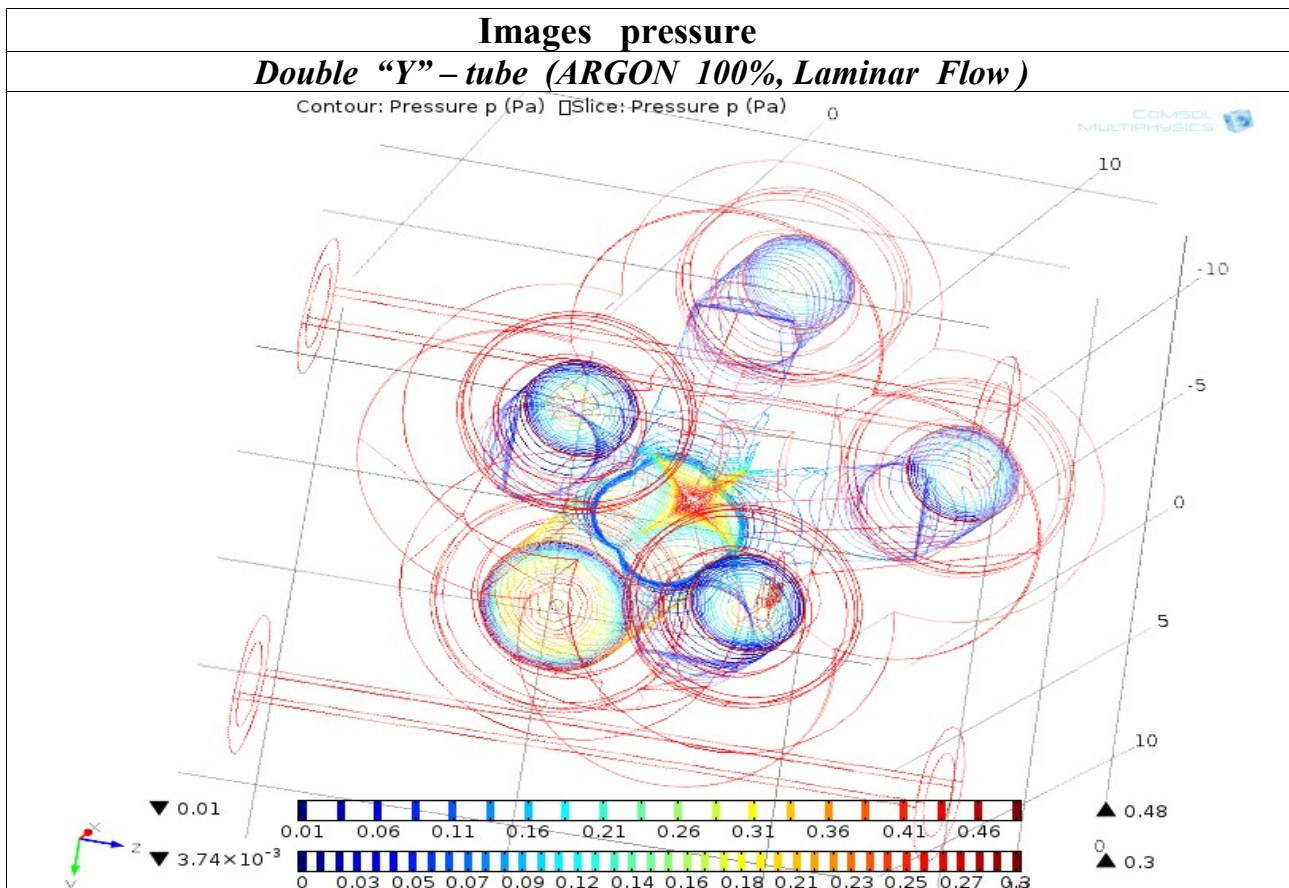
Μετά την ολοκλήρωση των προσομοιώσεων, παραθέτουμε τα 3D διαγράμματα της κατανομής πιέσεων της ροής του αερίου αργού σε ολόκληρο το χώρο εσωτερικά του διπλού “Y” σωλήνα. Αρχικά παραθέτουμε το πεδίο τιμών της εσωτερικής πίεσης της ροής του αερίου αργού που εισέρχεται στο χώρο του σωλήνα, η οποία ονομάζεται πίεση εισόδου και τη κατανομή των τιμών των τεσσάρων πιέσεων ροής του αερίου αργού που εξέρχονται από το σωλήνα, οι οποίες ονομάζονται εσωτερικές πιέσεις εξόδου.

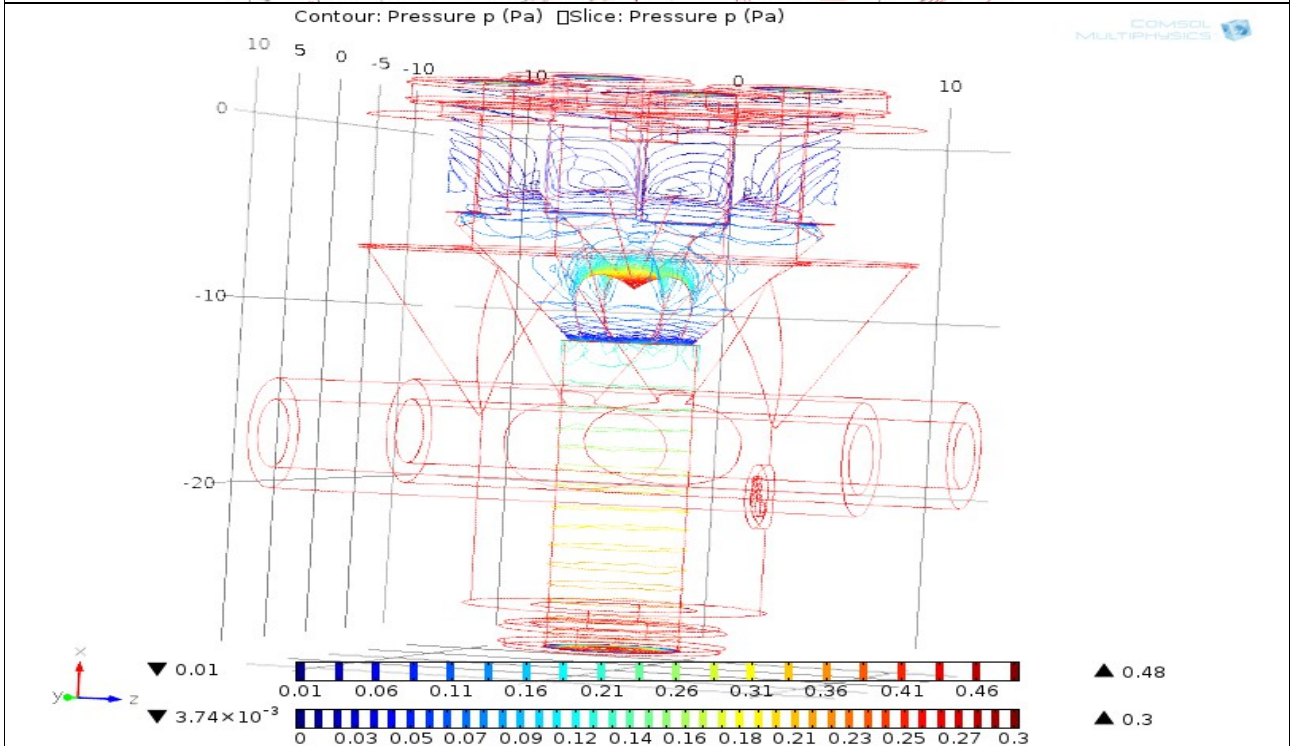
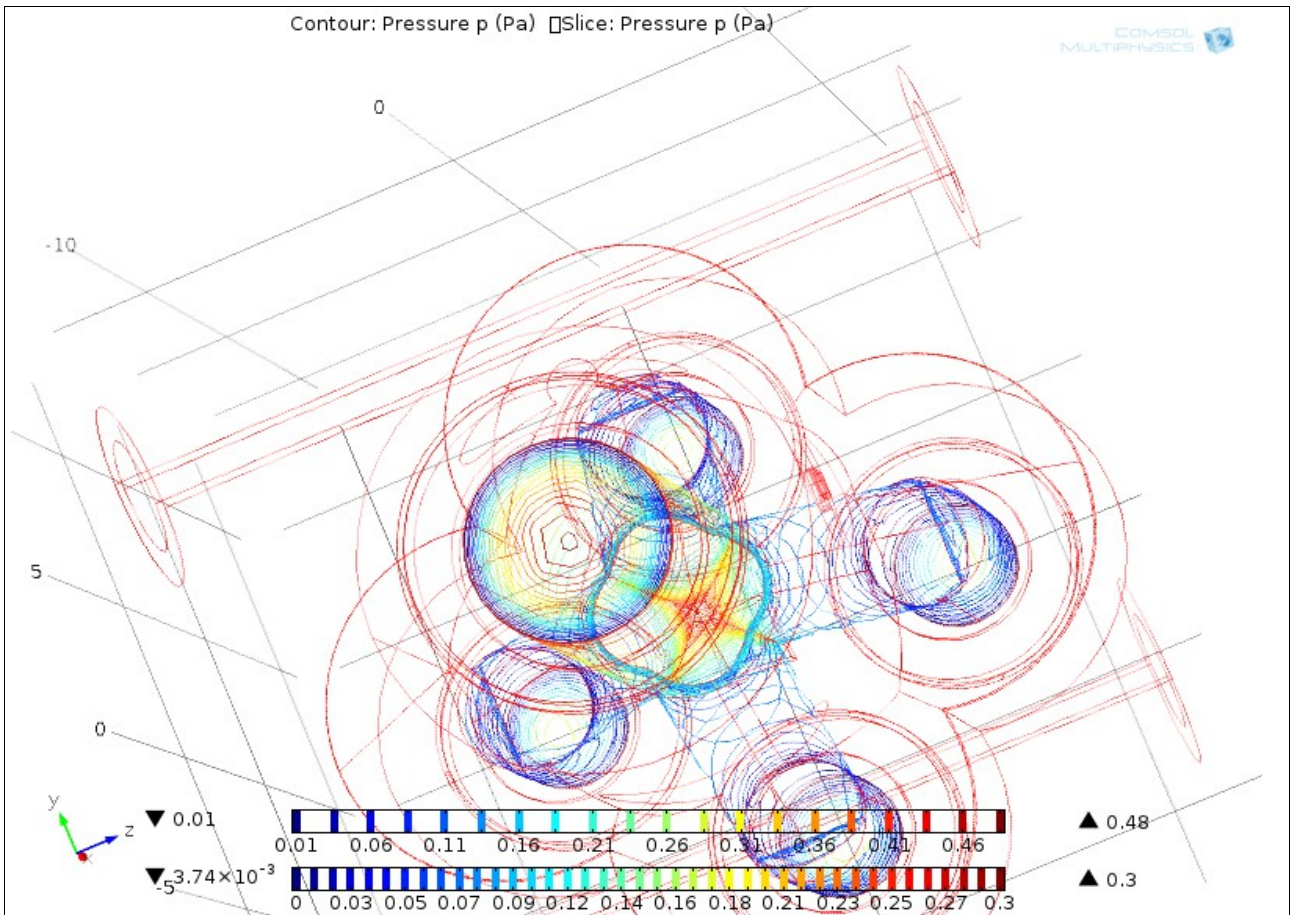
Η κατανομή των ταχυτήτων της ροής του αερίου αργού αφορά το κεντρικό κομμάτι του εσωτερικού χώρου του διπλού “Y”-σωλήνα επειδή σε αυτό το χώρο οι τιμές των ταχυτήτων ροής του αερίου παίρνουν τις μέγιστες τιμές τους, ενώ η κατανομή των πιέσεων του εσωτερικού χώρου του σωλήνα αναφέρεται σε όλο τον εσωτερικό χώρο του σωλήνα. Συνεπώς, η μέγιστη τιμή της πίεσης του διπλού “Y”- σωλήνα έχει να κάνει με τη μέγιστη ποσότητα του αερίου αργού που βρίσκεται στον εσωτερικό χώρο του σωλήνα. Η ποσότητα του αερίου αργού έχει να κάνει με την έκταση του εσωτερικού χώρου του σωλήνα.

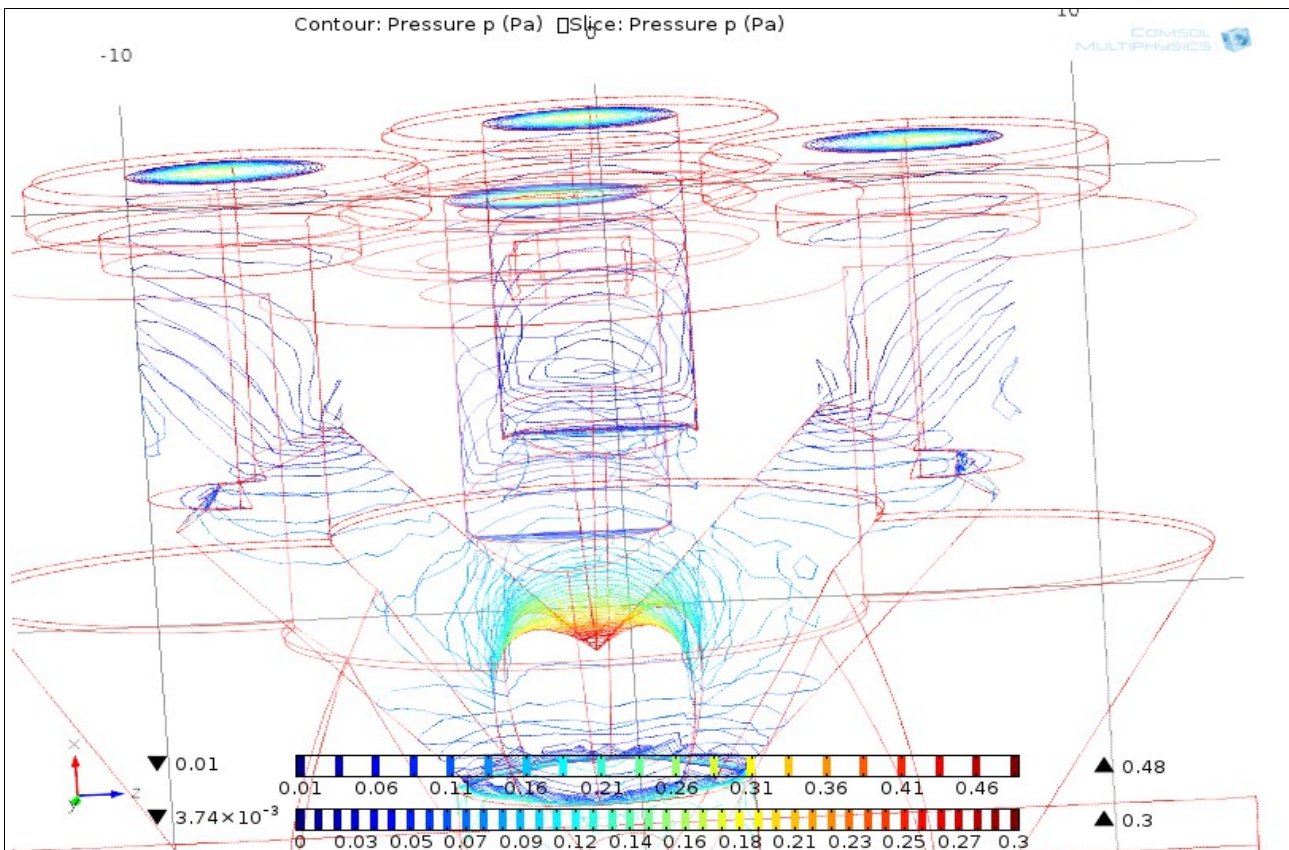
Αυτό σημαίνει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η έκταση του διπλού “Y” σωλήνα, τόσο μεγαλύτερη ποσότητα αερίου αργού περιέχει. Με τη σειρά του αυτό σημαίνει ότι η μέγιστη τιμή της πίεσης θα παρουσιάζεται στη περιοχή του εσωτερικού χώρου του σωλήνα που έχει τη μεγαλύτερη έκταση. Σε αντίθετη περίπτωση, η ελάχιστη τιμή της πίεσης του εσωτερικού χώρου του σωλήνα έχει να κάνει με την ελάχιστη ποσότητα του αερίου αργού που βρίσκεται στον εσωτερικό χώρο του σωλήνα. Επομένως, αυτό σημαίνει ότι η ελάχιστη τιμή της πίεσης θα παρουσιάζεται στη περιοχή του εσωτερικού χώρου του διπλού “Y” - σωλήνα που έχει τη μικρότερη έκταση.

## II. ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΙΜΩΝ ΠΙΕΣΕΩΝ ΡΟΗΣ ΑΕΡΙΟΥ ARGON 100%

(x,y) (mm,mm)	Pressure (Pa) Input	Pressure (Pa) Output 1	Pressure (Pa) Output 2	Pressure (Pa) Output 3	Pressure (Pa) Output 4
Ένα σημείο	1	1	2	3	4
Στο κέντρο	0.26	0.09	0.09	0.09	0.09
Ενδιάμεσα	0.24	0.085	0.085	0.085	0.085
Ενδιάμεσα	0.18	0.08	0.08	0.08	0.08
Ενδιάμεσα	0.13	0.075	0.075	0.075	0.075
Ενδιάμεσα	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07
Στα άκρα	0.10	0.06	0.06	0.06	0.06







**Εικόνα 13a, 13b, 13c, 13d:** Στα παραπάνω σχήματα, παραθέτουμε τη 3D γεωμετρία της κατανομής των εσωτερικών πιέσεων της ροής του αερίου αργό στον εσωτερικό χώρο του double “Y” – tube. Παρατηρούμε ότι η βαρύτητα επηρεάζει την κατανομή των εσωτερικών πιέσεων της ροής του αερίου. Τέλος, παρατηρούμε ότι η μέγιστη τιμή της εσωτερικής πίεσης ροής του αερίου διαμορφώνεται στη περιοχή εισόδου επειδή η περιοχή αυτή έχει την μεγαλύτερη έκταση εσωτερικά, ενώ η ελάχιστη τιμή της εσωτερικής πίεσης της ροής του αερίου διαμορφώνεται στις τέσσερις περιοχές εξόδου του double “Y” – tube επειδή οι περιοχές αυτές έχουν τη μικρότερη έκταση εσωτερικά.

Παρατηρώντας τα 3D διαγράμματα της κατανομής των εσωτερικών πιέσεων της ροής του αερίου αργού και τον αντίστοιχο πίνακα τιμών καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

a) Διαπιστώνουμε ότι η μέγιστη τιμή της εσωτερικής πίεσης της ροής του αερίου αργού παρατηρείται εκεί που ο χώρος είναι μεγαλύτερος, δηλαδή εκεί που η διάμετρος του εσωτερικού χώρου είναι μεγαλύτερη. Αυτό είναι φυσιολογικό γιατί όσο μεγαλύτερη είναι η έκταση του χώρου τόσο περισσότερος όγκος αερίου περνάει, άρα και εφαρμόζεται μεγαλύτερη πίεση στα τοιχώματά του.

b) Παρατηρούμε ότι η πίεση εισόδου, δηλαδή η πίεση της ροής του αερίου αργού όταν αυτό εισέρχεται στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Y” σωλήνα έχει μεγαλύτερη τιμή σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή των τεσσάρων πιέσεων εξόδου, δηλαδή των πιέσεων της ροής του αερίου αργού, όταν το αέριο εξέρχεται από έναν από τους τέσσερις κλάδους της περιοχής εξόδου.

c) Τέλος, παρατηρούμε ότι η κατανομή τιμών της πίεσης της ροής του αερίου αργού που εξέρχεται από ένα κλάδο της περιοχής εξόδου του εσωτερικού χώρου του διπλού “Y” σωλήνα είναι ίδια με τις αντίστοιχες κατανομές τιμών των πιέσεων της ροής του αερίου που εξέρχονται από τους υπόλοιπους τρεις κλάδους της περιοχής εξόδου του εσωτερικού χώρου του σωλήνα.

Τα παραπάνω τρία συμπεράσματα μπορούν να επαληθευτούν και πειραματικά κατά την πειραματική διαδικασία της διάταξης του διανομέα ροής αερίου.

Ένας από τους λόγους που είναι σημαντική η μελέτη της πίεσης της ροής του αερίου αργού στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Y” σωλήνα είναι, γιατί μπορούμε να υπολογίσουμε τη διαφορά πίεσης  $\Delta P$ , μεταξύ της πίεσης ενός οποιουδήποτε σημείου και της πίεσης εξόδου. Γνωρίζοντας τη *διαφορά πίεσης  $\Delta P$*  και την *παροχή  $Q$* , μπορούμε να υπολογίσουμε την εμπέδηση  $Z$  του διανομέα ροής αερίου μέσω του τύπου:

$$Z = \frac{\Delta P_{(1 \rightarrow 4)}}{Q_{(1 \rightarrow 4)}} = \frac{(P_{(1 \rightarrow 4)} - P_a)}{Q_{(1 \rightarrow 4)}} \quad (4.1)$$

Από τον παραπάνω τύπο (4.1) μπορούμε να υπολογίσουμε την εμπέδηση της ροής του αερίου αργού για οποιοδήποτε σημείο στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Y” σωλήνα, στην περίπτωση που η μεταφορά της ροής του αερίου γίνεται σύμφωνα με τους νόμους της στρωτής ροής. Από τις παραπάνω προσομοιώσεις της πίεσης της ροής του αερίου αργού στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Y” σωλήνα, μπορούμε να υπολογίσουμε την *διαφορά πίεσης  $\Delta P$* , μεταξύ της πίεσης ενός οποιουδήποτε σημείου που βρίσκεται στην περιοχή εισόδου και της πίεσης ενός οποιουδήποτε σημείου που βρίσκεται στην περιοχή εξόδου του σωλήνα, το οποίο είναι προκαθορισμένο.

Επειδή έχουμε κάποια προβλήματα σχετικά με το πώς θα υπάρχει ένας σωστός τρόπος υπολογισμού της *διαφοράς πίεσης  $\Delta P$*  από τη στιγμή που έχουμε να κάνουμε με κατανομές τιμών για την πίεση του εσωτερικού χώρου του διανομέα ροής αερίου, υπάρχουν γενικά δύο τρόποι υπολογισμού της  $\Delta P$ . Εφόσον έχουμε έναν κλάδο στην περιοχή εισόδου και τέσσερις κλάδους στην περιοχή εξόδου, παίρνουμε μια μεγενθυμένη απεικόνιση της κατανομής της εσωτερικής πίεσης της ροής του αερίου αργού στην περιοχή εισόδου και τέσσερις μεγενθυμένες απεικονίσεις των τεσσάρων κατανομών της εσωτερικής πίεσης της ροής του αερίου που αντιπροσωπεύουν τους τέσσερις κλάδους της περιοχής εξόδου.

Ο πρώτος τρόπος είναι ο παρακάτω:

#### a) *Υπολογισμός Higher Pressure*

Φτιάχνουμε μια απεικόνιση που περιέχει τη κατανομή των πιέσεων της ροής του αργού της περιοχής εισόδου στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Y” σωλήνα και τέσσερις απεικονίσεις που περιέχουν τις κατανομές των πιέσεων της ροής του αργού των τεσσάρων κλάδων της περιοχής εξόδου. Επομένως, η κατανομή των πιέσεων της ροής του αερίου αργού στην περιοχή εισόδου είναι εκτενέστερη και περιέχει μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με την κατανομή των πιέσεων της ροής του αερίου στην περιοχή εξόδου στον εσωτερικό χώρο του σωλήνα.

Από την κατανομή πιέσεων της ροής του αερίου στη περιοχή εισόδου, διαλέγουμε ως *αντιπροσωπευτική τιμή πίεσης*, την πίεση που βρίσκεται στο κεντρικό επίπεδο της απεικόνισης που είναι η *μέγιστη τιμή* της κατανομής των πιέσεων του εσωτερικού χώρου του διπλού “Y” σωλήνα. Την ίδια αντιπροσωπευτική τιμή πίεσης παίρνουμε και για τις υπόλοιπες τέσσερις κατανομές της εσωτερικής πίεσης της ροής του αργού στις τεσσάρους περιοχές εξόδου όπου κυριαρχούν οι νόμοι της στρωτής ροής.

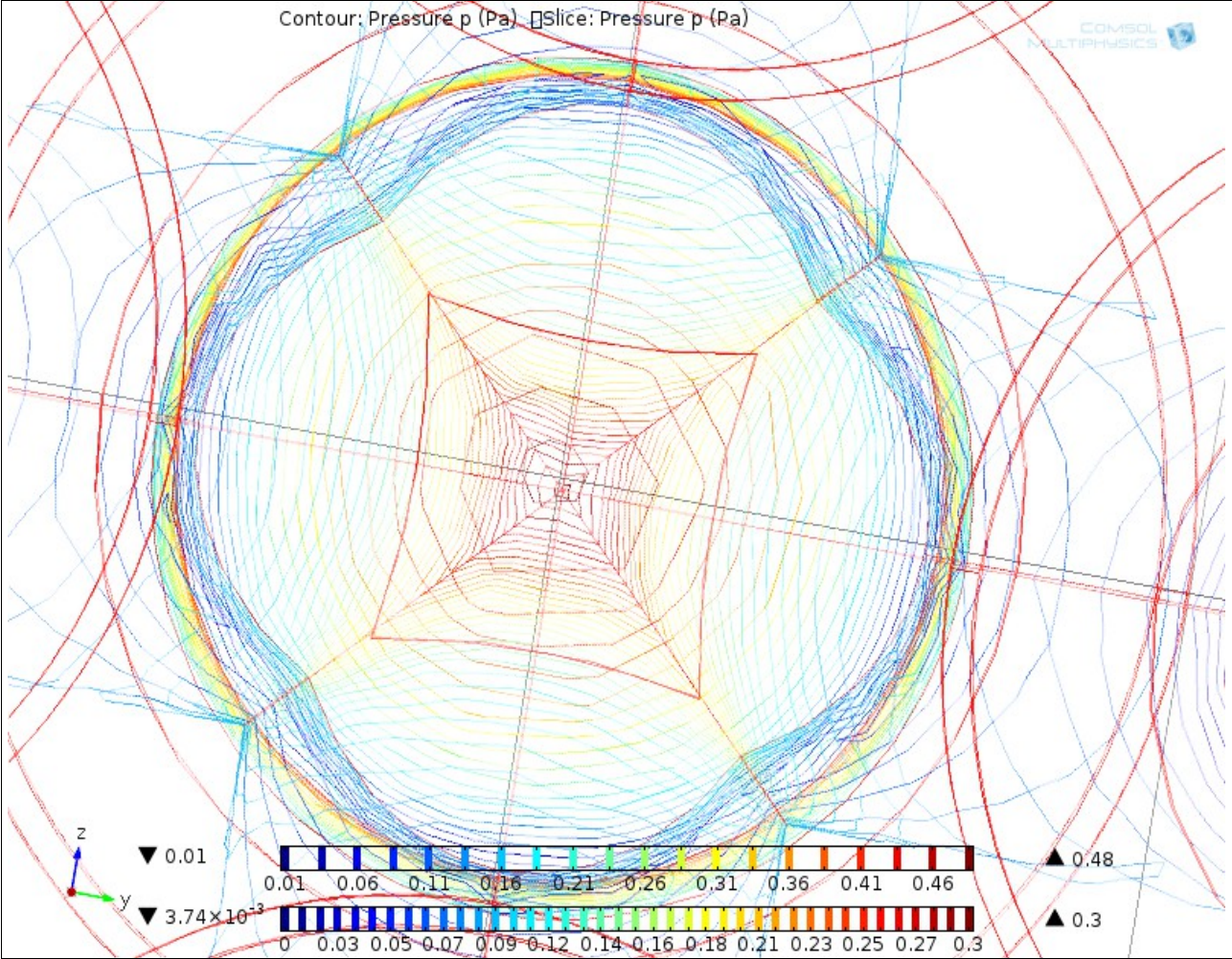


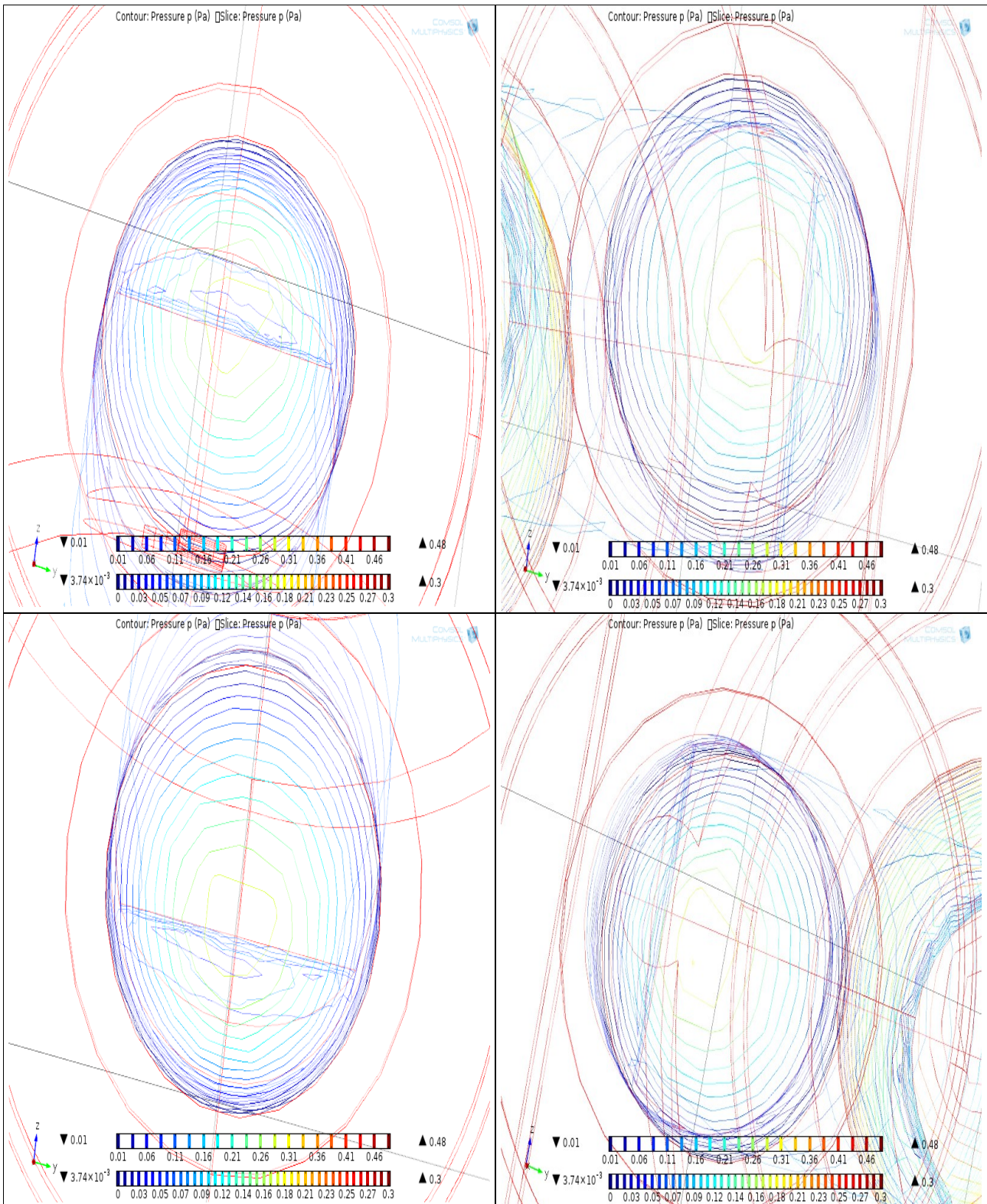
# Images Impedance

## a) double "Y" - tube (ARGON 100%, Laminar Flow)

Contour: Pressure p (Pa)    Slice: Pressure p (Pa)

COMSOL MULTIPHYSICS





**Εικόνες 14a, 14b1, 14b2, 14b3, 14b4:** Στη πρώτη σειρά παρατηρούμε την απεικόνιση της περιοχής εισόδου, ενώ στις επόμενες παρατηρούμε τις απεικονίσεις της περιοχής εξόδου στο εσωτερικό χώρο του double “Y” – tube. Παρατηρούμε: *a)* ο εσωτερικός χώρος της περιοχής εισόδου είναι μεγαλύτερος από τον εσωτερικό χώρο καθεμίας από τις τέσσερις περιοχές εξόδου. Αυτό σημαίνει ότι η κατανομή των εσωτερικών πιέσεων της ροής του αερίου αργού στη περιοχή εισόδου είναι εκτενέστερη από τις αντίστοιχες κατανομές των εσωτερικών πιέσεων της ροής αερίου αργού στις περιοχές εξόδου *b)* η μέγιστη τιμή της εσωτερικής πίεσης της ροής του αερίου αργού διαμορφώνεται στο κέντρο του κυκλικού χώρου ροής του αερίου ενώ η ελάχιστη τιμή της εσωτερικής πίεσης της ροής του αερίου διαμορφώνεται στον εφαιπτόμενο χώρο λόγω της βαρύτητας.

<b>Impedances [ 1η περίπτωση: Higher Pressure ]</b>			
<b>a) double “Y” – tube (ARGON 100%, Laminar Flow)</b>			
<b>Output 1</b>	<b>Output 2</b>	<b>Output 3</b>	<b>Output 4</b>
$P_1 = 0.0046 \text{ mbar}$	$P_2 = 0.0046 \text{ mbar}$	$P_3 = 0.0046 \text{ mbar}$	$P_4 = 0.0046 \text{ mbar}$
$P_a = 0.0031 \text{ mbar}$	$P_a = 0.0031 \text{ mbar}$	$P_a = 0.0031 \text{ mbar}$	$P_a = 0.0031 \text{ mbar}$
$\Delta P_1 = 0.0015 \text{ mbar}$	$\Delta P_2 = 0.0015 \text{ mbar}$	$\Delta P_3 = 0.0015 \text{ mbar}$	$\Delta P_4 = 0.0015 \text{ mbar}$
$Q_1 = 0.5187 \text{ L / hr}$	$Q_2 = 0.5208 \text{ L / hr}$	$Q_3 = 0.5180 \text{ L / hr}$	$Q_4 = 0.5156 \text{ L / hr}$
<b>Z1=0.002892</b> hr mbar /L	<b>Z2=0.002880</b> hr mbar /L	<b>Z3=0.002896</b> hr mbar /L	<b>Z4=0.002909</b> hr mbar /L

### β) Υπολογισμός Average Pressure

Φτιάχνουμε μια απεικόνιση που περιέχει τη κατανομή των πιέσεων της ροής του αερίου αργού στην περιοχή εισόδου στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Y” σωλήνα και τέσσερις απεικονίσεις που περιέχουν τις κατανομές των πιέσεων της ροής του αργού στους τεσσάρους κλάδους της περιοχής εξόδου. Όπως γίνεται αντιληπτό, η κατανομή των πιέσεων της ροής του αερίου στην περιοχή εισόδου, είναι εκτενέστερη και περιέχει μεγαλύτερες και περισσότερες τιμές σε σχέση με τις τέσσερις κατανομές των πιέσεων της ροής του αργού στις τεσσάρους περιοχές εξόδου.

Ο δεύτερος τρόπος υπολογισμού είναι ο ακόλουθος.

Από τη κατανομή πιέσεων της ροής του αργού στην περιοχή εισόδου, διαλέγουμε ως αντιπροσωπευτική τιμή πίεσης, την μέση τιμή της κατανομής των τιμών της πίεσης της ροής του αερίου που βρίσκεται σε όλο το χώρο της απεικόνισης. Αυτή η τιμή καλείται μέση τιμή. Την ίδια αντιπροσωπευτική τιμή πίεσης παίρνουμε και για τις υπόλοιπες τέσσερις κατανομές της πίεσης της ροής του αργού στις τεσσάρους περιοχές εξόδου όπου κυριαρχούν οι νόμοι της στρωτής ροής.

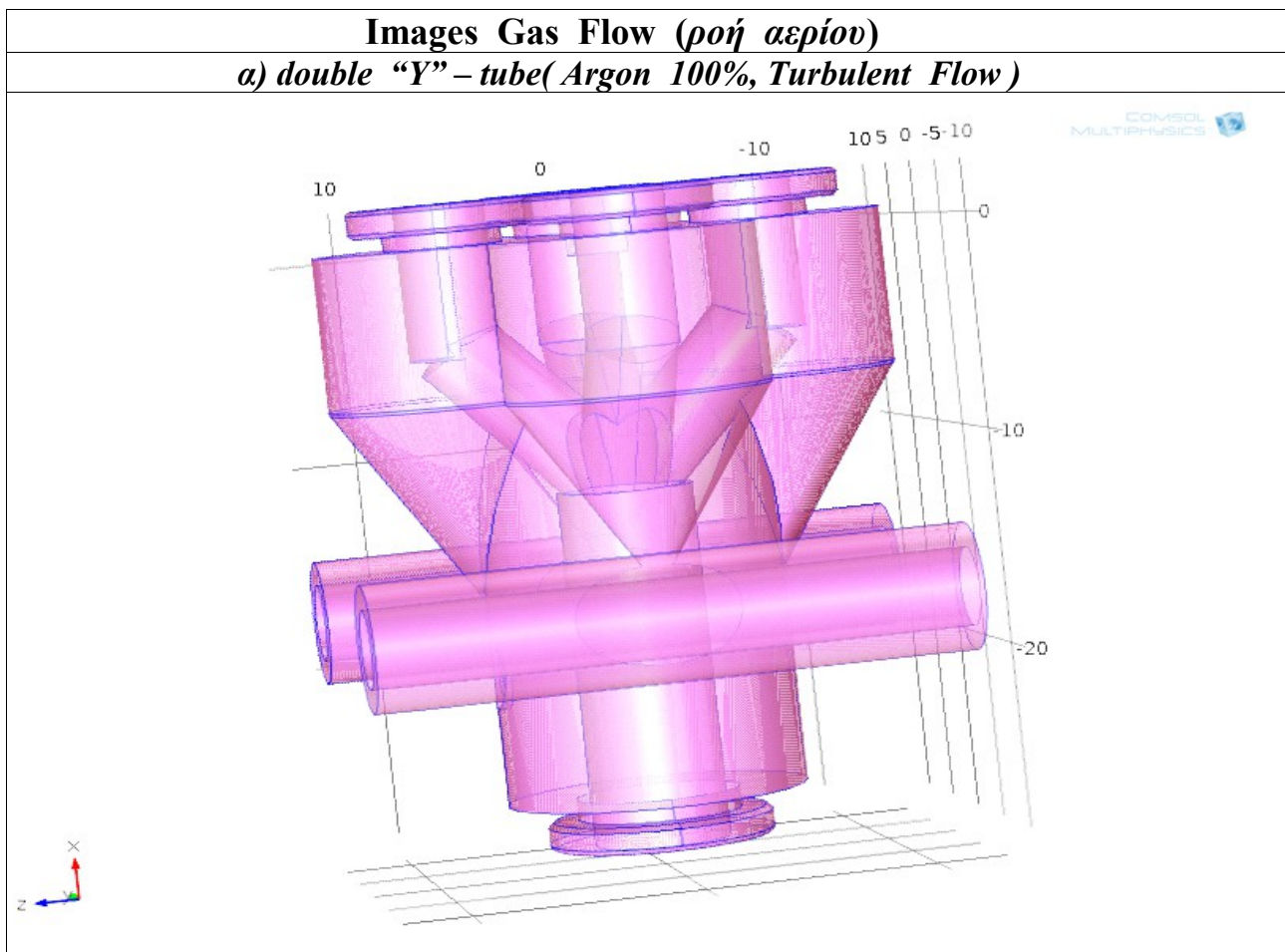
<b>Impedances [ 2η περίπτωση: Average Pressure ]</b>				
<b>a) double “Y” – tube (ARGON 100%, Laminar Flow)</b>				
<b>Input 1</b>	<b>Output 1</b>	<b>Output 2</b>	<b>Output 3</b>	<b>Output 4</b>
$P_{\max} = 0.0048 \text{ mbar}$	$P_{\max} = 0.0031 \text{ mbar}$	$P_{\max} = 0.0031 \text{ mbar}$	$P_{\max} = 0.0031 \text{ mbar}$	$P_{\max} = 0.0031 \text{ mbar}$
$P_{\min} = 0.0006 \text{ mbar}$	$P_{\min} = 0.00035 \text{ mbar}$	$P_{\min} = 0.00035 \text{ mbar}$	$P_{\min} = 0.00035 \text{ mbar}$	$P_{\min} = 0.00035 \text{ mbar}$
$P_{\text{average inside}} = 0.0027 \text{ mbar}$	$P_{\text{average outside}} = 0.0017 \text{ mbar}$	$P_{\text{average outside}} = 0.0017 \text{ mbar}$	$P_{\text{average outside}} = 0.0017 \text{ mbar}$	$P_{\text{average outside}} = 0.0017 \text{ mbar}$
—————	$\Delta P_1 = 0.000975 \text{ mbar}$	$\Delta P_2 = 0.000975 \text{ mbar}$	$\Delta P_3 = 0.000975 \text{ mbar}$	$\Delta P_4 = 0.000975 \text{ mbar}$
—————	$Q_1 = 0.5187 \text{ L / hr}$	$Q_2 = 0.5208 \text{ L / hr}$	$Q_3 = 0.5180 \text{ L / hr}$	$Q_4 = 0.5156 \text{ L / hr}$
<b>Z1=0.001880</b> hr mbar /L	<b>Z2=0.001872</b> hr mbar /L	<b>Z3=0.001882</b> hr mbar /L	<b>Z4=0.001891</b> hr mbar /L	

### 4.1.1b Αποτελέσματα της περιοχής κυριαρχίας της τυρβώδους ροής (turbulent flow)

Το επόμενο βήμα της εργασίας είναι να βρούμε το χώρο που κινείται το αέριο αργό, όταν η μεταφορά του γίνεται σύμφωνα με τους νόμους της στρωτής ροής ή της τυρβώδους ροής στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Y” σωλήνα.

Όπως παρατηρούμε από το σχήμα ροής (εικόνα 15) στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Y” – σωλήνα, αντιλαμβανόμαστε ότι η περιοχή που κυριαρχεί η στρωτή ροή του αερίου αργού είναι η περιοχή με το μωβ χρώμα που βρίσκεται κοντά στο κέντρο του εσωτερικού χώρου του σωλήνα, ενώ η περιοχή που κυριαρχεί η τυρβώδης ροή είναι η περιοχή με το μωβ χρώμα που βρίσκεται κοντά στα άκρα του εσωτερικού χώρου του σωλήνα.

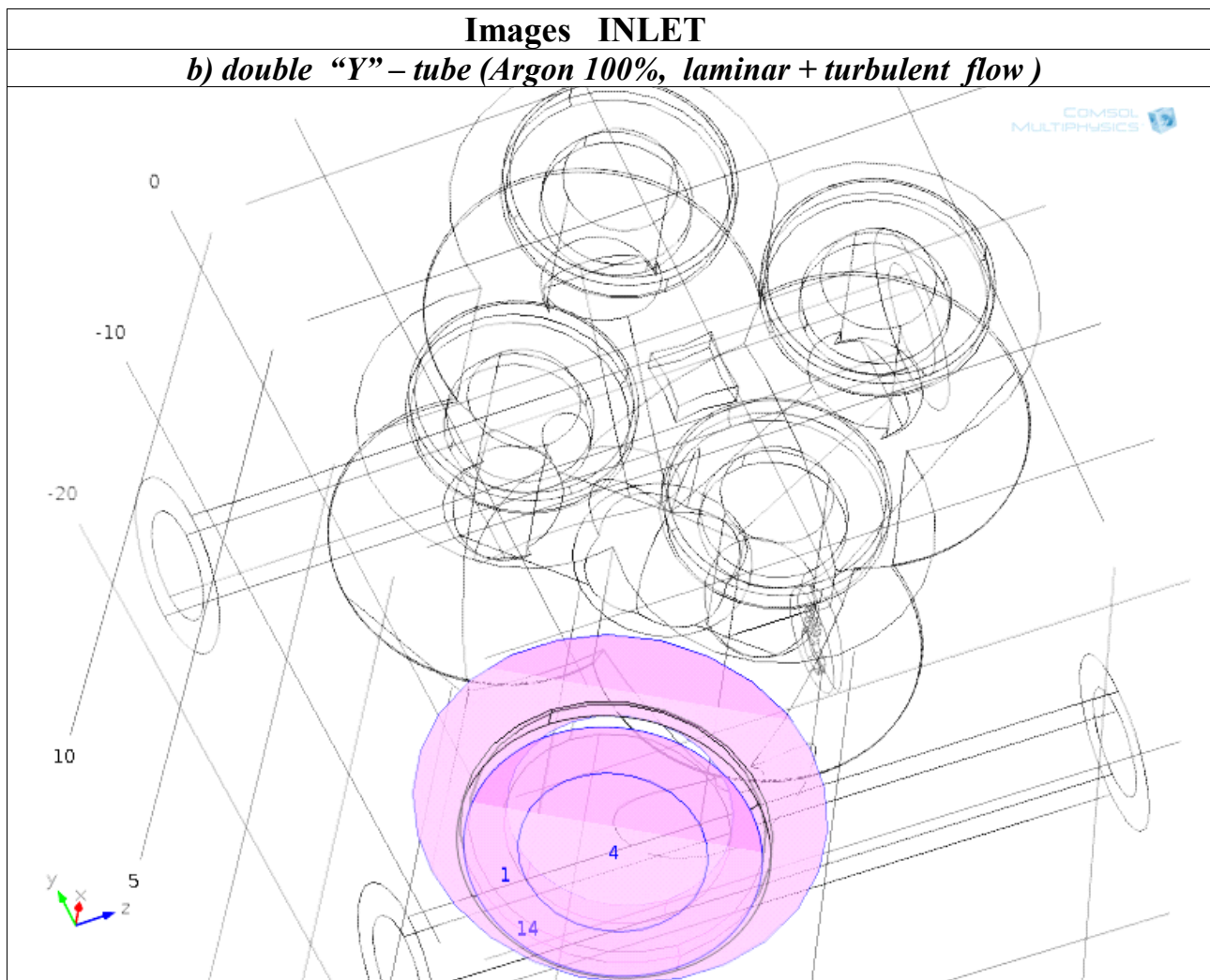
Οι ενδιάμεσοι χώροι είναι οι χώροι που παρουσιάζουν άλλου είδους φαινόμενα. Ο πρώτος χώρος έχει να κάνει με το χώρο όπου κυριαρχεί η στρωτή ροή του αργού αλλά σε κάποια σημεία σε τοπικό επίπεδο, υπάρχει περιοχή όπου αναπτύσσεται η τυρβώδης ροή. Ο δεύτερος χώρος έχει να κάνει με το χώρο όπου κυριαρχεί η τυρβώδης ροή του αερίου αλλά σε κάποια σημεία σε τοπικό επίπεδο, υπάρχει περιοχή όπου αναπτύσσεται η στρωτή ροή κατά τη μεταφορά του αερίου στο χώρο του διπλού “Y” σωλήνα.



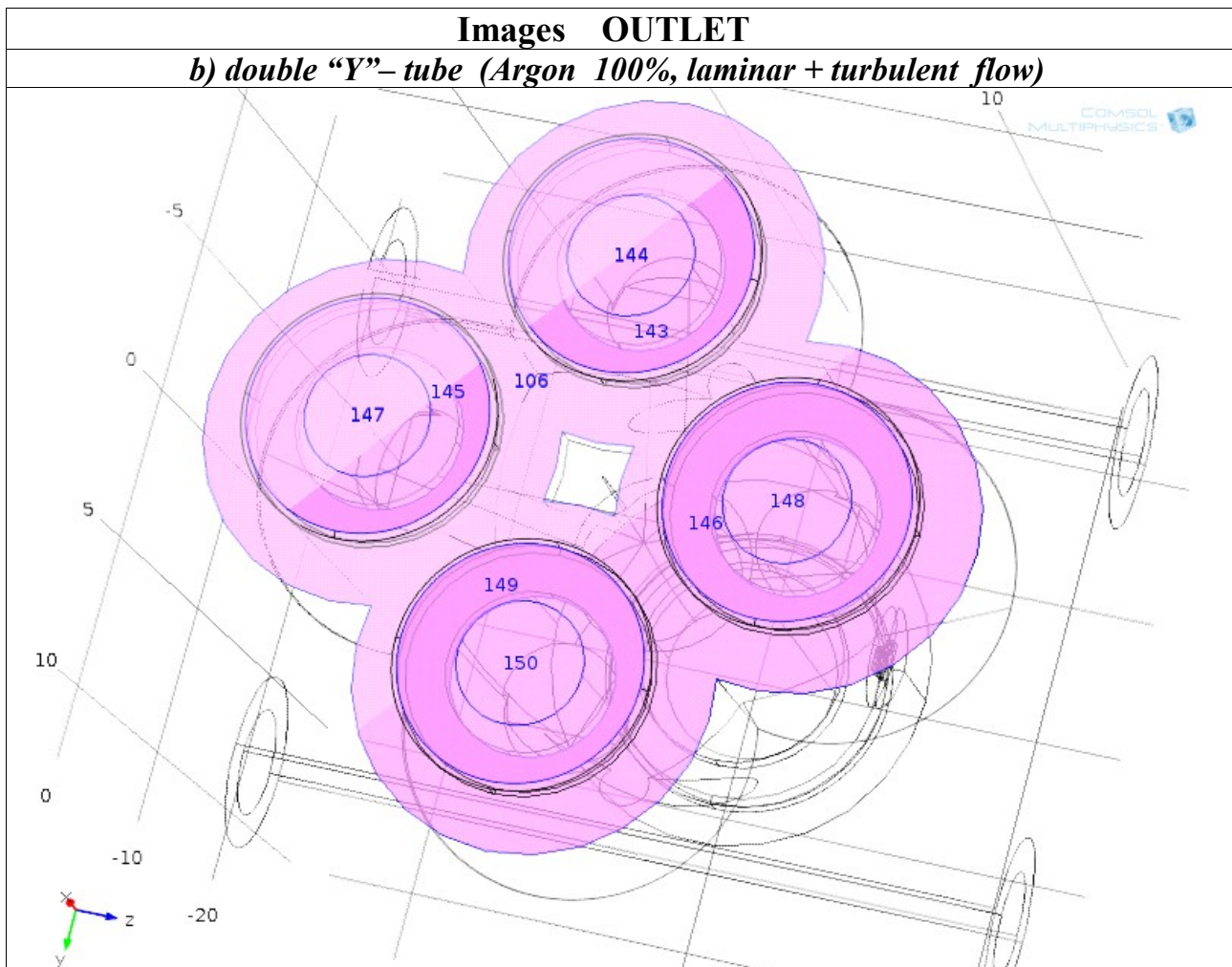
**Εικόνα 15:** Η κεντρική περιοχή με το μωβ χρώμα είναι η περιοχή όπου κυριαρχεί η στρωτή ροή για τη μεταφορά του αερίου αργού στο εσωτερικό χώρο του double “Y” – tube ενώ η ακριανή περιοχή με το μωβ χρώμα είναι η περιοχή όπου κυριαρχεί η τυρβώδης ροή για τη μεταφορά του αερίου αργού.

Το επόμενο βήμα της προσομοίωσης είναι να βρούμε τη περιοχή εισόδου του διπλού “Y” σωλήνα. Στο πρώτο σχήμα, φαίνεται καθαρά η περιοχή εισόδου όπου μετράμε τη ταχύτητα εισόδου. Η πρώτη επιφάνεια του σχήματος ροής (εικόνα 16), είναι ο χώρος όπου κυριαρχεί η στρωτή ροή του αερίου αργού, ενώ η δεύτερη επιφάνεια του σχήματος ροής (εικόνα 16) είναι ο χώρος όπου κυριαρχεί η τυρβώδης ροή κατά τη μεταφορά του αερίου αργού στον εσωτερικό χώρο του σωλήνα.

Στη συνέχεια, μελετούμε τους τέσσερις κλάδους της περιοχής εξόδου κατά τη μεταφορά του αερίου αργού στο διπλό “Y” σωλήνα. Η πρώτη επιφάνεια του σχήματος ροής (εικόνα 17), είναι ο χώρος όπου η μεταφορά του αερίου γίνεται σύμφωνα με τις αρχές της στρωτής ροής, ενώ η δεύτερη επιφάνεια είναι ο χώρος όπου η μεταφορά του αργού γίνεται σύμφωνα με τις αρχές της τυρβώδους ροής στον εσωτερικό χώρο του σωλήνα. Τέλος, στο δεύτερο σχήμα φαίνονται οι τέσσερις κλάδοι της επιφάνειας εξόδου που αναπαριστούν τις τέσσερις περιοχές εξόδου του αερίου, όπου μετράμε τις ταχύτητες εξόδου.



**Εικόνα 16:** Η μωβ επιφάνεια του double “Y” – tube αποτελεί την περιοχή εισόδου του συγκεκριμένου σωλήνα. Η μωβ επιφάνεια αποτελείται από τρεις υποπεριοχές: I. Στο κέντρο, κυριαρχεί η στρωτή ροή, II. Στα άκρα, κυριαρχεί η τυρβώδης ροή και III. Στην ενδιάμεση περιοχή, κυριαρχεί η στρωτή ροή αλλά σε κάποια τοπικά σημεία αναπτύσσεται η τυρβώδης ροή.

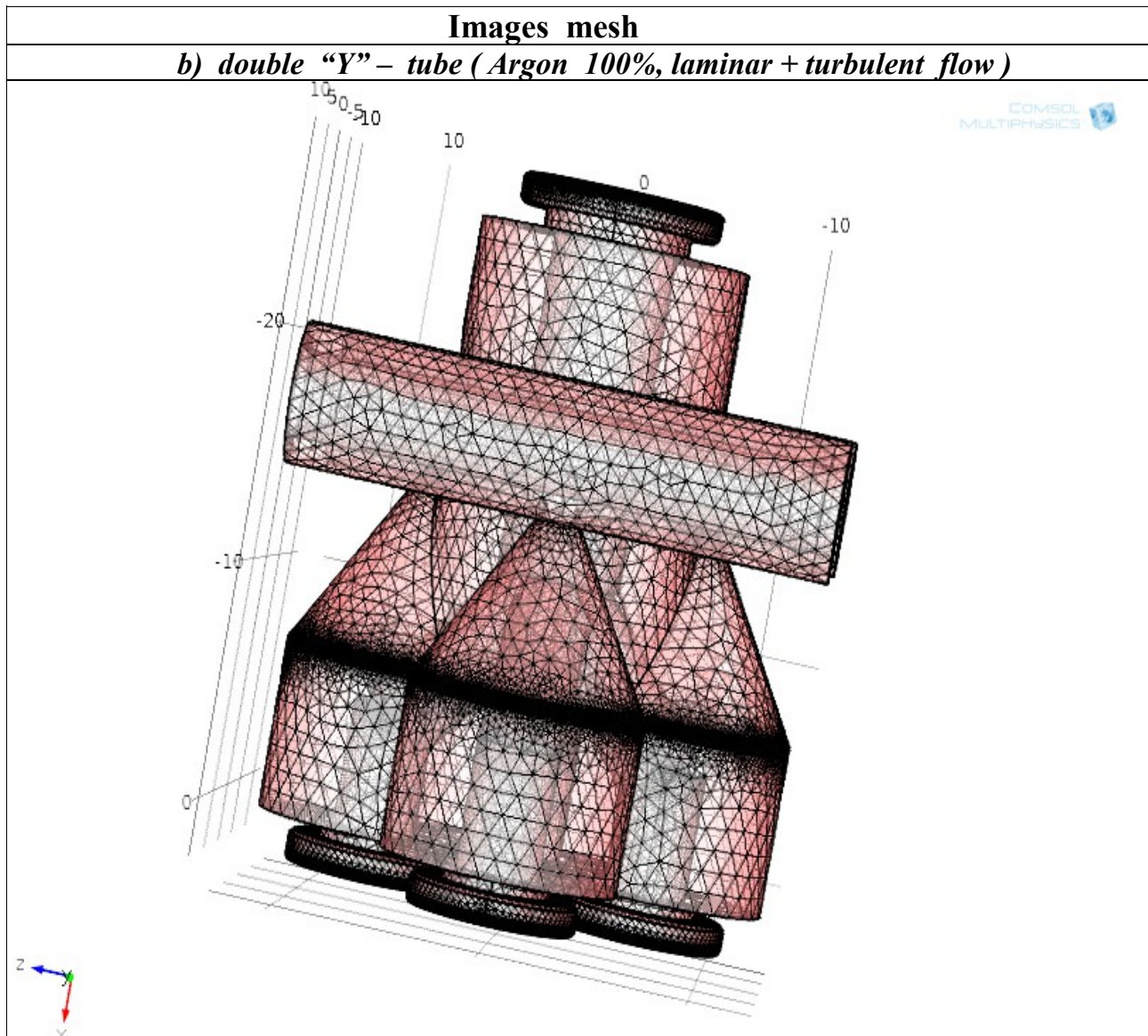


**Εικόνα 17:** Η μωβ επιφάνεια του double “Y” – tube, αποτελεί την περιοχή εξόδου του συγκεκριμένου σωλήνα. Η μωβ επιφάνεια αποτελείται από τρεις υποεπιφάνειες στους τέσσερις κλάδους τους: I.στο κέντρο κυριαρχεί η στρωτή ροή, II. στην ακριανή περιοχή κυριαρχεί η τυρβώδης ροή αλλά σε κάποια τοπική περιοχή αναπτύσσεται & η τυρβώδης ροή, III. στην ενδιάμεση περιοχή κυριαρχεί η στρωτή ροή αλλά σε κάποια τοπικά σημεί αναπτύσσεται η τυρβώδης ροή.

Στα παρακάτω σχήματα, φαίνονται τα τρισδιάστατα μοντέλα που κατασκευάσαμε για να αναπαραστήσουν τη 3D γεωμετρία του διπλού “Y” σωλήνα. Για να επιλύσουμε το πρόβλημα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε ένα πλέγμα. Επειδή αναφερόμαστε σε ένα τρισδιάστατο μοντέλο, για την παράθεση των αποτελεσμάτων δουλέψαμε με επιφάνειες κάθετες αλλά και παράλληλες στην επιφάνεια του πλέγματος. Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για το 3D μοντέλο του διπλού “Y” σωλήνα, στην περίπτωση που η μεταφορά του αερίου στον εσωτερικό χώρο του σωλήνα συμπεριφέρεται σύμφωνα με τους νόμους της στρωτής και τυρβώδους ροής.

Στο πίνακα Images mesh, παρατίθεται το 3D πλέγμα του μοντέλου του διπλού “Y”- σωλήνα σε ευθύγραμμη κατεύθυνση. Αυτό που παρατηρούμε είναι ότι η βαρύτητα δεν επηρεάζει καθόλου την υφή ή την πυκνότητα του πλέγματος, εξαιτίας της μεγάλης πυκνότητας που έχει το τρισδιάστατο μοντέλο αλλά και του μικρού μεγέθους των μορίων του αερίου.

Στον παρακάτω πίνακα παραθέτουμε τη 3D γεωμετρία του πλέγματος του μοντέλου του double “Y” tube όταν συμπεριφέρεται σύμφωνα με τους νόμους της στρωτής ροής για το εσωτερικό τμήμα και σύμφωνα με τους νόμους της τυρβώδους ροής για το εξωτερικό τμήμα του πλέγματος. Τα παραθέτουμε έτσι ώστε να παρατηρήσουμε καλύτερα τη δομή της υφής και της πυκνότητας του πλέγματος. Παρατηρούμε τελικά ότι η βαρύτητα δεν επηρεάζει την δομή και την υφή του.



**Εικόνα 18:** Στα παραπάνω σχήματα, παραθέτουμε τη τρισδιάστατη γεωμετρία του πλέγματος του double “Y” – tube για να επιλύσουμε το πρόβλημά μας. Τα παραθέτουμε έτσι ώστε να παρατηρήσουμε καλύτερα τη δομή της υφής και της πυκνότητας του πλέγματός.

Το επόμενο βήμα είναι να μελετήσουμε πώς κατανέμεται η ταχύτητα της ροής του αερίου αργού σε ένα κεντρικό κομμάτι (*slice*) στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Y” σωλήνα, όταν γνωρίζουμε ότι η μεταφορά του αερίου, γίνεται σύμφωνα με τους νόμους της τυρβώδους ροής.

Μετά την ολοκλήρωση των προσομοιώσεων, παραθέτουμε τα 3D διαγράμματα της κατανομής των ταχυτήτων της ροής του αργού σε ένα κεντρικό κομμάτι στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Y” σωλήνα και ο αντίστοιχος πίνακας της κατανομής των ταχυτήτων. Αρχικά παραθέτουμε τη κατανομή τιμών της ταχύτητας ροής του αερίου που εισέρχεται στον εσωτερικό χώρο του σωλήνα, η οποία ονομάζεται ταχύτητα εισόδου και την κατανομή τιμών των τεσσάρων ταχυτήτων που εξέρχονται από το σωλήνα και οι οποίες ονομάζονται ταχύτητες εξόδου.

Παρατηρώντας τη κατανομή των ταχυτήτων ροής του αερίου αργού σε ένα κεντρικό κομμάτι του εσωτερικού χώρου του σωλήνα και τον πίνακα κατανομής τιμών της ταχύτητας της ροής του αερίου, καταλήγουμε στις εξής παρατηρήσεις:

a) Ο χώρος της εσωτερικής διαμέτρου του διπλού “Y” σωλήνα παίρνει την τιμή 2.5 mm.

b) Η μέγιστη κατανομή τιμών της ταχύτητας ροής του αερίου αργού παρατηρείται στο κέντρο του σωλήνα ενώ η ελάχιστη κατανομή τιμών της ταχύτητας ροής του αργού παρατηρείται στα άκρα του. Στον ενδιάμεσο χώρο η κατανομή τιμών της ταχύτητα ροής του αερίου παίρνει ενδιάμεσες τιμές. Η παρατήρηση αυτή είναι φυσιολογική γιατί στο κέντρο έχουμε καλύτερη ροή του αερίου σε σχέση με τα ακρά που η ροή παίρνει την μικρότερη τιμή της.

c) Η ταχύτητα εισόδου, δηλαδή η κατανομή τιμών της ταχύτητας ροής του αερίου αργού όταν αυτό εισέρχεται στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Y” –σωλήνα, είναι εκτενέστερη σε σχέση με την κατανομή των τιμών της ταχύτητας εξόδου σε έναν από τους τέσσερις κλάδους της περιοχής εξόδου του σωλήνα.

d) Τέλος, η κατανομή τιμών της ταχύτητας ροής του αερίου αργού που εξέρχεται από ένα κλάδο της περιοχής εξόδου του εσωτερικού χώρου του διπλού “Y” σωλήνα είναι ίδια με την κατανομή τιμών της ταχυτήτας ροής του αργού που εξέρχεται από τους υπόλοιπους τρεις κλάδους της περιοχής εξόδου του εσωτερικού χώρου του σωλήνα.

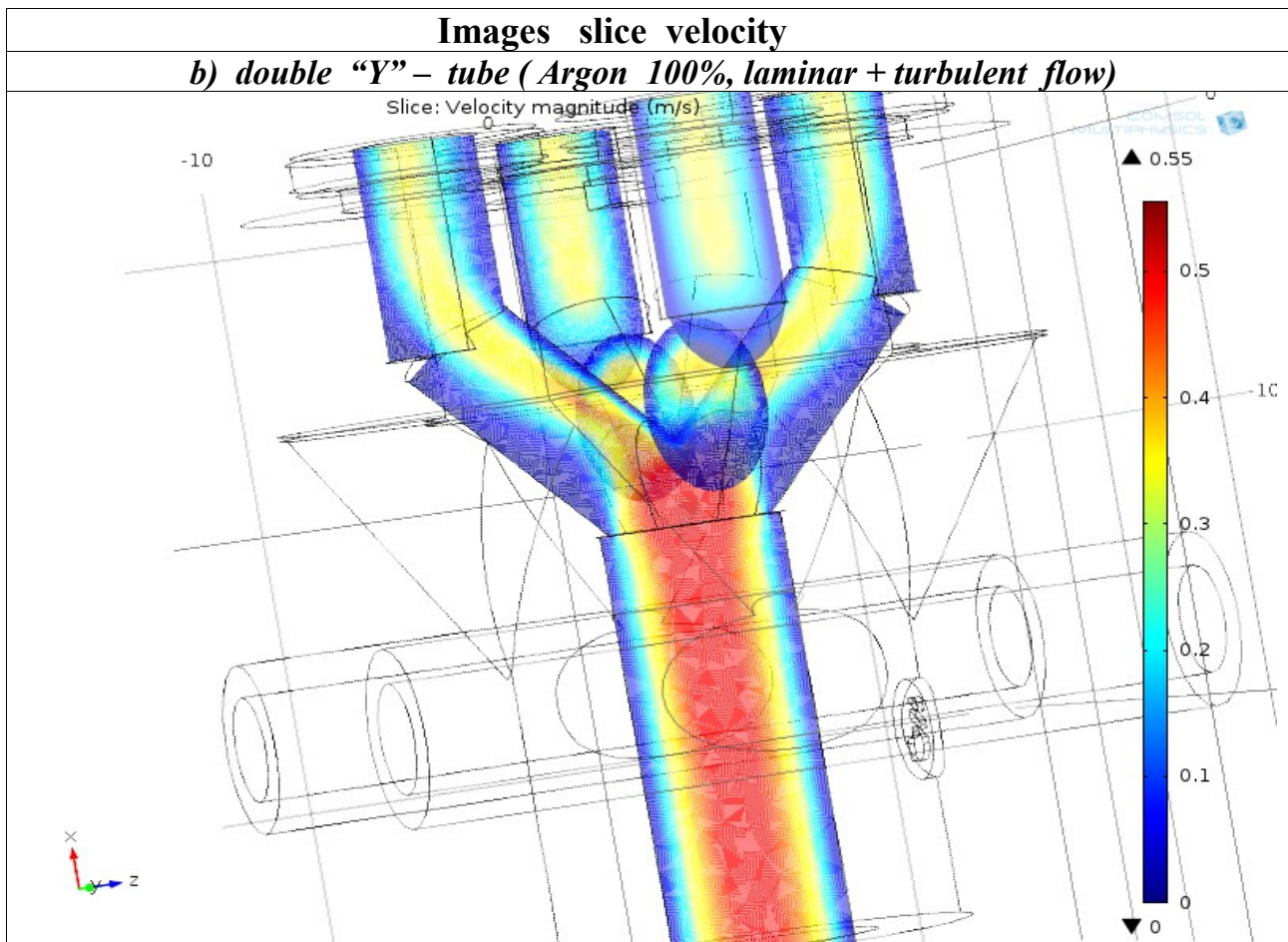
Σε αυτό το σημείο, θα πρέπει να τονίσουμε ότι τα παρακάτω σχήματα είναι τομές της κατανομής τιμών της ταχυτήτας της ροής του αερίου στη κεντρική περιοχή του εσωτερικού χώρου του σωλήνα, όπου η κατανομή τιμών της ταχύτητας ροής του αργού είναι η μέγιστη δυνατή.

Τα παραπάνω τέσσερα συμπεράσματα μπορούν να επαληθευτούν και πειραματικά κατά την πειραματική διαδικασία της διάταξης του διανομέα ροής αερίου αργού. (βλέπε το 6ο κεφάλαιο).

#### IV. ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΙΜΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΡΟΗΣ ΑΕΡΙΟΥ ARGON 100%

(x,y) (mm,mm)	Velocity (m/s) input	Velocity (m/s) output 1	Velocity (m/s) output 2	Velocity (m/s) output 3	Velocity (m/s) output4
Ένα σημείο	1	1	2	3	4
Στο κέντρο	0.55	0.33	0.33	0.33	0.33
Ενδιάμεσα	0.45	0.28	0.28	0.28	0.28
Ενδιάμεσα	0.35	0.23	0.23	0.23	0.23
Ενδιάμεσα	0.25	0.18	0.18	0.18	0.18
Ενδιάμεσα	0.15	0.13	0.13	0.13	0.13
Στα άκρα	0.08	0.06	0.06	0.06	0.06





**Εικόνα 19:** Στη παραπάνω εικόνα παραθέτουμε τη κατανομή τιμών της ταχύτητας ροής του αερίου αργού στο εσωτερικό χώρο του double “Y” – tube. Παρατηρούμε ότι η κατανομή τιμών της ταχύτητας της στρωτής + τυρβώδους ροής έχει μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τη κατανομή τιμών της ταχύτητας της στρωτής ροής.

Το προτελευταίο βήμα της μελετής είναι να δούμε πώς κατανέμεται η πίεση της ροής του αερίου αργού σε όλο το χώρο εσωτερικά του διπλού “Y” σωλήνα, όταν γνωρίζουμε ότι η μεταφορά του αερίου αργού γίνεται σύμφωνα με τους νόμους της τυρβώδους ροής + στρωτής ροής.

Μετά την ολοκλήρωση των προσομοιώσεων, παραθέτουμε τα 3D διαγράμματα της κατανομής πιέσεων ροής του αργού σε ολόκληρο το χώρο εσωτερικά του διπλού “Y” σωλήνα και του αντίστοιχου πίνακα τιμών της κατανομής των πιέσεων ροής του αερίου. Αρχικά παραθέτουμε τη κατανομή τιμών της πίεσης ροής του αργού που εισέρχεται στον εσωτερικό χώρο του σωλήνα, η οποία ονομάζεται πίεση εισόδου και την κατανομή τιμών των τεσσάρων πιέσεων ροής του αερίου που εξέρχονται από το σωλήνα, οι οποίες ονομάζονται πιέσεις εξόδου.

Παρατηρώντας τα 3D διαγράμματα των κατανομών τιμών της πίεσης ροής του αερίου αργού και του πίνακα τιμών, καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

a) Η μέγιστη τιμή της πίεσης ροής αερίου παρατηρείται εκεί όπου ο χώρος είναι μεγαλύτερος, δηλαδή εκεί όπου η διάμετρος του εσωτερικού χώρου είναι μεγαλύτερη. Αυτό είναι φυσιολογικό γιατί όσο μεγαλύτερος είναι ο χώρος τόσο περισσότερος όγκος αερίου περνάει, άρα και εφαρμόζεται μεγαλύτερη πίεση στα τοιχώματά του.

b) Η πίεση εισόδου, δηλαδή η πίεση ροής του αερίου αργού όταν εισέρχεται στο εσωτερικό χώρο του διπλού “Y” σωλήνα έχει μεγαλύτερη τιμή σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή της πίεσης εξόδου, δηλαδή της πίεσης ροής του αερίου όταν αυτό εξέρχεται από έναν από τους τέσσερις κλάδους της περιοχής εξόδου στον εσωτερικό χώρο του σωλήνα.

c) Η πίεση ροής του αργού που εξέρχεται από ένα κλάδο της περιοχής εξόδου του εσωτερικού χώρου του διπλού “Υ” σωλήνα είναι ίδια με τις αντίστοιχες τιμές των πιέσεων της ροής του αερίου που εξέρχονται από τους υπόλοιπους τέσσερις κλάδους της περιοχής εξόδου του εσωτερικού χώρου του σωλήνα.

d) Τέλος, συγκρίνοντας την κατανομή τιμών της πίεσης ροής αερίου αργού όταν αυτό εισέρχεται σύμφωνα με τους νόμους της στρωτής και τυρβώδους ροής στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Υ” σωλήνα είναι εκτενέστερη και έχει μεγαλύτερες τιμές όσο πάμε προς το κέντρο σε σχέση με τη κατανομή τιμών της πίεσης ροής του αερίου αργού όταν αυτό εισέρχεται σύμφωνα με τους νόμους της στρωτής ροής.

Τα παραπάνω τέσσερα συμπεράσματα μπορούν να επαληθευτούν και πειραματικά κατά την πειραματική διαδικασία της διάταξης του διανομέα ροής αερίου.

Ένας από τους λόγους που είναι σημαντική η μελέτη της πίεσης της ροής του αερίου αργού στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Υ” σωλήνα είναι διότι μπορούμε να υπολογίσουμε τη διαφορά πίεσης  $\Delta P$ , μεταξύ της πίεσης ενός οποιονδήποτε σημείου και της πίεσης εξόδου. Γνωρίζοντας τη διαφορά πίεσης  $\Delta P$  και την παροχή  $Q$ , μπορούμε να υπολογίσουμε την εμπέδηση  $Z$  του διανομέα ροής αερίου αργού μέσω του τύπου:

$$Z = \frac{\Delta P_{(1 \rightarrow 4)}}{Q_{(1 \rightarrow 4)}} = \frac{(P_{(1 \rightarrow 4)} - P_a)}{Q_{(1 \rightarrow 4)}} \quad (4.2)$$

Από τον παραπάνω τύπο (4.2) μπορούμε να υπολογίσουμε την εμπέδηση της ροής του αερίου αργού για οποιοδήποτε σημείο στο εσωτερικό του διπλού “Υ” σωλήνα, στην περίπτωση που η μεταφορά της ροής του αερίου γίνεται σύμφωνα με τους νόμους της στρωτής και τυρβώδους ροής. Από τα παραπάνω σχήματα της πίεσης ροής του αερίου, μπορούμε να υπολογίσουμε την διαφορά πίεσης  $\Delta P$ , μεταξύ ενός οποιουδήποτε σημείου που βρίσκεται στην περιοχή εισόδου και ενός οποιουδήποτε σημείου που βρίσκεται στην περιοχή εξόδου του σωλήνα, το οποίο είναι προκαθορισμένο.

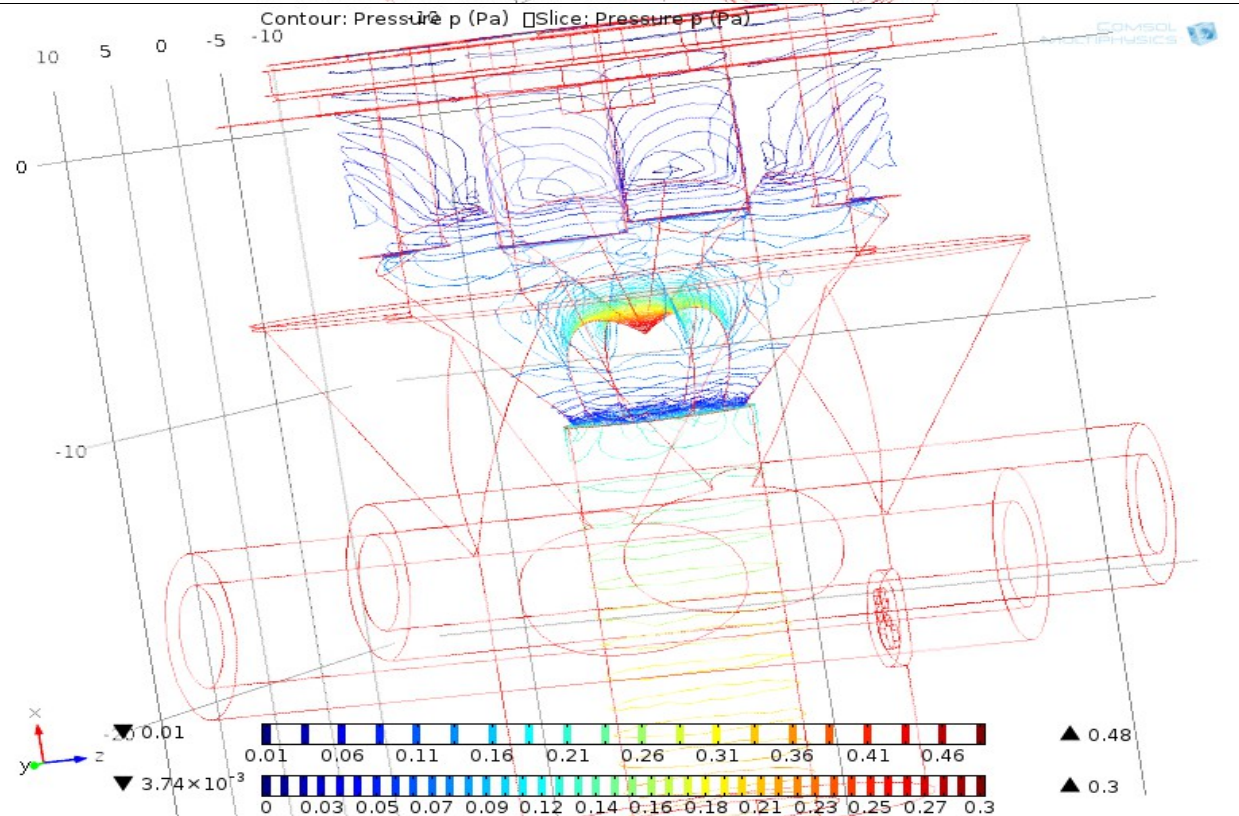
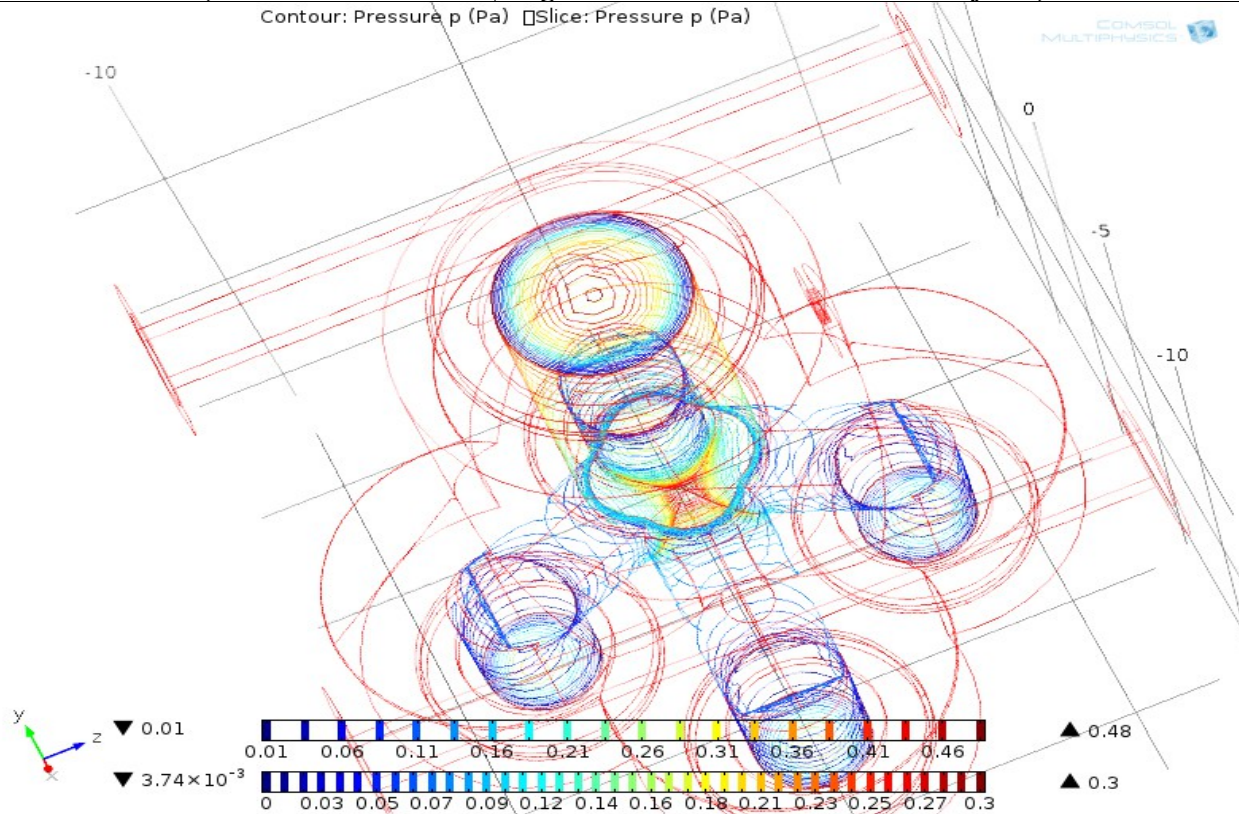
### • III. ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΙΜΩΝ ΕΣ. ΠΙΕΣΕΩΝ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΑΕΡΙΟΥ ARGON

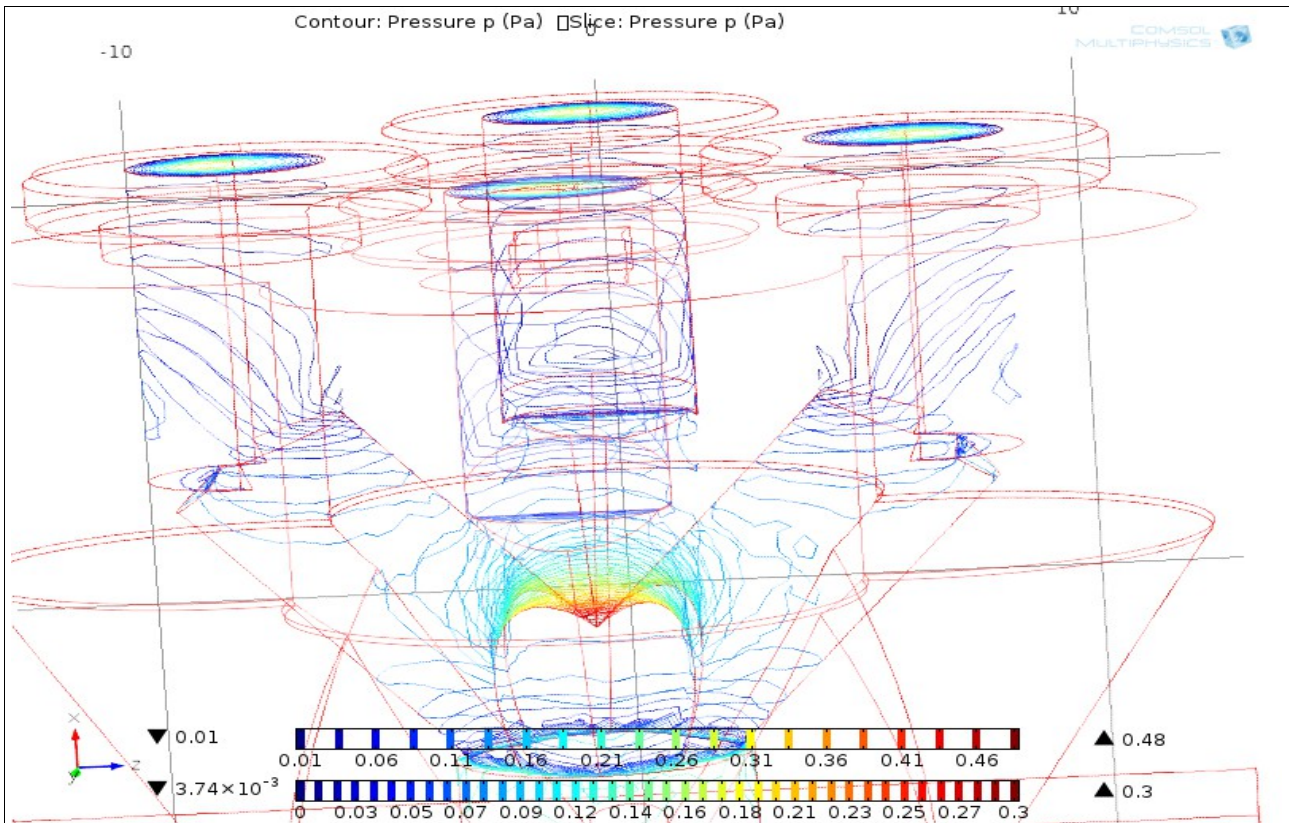
(x,y) (mm,mm)	Pressure (Pa) Input	Pressure (Pa) Output 1	Pressure (Pa) Output 2	Pressure (Pa) Output 3	Pressure (Pa) Output 4
Ένα σημείο	1	1	2	3	4
Στο κέντρο	0.28	0.11	0.11	0.11	0.11
Ενδιάμεσα	0.26	0.10	0.10	0.10	0.10
Ενδιάμεσα	0.20	0.095	0.095	0.095	0.095
Ενδιάμεσα	0.15	0.082	0.082	0.082	0.082
Ενδιάμεσα	0.08	0.075	0.075	0.075	0.075
Στα άκρα	0.12	0.065	0.065	0.065	0.065

# Images pressure

## b) double "Y"-tube (Argon 100%, turbulent + laminar flow)

Contour: Pressure p (Pa) □ Slice: Pressure p (Pa)





**Εικόνες 20a, 20b, 20c:** Στις παραπάνω εικόνες, παραθέτουμε τη κατανομή τιμών της εσωτερικής πίεσης της ροής του αερίου αργού στο εσωτερικό χώρο του double “Y” – tube. Παρατηρούμε ότι η κατανομή τιμών της εσωτερικής πίεσης ροής του αερίου που διαμορφώνεται στη περιοχή εισόδου σύμφωνα με τους νόμους της στρωτής + τυρβώδους ροής έχει μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τη κατανομή τιμών της εσωτερικής πίεσης της ροής του αερίου που διαμορφώνεται στη περιοχή εξόδου του double “Y” – tube σύμφωνα με τους νόμους της στρωτής ροής.

Επειδή έχουμε κάποια προβλήματα σχετικά με το πώς θα υπάρχει ένας σωστός τρόπος υπολογισμού της διαφοράς πίεσης  $\Delta P$  από τη στιγμή που έχουμε να κάνουμε με κατανομές τιμών για την πίεση του εσωτερικού χώρου του διανομέα ροής αερίου αργού, υπάρχουν γενικά δυο τρόποι υπολογισμού του  $\Delta P$  (a) Higher Pressure, b) Average Pressure).

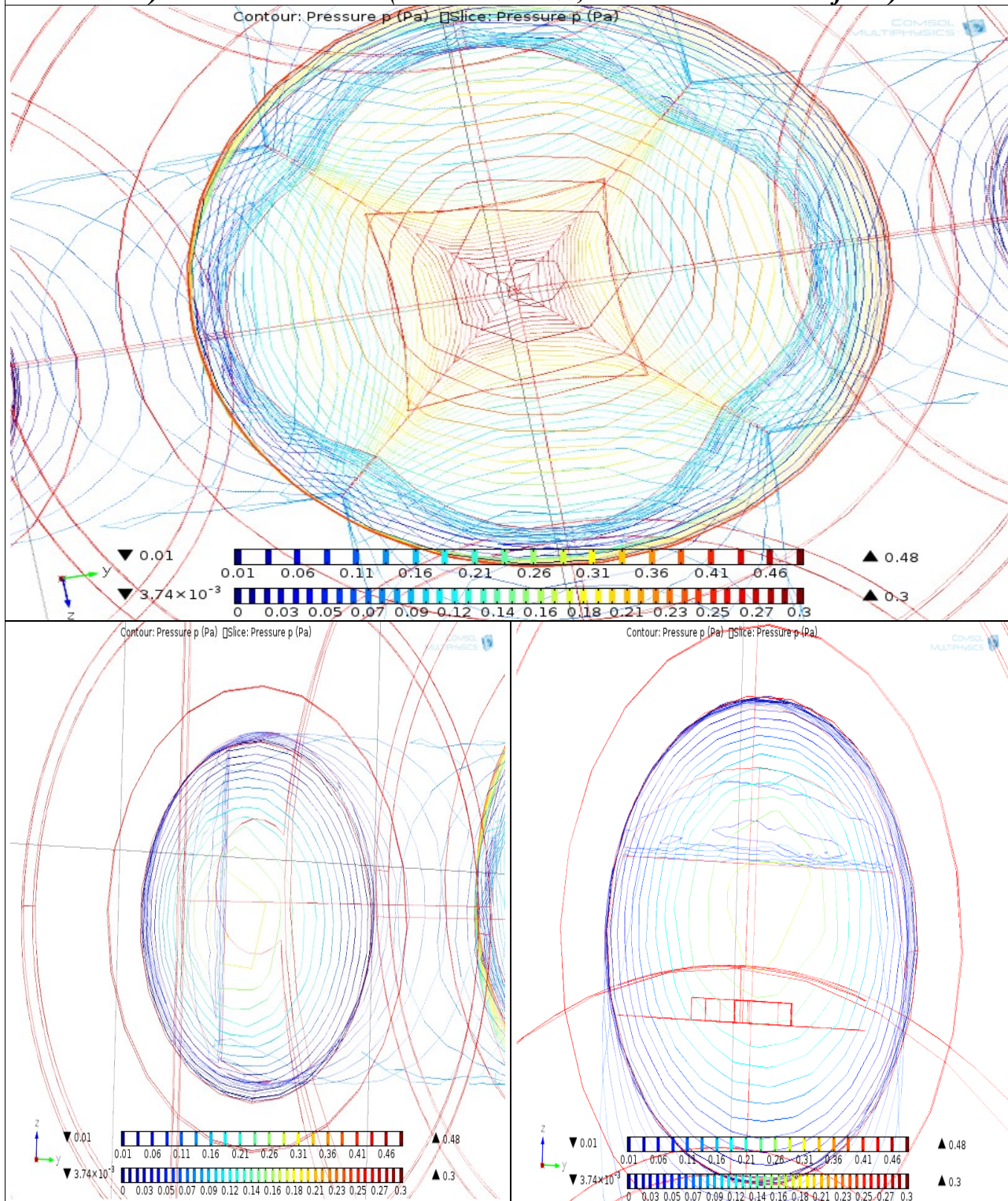
#### a) Υπολογισμός Higher Pressure

Φτιάχνουμε μια απεικόνιση που περιέχει τη κατανομή τιμών της πίεσης ροής του αργού στη περιοχή εισόδου στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Y” σωλήνα και τέσσερις απεικονίσεις που περιέχουν τις κατανομές τιμών της πίεσης ροής του αερίου στον εσωτερικό χώρο των τεσσάρων κλάδων της περιοχής εξόδου του σωλήνα. Η κατανομή των πιέσεων ροής του αερίου στη περιοχή εισόδου σύμφωνα με τους νόμους της στρωτής και τυρβώδους ροής είναι εκτενέστερη και περιέχει μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τη κατανομή τιμών της πίεσης ροής του αερίου αργού στη περιοχή εξόδου στον εσωτερικό χώρο του σωλήνα, όταν το αέριο μεταφέρεται σύμφωνα με τους νόμους της στρωτής ροής.

Ο πρώτος τρόπος υπολογισμού είναι: από τη κατανομή των πιέσεων ροής του αργού στη περιοχή εισόδου διαλέγουμε ως αντιπροσωπευτική τιμή πίεσης, την κατανομή της πίεσης ροής του αερίου που βρίσκεται στο κεντρικό επίπεδο της απεικόνισης που είναι η μέγιστη τιμή της κατανομής τιμών της πίεσης του εσωτερικού χώρου του σωλήνα. Την αντιπροσωπευτική τιμή πίεσης παίρνουμε και για τις υπόλοιπες τέσσερις κατανομές της πίεσης ροής του αερίου στις τέσσερις περιοχές εξόδου που κυριαρχούν οι νόμοι της στρωτής και τυρβώδους ροής.

## Images Impedance

### b) double "Y" – tube ( ARGON 100%, laminar + turbulent flow )



**Εικόνες 21a, 21b1, 21b2:** Στη πρώτη σειρά παρατηρούμε την απεικόνιση της περιοχής εισόδου ενώ στις επόμενες παρατηρούμε τις απεικονίσεις της περιοχής εξόδου στον εσωτερικό χώρο του double "Y" - tube. Εκτός από τα δυο συμπεράσματα (a,b) που βγάζουμε όταν το αέριο μεταφέρεται σύμφωνα με τη στρωτή ροή που είναι τα ίδια, επιπλέον έχουμε:c) η κατανομή τιμών της εσωτερικής πίεσης έχει μεγαλύτερες τιμές όταν το αέριο μεταφέρεται σύμφωνα με τους νόμους της στρωτής + τυρβώδους ροής.

<b>Impedances [ 1η περίπτωση: Higher Pressure ]</b>			
<b>b) double “Y” – tube ( ARGON 100%, Turbulent Flow )</b>			
P <sub>1</sub> = 0.0048mbar	P <sub>2</sub> = 0.0048mbar	P <sub>3</sub> = 0.0048mbar	P <sub>4</sub> = 0.0048mbar
P <sub>a</sub> = 0.0028mbar	P <sub>a</sub> = 0.0028mbar	P <sub>a</sub> =0.0028mbar	P <sub>a</sub> = 0.0028mbar
ΔP <sub>1</sub> = 0.0020mbar	ΔP <sub>2</sub> = 0.0020mbar	ΔP <sub>3</sub> = 0.0020mbar	ΔP <sub>4</sub> = 0.0020mbar
Q <sub>1</sub> = 0.5187L / hr	Q <sub>2</sub> = 0.5208L / hr	Q <sub>3</sub> = 0.5180L / hr	Q <sub>4</sub> = 0.5156L / hr
<b>Z1 = 0.003856</b> hr mbar/L	<b>Z2 = 0.003840</b> hr mbar/L	<b>Z3 = 0.003861</b> hr mbar/L	<b>Z4 = 0.003879</b> hr mbar/L

### β) Υπολογισμός Average Pressure

Φτιάχνουμε μια απεικόνιση που περιέχει την κατανομή των πιέσεων ροής του αερίου αργού στη περιοχή εισόδου στο εσωτερικό του διπλού “Y” – σωλήνα και τέσσερις απεικονίσεις που περιέχουν τις κατανομές των πιέσεων της ροής του αερίου αργού των τεσσάρων κλάδων της περιοχής εξόδου. Η κατανομή των πιέσεων ροής του αργού στη περιοχή εισόδου είναι εκτενέστερη, περιέχει μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τη κατανομή των πιέσεων ροής του αερίου στη περιοχή εξόδου στον εσωτερικό χώρο του σωλήνα και είναι μεγαλύτερη και με τη κατανομή των πιέσεων ροής του αερίου αργού, όταν στον εσωτερικό χώρο κυριαρχεί η στρωτή ροή.

Ο δεύτερος τρόπος υπολογισμού της εμπέδησης είναι από την κατανομή των πιέσεων της ροής του αερίου στη περιοχή εισόδου. Διαλέγουμε ως αντιπροσωπευτική τιμή πίεσης, την μέση τιμή της κατανομής των τιμών της πίεσης της ροής του αργού που βρίσκεται σε όλο το χώρο της απεικόνισης. Αυτή η τιμή καλείται μέση τιμή της κατανομής των τιμών της πίεσης ροής του αερίου που βρίσκεται στον εσωτερικό χώρο του σωλήνα. Την ίδια αντιπροσωπευτική τιμή πίεσης παίρνουμε και για τις υπόλοιπες τέσσερις κατανομές της πίεσης της ροής του αερίου στις τέσσερις περιοχές εξόδου που κυριαρχούν οι νόμοι της τυρβώδους ροής.

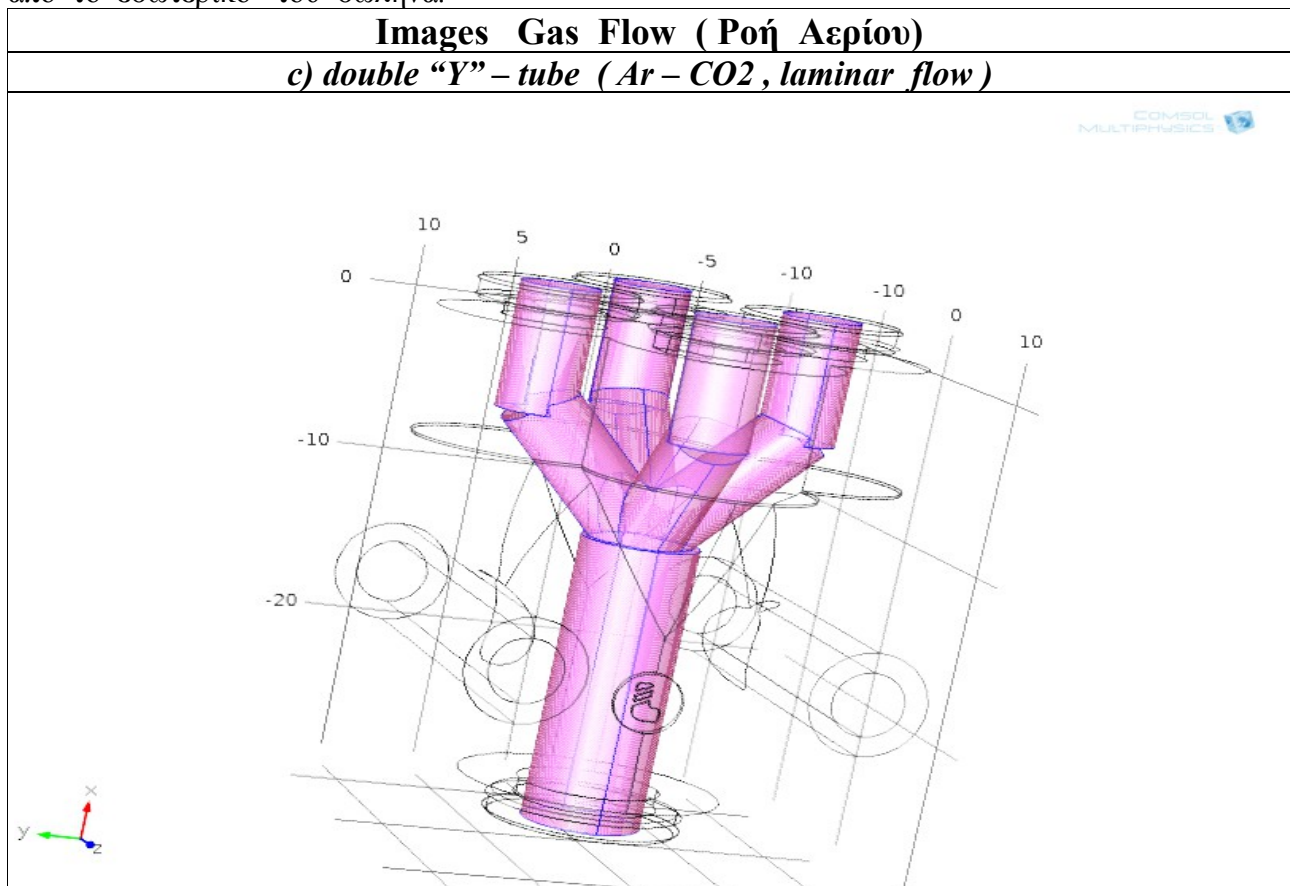
<b>Impedances [ 2η περίπτωση: Average Pressure ]</b>				
<b>b) double “Y” – tube ( ARGON 100%, Turbulent Flow )</b>				
<b>Input 1</b>	<b>Output 1</b>	<b>Output 2</b>	<b>Output 3</b>	<b>Output 4</b>
P <sub>max</sub> = 0.0050mbar	P <sub>max</sub> = 0.0028mbar	P <sub>max</sub> = 0.0028 mbar	P <sub>max</sub> = 0.0028mbar	P <sub>max</sub> = 0.0028mbar
P <sub>min</sub> = 0.0006 mbar	P <sub>min</sub> = 0.0003mbar	P <sub>min</sub> = 0.0003mbar	P <sub>min</sub> = 0.0003mbar	P <sub>min</sub> = 0.0003mbar
= 0.0028 mbar	= 0.00155mbar	= 0.00155 mbar	= 0.00155 mbar	= 0.00155 mbar
—————	ΔP <sub>1</sub> = 0.00125mbar	ΔP <sub>2</sub> = 0.00125mbar	ΔP <sub>3</sub> = 0.00125mbar	ΔP <sub>4</sub> = 0.00125mbar
—————	Q <sub>1</sub> = 0.5187L / hr	Q <sub>2</sub> = 0.5208L / hr	Q <sub>3</sub> = 0.5180L / hr	Q <sub>4</sub> = 0.5156 L / hr
<b>Z1 = 0.00241</b> hr mbar /L	<b>Z2 = 0.0024</b> hr mbar /L	<b>Z3 =0.002413</b> hr mbar /L	<b>Z4 =0.002424</b> hr mbar /L	

#### 4.1.2 Αποτελέσματα της προσομοίωσης του διπλού Y – σωλήνα όταν στο εσωτερικό του διαρρέεται από το μείγμα Ar 93% – CO2 7% .

##### 4.1.2a Αποτελέσματα της περιοχής κυριαρχίας της στρωτής ροής (laminar flow)

Σε αυτό το κεφάλαιο, καλούμαστε να βρούμε το χώρο όπου κινείται το μείγμα (Ar 93% – CO2 7%) σύμφωνα με τους νόμους της στρωτής ροής στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Y” σωλήνα. Σε πρώτο στάδιο θέλουμε να βρούμε το χώρο όπου κυριαρχεί η στρωτή ροή του μείγματος. Όπως παρατηρούμε από τη παρακάτω εικόνα (εικόνα 22), η περιοχή βρίσκεται στο τμήμα κοντά στο κέντρο του εσωτερικού χώρου του σωλήνα. Το επόμενο βήμα είναι να βρούμε την περιοχή εισόδου στον εσωτερικό χώρο του σωλήνα. Στο παρακάτω σχήμα, παρατηρούμε την μωβ επιφάνεια που είναι ο χώρος εισόδου του μείγματος. Το σημείο στο κέντρο της επιφάνειας, είναι το σημείο που μετράται η ταχύτητα εισόδου, δηλαδή η ταχύτητα ροής του μείγματος, όταν το μείγμα αρχίζει να διέρχεται στον εσωτερικό χώρο του σωλήνα.

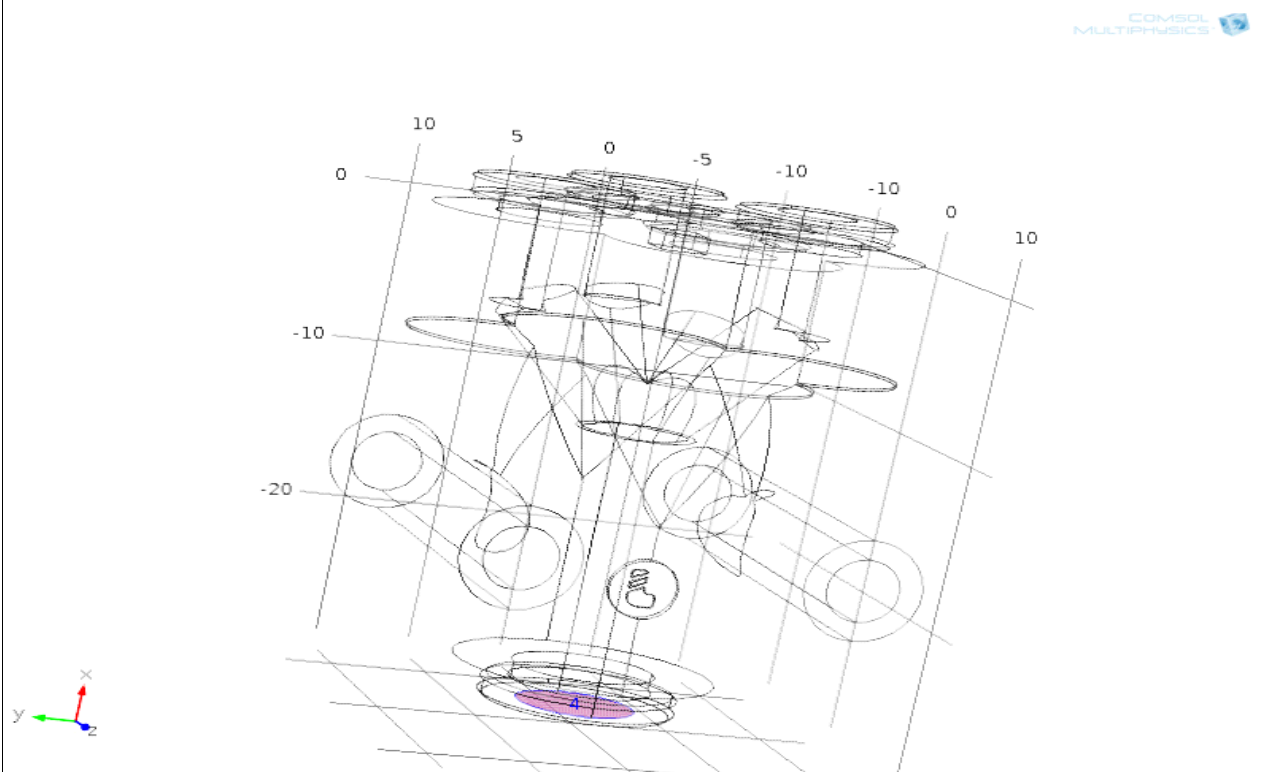
Έπειτα καλούμαστε να βρούμε την περιοχή εξόδου του μείγματος στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Y” σωλήνα. Η περιοχή εξόδου του μείγματος, αποτελείται από τέσσερις κλάδους. Έτσι, το μείγμα εισέρχεται από μια περιοχή εισόδου και εξέρχεται από τέσσερις περιοχές εξόδου σωλήνα. Σε τέσσερα σημεία, που βρίσκονται στο κέντρο των τεσσάρων περιοχών εξόδου του μείγματος στο εσωτερικό του σωλήνα μετράμε τις τέσσερις output velocities, δηλαδή τις τέσσερις τιμές της ταχύτητα ροής του μείγματος, όταν αυτό αρχίζει να εξέρχεται από το εσωτερικό του σωλήνα.



**Σχήμα 22:** Η περιοχή με το μωβ χρώμα είναι η περιοχή όπου κυριαρχεί η στρωτή ροή για τη μεταφορά του μείγματος Ar 93% – CO2 7% στο εσωτερικό του double “Y” – tube.

## Images INLET

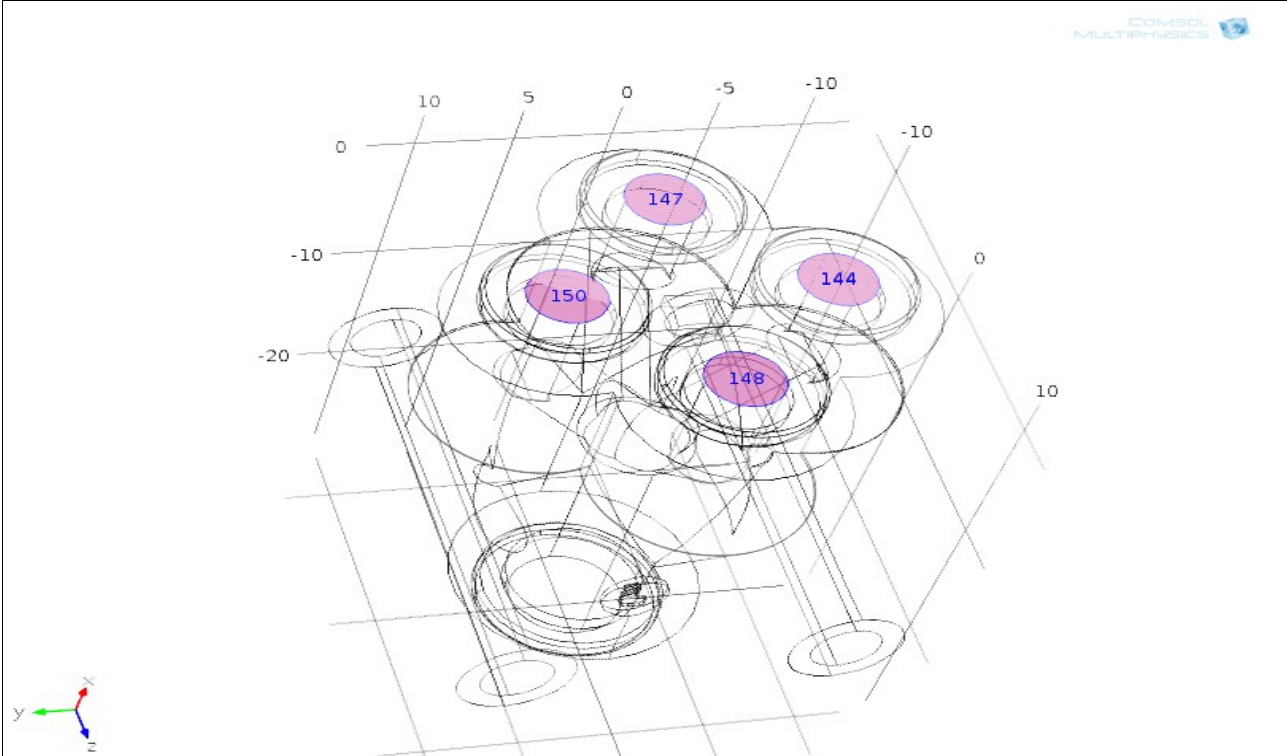
b) double “Y” – tube ( Ar 93%– CO2 7%, laminar flow )



**Εικόνα 23:** Η μωβ περιοχή αποτελεί την περιοχή εισόδου του double “Y” - tube. Παρατίθεται και η τιμή της στρωτής ροής της περιοχής εισόδου στον εσωτερικό χώρο του double “Y” - tube.

## Images OUTLET

c) double “Y” – tube ( Ar 93%– CO2 7%, laminar flow )



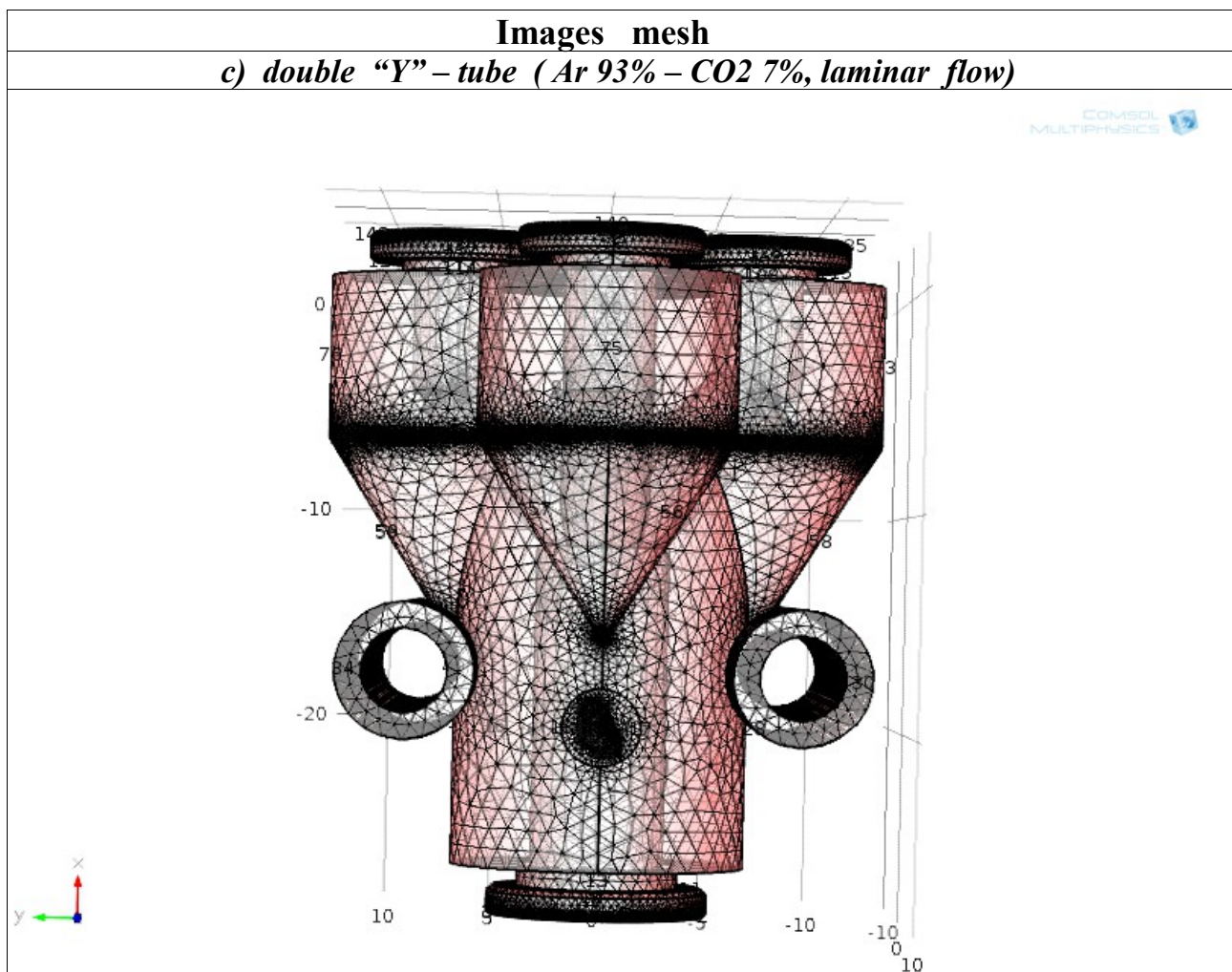
**Εικόνα 24:** Η μωβ περιοχή αποτελεί την περιοχή εξόδου. Παρατίθεται και οι τιμές της στρωτής ροής των τεσσάρων περιοχών εξόδου στον εσωτερικό χώρο του double “Y” - tube. Παρατηρούμε ότι και οι τέσσερις τιμές της στρωτής ροής είναι ισοδύναμες μεταξύ τους.



Στα παραπάνω σχήματα, φαίνονται τα τρισδιάστατα μοντέλα που κατασκευάσαμε για το διπλό “Y” σωλήνα. Το επόμενο βήμα είναι να χρησιμοποιήσουμε ένα πλέγμα για να επιλύσουμε το πρόβλημα. Επειδή αναφερόμαστε σε ένα τρισδιάστατο μοντέλο, για την παράθεση των αποτελεσμάτων μας, δουλέψαμε με επιφάνειες κάθετες αλλά και παράλληλες στην επιφάνεια του πλέγματος. Παραθέτουμε τα αποτελέσματά της προσομοίωσης για το μοντέλο του διπλού “Y” σωλήνα.

Στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 25), παραθέτουμε τη τρισδιάστατη γεωμετρία του πλέγματος του εσωτερικού χώρου του διπλού “Y” σωλήνα σε διάφορες κατευθύνσεις, για να δούμε αν υπάρχει εξάρτηση από την βαρύτητα. Αυτό που παρατηρούμε είναι ότι η βαρύτητα δεν επηρεάζει καθόλου την υφή ή την πυκνότητα του πλέγματος, εξαιτίας της μεγάλης πυκνότητας του πλέγματος που έχει το τρισδιάστατο μοντέλο.

Στον πίνακα παραθέτουμε τη 3D γεωμετρία του πλέγματος του μοντέλου για τη περίπτωση που το αέριο μεταφέρεται εσωτερικά σύμφωνα με τους νόμους της στρωτή ροής.



**Εικόνα 25:** Στο παραπάνω σχήμα, παραθέτουμε τη τρισδιάστατη γεωμετρία του πλέγματος του double “Y” – tube για να επιλύσουμε το πρόβλημά μας. Το παραθέτουμε έτσι ώστε να παρατηρήσουμε καλύτερα τη δομή της υφής και της πυκνότητας του πλέγματός.

Έπειτα, καλούμαστε να μελετήσουμε το πώς κατανέμεται η ταχύτητα ροής του μείγματος Ar 93% – CO<sub>2</sub> 7% σε ένα κεντρικό κομμάτι στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Y” σωλήνα, όταν γνωρίζουμε ότι η μεταφορά του μείγματος γίνεται σύμφωνα με τους νόμους της στρωτής ροής.

Στη συνέχεια, παραθέσουμε τα 3D διαγράμματα της κατανομής των ταχυτήτων ροής του μείγματος σε ένα κεντρικό κομμάτι στον εσωτερικό χώρο του σωλήνα και τον αντίστοιχο πίνακα της κατανομής τιμών της ταχύτητας ροής του μείγματος. Μετά παραθέτουμε τη κατανομή τιμών της ταχύτητας της ροής του μείγματος που εισέρχεται στον εσωτερικό χώρο του σωλήνα, η οποία ονομάζεται ταχύτητα εισόδου του μείγματος. Στη συνέχεια, παρατίθεται η κατανομή τιμών των τεσσάρων ταχυτήτων που εξέρχονται από το σωλήνα, οι οποίες ονομάζονται ταχύτητες εξόδου του μείγματος.

Παρατηρώντας το διάγραμμα της κατανομής τιμών της ταχύτητας ροής του μείγματος σε ένα κεντρικό κομμάτι στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Y” σωλήνα και τον αντίστοιχο πίνακα κατανομής τιμών της ταχύτητας της ροής του μείγματος, καταλήγουμε στα παρακάτω συμπεράσματα:

a) Η μέγιστη κατανομή τιμών της ταχύτητας ροής του μείγματος παρατηρείται στο κέντρο του σωλήνα ενώ η ελάχιστη κατανομή τιμών της ταχύτητας της ροής του μείγματος παρατηρείται στα άκρα του. Στον ενδιάμεσο χώρο η κατανομή τιμών της ταχύτητας ροής του μείγματος παίρνει ενδιάμεσες τιμές. Το φαινόμενο αυτό είναι φυσιολογικό διότι στο κέντρο του σωλήνα έχουμε την βέλτιστη ροή του μείγματος σε σχέση με τα άκρα του, όπου η ροή παίρνει την ελάχιστη κατανομή τιμών της.

b) Όταν εισέρχεται το μείγμα στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Y” σωλήνα έχει μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τη κατανομή τιμών της ταχύτητας ροής του μείγματος όταν εξέρχεται από έναν από τους τέσσερις κλάδους της περιοχής εξόδου του σωλήνα.

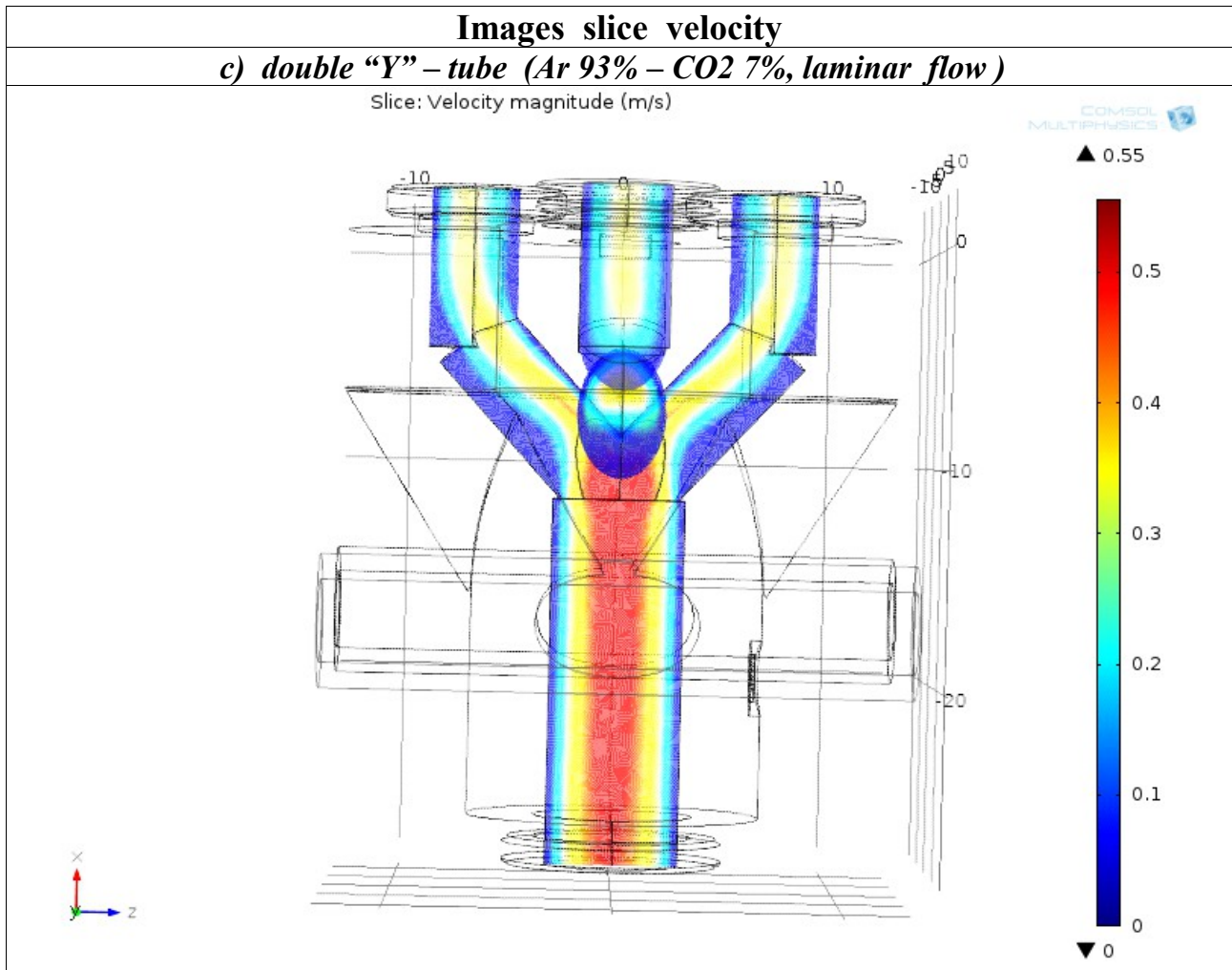
c) Τέλος, θα πρέπει να παρατηρήσουμε ότι η κατανομή τιμών της ταχύτητας ροής του μείγματος που εξέρχεται από ένα κλάδο της περιοχής εξόδου του εσωτερικού χώρου του σωλήνα, είναι ίδια με τις υπόλοιπες κατανομές τιμών της ταχύτητας ροής του μείγματος που εξέρχονται από τους υπόλοιπους τρεις κλάδους της περιοχής εξόδου.

Σε αυτό το σημείο, θα πρέπει να τονίσουμε ότι τα παρακάτω σχήματα είναι κομμάτια των κατανομών τιμών της ταχύτητας ροής του μείγματος στην κεντρική περιοχή στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Y” σωλήνα, όπου η κατανομή τιμών της ταχύτητας ροής του μείγματος είναι η βέλτιστη δυνατή.

Τα παραπάνω τρία συμπεράσματα μπορούν να επαληθευτούν και πειραματικά κατά την πειραματική διαδικασία της διάταξης του διανομέα ροής μείγματος. (βλέπε το κεφάλαιο 6ο).

## **VI. ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΙΜΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΡΟΗΣ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ Ar 93% – CO<sub>2</sub> 7%**

(x,y) (mm,mm)	Velocity (m/s) input	Velocity (m/s) output 1	Velocity (m/s) output2	Velocity (m/s) output 3	Velocity (m/s) output 4
Ένα σημείο	1	1	2	3	4
Στο κέντρο	0.51	0.29	0.29	0.29	0.29
Ενδιάμεσα	0.41	0.24	0.24	0.24	0.24
Ενδιάμεσα	0.31	0.19	0.19	0.19	0.19
Ενδιάμεσα	0.21	0.14	0.14	0.14	0.14
Ενδιάμεσα	0.11	0.09	0.09	0.09	0.09
Στα άκρα	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04



**Εικόνα 25:** Στη παραπάνω εικόνα, παραθέτουμε τη κατανομή τιμών της ταχύτητας ροής του μείγματος Ar 93% – CO2 7% στον εσωτερικό χώρο του double “Y” tube. Παρατηρούμε ότι η κατανομή τιμών της ταχύτητας ροής έχει τις μεγαλύτερες τιμές στο κέντρο ενώ διαμορφώνει τις ελάχιστες τιμές της κατανομής τιμών της ταχύτητας ροής στην ακριανή περιοχή του διπλού “Y” σωλήνα.

Παρατηρώντας τα διαγράμματα των κατανομών τιμών της πίεσης ροής του μείγματος Ar 93% – CO2 7% και τον αντίστοιχο πίνακα κατανομής τιμών, καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

a) Η μέγιστη κατανομή τιμών της πίεσης της ροής του μείγματος παρατηρείται εκεί που ο χώρος είναι μεγαλύτερος, εκεί δηλαδή που η διάμετρος του εσωτερικού χώρου είναι μεγαλύτερη. Αυτό είναι φυσιολογικό γιατί όσο μεγαλύτερος είναι ο χώρος τόσο μεγαλύτερη ποσότητα αερίου περνάει, άρα τόσο μεγαλύτερη πίεση εφαρμόζεται στα τοιχώματά του.

b) Η πίεση της ροής του μείγματος όταν εισέρχεται στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Y” σωλήνα έχει μεγαλύτερη κατανομή τιμών σε σχέση με την αντίστοιχη κατανομή τιμών της πίεσης εξόδου, δηλαδή της πίεσης του μείγματος όταν εξέρχεται από έναν από τους τέσσερις κλάδους της περιοχής εξόδου στον εσωτερικό χώρο του σωλήνα.

c) Στη συνέχεια, η κατανομή τιμών της πίεσης της ροής του μείγματος που εξέρχεται από τη περιοχή εξόδου στον εσωτερικό χώρο του σωλήνα είναι ίδια με τις αντίστοιχες κατανομές τιμών της πίεσης της ροής του μείγματος που εξέρχεται από τους υπόλοιπους τέσσερις κλάδους της περιοχής εξόδου του εσωτερικού χώρου του σωλήνα.

d) Τέλος, συγκρίνοντας την κατανομή τιμών της πίεσης της ροής του μείγματος όταν αυτό εισέρχεται σύμφωνα με τους νόμους της στρωτής ροής στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Υ” σωλήνα είναι εκτενέστερη και έχει μεγαλύτερες τιμές όσο πάμε προς το κέντρο σε σχέση με τη κατανομή τιμών της πίεσης του μείγματος, όταν αυτό εισέρχεται στον εσωτερικό χώρο του σωλήνα σύμφωνα με τους νόμους της στρωτής ροής.

Τα παραπάνω τέσσερα συμπεράσματα μπορούν να επαληθευτούν και πειραματικά κατά την πειραματική διαδικασία της διάταξης του διανομέα ροής του μείγματος.

Ένας από τους λόγους που είναι σημαντική η μελέτη της πίεσης της ροής του μείγματος στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Υ” σωλήνα είναι διότι μπορούμε να υπολογίσουμε τη διαφορά πίεσης  $\Delta P$  της στρωτής ροής του μείγματος, μεταξύ της πίεσης ενός οποιουδήποτε σημείου και της πίεσης εξόδου. Γνωρίζοντας τη διαφορά πίεσης  $\Delta P$  και την παροχή  $Q$ , μπορούμε να υπολογίσουμε την εμπέδηση  $Z$  του διανομέα ροής μείγματος μέσω του παρακάτω τύπου:

$$Z = \frac{\Delta P_{(1 \rightarrow 4)}}{Q_{(1 \rightarrow 4)}} = \frac{(P_{(1 \rightarrow 4)} - P_a)}{Q_{(1 \rightarrow 4)}} \quad (4.3)$$

Από τον παραπάνω τύπο, μπορούμε να υπολογίσουμε την εμπέδηση της ροής του μείγματος για οποιοδήποτε σημείο στο εσωτερικό του διπλού “Υ” σωλήνα στην περίπτωση, που η κυκλοφορία του μείγματος γίνεται σύμφωνα με τους νόμους της στρωτής ροής. Από τα παραπάνω σχήματα της πίεσης της ροής του μείγματος στον εσωτερικό χώρο του σωλήνα μπορούμε να υπολογίσουμε τη διαφορά πίεσης  $\Delta P$  μεταξύ της πίεσης ενός οποιουδήποτε σημείου που βρίσκεται στην περιοχή εισόδου και της πίεσης ενός οποιουδήποτε σημείου που βρίσκεται στην περιοχή εξόδου του σωλήνα, το οποίο είναι προκαθορισμένο.

## **VII. ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΙΜΩΝ ΠΙΕΣΕΩΝ ΡΟΗΣ ΤΟΥ ΑΕΡΙΟΥ Ar 93% - CO2 7%**

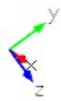
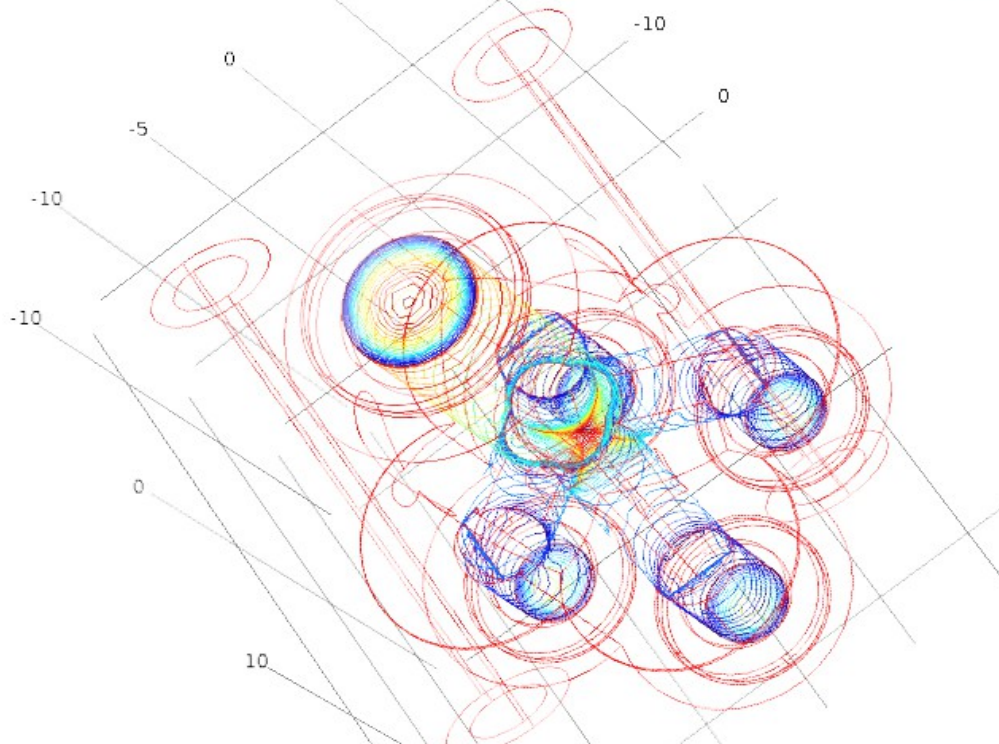
(x,y) (mm,mm)	Pressure (Pa) Input	Pressure (Pa) Output 1	Pressure (Pa) Output 2	Pressure (Pa) Output 3	Pressure (Pa) Output 4
Ένα σημείο	1	1	2	3	4
Στο κέντρο	0.255	0.085	0.085	0.085	0.085
Ενδιάμεσα	0.235	0.080	0.080	0.080	0.080
Ενδιάμεσα	0.175	0.075	0.075	0.075	0.075
Ενδιάμεσα	0.125	0.070	0.070	0.070	0.070
Ενδιάμεσα	0.055	0.065	0.065	0.065	0.065
Στα άκρα	0.095	0.060	0.060	0.060	0.060

# Images pressure

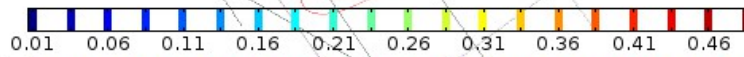
## c) double "Y" – tube ( Ar 93% – CO2 7%, laminar flow)

Contour: Pressure p (Pa) □ Slice: Pressure p (Pa)

COMSOL MULTIPHYSICS

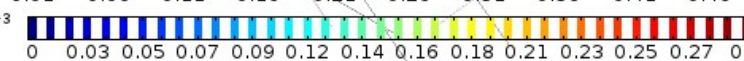


▼ 0.01



▲ 0.48

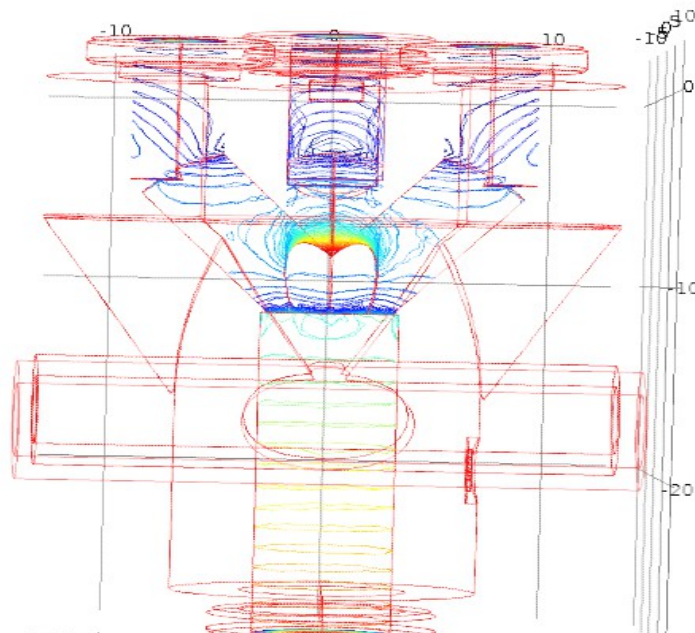
▼  $3.74 \times 10^{-3}$



▲ 0.3

Contour: Pressure p (Pa) □ Slice: Pressure p (Pa)

COMSOL MULTIPHYSICS

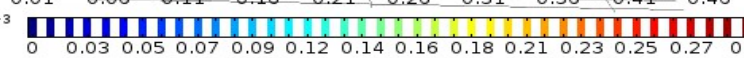


▼ 0.01

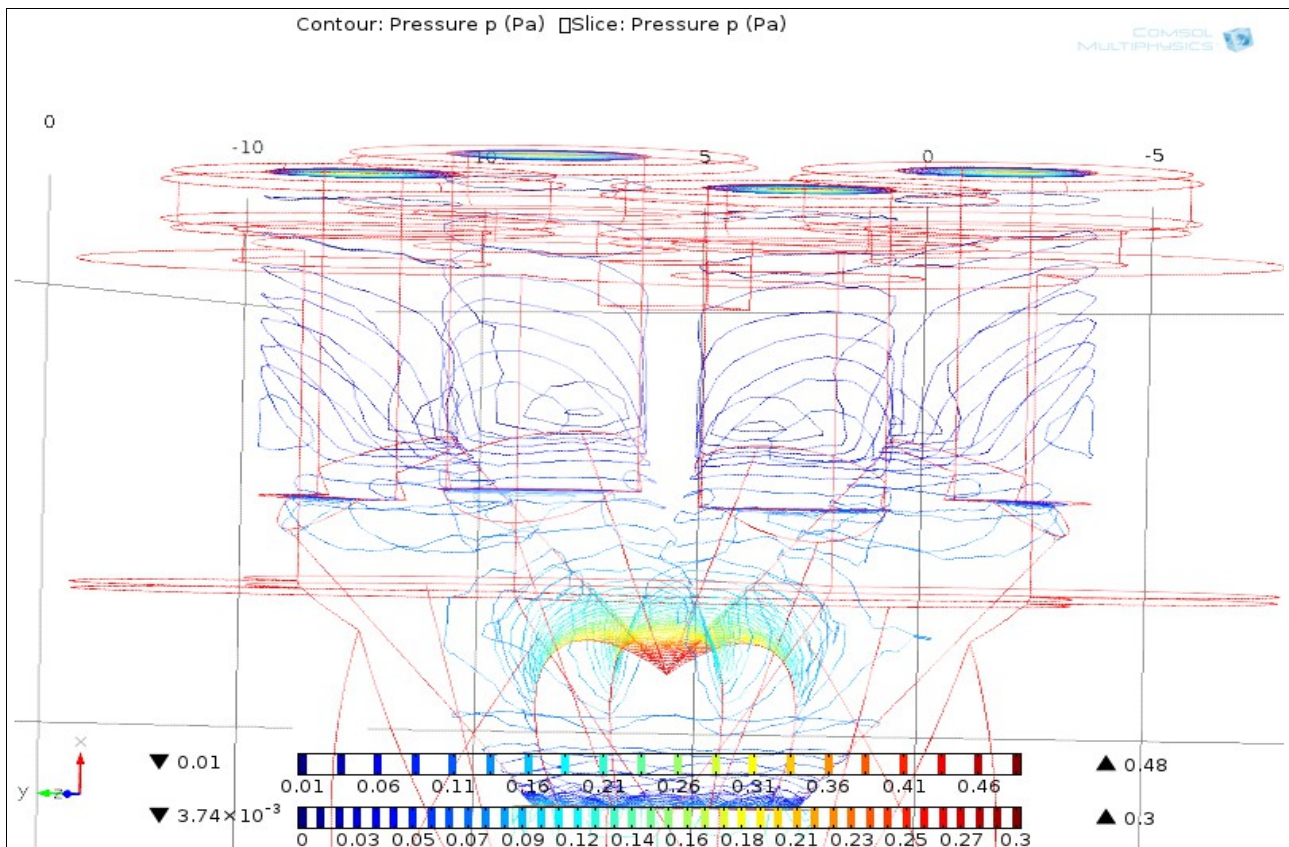


▲ 0.48

▼  $3.74 \times 10^{-3}$



▲ 0.3



**Εικόνες 26a, 26b, 26c:** Στις παραπάνω εικόνες, παραθέτουμε τη κατανομή της εσωτερικής πίεσης της ροής του μείγματος Ar 93% - CO<sub>2</sub> 7% στον εσωτερικό χώρο του double “Y” – tube. Παρατηρούμε ότι η κατανομή τιμών της εσωτερικής πίεσης της ροής του μείγματος που διαμορφώνεται στη περιοχή εισόδου σύμφωνα με τους νόμους της στρωτής ροής ληχει μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τη κατανομή τιμών της εσωτερικής πίεσης της ροής του μείγματος που διαμορφώνεται στην περιοχή εξόδου του double “Y” – tube σύμφωνα με τους νόμους της στρωτής ροής.

Επειδή δεν υπάρχει ένας σωστός τρόπος υπολογισμού της διαφοράς πίεσης  $\Delta P$  από τη στιγμή που έχουμε να κάνουμε με κατανομές τιμών για την πίεση του εσωτερικού χώρου του διανομέα ροής μείγματος Ar 93% - CO<sub>2</sub> 7%, υπάρχουν γενικά δύο τρόποι υπολογισμού του  $\Delta P$  (a) *Higher Pressure*, b) *Average Pressure*).

#### a) Υπολογισμός *Higher Pressure*

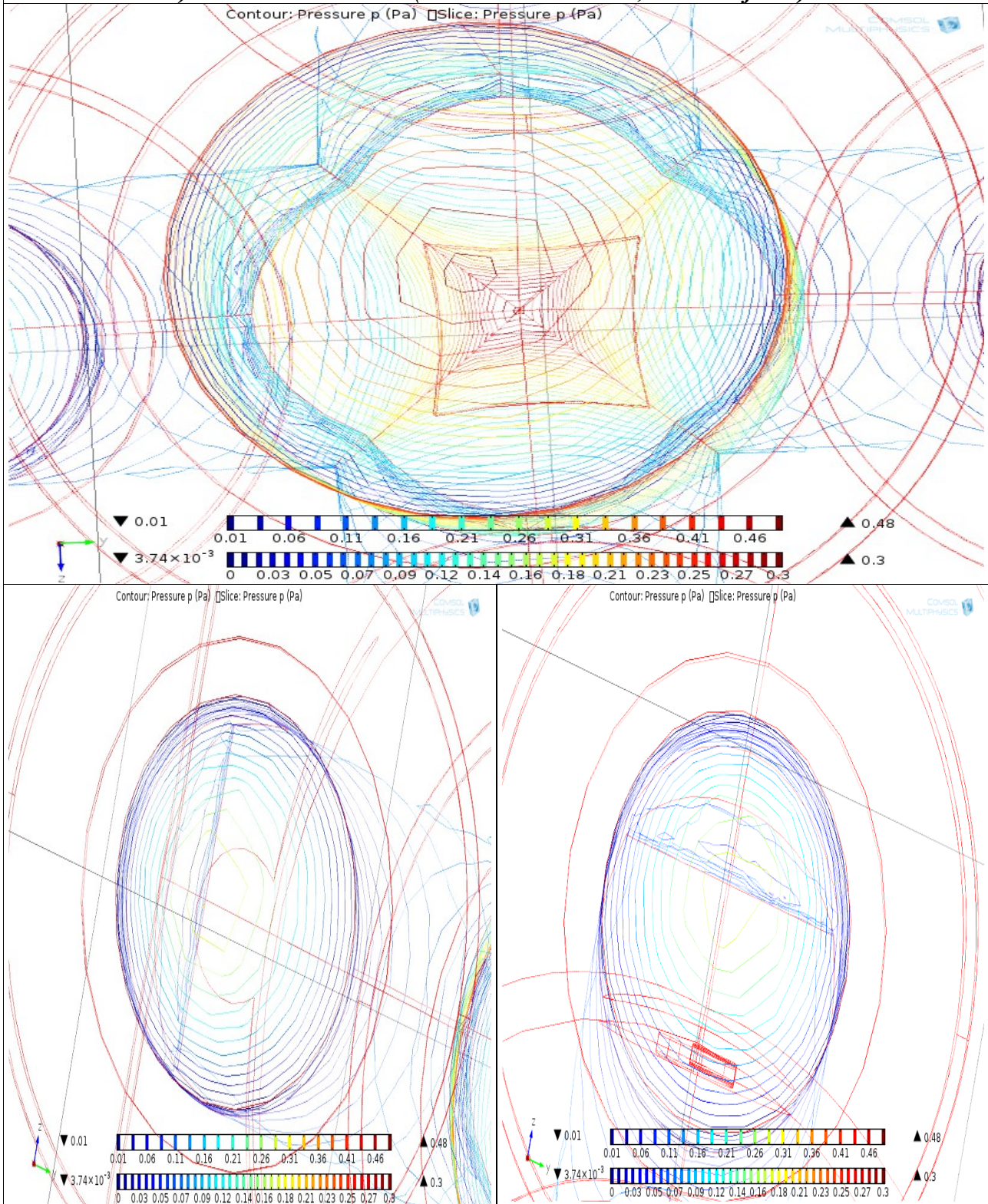
Φτιάχνουμε μια απεικόνιση που περιέχει τη κατανομή τιμών της πίεσης της ροής του μείγματος στην περιοχή εισόδου στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Y” σωλήνα και τέσσερις απεικονίσεις που περιέχουν τις κατανομές τιμών της πίεσης της στρωτής ροής του μείγματος των τεσσάρων κλάδων της περιοχής εξόδου του σωλήνα. Όπως γίνεται αντιληπτό, η κατανομή τιμών της εσωτερικής πίεσης της στρωτής ροής του μείγματος στη περιοχή εισόδου είναι εκτενέστερη και περιέχει μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τη κατανομή τιμών της πίεσης της στρωτής ροής του μείγματος στη περιοχή εξόδου του εσωτερικού χώρου του σωλήνα .

Ο πρώτος τρόπος υπολογισμού είναι ο ακόλουθος: από τη κατανομή τιμών της εσωτερικής πίεσης της ροής του μείγματος στην περιοχή εισόδου διαλέγουμε ως *αντιπροσωπευτική τιμή πίεσης* την κατανομή τιμών της πίεσης του μείγματος που βρίσκεται στο κεντρικό επίπεδο της απεικόνισης που είναι η μέγιστη τιμή της κατανομής τιμών της πίεσης στον εσωτερικό χώρο του σωλήνα.

Την ίδια αντιπροσωπευτική τιμή πίεσης της στρωτής ροής του μείγματος παίρνουμε και στους τέσσερις κλάδους της περιοχής εξόδου.

## Images Impedance

### c) double "Y" – tube ( Ar 93% – CO2 7%, laminar flow )



**Εικόνες 27a, 27b1, 27b2:** Στη πρώτη σειρά παρατηρούμε την απεικόνιση της περιοχής εισόδου ενώ στις επόμενες παρατηρούμε τις απεικονίσεις της περιοχής εξόδου στον εσωτερικό χώρο του διπλού "Y" σωλήνα. Εκτός από τα τρία συμπεράσματα (a,b,c) που βγάζουμε όταν μεταφέρεται καθαρό αργό επιπλέον έχουμε: η κατανομή τιμών της εσωτερικής πίεσης της στρωτής ροής του μείγματος έχει χαμηλότερες τιμές σε σχέση με την αντίστοιχη κατανομή τιμών εσωτερικής πίεσης στρωτής ροής του καθαρού αργού.

<b>Impedances [ 1η περίπτωση: Higher Pressure ]</b>			
<b>c) double “Y” – tube (Ar 93% – CO2 7%, laminar Flow )</b>			
$P_1 = 0.0044\text{mbar}$	$P_2 = 0.0044\text{mbar}$	$P_3 = 0.0044\text{mbar}$	$P_4 = 0.0044\text{mbar}$
$P_a = 0.0030\text{mbar}$	$P_a = 0.0030\text{mbar}$	$P_a = 0.0030\text{mbar}$	$P_a = 0.0030\text{mbar}$
$\Delta P_1 = 0.0014\text{mbar}$	$\Delta P_2 = 0.0014\text{mbar}$	$\Delta P_3 = 0.0014\text{mbar}$	$\Delta P_4 = 0.0014\text{mbar}$
$Q_1 = 0.5187\text{L / hr}$	$Q_2 = 0.5208\text{L / hr}$	$Q_3 = 0.5180\text{ L / hr}$	$Q_4 = 0.5156\text{L / hr}$
<b>Z1 = 0.002699 hr mbar/L</b>	<b>Z2 = 0.002688 hr mbar/L</b>	<b>Z3 = 0.002703 hr mbar/L</b>	<b>Z4 = 0.002715 hr mbar/L</b>

### β) Υπολογισμός Average Pressure

Φτιάχνουμε μια απεικόνιση που περιέχει τη κατανομή τιμών της πίεσης της ροής του μείγματος στην περιοχή εισόδου στον εσωτερικό χώρο του σωλήνα και τέσσερις απεικονίσεις που περιέχουν τις κατανομές τιμών της πίεσης της ροής του μείγματος των τεσσάρων κλάδων στη περιοχή εξόδου του εσωτερικού χώρου του σωλήνα. Όπως γίνεται αντιληπτό, η κατανομή τιμών της πίεσης της ροής του μείγματος στη περιοχή εισόδου είναι εκτενέστερη και περιέχει μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τη κατανομή τιμών της πίεσης της ροής του μείγματος στη περιοχή εξόδου στον εσωτερικό χώρο του σωλήνα.

Ο δεύτερος τρόπος υπολογισμού της εμπέδησης είναι από τη κατανομή τιμών της πίεσης της ροής του μείγματος στη περιοχή εισόδου. Διαλέγουμε ως αντιπροσωπευτική τιμή πίεσης, την μέση τιμή της κατανομής τιμών της πίεσης της ροής του μείγματος που βρίσκεται στον εσωτερικό χώρο του σωλήνα. Την ίδια αντιπροσωπευτική τιμή της πίεσης παίρνουμε και για τις υπόλοιπες τέσσερις κατανομές της πίεσης της ροής του μείγματος στις τέσσερις περιοχές που κυριαρχούν οι νόμοι της στρωτής ροής του μείγματος.

<b>Impedances [ 2η περίπτωση: Average Pressure ]</b>				
<b>c) double “Y” – tube (Ar 93% – CO2 7%, laminar flow )</b>				
<b>Input 1</b>	<b>Output 1</b>	<b>Output 2</b>	<b>Output 3</b>	<b>Output 4</b>
$P_{\max} = 0.0047\text{ mbar}$	$P_{\max} = 0.0028\text{mbar}$	$P_{\max} = 0.0028\text{ mbar}$	$P_{\max} = 0.0028\text{mbar}$	$P_{\max} = 0.0028\text{mbar}$
$P_{\min} = 0.00045\text{mbar}$	$P_{\min} = 0.00025\text{mbar}$	$P_{\min} = 0.00025\text{ mbar}$	$P_{\min} = 0.00025\text{mbar}$	$P_{\min} = 0.00025\text{mbar}$
$P_{\text{average input}} = 0.002273\text{ mbar}$	$P_{\text{average output}} = 0.001525\text{ mbar}$	$P_{\text{average output}} = 0.001525\text{ mbar}$	$P_{\text{average output}} = 0.001525\text{ mbar}$	$P_{\text{average output}} = 0.001525\text{ mbar}$
—————	$\Delta P_1 = 0.000748\text{ mbar}$	$\Delta P_2 = 0.000748\text{ mbar}$	$\Delta P_3 = 0.000748\text{ mbar}$	$\Delta P_4 = 0.000748\text{ mbar}$
—————	$Q_1 = 0.5187\text{L / hr}$	$Q_2 = 0.5208\text{L / hr}$	$Q_3 = 0.5180\text{L / hr}$	$Q_4 = 0.5156\text{L / h}$
<b>Z1 = 0.001442 hr mbar/L</b>	<b>Z2 = 0.001436 hr mbar/L</b>	<b>Z3 = 0.001444 hr mbar/L</b>	<b>Z4 = 0.001451 hr mbar/L</b>	

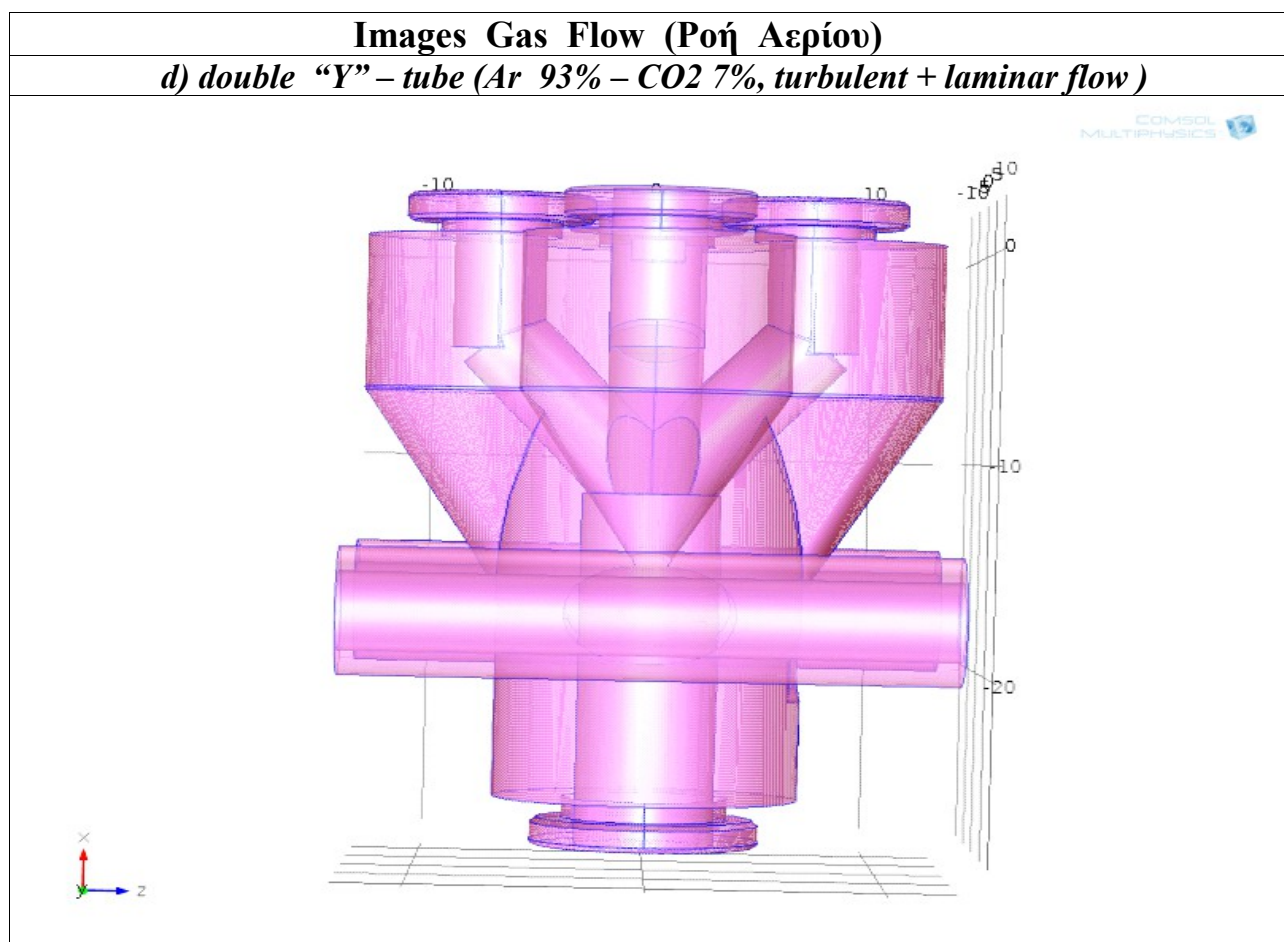


#### 4.1.2b Αποτελέσματα της περιοχής κυριαρχίας της τυρβώδους ροής (turbulent flow)

Το τελευταίο βήμα της εργασίας αυτής είναι να βρούμε το χώρο που κινείται το μείγμα  $Ar\ 93\% - CO_2\ 7\%$  και η κυκλοφορία του γίνεται σύμφωνα με τους νόμους της στρωτής ροής + τυρβώδους ροής στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Y” σωλήνα.

Όπως παρατηρούμε την εικόνα 28 στον εσωτερικό χώρο του σωλήνα, αντιλαμβανόμαστε ότι η περιοχή που κυριαρχεί η στρωτή ροή του μείγματος είναι η μωβ περιοχή, που βρίσκεται κοντά στο κέντρο του εσωτερικού χώρου του σωλήνα ενώ η περιοχή που κυριαρχεί η τυρβώδης ροή κατά τη κυκλοφορία του μείγματος είναι η μαύρη περιοχή που βρίσκεται κοντά στα άκρα του εσωτερικού χώρου του διπλού “Y” σωλήνα.

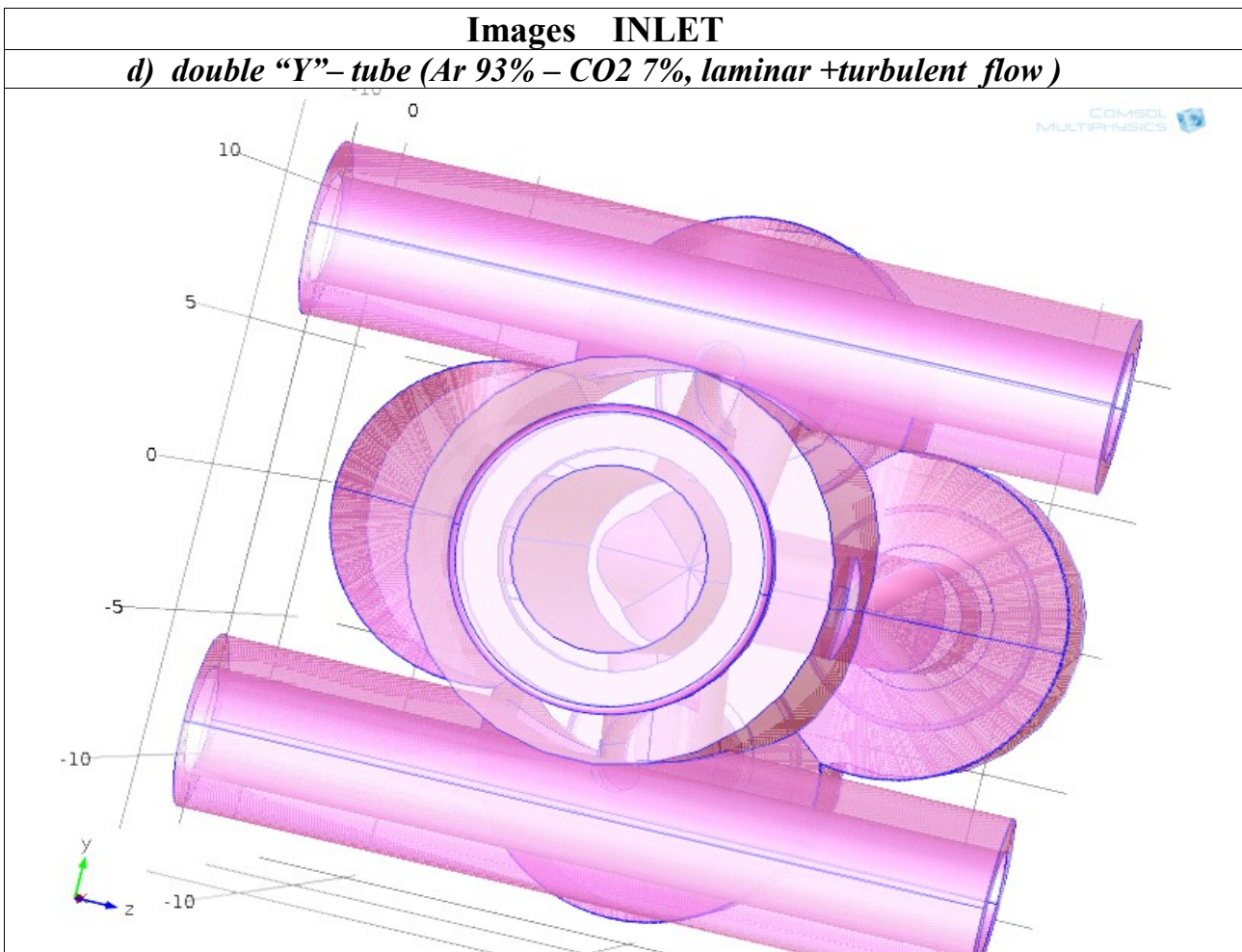
Οι ενδιάμεσοι χώροι είναι οι χώροι που φέρουν δύο άλλου είδους φαινόμενα. Ο πρώτος χώρος είναι η περιοχή όπου κυριαρχεί η στρωτή ροή του μείγματος, όμως σε κάποια άλλα σημεία, σε τοπικό επίπεδο, υπάρχει περιοχή όπου αναπτύσσεται η τυρβώδης ροή στον εσωτερικό χώρο του σωλήνα. Ο δεύτερος χώρος έχει να κάνει με το χώρο όπου κυριαρχεί η τυρβώδης ροή του μείγματος αλλά και εδώ σε κάποια σημεία σε τοπικό πάλι επίπεδο υπάρχει περιοχή όπου αναπτύσσεται η στρωτή ροή κατά τη μεταφορά του μείγματος στον εσωτερικό χώρο του σωλήνα.



**Εικόνα 28:** Η κεντρική μωβ περιοχή είναι η περιοχή που κυριαρχεί η στρωτή ροή κατά τη κυκλοφορία του μείγματος στον εσωτερικό χώρο του double “Y” – tube ενώ η ακριανή μαύρη περιοχή είναι η αντίστοιχη περιοχή που κυριαρχεί η τυρβώδης ροή. - 81 -

Στη συνέχεια της προσομοίωσης είναι να βρούμε την περιοχή εισόδου του διπλού “Y” σωλήνα. Στη πρώτη εικόνα, φαίνεται καθαρά η περιοχή εισόδου όπου μετρούμε την ταχύτητα εισόδου. Η πρώτη επιφάνεια της εικόνας ροής (εικόνα 29) είναι ο χώρος στον οποίο αρχίζει η λεγόμενη στρωτή ροή του μείγματος ενώ η δεύτερη επιφάνεια της εικόνας ροής (εικόνα 29) είναι ο χώρος που αρχίζει η τυρβώδης ροή κατά τη κυκλοφορία του μείγματος στον εσωτερικό χώρο του σωλήνα.

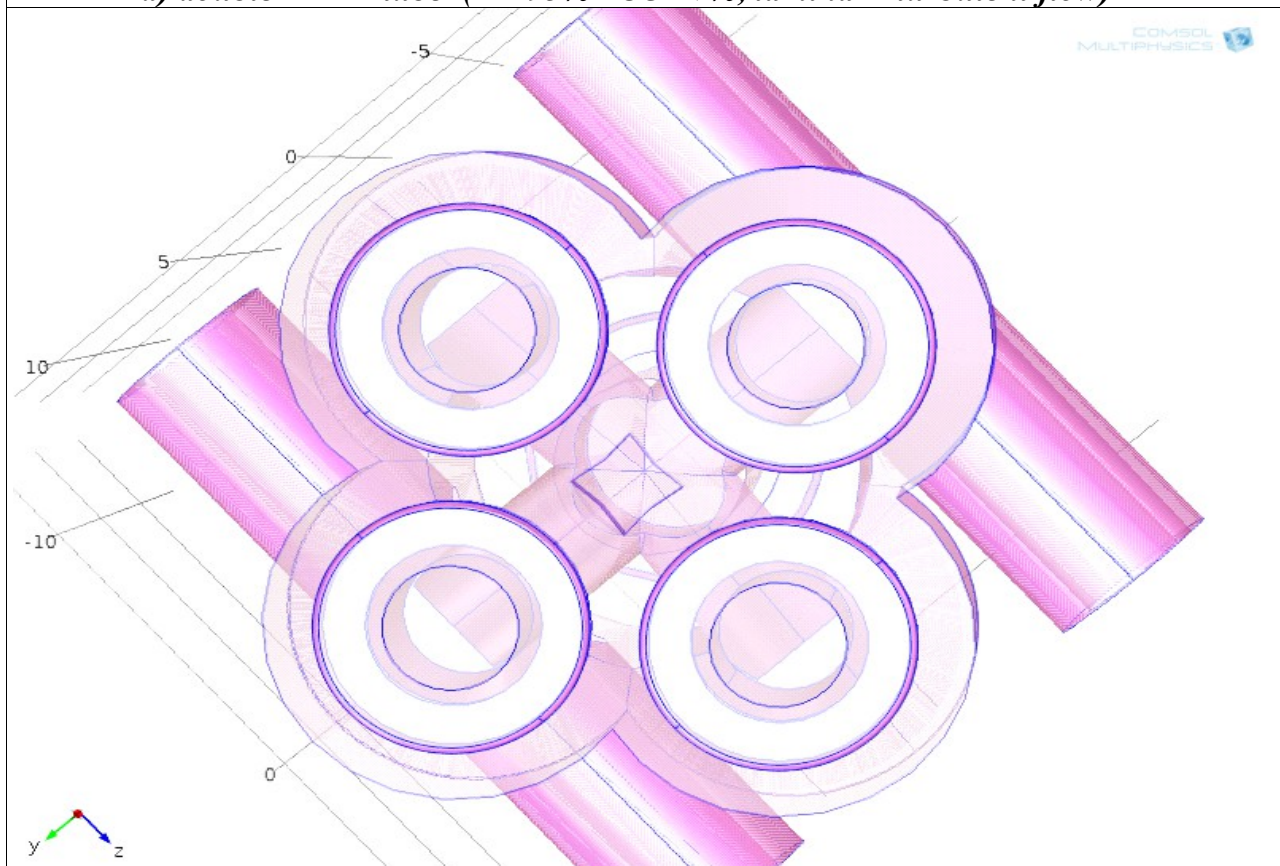
Μετά, προσπαθούμε να μελετήσουμε τους τέσσερις κλάδους της περιοχής εξόδου του διπλού “Y” σωλήνα. Η πρώτη επιφάνεια της εικόνας ροής (εικόνα 30) είναι ο χώρος όπου η κυκλοφορία του μείγματος γίνεται σύμφωνα με τους νόμους της στρωτής ροής του μείγματος ενώ η δεύτερη επιφάνεια της εικόνας είναι ο χώρος όπου η κυκλοφορία του μείγματος γίνεται σύμφωνα με τις αρχές της τυρβώδους ροής του μείγματος στον εσωτερικό χώρο του σωλήνα. Τέλος, οι τέσσερις κλάδοι της περιοχής εξόδου αναπαριστούν τις τέσσερις περιοχές εξόδου του μείγματος, όπου μετρούμε τις ταχύτητες εξόδου.



**Εικόνα 29:** Παρατηρούμε παραπάνω τη μωβ – άσπρη περιοχή εισόδου του double “Y” – tube.

## Images OUTLET

*d) double “Y” – tube ( Ar 93%– CO2 7%, laminar +turbulent flow)*



**Εικόνα 30:** Παρατηρούμε τις τέσσερις μωβ – άσπρες περιοχές εξόδου του double “Y” – tube.

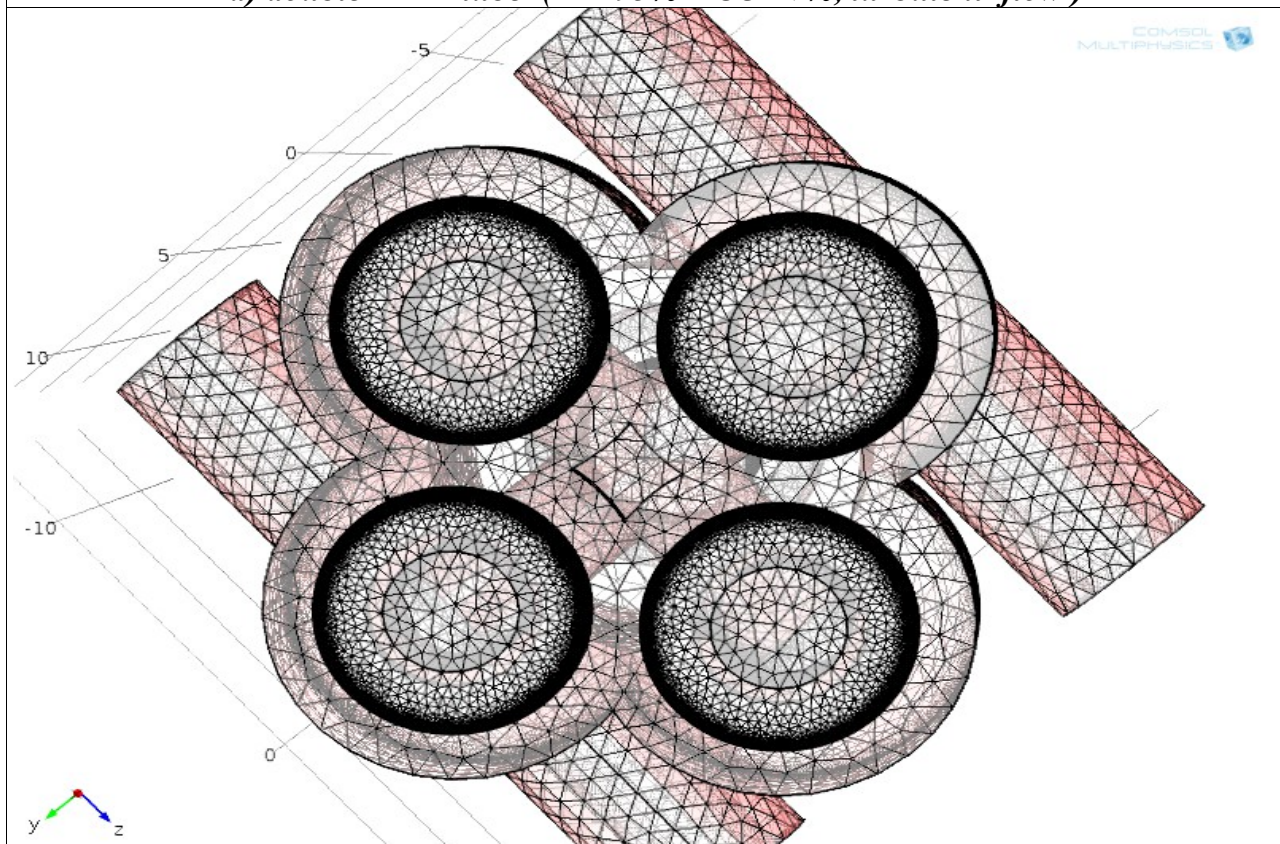
Στα παραπάνω σχήματα, φαίνεται η τρισδιάστατη γεωμετρία για το μοντέλο που κατασκευάσαμε για να αναπαραστήσουμε το διπλό “Y” σωλήνα. Το επόμενο βήμα είναι να χρησιμοποιήσουμε ένα πλέγμα για να επιλύσουμε το πρόβλημα. Ακολουθώντας την ίδια πορεία με το δισδιάστατο μοντέλο, παραθέτουμε τα αποτελέσματά μας στα επόμενα σχήματα. Επειδή αναφερόμαστε σε ένα τρισδιάστατο μοντέλο, για την παράθεση των αποτελεσμάτων μας, δουλέψαμε με επιφάνειες κάθετες αλλά και παράλληλες στην επιφάνεια του πλέγματος. Παραθέτουμε τα αποτελέσματά της προσομοίωσης για τη γεωμετρία του μοντέλου που αναπαριστά το διπλό “Y” σωλήνα.

Στον πίνακα Images mesh, στη πρώτη σειρά παραθέτουμε τη τρισδιάστατη γεωμετρία του μοντέλου που αναπαριστά το double “Y” tube σε ευθύγραμμη κατεύθυνση. Αυτό που παρατηρούμε είναι ότι η βαρύτητα δεν επηρεάζει καθόλου την υφή ή την πυκνότητα του πλέγματος εξαιτίας της μεγάλης πυκνότητας του πλέγματος που έχει το τρισδιάστατο μοντέλο αλλά και του μικρού μεγέθους των μορίων του αερίου.

Στον παρακάτω πίνακα παραθέτουμε τη γεωμετρία του πλέγματος του μοντέλου μας που αναπαριστά τους τέσσερις κλάδους της περιοχής εξόδου του μείγματος Ar 93% – CO2 7% στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Y” - σωλήνα στην περίπτωση που η κυκλοφορία του μείγματος γίνεται σύμφωνα με τους νόμους της στρωτής ροής για το εσωτερικό τμήμα και σύμφωνα με τους νόμους της τυρβώδους ροής για το εξωτερικό τμήμα του εσωτερικού χώρου του σωλήνα.

## Images mesh

### d) double “Y” – tube ( Ar 93% – CO2 7%, turbulent flow )



**Εικόνα 31:** Στη παραπάνω εικόνα, παραθέτουμε τη γεωμετρία του πλέγματος των τεσσάρων κλάδων της περιοχής εξόδου του εσωτερικού χώρου του double “Y” – tube για να επιλύσουμε το πρόβλημά και να παρατηρήσουμε καλύτερα τη δομή της υφής και της πυκνότητας του πλέγματός.

Μετά πρέπει να μελετήσουμε τον τρόπο κατανομής της ταχύτητας ροής του μείγματος Ar 93% – CO2 7% σε ένα κεντρικό κομμάτι στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Y” σωλήνα, γνωρίζοντας ότι η μεταφορά του μείγματος γίνεται σύμφωνα με τους νόμους της στρωτής ροής στο κεντρικό τμήμα και σύμφωνα με τους νόμους της τυρβώδους ροής στο ακριανό τμήμα του εσωτερικού χώρου του σωλήνα.

Παραθέτουμε τα διαγράμματα της κατανομής τιμών της ταχύτητας της ροής του μείγματος σε ένα κεντρικό κομμάτι στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Y” σωλήνα και τον πίνακα της κατανομής τιμών της ταχύτητας ροής του μείγματος. Στη συνέχεια, παραθέτουμε την κατανομή τιμών της ταχύτητας της ροής του μείγματος που εισέρχεται στον εσωτερικό χώρο του σωλήνα, η οποία ονομάζεται ταχύτητα εισόδου και την κατανομή των τιμών των τεσσάρων ταχυτήτων που εξέρχονται από τον εσωτερικό χώρο του σωλήνα, οι οποίες ονομάζονται ταχύτητες εξόδου.

Παρατηρώντας το 3D διάγραμμα της κατανομής τιμών της ταχύτητας ροής του μείγματος σε ένα κεντρικό κομμάτι στον εσωτερικό χώρο του σωλήνα και τον πίνακα κατανομής τιμών της ταχύτητας ροής του μείγματος, καταλήγουμε στις εξής παρατηρήσεις:

a) Η μέγιστη κατανομή τιμών της ταχύτητας ροής του μείγματος παρατηρείται στο κέντρο του διπλού “Y” σωλήνα ενώ η ελάχιστη κατανομή τιμών της ταχύτητας της ροής του μείγματος παρατηρείται στα ακριανή περιοχή του διπλού “Y” σωλήνα. Στον ενδιάμεσο χώρο, η ταχύτητα της ροής του μείγματος παίρνει ενδιάμεσες τιμές. Το φαινόμενο αυτό είναι φυσιολογικό γιατί στο κέντρο του σωλήνα μας έχουμε την βέλτιστη δυνατή ροή του μείγματος σε σχέση με την ακριανή περιοχή του σωλήνα μας, όπου η κατανομή τιμών της ταχύτητας της ροής του μείγματος παίρνει την ελάχιστη τιμή της.

b) Η κατανομή τιμών της ταχύτητας ροής του μείγματος όταν αυτό εισέρχεται στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Y” σωλήνα είναι εκτενέστερη με μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με την κατανομή των τιμών της ταχύτητας εξόδου, δηλαδή της κατανομής τιμών της ταχύτητας ροής του μείγματος, όταν εξέρχεται από έναν από τους τέσσερις κλάδους της περιοχής εξόδου του σωλήνα.

c) Στη συνέχεια, η κατανομή τιμών της ταχύτητας ροής του μείγματος που εξέρχεται από ένα κλάδο στη περιοχή εξόδου στον εσωτερικό χώρο του σωλήνα είναι ίδια με τις τρεις κατανομές τιμών της ταχύτητας ροής του μείγματος που εξέρχονται από τους υπόλοιπους τρεις κλάδους της περιοχής εξόδου σωλήνα.

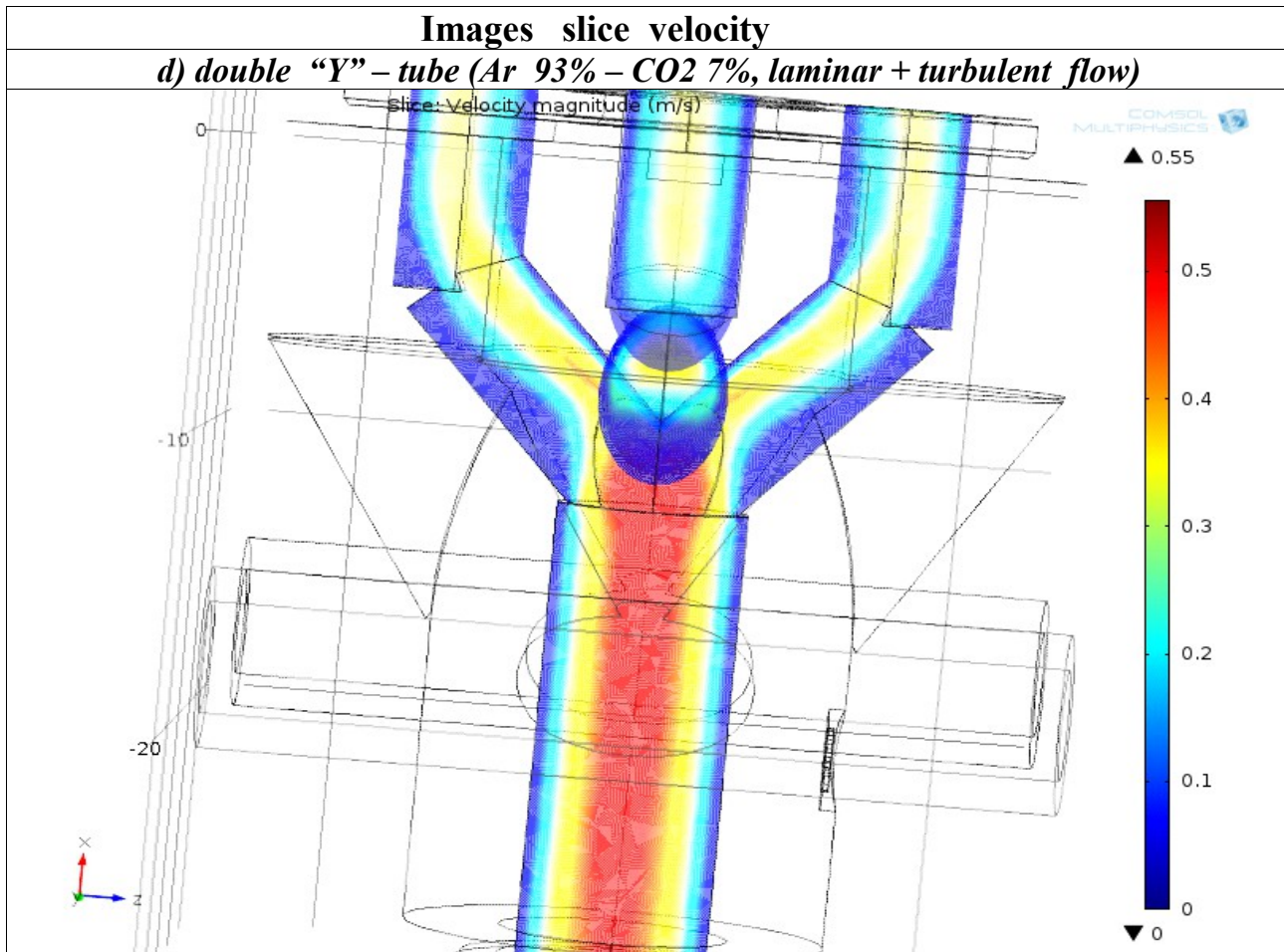
d) Τέλος, από τη σύγκριση των δυο κατανομών τιμών της ταχύτητας της στρωτής + τυρβώδους ροής όταν διαρρέεται από καθαρό αργό σε σχέση με το όταν διαρρέεται από το μείγμα, διαπιστώνουμε ότι η κατανομή τιμών της ταχύτητας έχει μικρότερο εύρος με μικρότερες τιμές όταν διαρρέεται από το μείγμα σε σχέση με την αντίστοιχη κατανομή τιμών της ταχύτητας, όταν διαρρέεται από καθαρό αργό.

Οι παρακάτω εικόνες είναι τομές των κατανομών τιμών της ταχύτητας της στρωτής + τυρβώδους ροής του μείγματος στην κεντρική περιοχή του εσωτερικού χώρου του σωλήνα. Η κατανομή τιμών της ταχύτητας είναι η βέλτιστη δυνατή σε αντίθεση με την ακριανή περιοχή όπου η κατανομή τιμών της ταχύτητας είναι η ελάχιστη δυνατή.

Τα παραπάνω τέσσερα συμπεράσματα μπορούν να επαληθευτούν και πειραματικά κατά την πειραματική διαδικασία της διάταξης του διανομέα ροής αερίου.

### **VIII. ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΙΜΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΡΟΗΣ ΤΟΥ ΑΕΡΙΟΥ Ar 93% – CO2 7%**

(x,y) (mm,mm)	Velocity (m/s) input	Velocity (m/s) output 1	Velocity (m/s) output 2	Velocity (m/s) output 3	Velocity (m/s) output 4
Ένα σημείο	1	1	2	3	4
Στο κέντρο	0.54	0.32	0.32	0.32	0.32
Ενδιάμεσα	0.44	0.27	0.27	0.27	0.27
Ενδιάμεσα	0.34	0.22	0.22	0.22	0.22
Ενδιάμεσα	0.24	0.17	0.17	0.17	0.17
Ενδιάμεσα	0.14	0.12	0.12	0.12	0.12
Στα άκρα	0.07	0.05	0.05	0.05	0.05



**Εικόνα 32:** Στη παραπάνω εικόνα παραθέτουμε τη κατανομή τιμών της ταχύτητας της τυρβώδους + στρωτής ροής του μείγματος στον εσωτερικό χώρο του double “Y” tube. Παρατηρούμε ότι η κατανομή τιμών της ταχύτητας της στρωτής + τυρβώδους ροής έχει μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τη κατανομή τιμών της ταχύτητας της στρωτής ροής. Επίσης, παρατηρούμε ότι η κατανομή τιμών της ταχύτητας ροής του μείγματος έχει μικρότερες τιμές σε σχέση με τη κατανομή τιμών της ταχύτητας ροής του καθαρού αργού.

Παρατηρώντας τα 3D διαγράμματα των κατανομών τιμών της εσωτερικής πίεσης της ροής των πιέσεων της τυρβώδους + στρωτής ροής του μείγματος και του αντίστοιχου πίνακα κατανομής τιμών, καταλήγουμε στις εξής παρατηρήσεις:

a) Η μέγιστη κατανομή τιμών της εσωτερικής πίεσης της τυρβώδους + στρωτής ροής του μείγματος παρατηρείται εκεί όπου ο χώρος είναι μεγαλύτερος, δηλαδή εκεί που η διάμετρος του εσωτερικού χώρου είναι μεγαλύτερη. Αυτό είναι φυσιολογικό γιατί όσο μεγαλύτερος είναι ο χώρος που περνάει το μείγμα τόσο περισσότερος όγκος μείγματος περνάει και άρα τόσο μεγαλύτερη εσωτερική πίεση εφαρμόζεται στα τοιχώματα του σωλήνα.

b) Η πίεση εισόδου, δηλαδή η πίεση της τυρβώδους + στρωτής ροής του μείγματος όταν εισέρχεται το μείγμα στον εσωτερικό χώρο του σωλήνα έχει μεγαλύτερη τιμή σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή της πίεσης εξόδου, δηλαδή της πίεσης της τυρβώδους + στρωτής ροής του μείγματος όταν αυτό εξέρχεται από έναν από τους τέσσερις κλάδους της περιοχής εξόδου στον εσωτερικό χώρο του σωλήνα.

c) Στη συνέχεια παρατηρούμε ότι η τιμή της εσωτερικής πίεσης της τυρβώδους + στρωτής ροής του μείγματος που εξέρχεται από ένα κλάδο της περιοχής εξόδου στον εσωτερικό χώρο του σωλήνα είναι ίδια με τις αντίστοιχες τιμές των πιέσεων της τυρβώδους + στρωτής ροής του μείγματος που εξέρχονται από τους υπόλοιπους τρεις κλάδους της περιοχής εξόδου στον εσωτερικό χώρο του σωλήνα.

d) Τέλος, συγκρίνοντας την κατανομή τιμών της πίεσης της τυρβώδους + στρωτής ροής όταν διαρρέεται από το μείγμα στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Υ” σωλήνα, είναι χαμηλότερου εύρους με μικρότερες τιμές σε σχέση με την κατανομή τιμών της πίεσης της τυρβώδους + στρωτής ροής όταν διαρρέεται από καθαρό αργό.

Τα παραπάνω τέσσερα συμπεράσματα μπορούν να επαληθευτούν και πειραματικά κατά την πειραματική διαδικασία της διάταξης του διανομέα ροής αερίου.

Ένας από τους λόγους που είναι σημαντική η μελέτη της πίεσης της τυρβώδους + στρωτής ροής του μείγματος στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Υ” σωλήνα είναι διότι μπορούμε να υπολογίσουμε τη διαφορά πίεσης  $\Delta P$ , μεταξύ της πίεσης ενός οποιουδήποτε σημείου κοντά στην περιοχή εισόδου και της πίεσης εξόδου. Γνωρίζοντας τη διαφορά πίεσης  $\Delta P$  και την παροχή  $Q$  μπορούμε να υπολογίσουμε την εμπέδηση  $Z$  μέσω του τύπου:

$$Z = \frac{\Delta P_{(1 \rightarrow 4)}}{Q_{(1 \rightarrow 4)}} = \frac{(P_{(1 \rightarrow 4)} - P_a)}{Q_{(1 \rightarrow 4)}} \quad (4.4)$$

Από τον παραπάνω τύπο μπορούμε να υπολογίσουμε την εμπέδηση  $Z$  της τυρβώδους + στρωτής ροής του μείγματος για οποιοδήποτε σημείο στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Υ” σωλήνα, στην περίπτωση που η κυκλοφορία ροής του μείγματος γίνεται σύμφωνα με τις αρχές της τυρβώδους + στρωτής ροής. Από τις παρακάτω εικόνες της πίεσης της ροής του μείγματος στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Υ” σωλήνα, μπορούμε να υπολογίσουμε την διαφορά πίεσης  $\Delta P$  μεταξύ ενός οποιουδήποτε σημείου που βρίσκεται στην περιοχή εισόδου και ενός οποιουδήποτε σημείου που βρίσκεται στην περιοχή εξόδου του σωλήνα, το οποίο είναι προκαθορισμένο από την αρχή της διαδικασίας.

#### **ΙΧ. ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΙΜΩΝ ΠΙΕΣΕΩΝ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΑΕΡΙΟΥ Ar 93% – CO2 7%**

(x,y) (mm,mm)	Pressure (Pa) Input	Pressure (Pa) Output 1	Pressure (Pa) Output 2	Pressure (Pa) Output 3	Pressure (Pa) Output 4
Ένα σημείο	1	1	2	3	4
Στο κέντρο	0.274	0.104	0.104	0.104	0.104
Ενδιάμεσα	0.254	0.094	0.094	0.094	0.094
Ενδιάμεσα	0.194	0.089	0.089	0.089	0.089
Ενδιάμεσα	0.144	0.078	0.078	0.078	0.078
Ενδιάμεσα	0.074	0.069	0.069	0.069	0.069
Στα άκρα	0.114	0.059	0.059	0.059	0.059

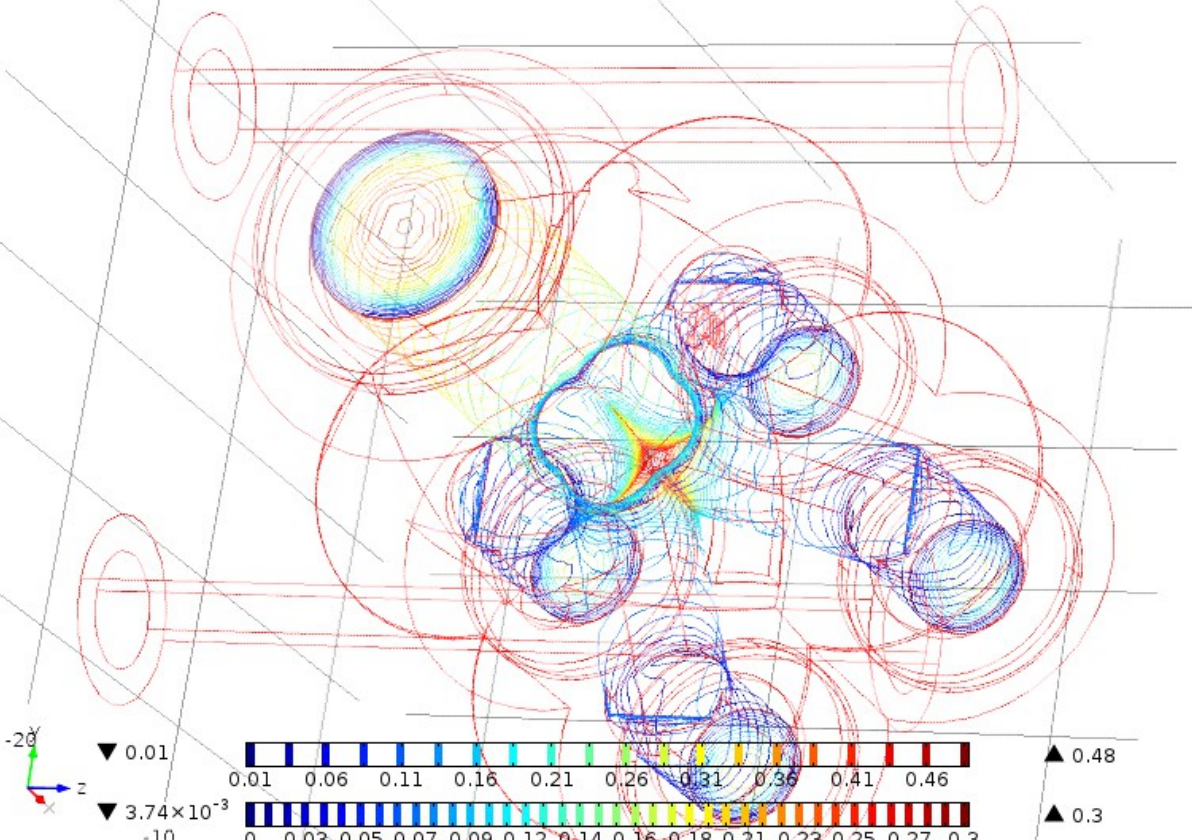
# Images pressure

## d) double "Y" - tube (Ar 93% - CO2 7%, laminar + turbulent flow)

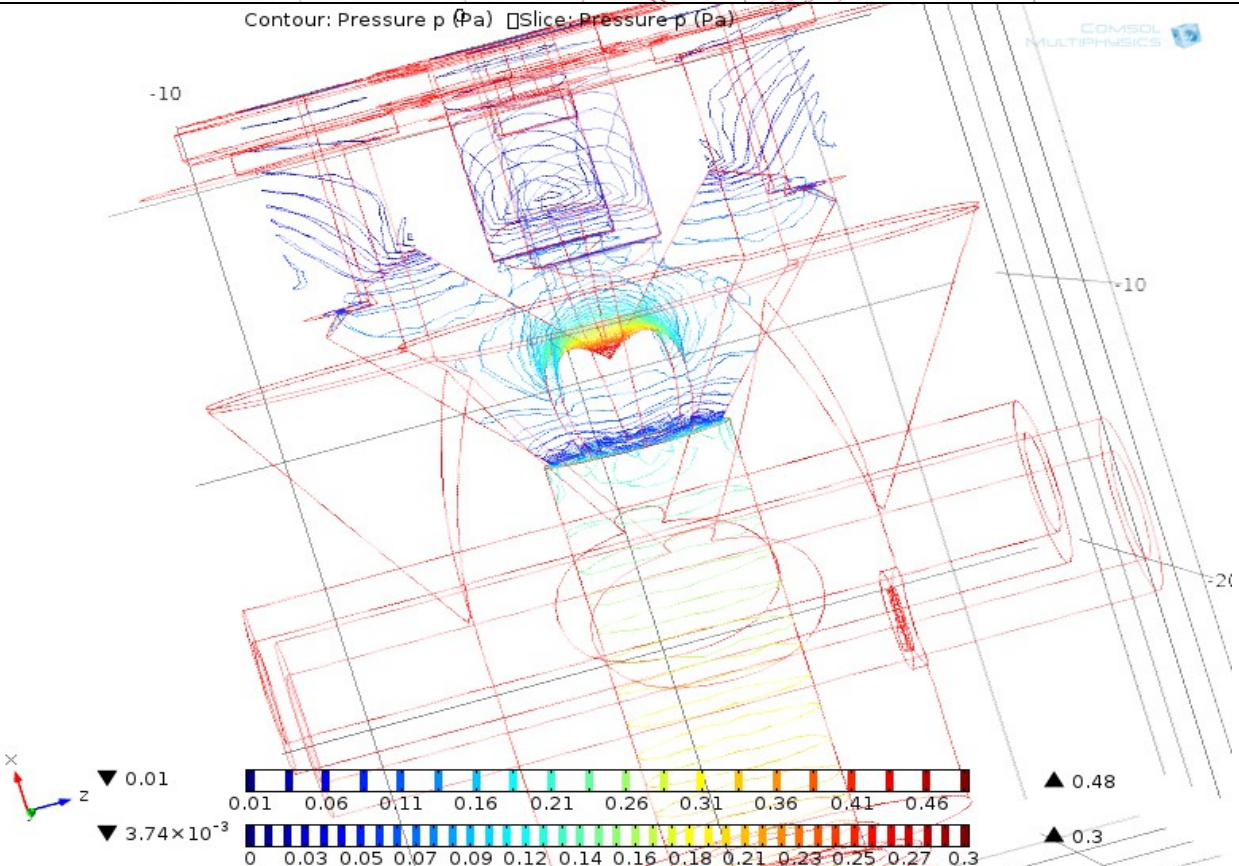
Contour: Pressure p (Pa) [Slice: Pressure p (Pa)]

COMSOL MULTIPHYSICS

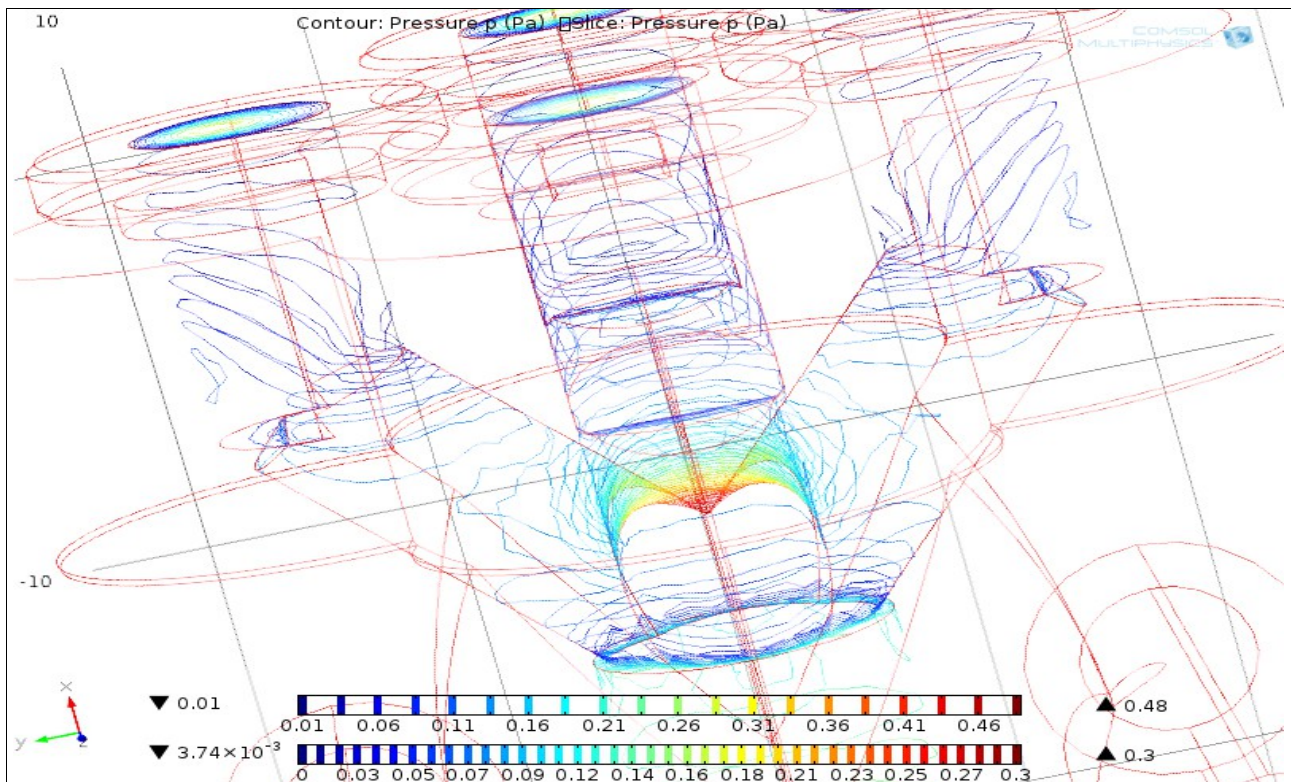
5



-10







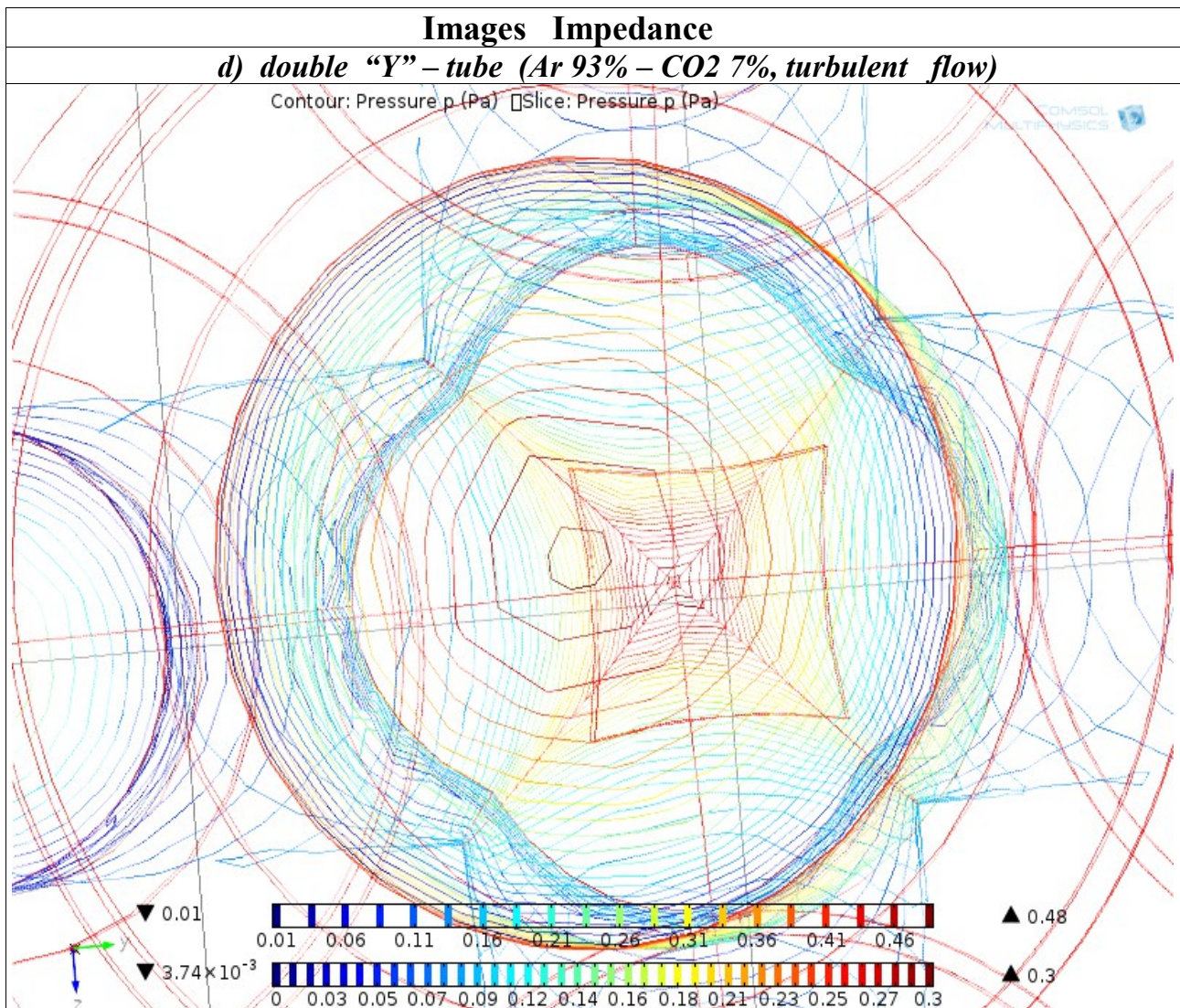
**Εικόνες 32a, 32b1, 32b2:** Στις παραπάνω εικόνες παραθέτουμε τη κατανομή τιμών της εσωτερικής πίεσης της τυρβώδους + στρωτής ροής του μείγματος στον εσωτερικό χώρο του double “Y” tube. Παρατηρούμε ότι η κατανομή τιμών της εσωτερικής πίεσης της τυρβώδους + στρωτής ροής όταν διαρρέεται το μείγμα Ar 93% - CO<sub>2</sub> 7% έχει λιγότερο εύρος σε σχέση με την κατανομή τιμών της εσωτερικής πίεσης της τυρβώδους + στρωτής ροής όταν διαρρέεται καθαρό αργό.

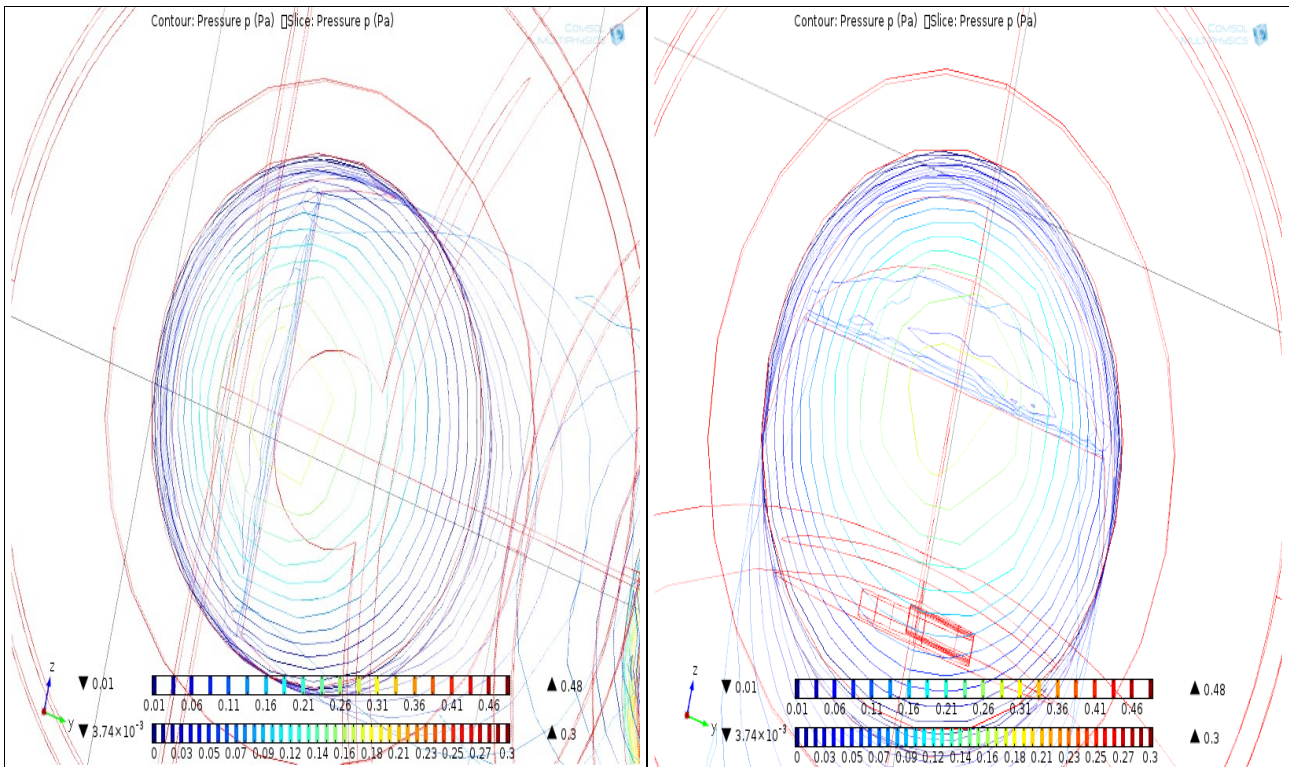
Έχοντας μια δυσκολία σχετικά με το πώς θα υπάρχει ένας σωστός τρόπος υπολογισμού της διαφοράς πίεσης  $\Delta P$ , από τη στιγμή που έχουμε να κάνουμε με κατανομές τιμών για την εσωτερική πίεση στον εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου, υπάρχουν δύο τρόποι υπολογισμού του  $\Delta P$ . Εφόσον έχουμε έναν κλάδο στην περιοχή εισόδου και τέσσερις κλάδους στην περιοχή εξόδου, παίρνουμε μια μεγενθυμένη απεικόνιση της κατανομής της εσωτερικής πίεσης της τυρβώδους + στρωτής ροής του μείγματος στην περιοχή εισόδου και τέσσερις μεγενθυμένες απεικονίσεις των τεσσάρων κατανομών της πίεσης της ροής του μείγματος στους τέσσερις κλάδους της περιοχής εξόδου του διπλού “Y” σωλήνα. Έτσι έχουμε:

#### a) Υπολογισμός *Higher Pressure*

Δημιουργούμε μια απεικόνιση που περιέχει τη κατανομή τιμών της εσωτερικής πίεσης της τυρβώδους + στρωτής ροής του μείγματος ενός κλάδου της περιοχής εισόδου στο εσωτερικό της γεωμετρίας του διπλού “Y” σωλήνα και τις τέσσερις απεικονίσεις που περιέχουν τις κατανομές τιμών των πιέσεων της ροής του μείγματος των τεσσάρων κλάδων της περιοχής εξόδου στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Y” σωλήνα. Όπως γίνεται αντιληπτό η κατανομή τιμών της πίεσης της τυρβώδους + στρωτής ροής του μείγματος της περιοχής εισόδου είναι εκτενέστερο και περιέχει μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τη κατανομή τιμών της πίεσης της τυρβώδους + στρωτής ροής του μείγματος της περιοχής εξόδου στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Y” σωλήνα.

Ο πρώτος τρόπος υπολογισμού είναι: από τη κατανομή τιμών της πίεσης της τυρβώδους + στρωτής ροής του μείγματος της περιοχής εισόδου διαλέγουμε ως αντιπροσωπευτική τιμή πίεσης, τη κατανομή τιμών της πίεσης του μείγματος που βρίσκεται στο κεντρικό σημείο της απεικόνισης που είναι η μέγιστη τιμή της κατανομής τιμών της πίεσης. Την ίδια αντιπροσωπευτική τιμή της πίεσης παίρνουμε και για τις υπόλοιπες τέσσερις κατανομές τιμών της εσωτερικής πίεσης της τυρβώδους + στρωτής ροής του μείγματος της περιοχής εξόδου.





**Εικόνες 33a, 33b1, 33b2:** Στη πρώτη σειρά παρατηρούμε την απεικόνιση της περιοχής εισόδου ενώ στις επόμενες παρατηρούμε τις απεικονίσεις της περιοχής εξόδου στον εσωτερικό χώρο του double “Y” – tube. Εκτός από τα τρία συμπεράσματα (a,b,c) που βγάζουμε όταν το μείγμα κυκλοφορεί σύμφωνα με τη στρωτή + τυρβώδης ροή που είναι τα ίδια, επιπλέον έχουμε: d) η κατανομή τιμών της εσωτερικής πίεσης του μείγματος έχει μικρότερο εύρος σε σχέση με τη κατανομή τιμών της εσωτερικής πίεσης του καθαρού αργού.

<b>Impedances [ 1η περίπτωση: Higher Pressure ]</b>			
<b>d) double “Y” – tube (Ar 93% – CO2 7%, laminar + turbulent flow)</b>			
$P_1 = 0.0046\text{mbar}$	$P_2 = 0.0046\text{mbar}$	$P_3 = 0.0046\text{mbar}$	$P_4 = 0.0046\text{mbar}$
$P_a = 0.0029\text{mbar}$	$P_a = 0.0029\text{mbar}$	$P_a = 0.0029\text{mbar}$	$P_a = 0.0029\text{mbar}$
$\Delta P_1 = 0.0017\text{mbar}$	$\Delta P_2 = 0.0017\text{mbar}$	$\Delta P_3 = 0.0017\text{mbar}$	$\Delta P_4 = 0.0017\text{mbar}$
$Q_1 = 0.5187\text{L / hr}$	$Q_2 = 0.5208\text{L / hr}$	$Q_3 = 0.5180\text{L / hr}$	$Q_4 = 0.5156\text{L / hr}$
<b>Z1= 0.003277 hr mbar /L</b>	<b>Z2= 0.003264 hr mbar /L</b>	<b>Z3= 0.003282 hr mbar /L</b>	<b>Z4= 0.003297 hr mbar /L</b>

### b) Υπολογισμός Average Pressure

Δημιουργούμε μια απεικόνιση που περιέχει τη κατανομή τιμών της εσωτερικής πίεσης της τυρβώδους + στρωτής ροής του μείγματος Ar 93% - CO2 7% ενός κλάδου της περιοχής εισόδου στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Y” σωλήνα και τέσσερις απεικονίσεις που περιέχουν τις κατανομές τιμών της πίεσης της τυρβώδους + στρωτής ροής του μείγματος των τεσσάρων κλάδων της περιοχής εξόδου στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Y” σωλήνα. Όπως γίνεται αντιληπτό, η κατανομή τιμών της πίεσης της τυρβώδους + στρωτής ροής του μείγματος της περιοχής εισόδου είναι εκτενέστερο και περιέχει μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τη κατανομή τιμών της εσωτερικής πίεσης της τυρβώδους + στρωτής ροής του μείγματος της περιοχής εξόδου στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Y” σωλήνα .

Ο δεύτερος τρόπος υπολογισμού της εμπέδησης είναι από τη κατανομή τιμών της πίεσης της τυρβώδους + στρωτής ροής του μείγματος της περιοχής εισόδου διαλέγουμε ως αντιπροσωπευτική τιμή πίεσης, την μέση τιμή της κατανομής τιμών της πίεσης της τυρβώδους + στρωτής ροής του μείγματος που βρίσκεται σε όλο το χώρο της απεικόνισης. Αυτή η τιμή καλείται μέση τιμή της κατανομής τιμών της πίεσης της τυρβώδους + στρωτής ροής του μείγματος που βρίσκεται στον εσωτερικό χώρο του διπλού “Y” σωλήνα.

Την ίδια αντιπροσωπευτική τιμή πίεσης παίρνουμε και για τις υπόλοιπες τέσσερις κατανομές τιμών της εσωτερικής πίεσης της τυρβώδους + στρωτής ροής του μείγματος της περιοχής εξόδου του εσωτερικού χώρου του διπλού “Y” σωλήνα.

<b>Impedances [ 2η περίπτωση: Average Pressure ]</b>				
<b>d) double “Y” – tube (Ar 93% – CO2 7%, laminar + turbulent flow)</b>				
<b>Input 1</b>	<b>Output 1</b>	<b>Output 2</b>	<b>Output 3</b>	<b>Output 4</b>
P <sub>max</sub> = 0.0048mbar	P <sub>max</sub> = 0.00265 mbar	P <sub>max</sub> =0.00265 mbar	P <sub>max</sub> =0.00265 mbar	P <sub>max</sub> = 0.00265mbar
P <sub>min</sub> = 0.0002 mbar	P <sub>min</sub> = 0.00015mbar	P <sub>min</sub> = 0.00015mbar	P <sub>min</sub> = 0.00015mbar	P <sub>min</sub> =0.00015mbar
P <sub>average</sub> <sub>input</sub> =0.0025 mbar	P <sub>average</sub> <sub>output</sub> =0.0014 mbar	P <sub>average</sub> <sub>output</sub> =0.0014 mbar	P <sub>average</sub> <sub>output</sub> =0.0014 mbar	P <sub>average</sub> <sub>output</sub> =0.0014 mbar
—————	ΔP <sub>1</sub> = 0.0011 mbar	ΔP <sub>2</sub> = 0.0011 mbar	ΔP <sub>3</sub> = 0.0011mbar	ΔP <sub>4</sub> = 0.0011 mbar
—————	Q <sub>1</sub> = 0.5187L / hr	Q <sub>2</sub> = 0.5208L / hr	Q <sub>3</sub> = 0.5180L / hr	Q <sub>4</sub> = 0.5156L / hr

<b>Z1= 0.002121 hr mbar /L</b>	<b>Z2= 0.002112 hr mbar /L</b>	<b>Z3= 0.002124 hr mbar /L</b>	<b>Z4= 0.002133 hr mbar /L</b>
--------------------------------	--------------------------------	--------------------------------	--------------------------------

## **4.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΔΙΑΝΟΜΕΑ ΡΟΗΣ ΑΕΡΙΟΥ (MANIFOLD)**

Σε αυτό το σημείο θα παραθέσουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του διανομέα ροής του αερίου αργού με τη χρήση του προγράμματος COMSOL MULTIPHYSICS 4.4. Οι προσομοιώσεις γίνονται για να υπολογίσουμε: α) την κατανομή τιμών της ταχύτητας της στρωτής ροής στο κέντρο, β) την κατανομή τιμών της πίεσης της στρωτής ροής και γ) την κατανομή τιμών της εμπέδησης της στρωτής ροής του υπό μελέτη αερίου. Η γνώση των μεταβλητών αυτών είναι χρήσιμη για τη μελέτη της κυκλοφορίας του αερίου στο εσωτερικό του διανομέα ροής αερίου.

Στη συγκεκριμένη παράγραφο θα παρουσιάσουμε τις τρισδιάστατες απεικονίσεις του διανομέα ροής αερίου και τα διαγράμματα των παρακάτω μεταβλητών της μελέτης. Αυτά αναφέρονται στα 3D διαγράμματα: **i) Ροής αερίου (gas flow), ii) Πλέγματος (mesh), iii) κατανομή τιμών της ταχύτητας της στρωτής ροής σε κεντρικό κομμάτι (slice velocity), iv) κατανομή τιμών της παροχής (velocity magnitude), v) κατανομή τιμών της εσωτερικής πίεσης της στρωτής ροής (pressure) και vi) κατανομή τιμών της εμπέδησης (impedance) του υπό μελέτη αερίου.** Η προσομοίωση ολόκληρου του διανομέα ροής αερίου δεν πραγματοποιήθηκε λόγω της μικρής χωρητικότητας της μνήμης του υπολογιστή του υποφαινόμενου (το input αρχείο ήταν 2.74 GB).

### **4.2.1 Αποτελέσματα της προσομοίωσης του διανομέα ροής αερίου (manifold), όταν στο εσωτερικό του διαρρέεται από καθαρό αργό**

Αρχικά στην πρώτη προσομοίωση χρησιμοποιούμε κάποιο αέριο που έχει συγκεκριμένες προδιαγραφές (συγκεκριμένη τιμή *viscosity*, ατμοσφαιρική πίεση και βρίσκεται σχετικά εύκολα στη φύση) που κάνουν για την προσομοίωση του σωλήνα. Επιπλέον έχει ένα σημαντικό πλεονέκτημα, το ότι είναι σχετικά φθηνό “αέριο”.

Το επόμενο βήμα της προσομοίωσης είναι να παρατηρήσουμε τη γεωμετρία του διανομέα ροής αερίου μας σε διαφορετικές γωνίες, για να δούμε αν υπάρχει εξάρτηση μεταξύ της ροής του αερίου και της βαρύτητας του σωλήνα. Από την παρατήρηση των παρακάτω απεικονίσεων της προσομοίωσης αντιλαμβανόμαστε ότι η βαρύτητα του σωλήνα δεν περιορίζει τη ροή του καθαρού αργού στον εσωτερικό χώρο του σωλήνα. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο μικρό μέγεθος των μορίων του αερίου.

Η συνέχεια της προσομοίωσης είναι να βρούμε το χώρο που κινείται το αέριο μας στον εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής του αερίου και να μελετήσουμε πώς κατανέμεται η ροή του στον αντίστοιχο χώρο. Έχοντας στο μυαλό μας την θεωρία της Ρευστομηχανικής και τους τρόπους ροής του υπό μελέτη αερίου στον εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου, θέλουμε να βρούμε απαντήσεις στα παρακάτω:

a) να βρούμε το χώρο που επικρατεί η στρωτή ροή του καθαρού αργού στον εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου,

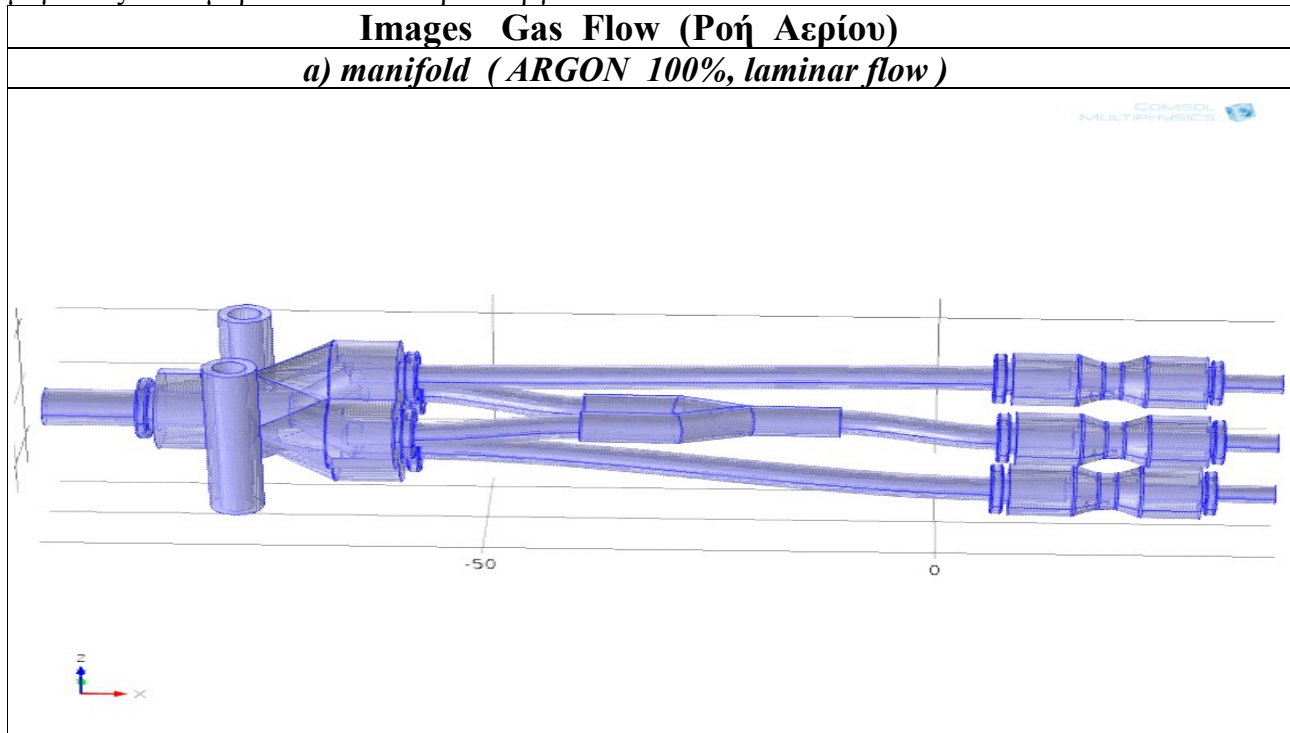
b) να βρούμε το χώρο που επικρατεί η τυρβώδης ροή του καθαρού αργού στον εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου,

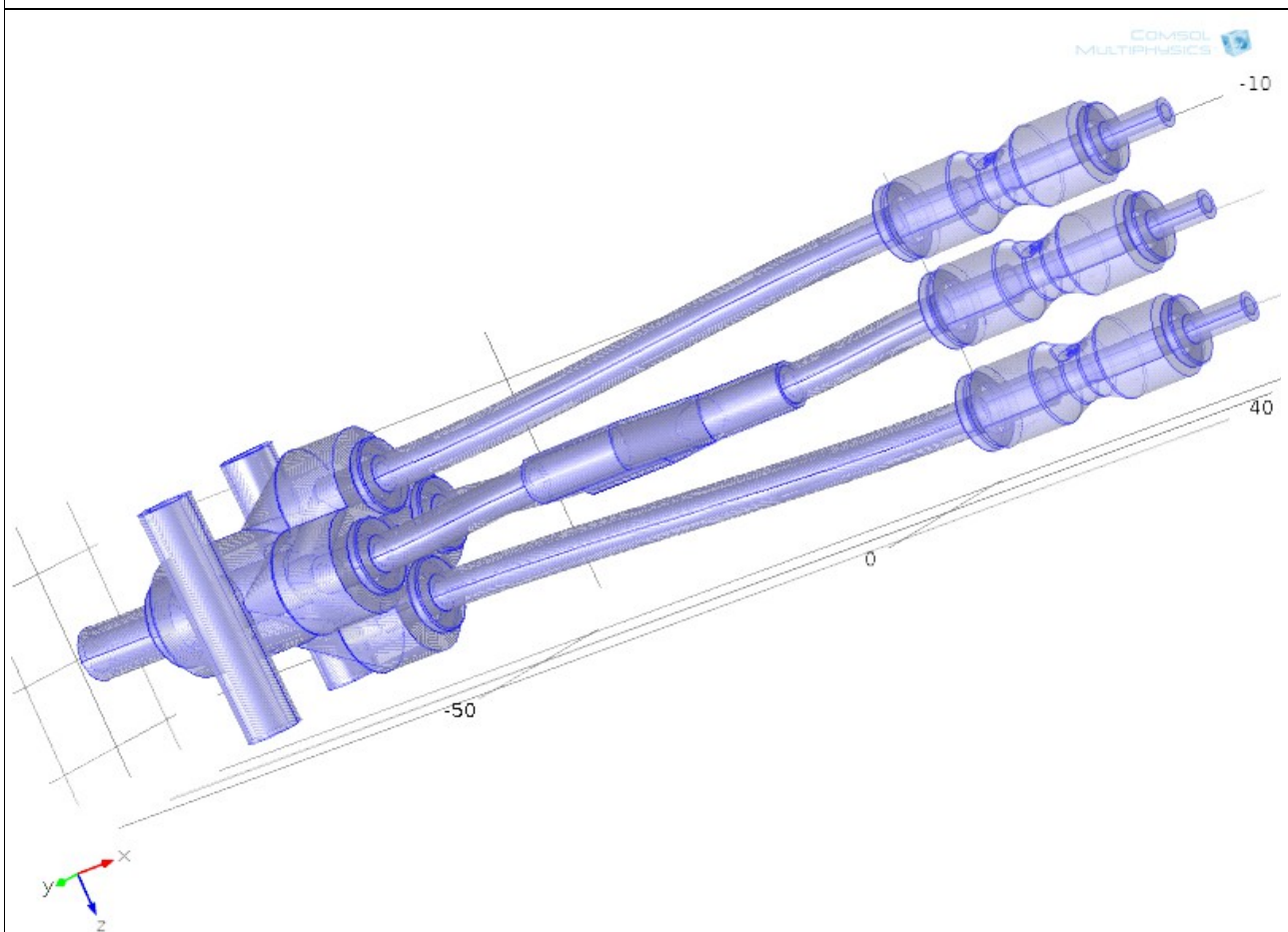
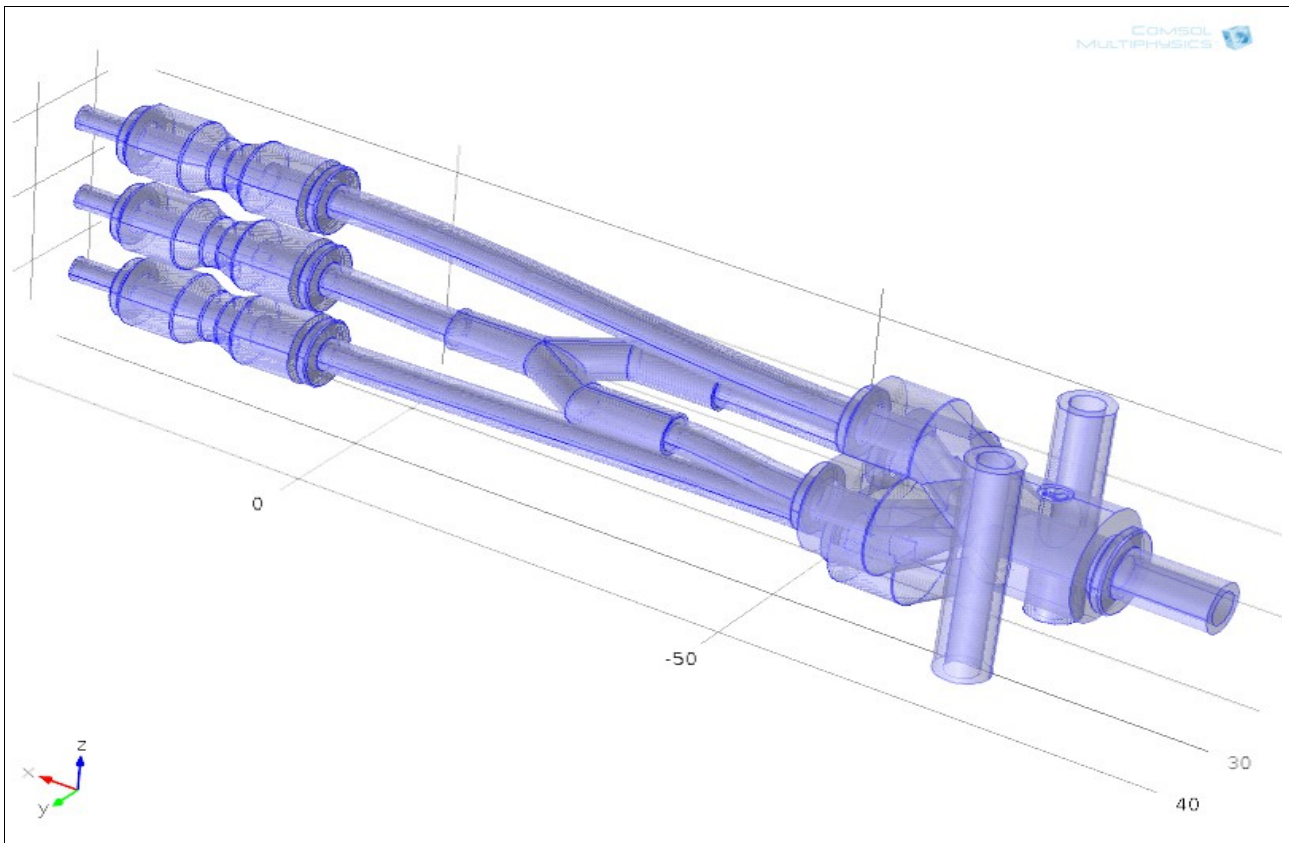
c) να βρούμε το χώρο που επικρατεί η στρωτή ροή του καθαρού αργού αλλά σε κάποια σημεία του, σε τοπικό επίπεδο, υπάρχει και η τυρβώδης ροή στο εσωτερικό του διανομέα,

d) να βρούμε το χώρο που επικρατεί η τυρβώδης ροή του καθαρού αργού αλλά σε κάποια σημεία σε τοπικό επίπεδο υπάρχει και η στρωτή ροή στο εσωτερικό του διανομέα.

#### 4.2.1a Αποτελέσματα της περιοχής κυριαρχίας της στρωτής ροής (laminar flow)

Παραθέτουμε την 3D γεωμετρία του μοντέλου του διανομέα ροής του καθαρού αργού με τη βοήθεια του προγράμματος COMSOL MULTIPHYSICS 4.4 σε διαφορετικές γωνίες ( $0^\circ$ ,  $-45^\circ$  &  $45^\circ$ ) ώστε να μελετήσουμε τις ιδιότητες ροής (*Fluid properties*) του διανομέα. Παρατηρούμε ότι η βαρύτητα δεν περιορίζει τη στρωτή ροή λόγω της μεγάλης ταχύτητας της στρωτής ροής ( $0.5 \text{ m/s}$ ) που έχουμε στον εσωτερικό χώρο του διανομέα και του μικρού μεγέθους των μορίων του καθαρού αργού.

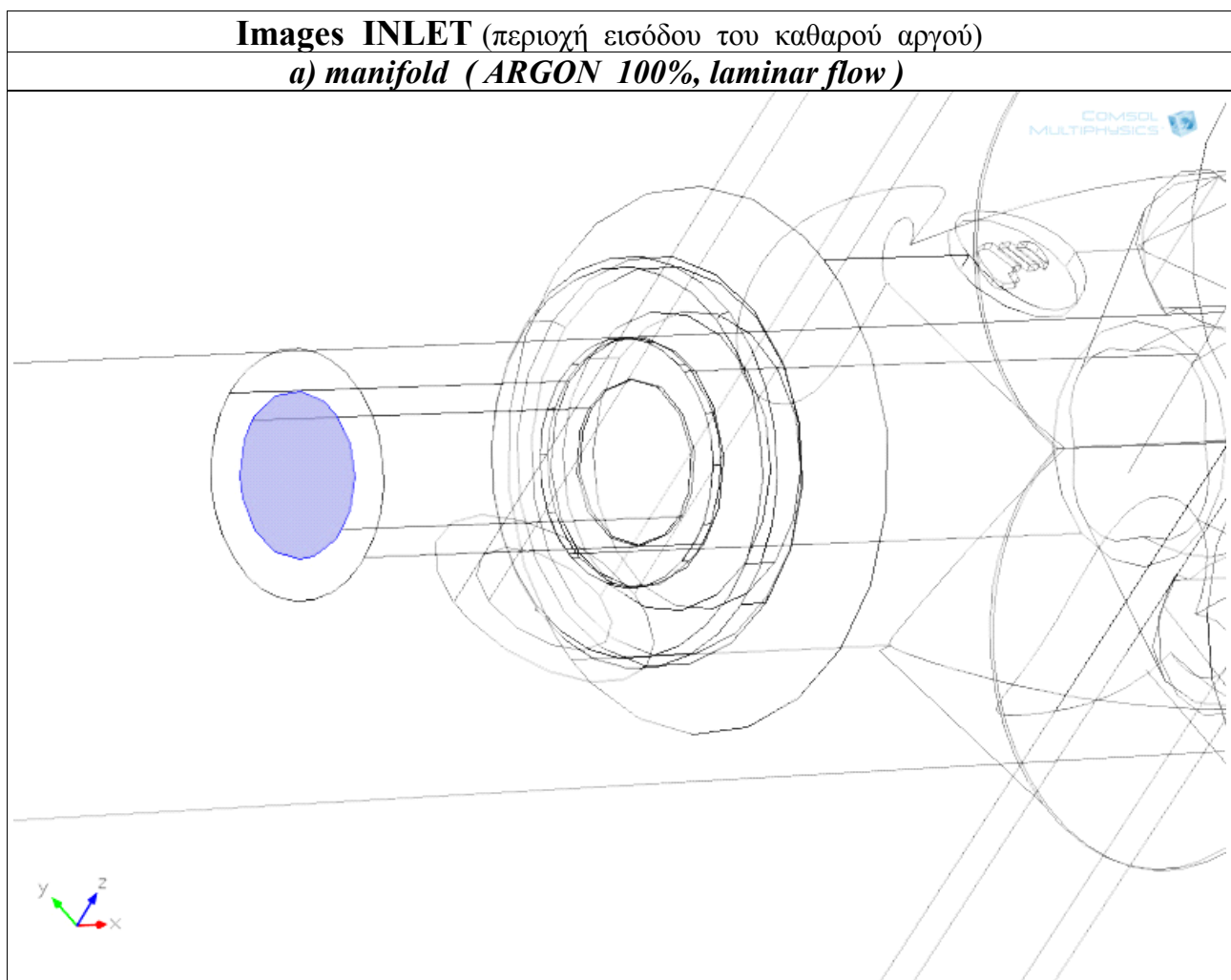




**Εικόνες 34a, 34b, 34c:** Η 3D γεωμετρία του μοντέλου που αναπαριστά το διανομέα ροής αερίου σε διάφορες γωνίες. Παρατηρούμε ότι η βαρύτητα δεν περιορίζει τη στρωτή ροή λόγω της μεγάλης ταχύτητας στρωτής ροής που έχουμε (0.5 m/s) και του μικρού μεγέθους των μορίων του καθαρού αργού.

Στη συνέχεια αυτό που έχουμε να βρούμε είναι η περιοχή εισόδου του καθαρού αργού στον εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου. Στο παρακάτω σχήμα, παρατηρούμε την μπλε επιφάνεια που αναπαριστά τον χώρο εισόδου του καθαρού αργού. Το σημείο στο κέντρο της περιοχής αυτής, είναι το σημείο που μετράμε τη ταχύτητα της στρωτής ροής του αερίου, όταν το καθαρό αργό αρχίζει να διέρχεται στον εσωτερικό χώρο του διανομέα.

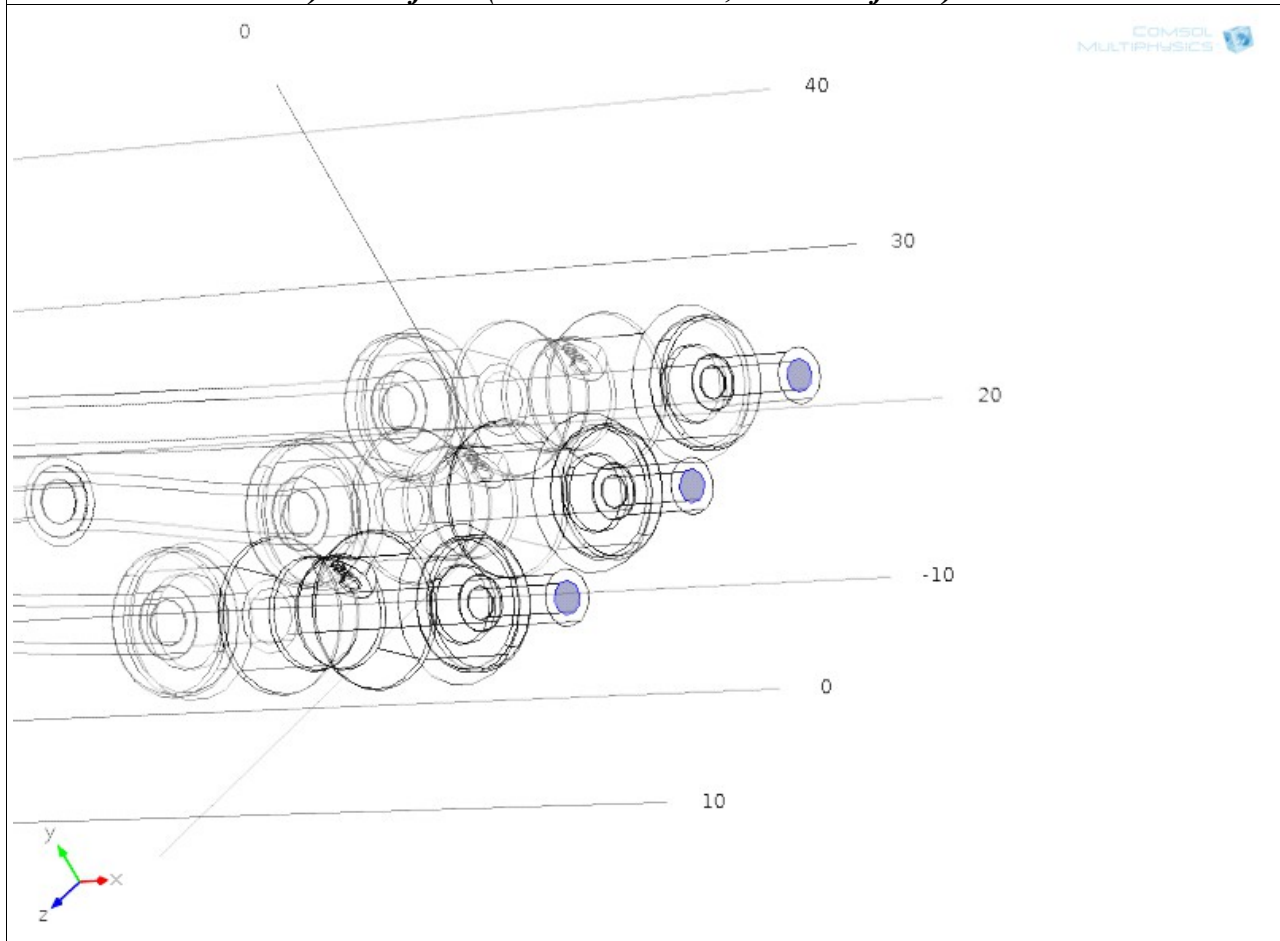
Μετά πρέπει να βρούμε την περιοχή εξόδου του καθαρού αργού στον εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου. Όπως παρατηρούμε από τις παρακάτω απεικονίσεις, η περιοχή εξόδου του καθαρού αργού αποτελείται από τέσσερις κλάδους. Έτσι, το καθαρό αργό εισέρχεται από τη περιοχή εισόδου στον εσωτερικό χώρο του διανομέα και εξέρχεται από τους τέσσερις κλάδους της περιοχής εξόδου. Σε τέσσερα σημεία που βρίσκονται στο κέντρο των τεσσάρων κλάδων της περιοχής εξόδου του καθαρού αργού στον εσωτερικό χώρο του διανομέα μετράμε τις τέσσερις ταχύτητες της στρωτής ροής του αερίου όταν το καθαρό αργό αρχίζει να εξέρχεται από τον εσωτερικό χώρο του διανομέα.



**Εικόνα 35:** Παρατίθεται η μπλε επιφάνεια της περιοχής εισόδου του διανομέα ροής αερίου όπου κυριαρχεί η στρωτή ροή του καθαρού αργού.

## Images OUTLET (περιοχή εξόδου του καθαρού αργού)

### a) manifold (ARGON 100%, laminar flow)



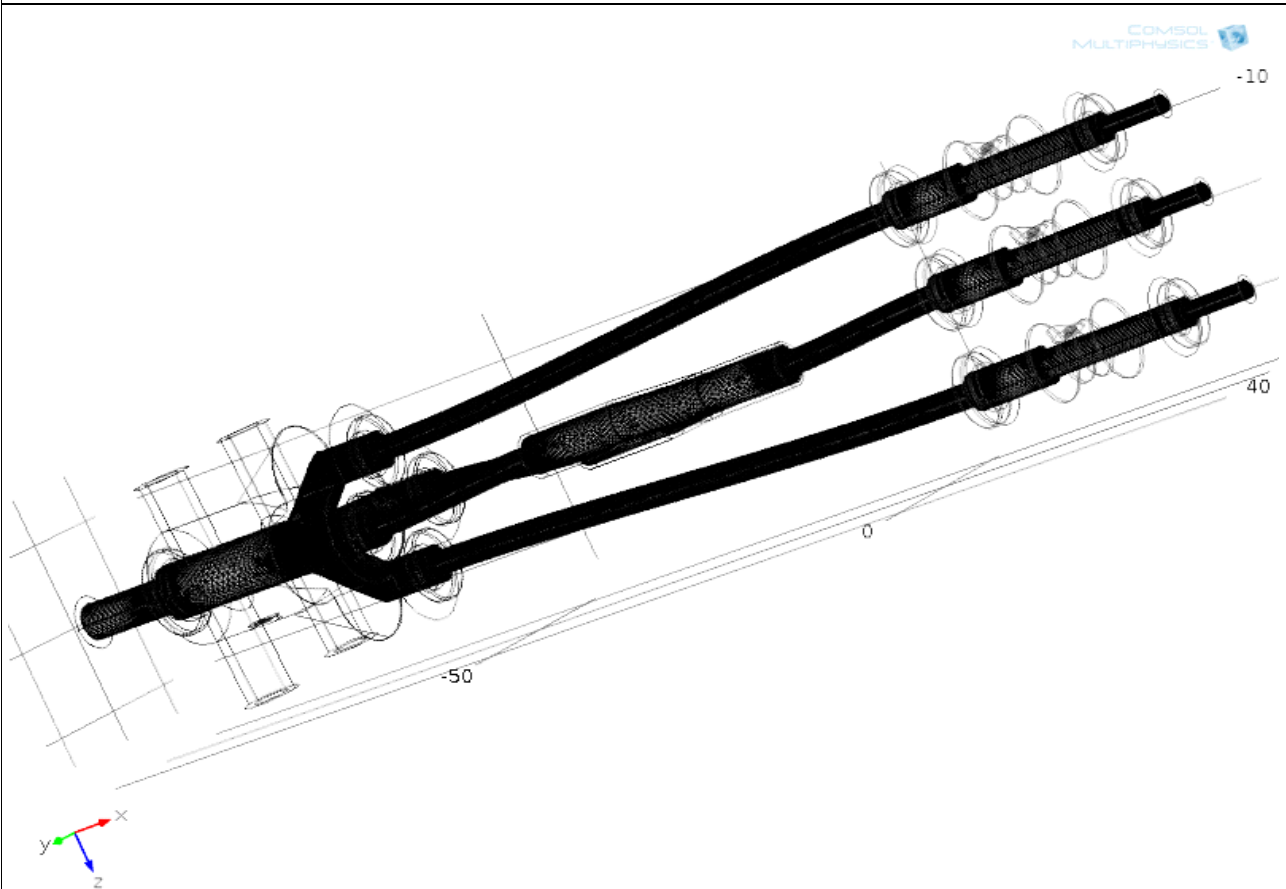
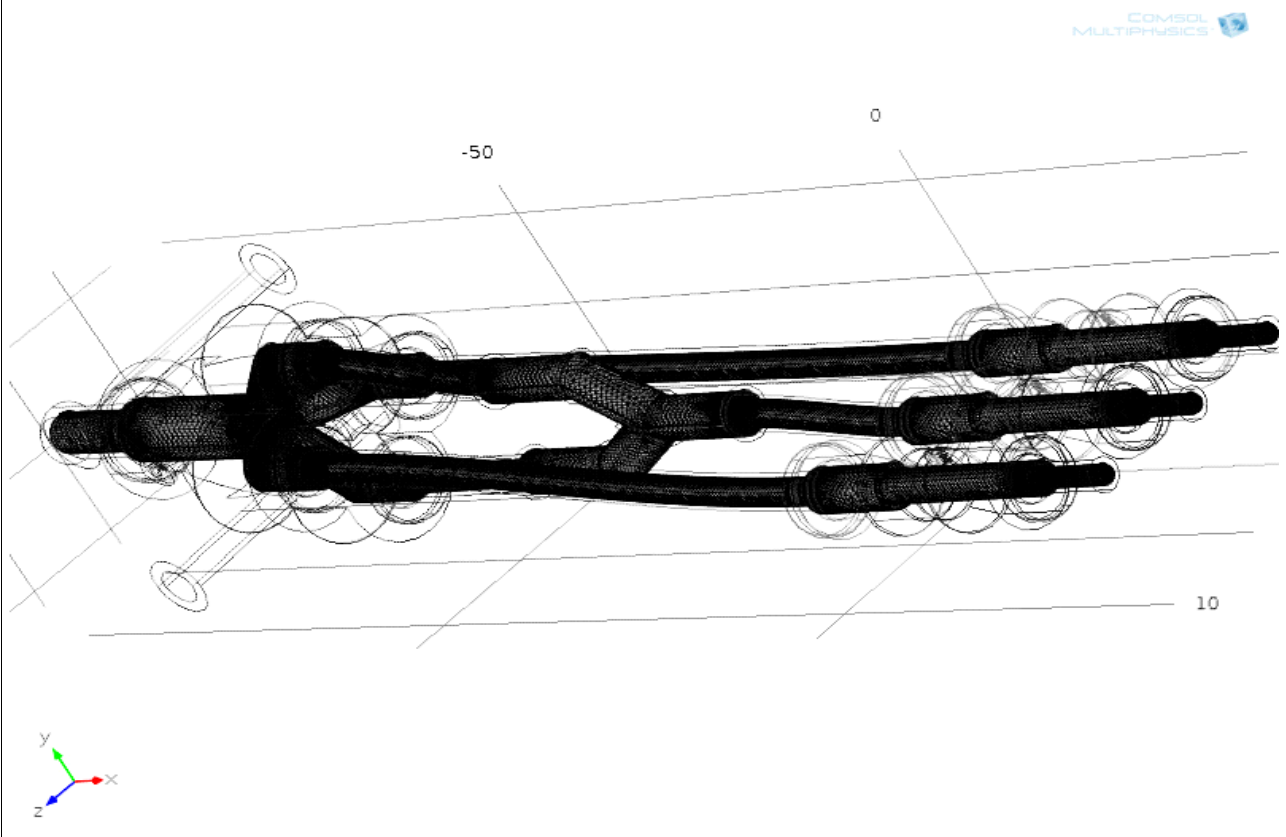
**Εικόνα 36:** Παρατίθενται οι τρεις κλάδοι της περιοχής εξόδου του διανομέα ροής αερίου όπου κυριαρχεί η στρωτή ροή του καθαρού αργού.

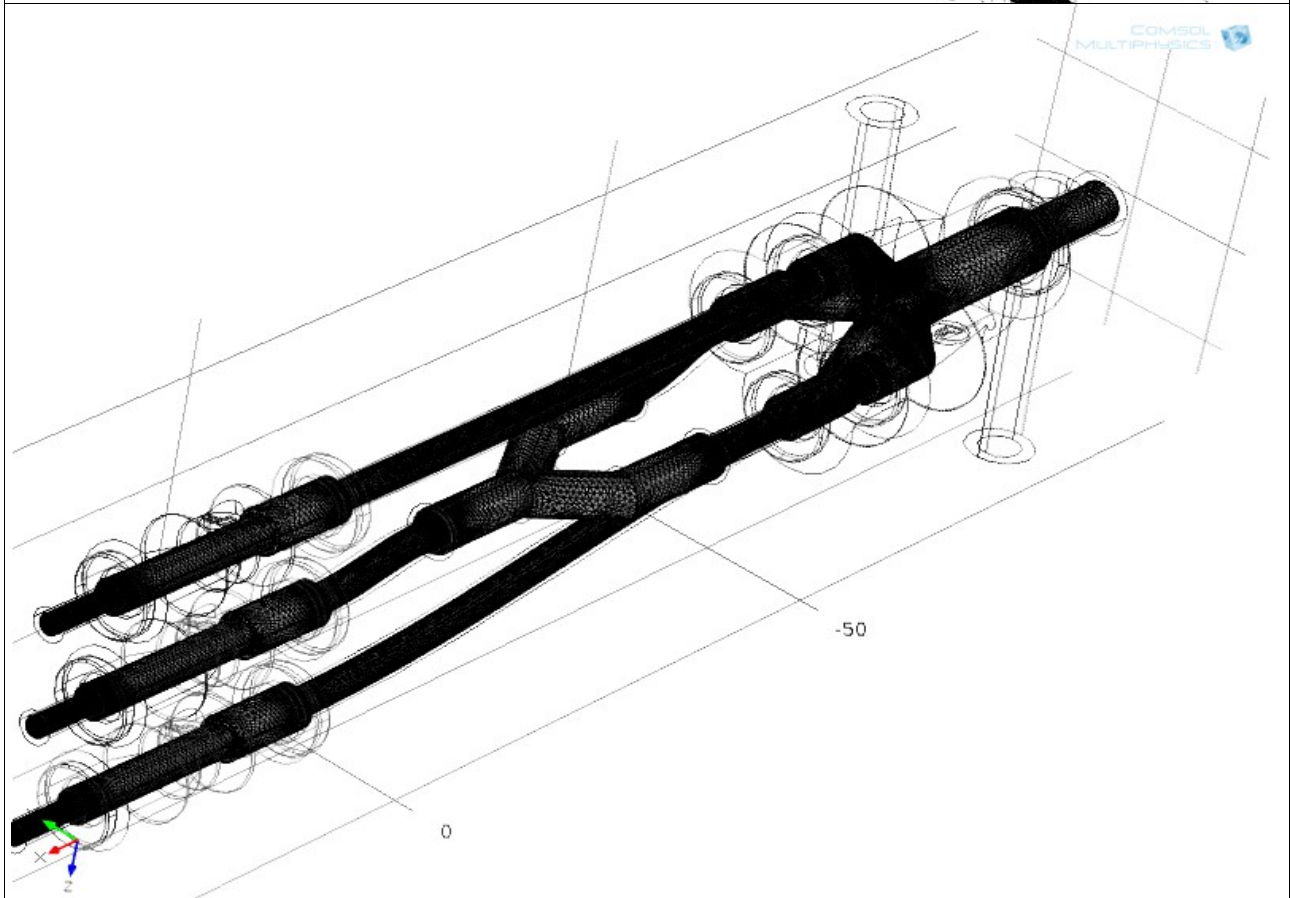
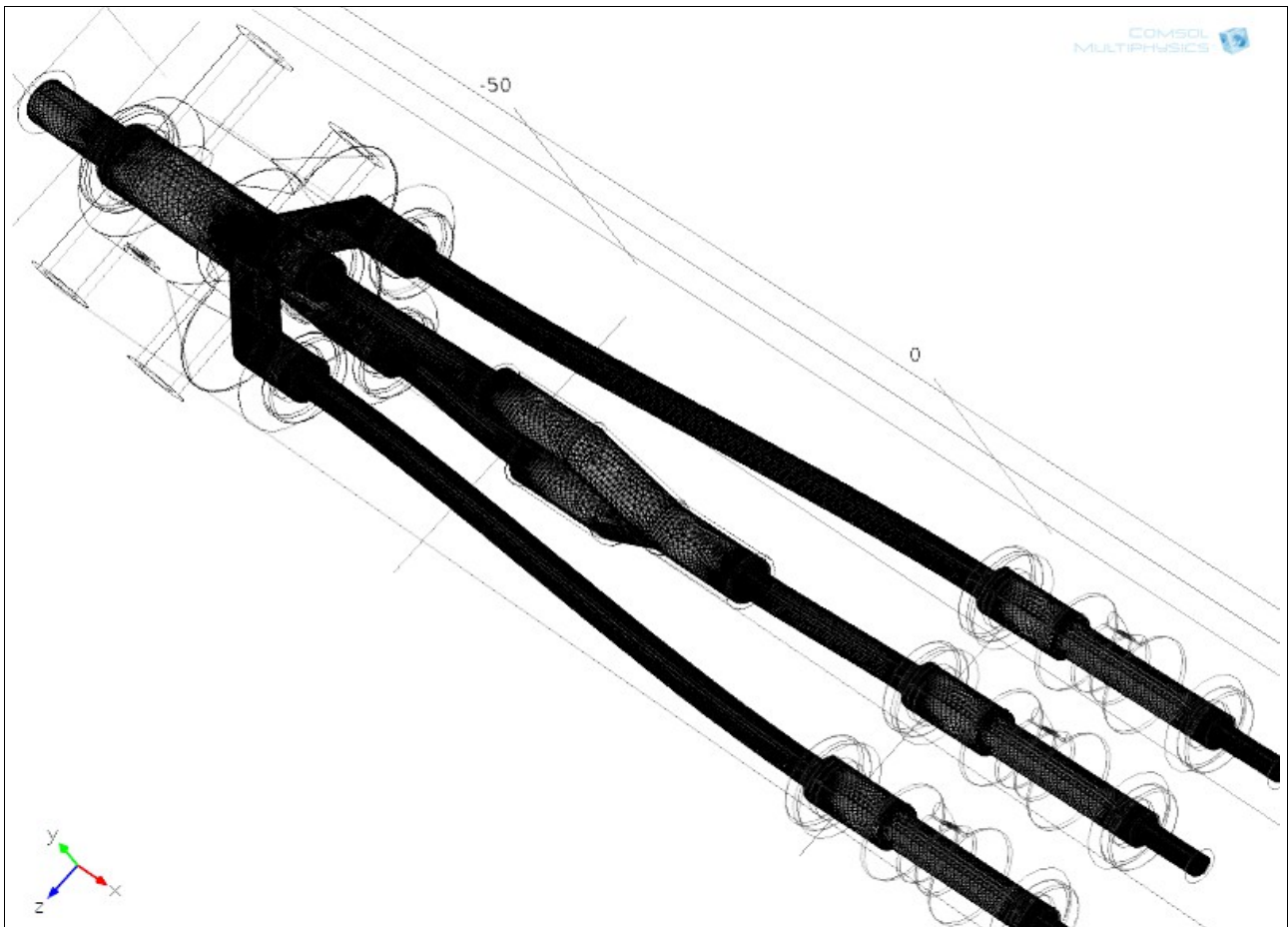
Στις παρακάτω απεικονίσεις φαίνονται οι 3D γεωμετρίες για τα μοντέλα που αναπαριστούν, όσο καλύτερα γίνεται, το διανομέα ροής αερίου. Το επόμενο βήμα είναι να χρησιμοποιήσουμε ένα πλέγμα για να επιλύσουμε το πρόβλημα. Επειδή αναφερόμαστε σε ένα τρισδιάστατο μοντέλο, για την παράθεση των αποτελεσμάτων, δουλέψαμε με επιφάνειες κάθετες αλλά και παράλληλες στην επιφάνεια του πλέγματος. Παραθέτουμε τα αποτελέσματά της προσομοίωσης μας για το μοντέλο του πλέγματος του διανομέα ροής αερίου.

Στον παρακάτω πίνακα παραθέτουμε τη τρισδιάστατη γεωμετρία του διανομέα ροής αερίου σε διάφορες διευθύνσεις για να δούμε αν υπάρχει εξάρτηση από την βαρύτητα. Αυτό που παρατηρούμε είναι ότι η βαρύτητα δεν επηρεάζει καθόλου την υφή ή την πυκνότητα του πλέγματός μας εξαιτίας της μεγάλης πυκνότητας του πλέγματος που έχει το τρισδιάστατο μοντέλο του διανομέα ροής αερίου αλλά και του μικρού μεγέθους των μορίων του καθαρού αργού.



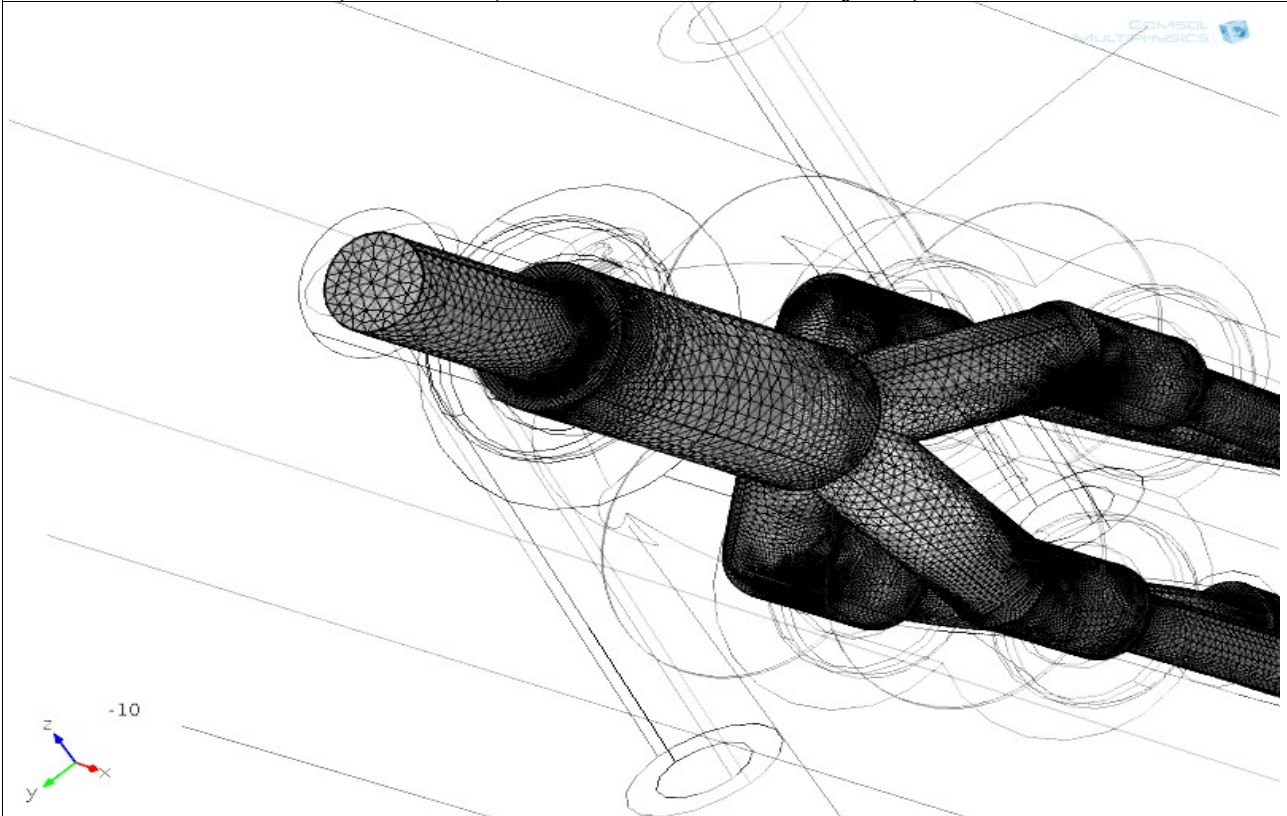
**Images mesh (εικόνες πλέγματος)**  
**a) manifold (ARGON 100%, laminar flow)**





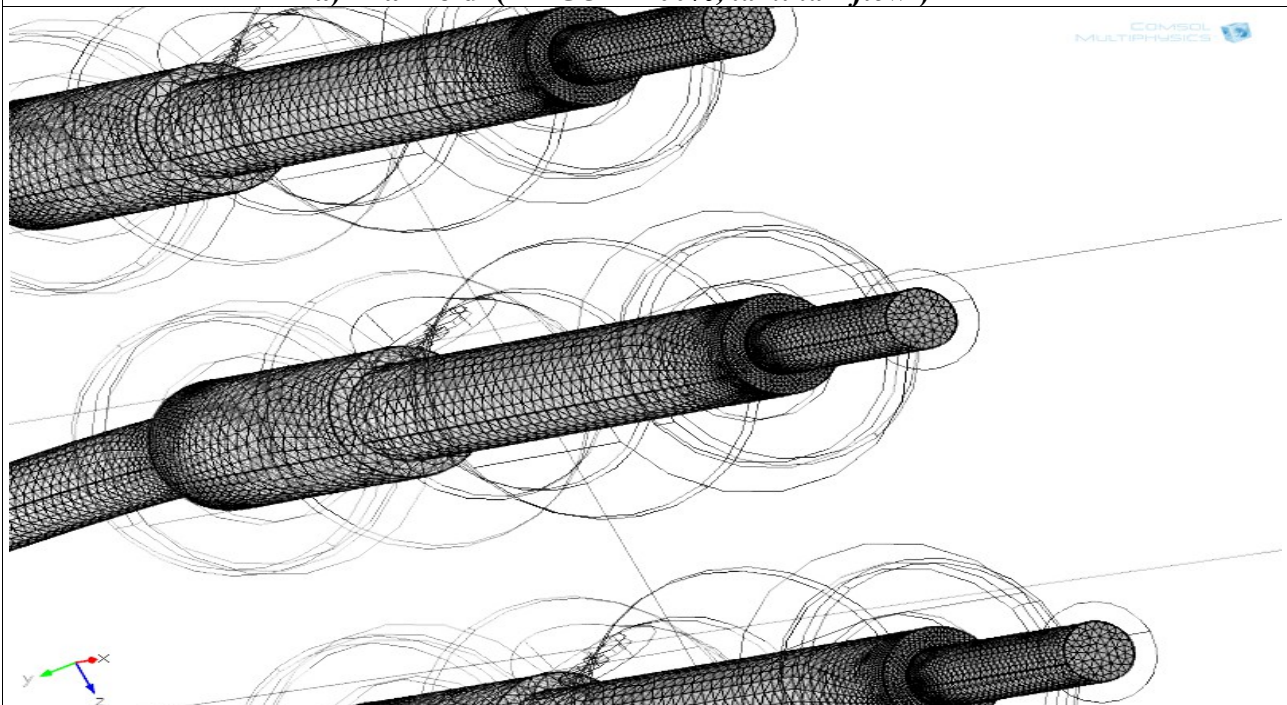
**Εικόνες 37a, 37b, 37c, 37d:** Παρατίθεται η μορφή του πλέγματος του διανομέα ροής αερίου όπου κυριαρχεί η στρωτή ροή του καθαρού αργού. Από τη παρατήρηση των παραπάνω εικόνων συμπεραίνουμε ότι η βαρύτητα δεν επηρεάζει τη δομή και την λεπτή υφή του πλέγματος του διανομέα ροής αερίου.

**Images Mesh INLET** (εικόνες πλέγματος περιοχής εισόδου του καθαρού αργού)  
**α) manifold ( ARGON 100%, laminar flow )**



**Εικόνα 38:** Παρατίθεται η μορφή του πλέγματος στην περιοχή εισόδου του διανομέα ροής αερίου όπου κυριαρχεί η στρωτή ροή του καθαρού αργού. Αυτή η παράθεση γίνεται γιατί η περιοχή εισόδου είναι μια από τις συνοριακές συνθήκες του πλέγματος.

**Images Mesh OUTLET** (εικόνες πλέγματος περιοχής εξόδου του καθαρού αργού)  
**α) manifold ( ARGON 100%, laminar flow )**

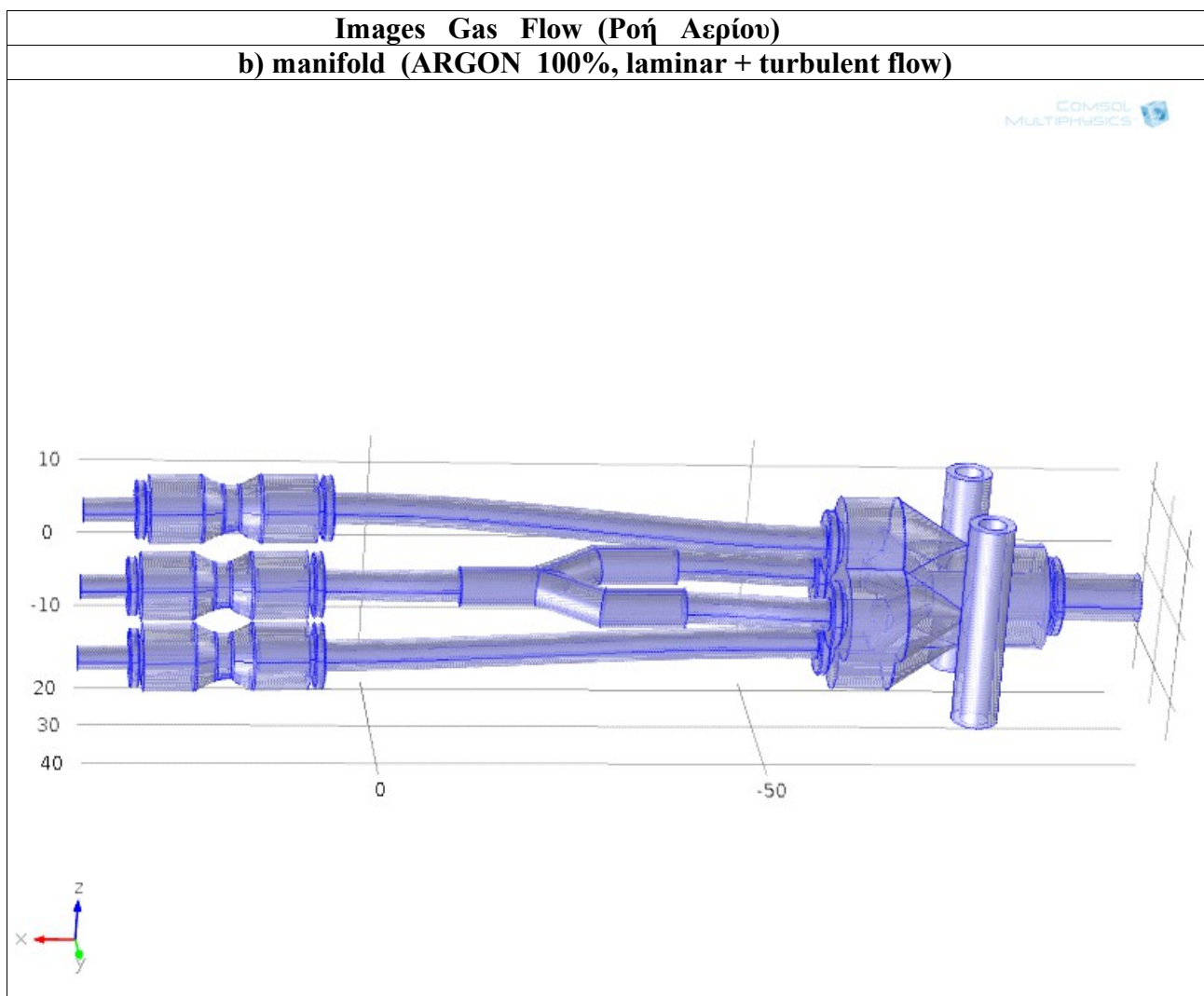


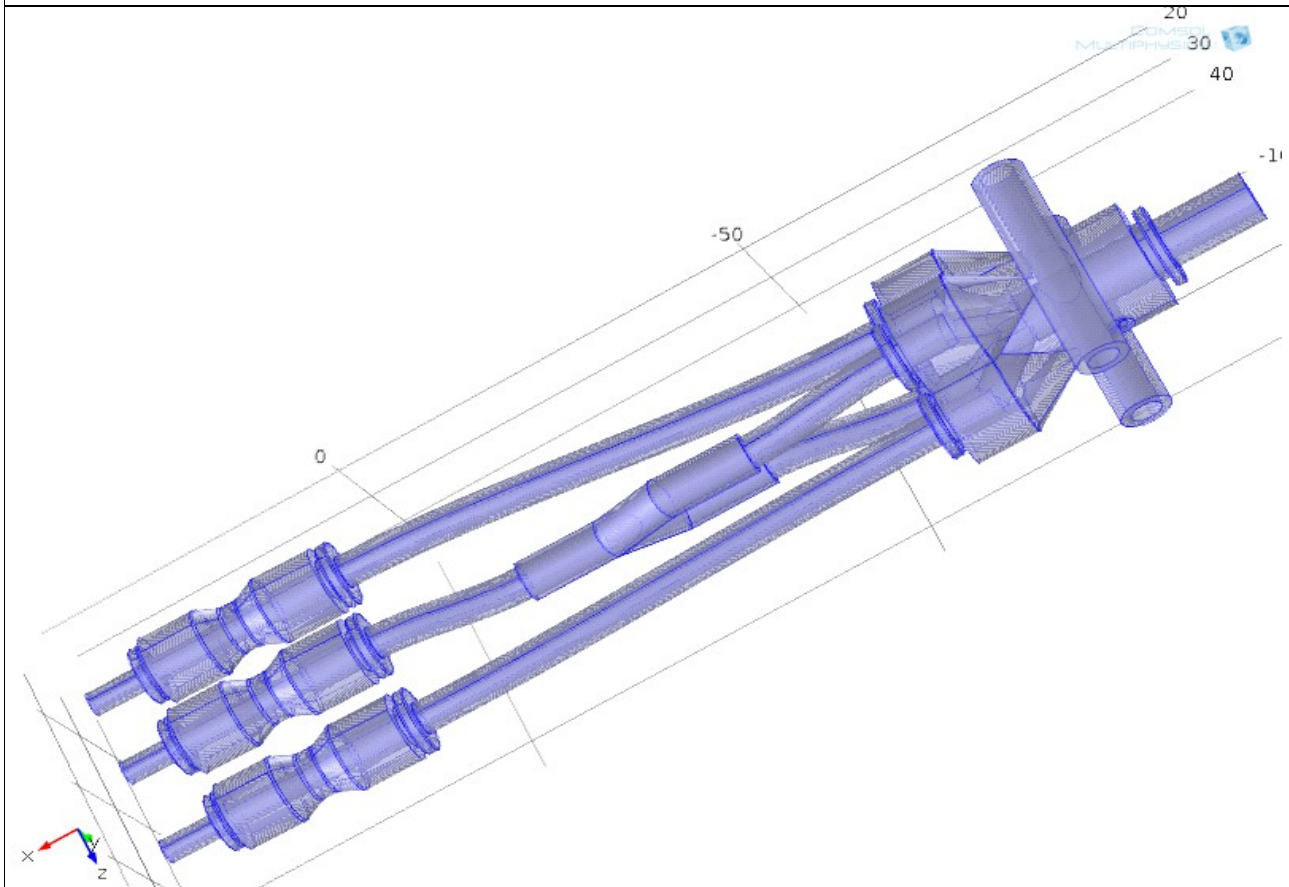
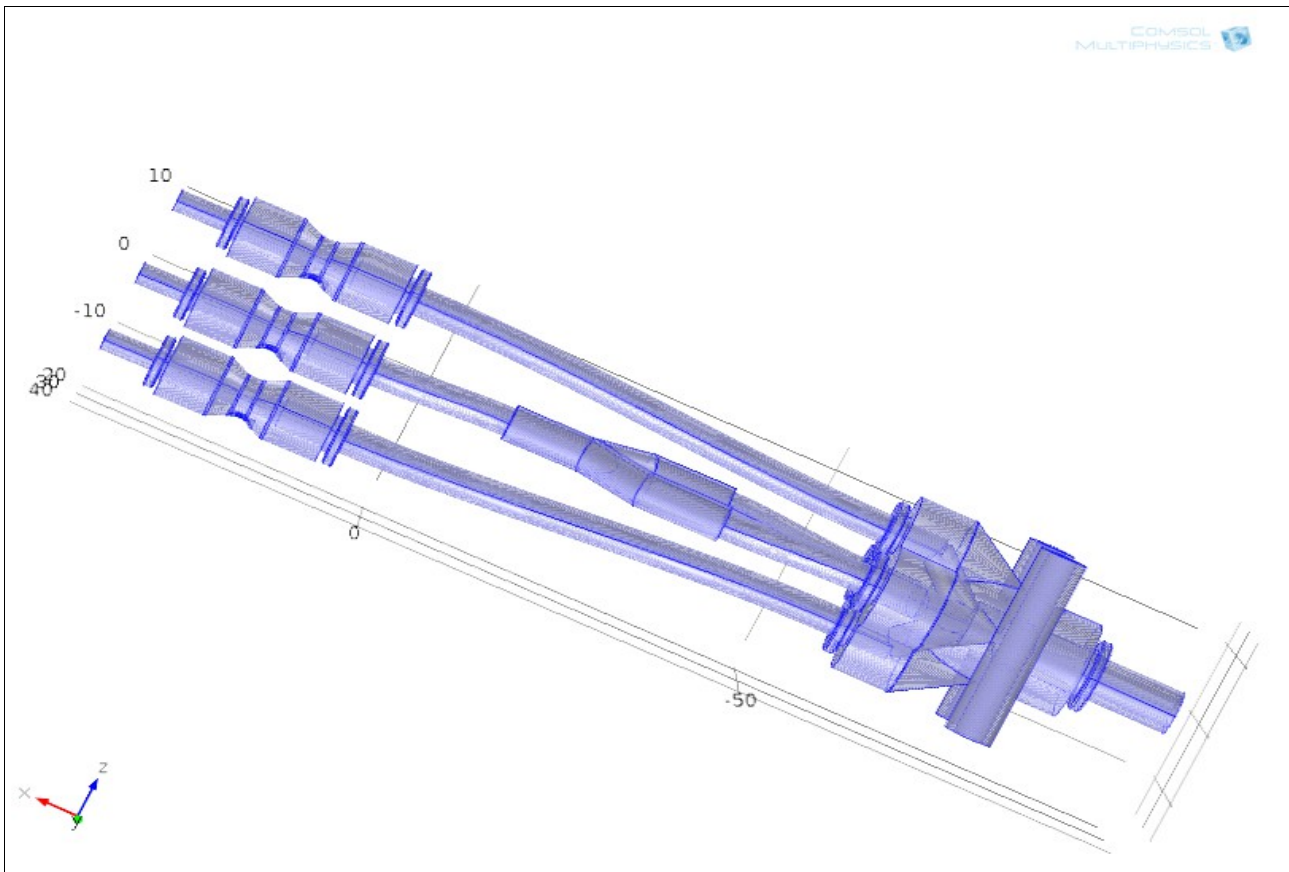
**Εικόνα 39:** Παρατίθεται η μορφή του πλέγματος στην περιοχή εξόδου του διανομέα ροής αερίου όπου κυριαρχεί η στρωτή ροή του καθαρού αργού. Αυτή η παράθεση γίνεται γιατί η περιοχή εξόδου είναι η άλλη συνοριακή συνθήκη του πλέγματος.

Η συνέχιση της προσομοίωσης με τη μελέτη των υπόλοιπων μεταβλητών του διανομέα ροής αερίου δεν πραγματοποιήθηκε λόγω της μικρής χωρητικότητας της μνήμης του labtop του υποφαινόμενου.

#### 4.2.1b Αποτελέσματα της περιοχής κυριαρχίας της τυρβώδους ροής (turbulent flow)

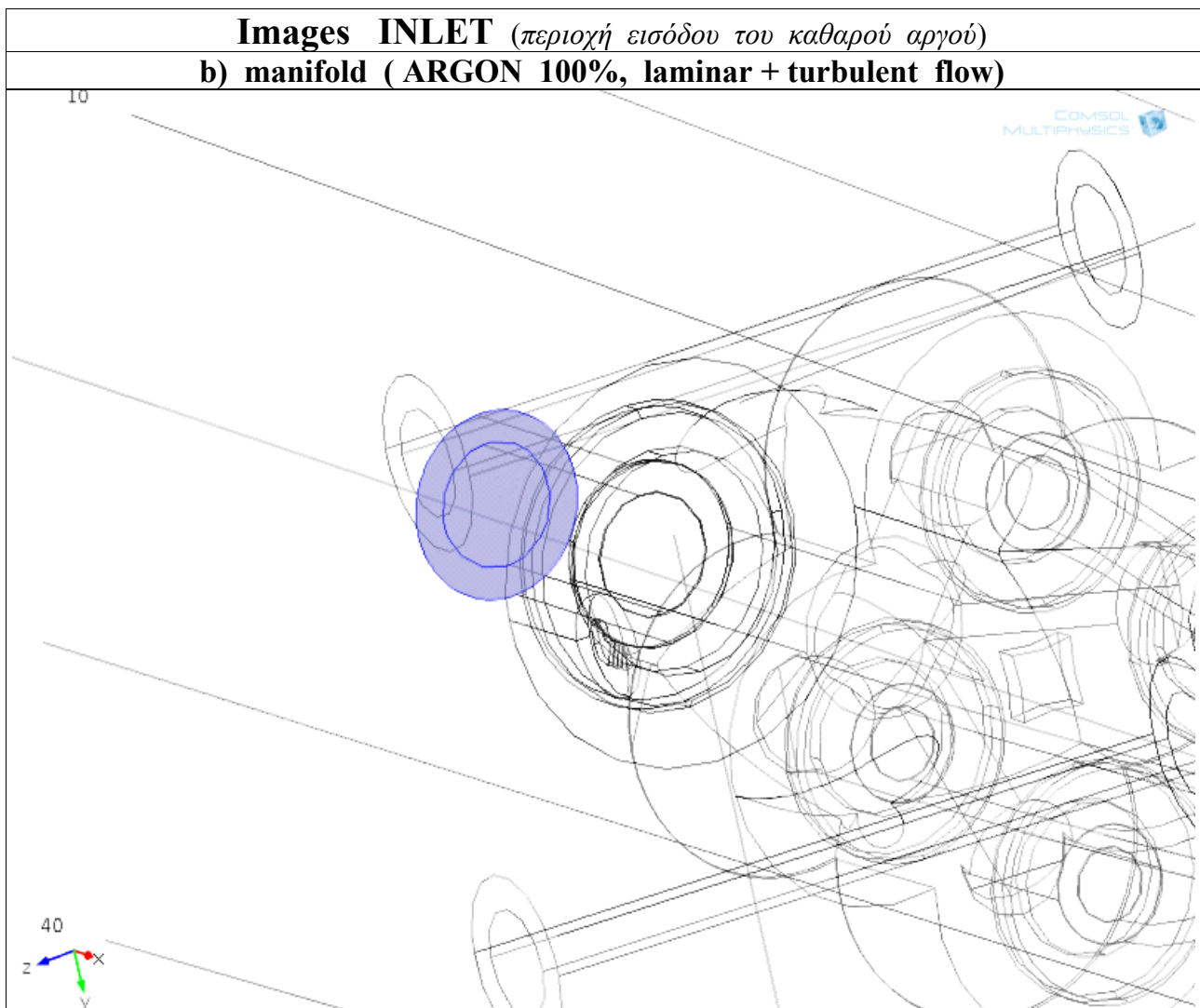
Παραθέτουμε την 3D γεωμετρία του μοντέλου του διανομέα ροής του καθαρού αργού με τη βοήθεια του προγράμματος COMSOL MULTIPHYSICS 4.4 σε διαφορετικές γωνίες ( $0^\circ$ ,  $-45^\circ$  &  $135^\circ$ ) έτσι ώστε να παρατηρήσουμε τις ιδιότητες ροής (*Fluid properties*) του διανομέα ροής αερίου όταν αυτός διαρρέεται εσωτερικά από δύο ειδών ροής: a) στη περιοχή κοντά στο κέντρο όπου κυριαρχεί η στρωτή ροή και b) στη περιοχή κοντά στα ακριανά τοιχώματα του, όπου επικρατεί η τυρβώδης ροή.





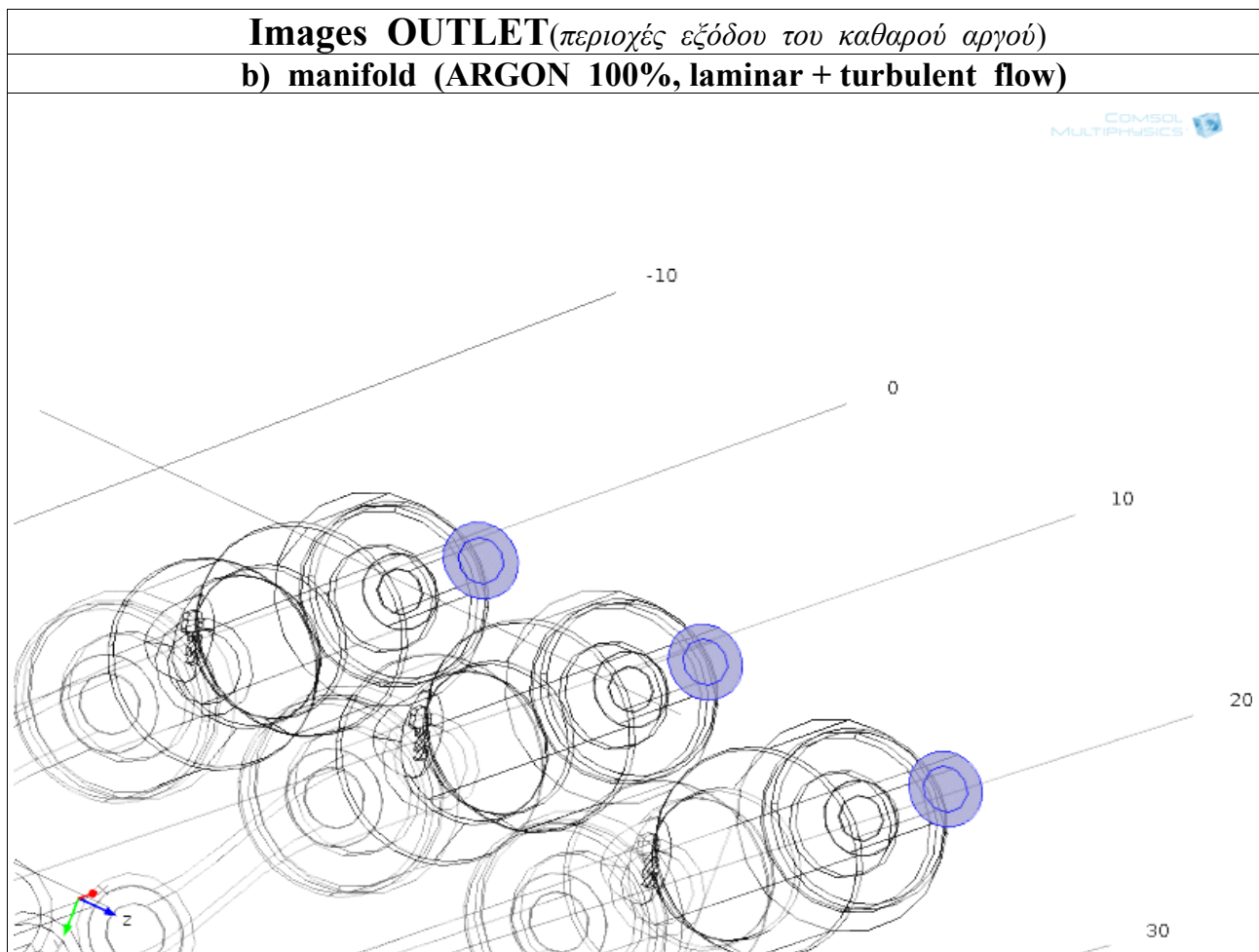
**Εικόνες 40a, 40b, 40c:** Η 3D γεωμετρία του μοντέλου που αναπαριστά το διανομέα ροής αερίου σε διάφορες γωνίες. Αυτό σημαίνει ότι η βαρύτητα δεν περιορίζει τη στρωτή + τυρβώδη ροή λόγω της μεγάλης ταχύτητας της στρωτής + τυρβώδους ροής που έχουμε (0.55 m/s) και του μικρού μεγέθους των μορίων του καθαρού αργού.

Ακολουθως, αυτό που έχουμε να βρούμε είναι η περιοχή εισόδου του καθαρού αργού όταν αυτό διαρρέεται σύμφωνα με τους νόμους της στρωτής + τυρβώδους ροής στον εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου. Στη παρακάτω εικόνα, παρατηρούμε την μπλε επιφάνεια που αναπαριστά την περιοχή εισόδου του καθαρού αργού. Η μπλε επιφάνεια χωρίζεται σε δύο περιοχές ανάλογα με το τρόπο ροής που κυριαρχεί στον εσωτερικό της χώρο. Έτσι, παρατηρούμε ότι η κεντρική περιοχή είναι η περιοχή που κυριαρχεί η στρωτή ροή ενώ η περιοχή κοντά στην άκρη των τοιχωμάτων του διανομέα, είναι η περιοχή που κυριαρχεί η τυρβώδης ροή του καθαρού αργού. Ένα οποιοδήποτε σημείο της πρώτης περιοχής, είναι το σημείο όπου μετράμε τη ταχύτητα εισόδου δηλαδή την ταχύτητα της στρωτής + τυρβώδους ροής του καθαρού αργού όταν το αργό αρχίζει να διέρχεται στον εσωτερικό χώρο του διανομέα.



**Εικόνα 40:** Παρατίθεται η μπλε επιφάνεια της περτοχής εισόδου του διανομέα ροής αερίου. Η επιφάνεια αυτή χωρίζεται σε δύο μέρη: i) την εσωτερική περιοχή κυριαρχίας της στρωτής ροής (laminar flow) και ii) την εξωτερική περιοχή κυριαρχίας της τυρβώδους ροής (turbulent flow) του καθαρού αργού.

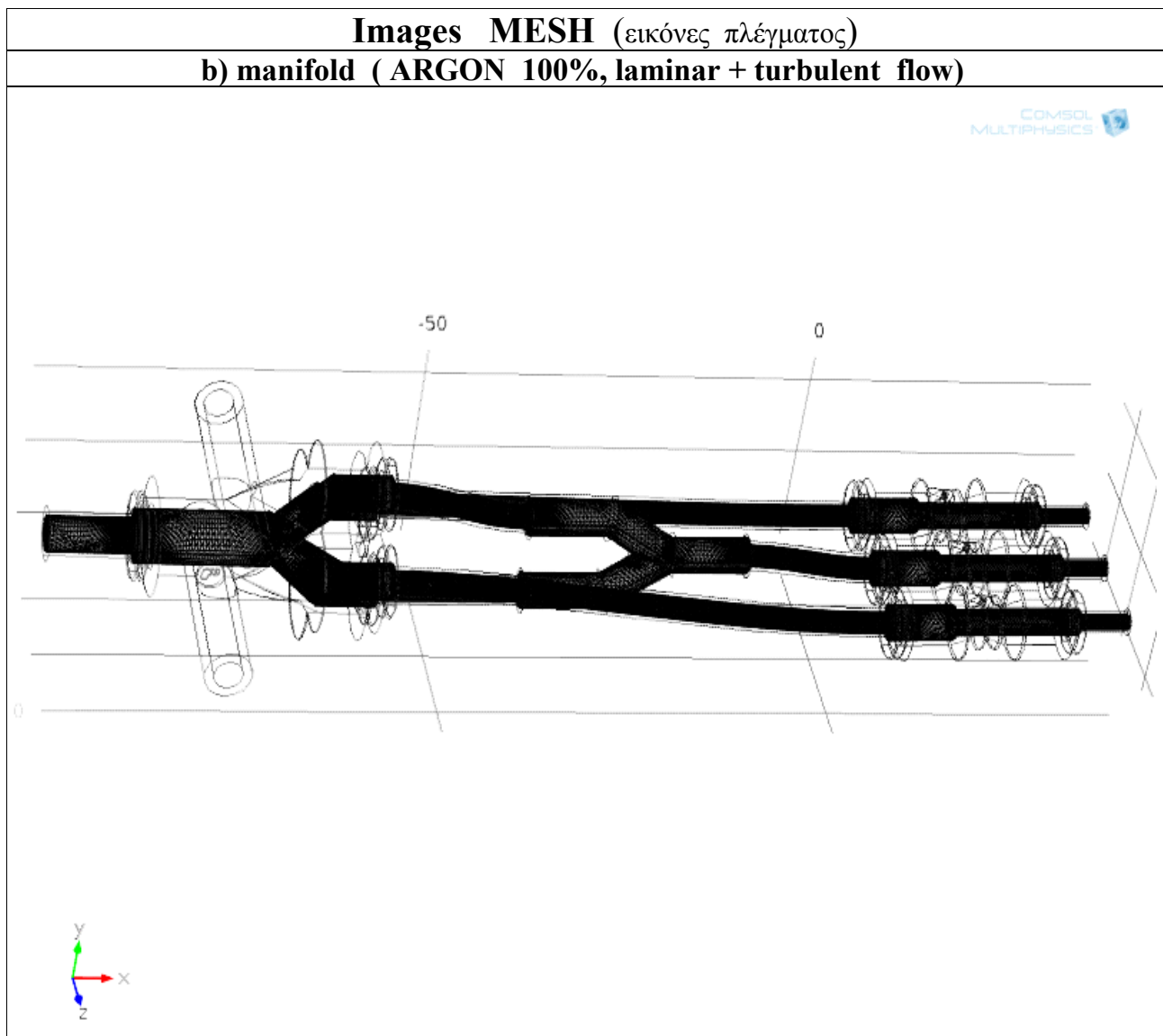
Η συνέχεια της εργασίας, είναι να βρούμε την περιοχή εξόδου (*outlet*) του αερίου ARGON 100% στη 3D γεωμετρία του μοντέλου που αναπαριστά τον διανομέα ροής αερίου. Όπως παρατηρούμε από τα παρακάτω σχήματα, η περιοχή εξόδου του αερίου, αποτελείται από τέσσερις κλάδους. Έτσι, το αέριο εισέρχεται από μια περιοχή εισόδου (*inlet*) στον εσωτερικό χώρο του διανομέα και εξέρχεται από τέσσερις περιοχές εξόδου (*outlet*). Η μπλε επιφάνεια (που αναπαριστά την περιοχή εξόδου του αερίου ARGON 100%) χωρίζεται σε δύο περιοχές ανάλογα με το τρόπο ροής που κυριαρχεί στον εσωτερικό της χώρο. Έτσι, παρατηρούμε ότι η περιοχή κοντά στο κέντρο είναι η περιοχή που κυριαρχεί η *στρωτή ροή* ενώ η περιοχή κοντά στην άκρη των τοιχωμάτων του διανομέα, είναι η περιοχή που κυριαρχεί η *τυρβώδης ροή* του αερίου. Στα τέσσερα σημεία, που βρίσκονται στο κέντρο των τεσσάρων περιοχών εξόδου του αερίου ARGON 100% στο εσωτερικό του διανομέα ροής αερίου, μετράμε τα τέσσερα *output velocities*, δηλαδή τις τέσσερις τιμές της ταχύτητας ροής του αερίου, όταν το αέριο αρχίζει να εξέρχεται από τον εσωτερικό χώρο του διανομέα.



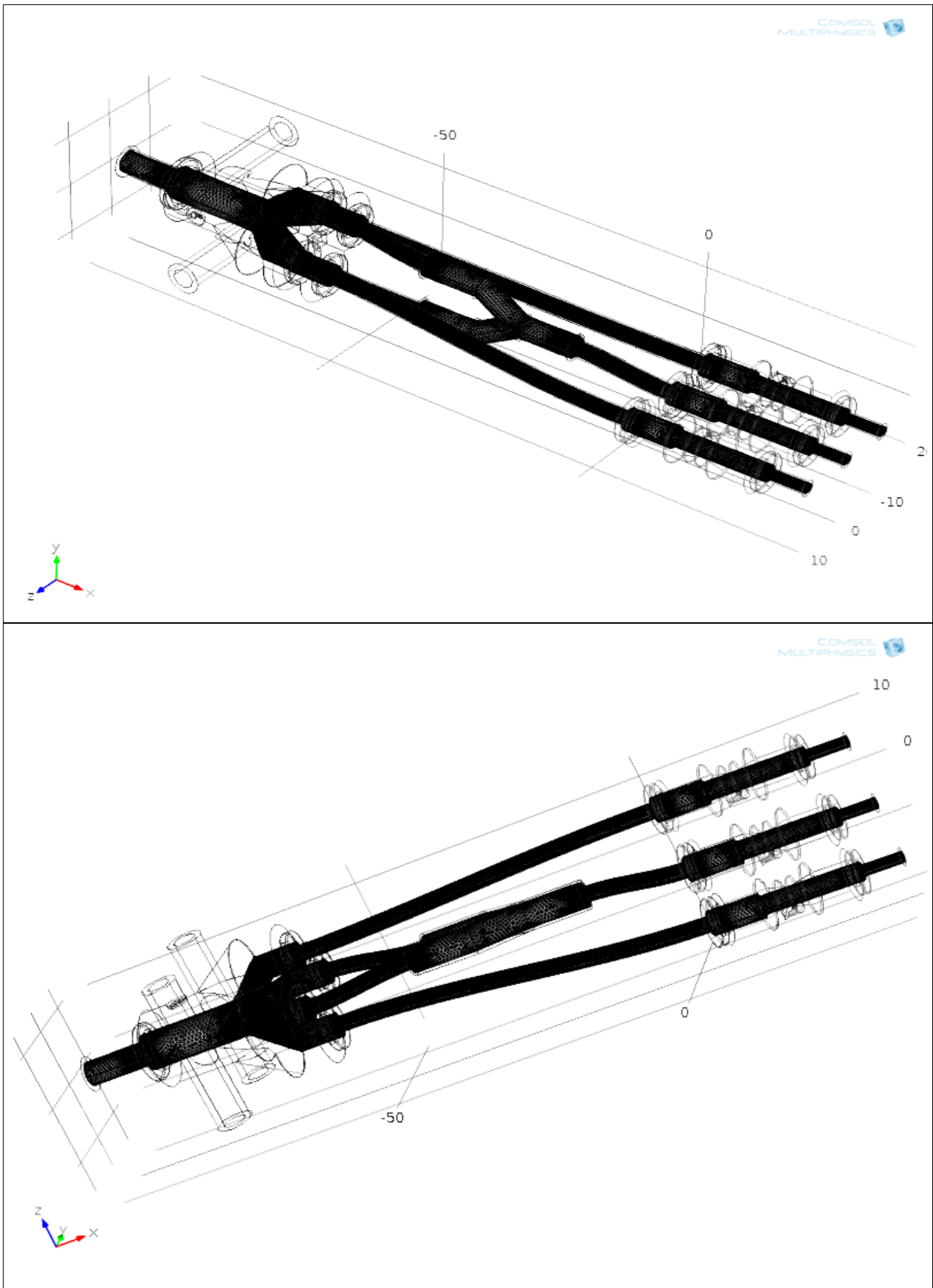
**Εικόνα 41:** Παρατίθενται οι τρεις κλάδοι της περιοχής εξόδου του διανομέα ροής αερίου. Η κάθε μια από τις τρεις επιφάνειες χωρίζεται σε δύο μέρη: i) την εσωτερική περιοχή κυριαρχίας της στρωτής ροής (*laminar flow*) και ii) την εξωτερική περιοχή κυριαρχίας της τυρβώδους ροής (*turbulent flow*) του καθαρού αργού.

Στις παρακάτω απεικονίσεις φαίνονται οι 3D γεωμετρίες για τα μοντέλα που αναπαριστούν, όσο καλύτερα γίνεται το διανομέα ροής αερίου. Για να επιλύσουμε το πρόβλημα, θα χρησιμοποιήσουμε ένα πλέγμα. Επειδή αναφερόμαστε σε ένα τρισδιάστατο μοντέλο για την παράθεση των αποτελεσμάτων, δουλέψαμε με επιφάνειες κάθετες αλλά και παράλληλες στην επιφάνεια του πλέγματος. Παραθέτουμε τα αποτελέσματά της προσομοίωσης για το μοντέλο του πλέγματος του διανομέα ροής αερίου.

Στον πρώτο πίνακα παραθέτουμε τη τρισδιάστατη γεωμετρία του διανομέα ροής αερίου σε διάφορες διευθύνσεις για να δούμε αν υπάρχει εξάρτηση από την βαρύτητα. Αυτό που παρατηρούμε είναι ότι η βαρύτητα δεν επηρεάζει καθόλου την υφή ή την πυκνότητα του πλέγματος εξαιτίας της μεγάλης πυκνότητας του πλέγματος που έχει το τρισδιάστατο μοντέλο του διανομέα αλλά και του μικρού μεγέθους των μορίων του αερίου.

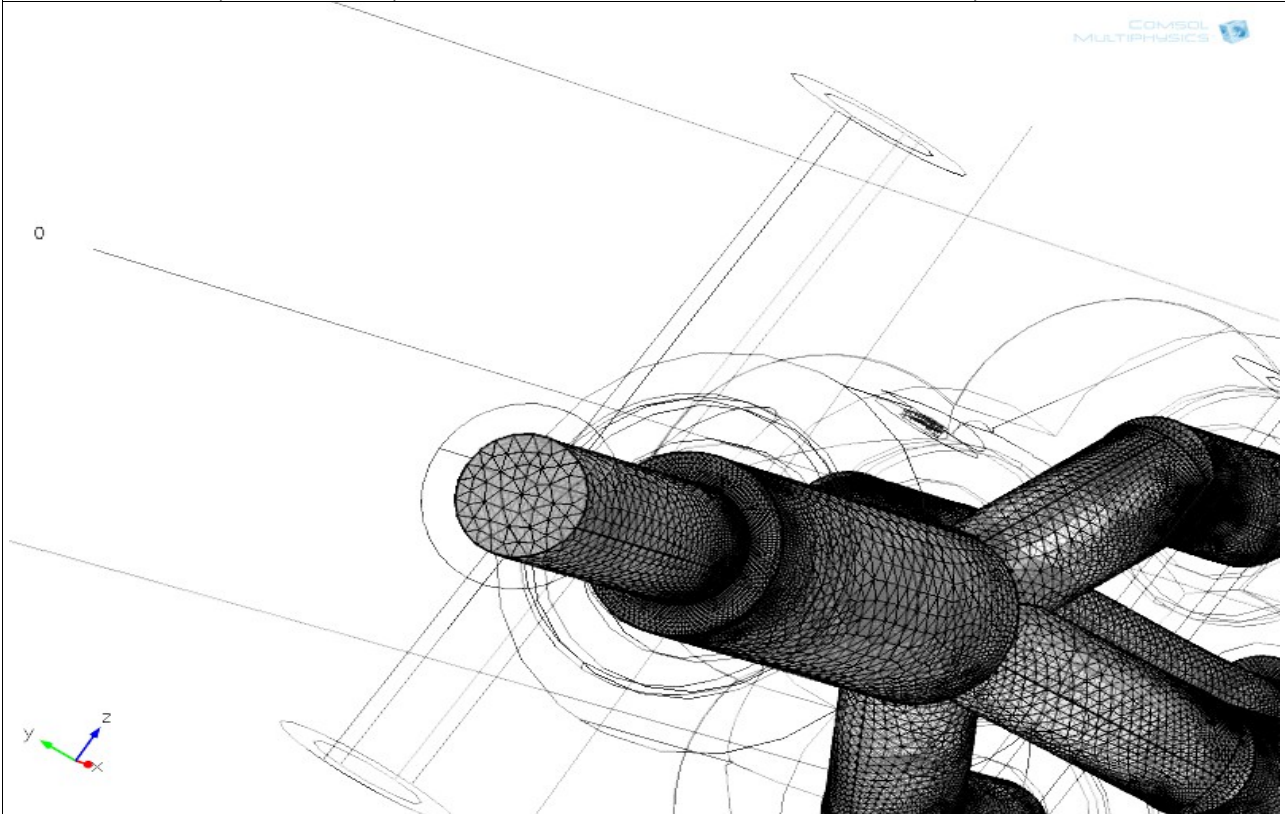






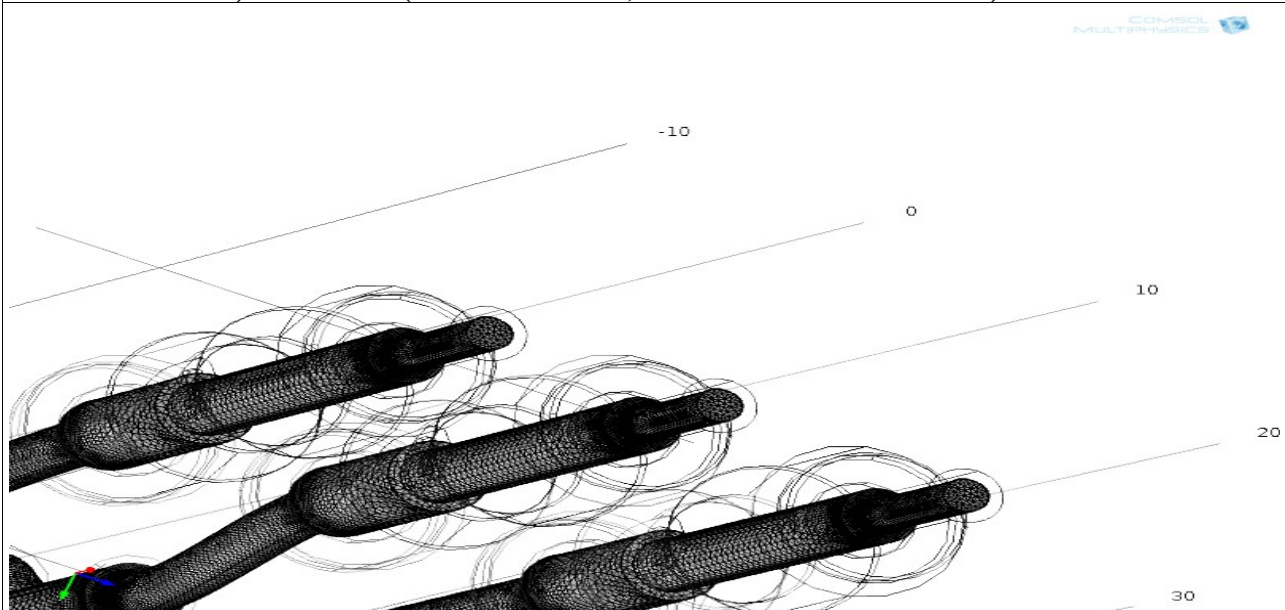
**Εικόνες 42a, 42b, 42c:** Παρατίθεται η μορφή του πλέγματος του διανομέα ροής αερίου όπου κυριαρχεί η στρωτή + τυρβώδης ροή του καθαρού αργού. Από τη παρατήρηση των παραπάνω εικόνων συμπεραίνουμε ότι η βαρύτητα δεν επηρεάζει τη δομή και την λεπτή υφή του πλέγματος (mesh) του διανομέα ροής αερίου.

**Images Mesh INLET** (εικόνες πλέγματος περιοχής εισόδου του καθαρού αργού)  
**b) manifold (ARGON 100%, laminar + turbulent flow)**



**Εικόνα 43:** Παρατίθεται η μορφή του πλέγματος στην περιοχή εισόδου του διανομέα ροής αερίου. Υπάρχουν εσωτερικά δυο τρόποι ροής του καθαρού αργού: I) της στρωτής ροής (laminar flow) και ii) της τυρβώδους ροής (turbulent flow). Αυτή η παράθεση γίνεται διότι η περιοχή εισόδου είναι μια από τις συνοριακές συνθήκες του πλέγματος.

**Images Mesh OUTLET** (εικόνες πλέγματος περιοχής εξόδου του καθαρού αργού)  
**b) manifold (ARGON 100%, laminar + turbulent flow)**



**Εικόνα 44:** Παρατίθεται η μορφή του πλέγματος στην περιοχή εξόδου του διανομέα ροής αερίου. Υπάρχουν εσωτερικά δυο τρόποι ροής του καθαρού αργού: I) της στρωτής ροής (laminar flow) και ii) της τυρβώδους ροής (turbulent flow). Αυτή η παράθεση γίνεται διότι η περιοχή εισόδου είναι η άλλη συνοριακή συνθήκη του πλέγματος.

## 5ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΤΡΟΠΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΜΠΕΔΗΣΗΣ ΣΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΔΙΑΝΟΜΕΑ ΡΟΗΣ ΑΕΡΙΟΥ

Αντικειμενικός σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι η εύρεση της χαρακτηριστικής αντίστασης ή εμπέδησης του διανομέα ροής αερίου. Οι δυο τρόποι υπολογισμού που υπάρχουν είναι: a) Higher Pressure και b) Average Pressure. Σε αυτό το κεφάλαιο καλούμαστε να συγκρίνουμε τους δυο αυτούς τρόπους υπολογισμού μεταξύ τους για να συμπεράνουμε ποιος είναι καλύτερος για να τον χρησιμοποιήσουμε.

#### 5.1 Σύγκριση του τρόπου υπολογισμού της Higher Pressure στις προσομοιώσεις του διανομέα ροής αερίου

Ο πρώτος τρόπος υπολογισμού της εμπέδησης είναι ο *Higher Pressure*. Ορίζεται όταν στην θέση της αντιπροσωπευτικής τιμής της εσωτερικής πίεσης ροής του αερίου, βάζουμε την μέγιστη τιμή από τη κατανομή των πιέσεων ροής του αερίου που διαρρέει εσωτερικά τον διανομέα.

##### 5.1a Όταν ο εσωτερικός χώρος του διανομέα ροής αερίου διαρέεται από το ίδιο αέριο ( ARGON 100%, Ar 93 % - CO2 7 % )

Έστω ότι ο διανομέας ροής αερίου διαρρέεται αποκλειστικά από το αέριο αργό. Σε αυτή τη περίπτωση, θέλουμε να συγκρίνουμε τις τιμές της εμπέδησης  $Z$ , όταν η μεταφορά του αργού γίνεται σύμφωνα με τις αρχές της στρωτής ροής με την αντίστοιχη τιμή όταν το αέριο μεταφέρεται σύμφωνα με τις αρχές της τυρβώδους ροής. Έτσι παίρνουμε τις αντίστοιχες μέσες τιμές της  $Z$  και έχουμε:

$$Z_{(turbulent\ flow, ARGON)}^{(Higher\ Pressure)} = 0.0039 \frac{(hr\ mbar)}{L}, Z_{(laminar\ flow, ARGON)}^{(Higher\ Pressure)} = 0.0029 \frac{(hr\ mbar)}{L} \quad (5.1.1a)$$

Επομένως, ισχύει:

$$Z_{(turbulent\ flow, ARGON)}^{(Higher\ Pressure)} > Z_{(laminar\ flow, ARGON)}^{(Higher\ Pressure)} \quad (5.1.1b)$$

Παρατηρούμε λοιπόν ότι η μέση τιμή της εμπέδησης  $Z$  όταν η μεταφορά του αργού γίνεται σύμφωνα με τις αρχές της τυρβώδους ροής είναι μεγαλύτερη κατά 30% από την αντίστοιχη μέση τιμή όταν το αέριο μεταφέρεται σύμφωνα με τις αρχές της στρωτής ροής.

Είναι κάτι φυσιολογικό γιατί, όταν έχουμε τυρβώδη ροή στο εσωτερικό του διανομέα ροής αερίου, έχουμε μεγαλύτερη ποσότητα του αερίου αργού που παίρνει τη βέλτιστη τιμή της ταχύτητας ροής του αερίου (κόκκινο χρώμα) σε σχέση με τη στρωτή ροή αερίου στο εσωτερικό του διανομέα. Επομένως έχουμε μεγαλύτερη τιμή της πίεσης ροής του αερίου στον εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η τιμή της *διαφοράς πίεσης*  $\Delta P$  να είναι μεγαλύτερη στην τυρβώδη ροή από ό,τι στην στρωτή ροή. Υπάρχει όμως και ένα άλλο παράδειγμα που καλούμαστε να δούμε:

Έστω ότι ο διανομέας ροής αερίου διαρρέεται αποκλειστικά με το μείγμα Ar 93% - CO2 7%. Σε αυτή την περίπτωση, θέλουμε να συγκρίνουμε τις τιμές της εμπέδησης  $Z$ , όταν η μεταφορά του μείγματος γίνεται σύμφωνα με τις αρχές της τυρβώδους ροής με την αντίστοιχη τιμή όταν το μείγμα μεταφέρεται σύμφωνα με τις αρχές της στρωτής ροής. Έτσι παίρνουμε τις αντίστοιχες μέσες τιμές της  $Z$  και έχουμε:

$$Z_{(turbulent\ flow, Ar93\% - CO27\%)}^{(Higher\ Pressure)} = 0.0033 \frac{(hr\ mbar)}{L}, Z_{(laminar\ flow, Ar93\% - CO27\%)}^{(Higher\ Pressure)} = 0.0027 \frac{(hr\ mbar)}{L} \quad (5.1.2)$$

Επομένως, ισχύει:

$$Z_{(turbulent\ flow, Ar93\% - CO27\%)}^{(Higher\ Pressure)} > Z_{(laminar\ flow, Ar93\% - CO27\%)}^{(Higher\ Pressure)} \quad (5.1.2b)$$

Παρατηρούμε λοιπόν ότι η μέση τιμή της εμπέδησης  $Z$ , όταν η μεταφορά του μείγματος Ar 93% - CO2 7% γίνεται σύμφωνα με τις αρχές της τυρβώδους ροής είναι μεγαλύτερη κατά 20% από την αντίστοιχη μέση τιμή όταν το αέριο μεταφέρεται σύμφωνα με τις αρχές της στρωτής ροής.

### 5.1b Όταν το αργό κυκλοφορεί με τον ίδιο τρόπο ροής αερίου (*laminar flow, turbulent flow*)

Έστω ότι η μεταφορά του αερίου στον εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου γίνεται σύμφωνα με τις αρχές της τυρβώδους ροής ανεξαρτήτως αερίου. Έχουμε δύο είδη αερίων: I. ARGON 100% και II. Ar 93% - CO2 7%. Θέλουμε να συγκρίνουμε τη τιμή της εμπέδησης  $Z$  όταν το αέριο που διαρρέει εσωτερικά τον διανομέα ροής αερίου είναι το αργό σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή όταν το αέριο που διαρρέει εσωτερικά τον διανομέα είναι το μείγμα. Έτσι παίρνουμε τις αντίστοιχες μέσες τιμές της  $Z$ :

$$Z_{(turbulent\ flow, ARGON)}^{(Higher\ Pressure)} = 0.0039 \frac{(hr\ mbar)}{L}, Z_{(laminar\ flow, ARGON)}^{(Higher\ Pressure)} = 0.0033 \frac{(hr\ mbar)}{L} \quad (5.1.3)$$

Επομένως, ισχύει:

$$Z_{(turbulent\ flow, ARGON)}^{(Higher\ Pressure)} > Z_{(laminar\ flow, ARGON)}^{(Higher\ Pressure)} \quad (5.1.3b)$$

Έστω ότι το αέριο που διαρρέει τον διανομέα ροής αερίου προσομοιώνει τις αρχές της τυρβώδους ροής. Παρατηρούμε ότι η μέση τιμή της εμπέδησης  $Z$  όταν το αέριο που διαρρέει τον διανομέα είναι το αργό είναι μεγαλύτερη κατά 20% σε σχέση με την αντίστοιχη μέση τιμή όταν το αέριο που διαρρέει τον διανομέα ροής αερίου είναι το μείγμα Ar 93% – CO2 7%. Έχουμε και ένα άλλο παράδειγμα που πρέπει να δούμε.

Έστω ότι το αέριο που διαρρέει εσωτερικά τον διανομέα ροής αερίου προσομοιώνει τις αρχές της στρωτής ροής (laminar flow). Έχουμε δύο είδη αερίων: I. ARGON 100% και II. Ar 93% - CO2 7%. Θέλουμε να συγκρίνουμε τη τιμή της χαρακτηριστικής αντίστασης  $Z$  όταν το αέριο που διαρρέει εσωτερικά τον διανομέα ροής αερίου είναι το αργό σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή όταν το αέριο που διαρρέει εσωτερικά τον διανομέα ροής αερίου είναι το II. Ar 93% - CO2 7%. Έτσι παίρνουμε τις αντίστοιχες μέσες τιμές της  $Z$ :

$$Z_{(laminar\ flow, ARGON)}^{(Higher\ Pressure)} = 0.0029 \frac{(hr\ mbar)}{L}, \quad Z_{(laminar\ flow, Ar\ 93\% - CO2\ 7\%)}^{(Higher\ Pressure)} = 0.0027 \frac{(hr\ mbar)}{L} \quad (5.1.4)$$

Επομένως, ισχύει:

$$Z_{(laminar\ flow, ARGON)}^{(Higher\ Pressure)} > Z_{(laminar\ flow, Ar\ 93\% - CO2\ 7\%)}^{(Higher\ Pressure)} \quad (5.1.4b)$$

Παρατηρούμε ότι η μέση τιμή της εμπέδησης  $Z$  όταν το αέριο που διαρρέει τον διανομέα ροής αερίου είναι το αργό είναι μεγαλύτερη κατά 10% σε σχέση με την αντίστοιχη μέση τιμή όταν το αέριο που διαρρέει τον διανομέα ροής αερίου είναι το μείγμα Ar 93% – CO2 7%.

Τελικά, παρατηρούμε ότι όταν χρησιμοποιούμε τον τρόπο υπολογισμού Higher Pressure η τιμή της χαρακτηριστικής αντίστασης του μείγματος Ar 93% – CO2 7% είναι γενικά μικρότερη από την αντίστοιχη τιμή της χαρακτηριστικής αντίστασης του αργού. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να εξηγηθεί λόγω της μικρότερης ποσότητας αργού μέσα στο μείγμα Ar 93% – CO2 7%. Ένας άλλος λόγος είναι ότι η ύπαρξη του *quencher* CO2 “απορροφά” μια ποσότητα του αερίου αργού. Όλα τα παραπάνω συνηγορούν ότι το μείγμα έχει μικρότερη ποσότητα αργού και επομένως δίνει μικρότερες τιμές της χαρακτηριστικής αντίστασης ή εμπέδησης  $Z$  σε σχέση με το καθαρό αργό.

Ειδικότερα, αν η κυκλοφορία του αερίου γίνεται σύμφωνα με τις αρχές της στρωτής ροής, τότε η μείωση είναι της τάξης 10% ενώ όταν η μεταφορά του αερίου γίνεται σύμφωνα με τις αρχές της τυρβώδους + στρωτής ροής, τότε η μείωση είναι της τάξης του 20%. Το ποσοστό της μείωσης είναι διπλάσιο αριθμητικά. Επομένως, βλέπουμε ότι παίζει ρόλο και ο τρόπος ροής του αερίου για την τιμή της εμπέδησης.

Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι όταν ο τρόπος ροής του μείγματός είναι η τυρβώδης ροή, τότε η κίνηση των μορίων του *quencher* CO2 είναι χαωτική με αποτέλεσμα να απορροφούν μεγαλύτερη ποσότητα αργού σε σχέση με τον τρόπο ροής της στρωτής ροής, όπου η κίνηση των μορίων του *quencher* CO2 είναι πιο “ευθύγραμμη”.

## 5.2 Σύγκριση του τρόπου υπολογισμού της Average Pressure στις προσομοιώσεις του διανομέα ροής αερίου

Ο δεύτερος τρόπος υπολογισμού της χαρακτηριστικής αντίστασης της *Average Pressure* ορίζεται όταν στην θέση της αντιπροσωπευτικής τιμής της εσωτερικής πίεσης ροής του αερίου, βάζουμε την μέση τιμή από τη κατανομή των εσωτερικών πιέσεων ροής του αερίου που διαρρέει εσωτερικά τον διανομέα ροής αερίου.

### 5.2a Όταν ο εσωτερικός χώρος του διανομέα ροής αερίου διαρρέεται από το ίδιο αέριο (ARGON 100%, Ar 93% – CO2 7%)

Έστω ότι ο διανομέας ροής αερίου διαρρέεται αποκλειστικά από το αέριο αργό. Σε αυτή τη περίπτωση, θέλουμε να συγκρίνουμε τις τιμές της χαρακτηριστικής αντίστασης ή εμπέδησης  $Z$  όταν η κυκλοφορία του αερίου αργού γίνεται σύμφωνα με τις αρχές της στρωτής ροής με την αντίστοιχη τιμή όταν το αέριο κυκλοφορεί σύμφωνα με τις αρχές της τυρβώδους + στρωτής ροής. Έτσι παίρνουμε τις αντίστοιχες μέσες τιμές της  $Z$ :

$$Z_{(turbulent\ flow, ARGON)}^{(Average\ Pressure)} = 0.0024 \frac{(hr\ mbar)}{L}, Z_{(laminar\ flow, ARGON)}^{(Average\ Pressure)} = 0.0019 \frac{(hr\ mbar)}{L} \quad (5.2.1a)$$

Επομένως, ισχύει:

$$Z_{(turbulent\ flow, ARGON)}^{(Average\ Pressure)} > Z_{(laminar\ flow, ARGON)}^{(Average\ Pressure)} \quad (5.2.1b)$$

Παρατηρούμε λοιπόν ότι η μέση τιμή της εμπέδησης  $Z$  όταν η κυκλοφορία του αργού γίνεται σύμφωνα με τις αρχές της τυρβώδους + στρωτής ροής είναι μεγαλύτερη κατά 20% από την αντίστοιχη μέση τιμή όταν το αέριο μεταφέρεται σύμφωνα με τις αρχές της στρωτής ροής.

Είναι κάτι φυσιολογικό γιατί όταν έχουμε τυρβώδη ροή στο εσωτερικό του διανομέα ροής αερίου, έχουμε μεγαλύτερη ποσότητα του αργού που παίρνει τη βέλτιστη τιμή της ταχύτητας ροής του αερίου (κόκκινο χρώμα) σε σχέση με τη στρωτή ροή αερίου στο εσωτερικό του διανομέα ροής αερίου. Επομένως έχουμε μεγαλύτερη τιμή της εσωτερικής πίεσης ροής του καθαρού αργού στον εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής του αερίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η τιμή της διαφοράς πίεσης  $\Delta P$  να είναι μεγαλύτερη στην τυρβώδη ροή από ό,τι στη στρωτή ροή. Υπάρχει όμως και ένα άλλο παράδειγμα που καλούμαστε να δούμε.

Έστω ότι ο διανομέας ροής αερίου διαρρέεται αποκλειστικά από το μείγμα Ar 93% – CO2 7%. Σε αυτή την περίπτωση θέλουμε να συγκρίνουμε τις τιμές της χαρακτηριστικής αντίστασης  $Z$  όταν η κυκλοφορία του μείγματος γίνεται σύμφωνα με τις αρχές της τυρβώδους + στρωτής ροής με την αντίστοιχη τιμή όταν το μείγμα μας κυκλοφορεί σύμφωνα με τις αρχές της στρωτής ροής. Έτσι παίρνουμε τις αντίστοιχες μέσες τιμές της εμπέδησης  $Z$ :

$$Z_{(turbulent\ flow, Ar93\% - CO27\%)}^{(Average\ Pressure)} = 0.0021 \frac{(hr\ mbar)}{L}, Z_{(laminar\ flow, Ar93\% - CO27\%)}^{(Average\ Pressure)} = 0.0014 \frac{(hr\ mbar)}{L} \quad (5.2.2a)$$

Επομένως, ισχύει:

$$Z_{(turbulent\ flow, Ar\ 93\% - CO2\ 7\%)}^{(Average\ Pressure)} > Z_{(laminar\ flow, Ar\ 93\% - CO2\ 7\%)}^{(Average\ Pressure)} \quad (5.2.2b)$$

Παρατηρούμε λοιπόν ότι η μέση τιμή της χαρακτηριστικής αντίστασης  $Z$  όταν η κυκλοφορία του μείγματος  $Ar\ 93\% - CO2\ 7\%$  γίνεται σύμφωνα με τις αρχές της τυρβώδους + στρωτής ροής είναι μεγαλύτερη κατά  $30\%$  από την αντίστοιχη μέση τιμή όταν το αέριο μεταφέρεται σύμφωνα με τις αρχές της στρωτής ροής.

### 5.2b Όταν το αργό κυκλοφορεί με το ίδιο τρόπο ροής αερίου (*laminar flow, turbulent flow*)

Έστω ότι η κυκλοφορία του αερίου στον εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου γίνεται σύμφωνα με τις αρχές της τυρβώδους + στρωτής ροής ανεξαρτήτως αερίου. Έχουμε δύο είδη αερίων: I. ARGON  $100\%$  και II.  $Ar\ 93\% - CO2\ 7\%$ . Θέλουμε να συγκρίνουμε τη τιμή της χαρακτηριστικής αντίστασης  $Z$  όταν το αέριο που διαρρέει εσωτερικά τον διανομέα ροής αερίου είναι το αργό σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή όταν το αέριο που διαρρέει εσωτερικά τον διανομέα ροής αερίου είναι το μείγμα  $Ar\ 93\% - CO2\ 7\%$ . Έτσι κάνουμε τους υπολογισμούς:

$$Z_{(turbulent\ flow, ARGON)}^{(Average\ Pressure)} = 0.0024 \frac{(hr\ mbar)}{L}, \quad Z_{(turbulent\ flow, Ar\ 93\% - CO2\ 7\%)}^{(Average\ Pressure)} = 0.0021 \frac{(hr\ mbar)}{L} \quad (5.2.3a)$$

Επομένως, ισχύει:

$$Z_{(turbulent\ flow, ARGON)}^{(Average\ Pressure)} > Z_{(turbulent\ flow, Ar\ 93\% - CO2\ 7\%)}^{(Average\ Pressure)} \quad (5.2.3b)$$

Έστω ότι το αέριο που διαρρέει τον διανομέα ροής αερίου προσομοιώνει τις αρχές της τυρβώδους + στρωτής ροής. Παρατηρούμε ότι η μέση τιμή της εμπέδησης  $Z$  όταν το αέριο που διαρρέει τον διανομέα ροής αερίου είναι το αργό είναι μεγαλύτερη κατά  $20\%$  σε σχέση με την αντίστοιχη μέση τιμή όταν το αέριο που διαρρέει τον διανομέα ροής αερίου είναι το  $Ar\ 93\% - CO2\ 7\%$ . Έχουμε και ένα άλλο παράδειγμα που καλούμαστε να δούμε.

Έστω ότι το αέριο που διαρρέει εσωτερικά τον διανομέα ροής αερίου προσομοιώνει τις αρχές της στρωτής ροής. Έχουμε δύο είδη αερίων: I. Argon  $100\%$  και II.  $Ar\ 93\% - CO2\ 7\%$ . Θέλουμε να συγκρίνουμε τη μέση τιμή της χαρακτηριστικής αντίστασης  $Z$  όταν το αέριο που διαρρέει εσωτερικά τον διανομέα ροής αερίου είναι το αργό σε σχέση με την αντίστοιχη μέση τιμή όταν το μείγμα που διαρρέει εσωτερικά τον διανομέα ροής αερίου είναι το  $Ar\ 93\% - CO2\ 7\%$ . Έτσι παίρνουμε τις αντίστοιχες μέσες τιμές της  $Z$ :

$$Z_{(laminar\ flow, ARGON)}^{(Average\ Pressure)} = 0.0019 \frac{(hr\ mbar)}{L}, \quad Z_{(laminar\ flow, Ar\ 93\% - CO2\ 7\%)}^{(Average\ Pressure)} = 0.0014 \frac{(hr\ mbar)}{L} \quad (5.2.4a)$$

Επομένως, ισχύει:

$$Z_{(laminar\ flow, ARGON)}^{(Average\ Pressure)} > Z_{(laminar\ flow, Ar\ 93\% - CO2\ 7\%)}^{(Average\ Pressure)} \quad (5.2.4b)$$

Έστω ότι το αέριο που διαρρέει τον διανομέα ροής αερίου προσομοιώνει τις αρχές της στρωτής ροής. Παρατηρούμε ότι η μέση τιμή της εμπέδηση  $Z$  όταν το αέριο που διαρρέει τον διανομέα ροής αερίου είναι το αργό είναι μεγαλύτερη κατά 30% σε σχέση με την αντίστοιχη μέση τιμή όταν το μείγμα που διαρρέει τον διανομέα ροής αερίου είναι το Ar 93% – CO2 7%.

Τελικά, παρατηρούμε ότι όταν χρησιμοποιούμε τον τρόπο υπολογισμού της εμπέδησης Average Pressure η τιμή της χαρακτηριστικής αντίστασης ή εμπέδησης του μείγματος Ar 93% – CO2 7% είναι γενικά μικρότερη από την αντίστοιχη τιμή της εμπέδησης του αργού. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να εξηγηθεί λόγω της μικρότερης ποσότητας αργού μέσα στο μείγμα μας. Επίσης ένας άλλος λόγος είναι ότι η ύπαρξη του *quencher* CO2 “απορροφά” μια ποσότητα του αργού. Όλα τα παραπάνω συνηγορούν ότι το μείγμα Ar 93% - CO2 7% έχει μικρότερη ποσότητα αργού και επομένως δίνει μικρότερες τιμές της εμπέδησης σε σχέση με το καθαρό αργό.

Ειδικότερα, αν η κυκλοφορία του αερίου γίνεται σύμφωνα με τις αρχές της στρωτής ροής, τότε η μείωση της τιμής είναι της τάξης 30% ενώ όταν η κυκλοφορία του αερίου γίνεται σύμφωνα με τις αρχές της τυρβώδους + στρωτής ροής, τότε η μείωση της τιμής είναι της τάξης του 20%.

Το φαινόμενο αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι με τον τρόπο υπολογισμού της εμπέδησης Average Pressure, παίρνει μέρος όλος ο εσωτερικός χώρος του διανομέα ροής αερίου ως ολότητα. Επομένως, όταν ο τρόπος ροής του μείγματος μας είναι η στρωτή ροή, τότε η κίνηση του *quencher* CO2 είναι “ευθύγραμμη”, επομένως περισσότερη ποσότητα αργού “απορροφάται” από το *quencher* CO2 σε σχέση με το όταν ο τρόπος ροής του είναι η τυρβώδης + στρωτή ροή. Τότε η κίνηση του *quencher* CO2 είναι χαώδης άρα δεν προλαβαίνει να απορροφήσει μεγάλη ποσότητα του αργού, λόγω της κίνησης του αερίου CO2.

### 5.3 Σύγκριση της Higher Pressure με τη Average Pressure στις προσομοιώσεις του διανομέα ροής αερίου

Σε αυτή την ενότητα καλούμαστε να αναρωτηθούμε ποιος από τους δυο τρόπους υπολογισμού της εμπέδησης  $Z$  του διανομέα ροής αερίου (I. Higher Pressure και II. Average Pressure) είναι αποδοτικότερος από τον άλλον.

#### 5.3a Όταν ο εσωτερικός χώρος του διανομέα ροής αερίου διαρρέεται από το ίδιο αέριο (ARGON 100%, Ar - CO2) και κυκλοφορεί με το ίδιο τρόπο ροής αερίου (*laminar flow, turbulent flow*).

Έστω ότι ο διανομέας ροής αερίου διαρρέεται μόνο από το αργό και η κυκλοφορία του αργού στον εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου γίνεται σύμφωνα με τις αρχές της στρωτής ροής (*laminar flow*). Θέλουμε να συγκρίνουμε τη μέση τιμή της χαρακτηριστικής αντίστασης  $Z$  όταν χρησιμοποιούμε: I. Higher Pressure και II. Average Pressure. Έτσι παίρνουμε τις αντίστοιχες μέσες τιμές της  $Z$ :



$$Z_{(laminar\ flow, ARGON)}^{(Higher\ Pressure)} = 0.0029 \frac{(hr\ mbar)}{L}, Z_{(laminar\ flow, ARGON)}^{(Average\ Pressure)} = 0.0019 \frac{(hr\ mbar)}{L} \quad (5.3.1a)$$

Επομένως, ισχύει:

$$Z_{(laminar\ flow, ARGON)}^{(Higher\ Pressure)} > Z_{(laminar\ flow, ARGON)}^{(Average\ Pressure)} \quad (5.3.1b)$$

Παρατηρούμε λοιπόν ότι η μέση τιμή της χαρακτηριστικής αντίστασης όταν η μεταφορά του αργού στον εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου γίνεται σύμφωνα με τις αρχές της στρωτής ροής όταν χρησιμοποιούμε τον τρόπο του Higher Pressure είναι μεγαλύτερη κατά 30% σε σχέση με την αντίστοιχη μέση τιμή, όταν χρησιμοποιούμε τον τρόπο του Average Pressure.

Έστω ότι ο διανομέας ροής αερίου διαρρέεται από το μείγμα *Ar 93% – CO2 7%* και η κυκλοφορία του μείγματος στον εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου γίνεται σύμφωνα με τις αρχές της στρωτής ροής. Θέλουμε να συγκρίνουμε τη μέση τιμή της εμπέδησης όταν χρησιμοποιούμε: I. Higher Pressure και II. Average Pressure. Έτσι παίρνουμε τις αντίστοιχες μέσες τιμές της εμπέδησης *Z*:

$$Z_{(laminar\ flow, Ar\ 93\% - CO2\ 7\%)}^{(Higher\ Pressure)} = 0.0027 \frac{(hr\ mbar)}{L}, Z_{(laminar\ flow, Ar\ 93\% - CO2\ 7\%)}^{(Average\ Pressure)} = 0.0014 \frac{(hr\ mbar)}{L} \quad (5.3.2a)$$

Επομένως, ισχύει:

$$Z_{(laminar\ flow, Ar\ 93\% - CO2\ 7\%)}^{(Higher\ Pressure)} > Z_{(laminar\ flow, Ar\ 93\% - CO2\ 7\%)}^{(Average\ Pressure)} \quad (5.3.2b)$$

Παρατηρούμε λοιπόν ότι η μέση τιμή της χαρακτηριστικής αντίστασης *Z* όταν η μεταφορά του μείγματος στον εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου γίνεται σύμφωνα με τις αρχές της στρωτής ροής όταν χρησιμοποιούμε τον τρόπο Higher Pressure είναι μεγαλύτερη κατά 50% σε σχέση με την αντίστοιχη μέση τιμή όταν χρησιμοποιούμε τον τρόπο Average Pressure.

Έστω ότι ο διανομέας ροής αερίου διαρρέεται από το αργό και η μεταφορά του αργού στον εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου γίνεται σύμφωνα με τις αρχές της τυρβώδους + στρωτής ροής. Θέλουμε να συγκρίνουμε τη μέση τιμή της εμπέδησης όταν χρησιμοποιούμε: I. Higher Pressure και II. Average Pressure. Έτσι παίρνουμε τις αντίστοιχες μέσες τιμές της *Z*:

$$Z_{(turbulent\ flow, ARGON)}^{(Higher\ Pressure)} = 0.0039 \frac{(hr\ mbar)}{L}, Z_{(turbulent\ flow, ARGON)}^{(Average\ Pressure)} = 0.0024 \frac{(hr\ mbar)}{L} \quad (5.3.3a)$$

Επομένως, ισχύει:

$$Z_{(turbulent\ flow, ARGON)}^{(Higher\ Pressure)} > Z_{(turbulent\ flow, ARGON)}^{(Average\ Pressure)} \quad (5.3.3b)$$

Παρατηρούμε λοιπόν ότι η μέση τιμή της χαρακτηριστικής αντίστασης όταν η κυκλοφορία του αργού στον εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου γίνεται σύμφωνα με τις αρχές της τυρβώδους + στρωτής ροής, όταν χρησιμοποιούμε τον τρόπο υπολογισμού Higher Pressure είναι μεγαλύτερη κατά 40% σε σχέση με την αντίστοιχη μέση τιμή όταν χρησιμοποιούμε τον τρόπο υπολογισμού Average Pressure.

Έστω ότι ο διανομέας ροής αερίου διαρρέεται από το μείγμα Ar 93% – CO2 7% και η κυκλοφορία του μείγματος στο εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου γίνεται σύμφωνα με τις αρχές της τυρβώδους + στρωτής ροής. Θέλουμε να συγκρίνουμε τη μέση τιμή της εμπέδησης όταν χρησιμοποιούμε: I. Higher Pressure και II. Average Pressure. Έτσι κάνουμε τους υπολογισμούς:

$$Z_{(turbulent\ flow, Ar93\% - CO27\%)}^{(Higher\ Pressure)} = 0.0033 \frac{(hr\ mbar)}{L}, Z_{(turbulent\ flow, Ar93\% - CO27\%)}^{(Average\ Pressure)} = 0.0021 \frac{(hr\ mbar)}{L} \quad (5.3.4a)$$

Επομένως, ισχύει:

$$Z_{(turbulent\ flow, Ar93\% - CO27\%)}^{(Higher\ Pressure)} > Z_{(turbulent\ flow, Ar93\% - CO27\%)}^{(Average\ Pressure)} \quad (5.3.4b)$$

Παρατηρούμε λοιπόν ότι η μέση τιμή της εμπέδησης όταν η κυκλοφορία του μείγματος στο εσωτερικό του διανομέα ροής αερίου γίνεται σύμφωνα με τις αρχές της τυρβώδους + στρωτής ροής, όταν χρησιμοποιούμε το τρόπο υπολογισμού Higher Pressure είναι μεγαλύτερη κατά 40% σε σχέση με την αντίστοιχη μέση τιμή όταν χρησιμοποιούμε το τρόπο υπολογισμού Average Pressure.

Από την παρατήρηση των μέσων τιμών της εμπέδησης, αντιλαμβανόμαστε ότι χρησιμοποιώντας το τρόπο υπολογισμού Higher Pressure, οι τιμές της εμπέδησης είναι ίσες σε σχέση με τις αντίστοιχες μέσες τιμές που προέρχονται από τη χρήση του τρόπου υπολογισμού Average Pressure.

Αρα αντιλαμβανόμαστε ότι ο τρόπος υπολογισμού του Higher Pressure μας δίνει τις ίδιες τιμές της εμπέδησης σε σχέση με τις τιμές που μας δίνει ο τρόπος υπολογισμού Average Pressure. Θα πρέπει όμως να αναγνωρίσουμε ότι ο τρόπος Higher Pressure αναπαριστά μια ιδεατή κατανομή των μέσων τιμών της εμπέδησης  $Z$  του εσωτερικού χώρου της 3D γεωμετρίας του διανομέα ροής αερίου σε σχέση με τον τρόπο Average Pressure που αναπαριστά μια πιο κοντά στην πραγματικότητα κατανομή μέσων τιμών της χαρακτηριστικής αντίστασης  $Z$ .

Μια πρόταση για το μέλλον είναι να γίνουν περισσότερα πειράματα στον διανομέα ροής αερίου με άλλα αέρια και άλλα μείγματα με παρόμοια viscosity.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο

### ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΔΙΑΝΟΜΕΑ ΡΟΗΣ ΑΕΡΙΟΥ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

#### 6.1 Περιγραφή της πειραματικής διάταξης του διανομέα ροής αερίου

Πριν παρουσιάσουμε το πειραματικό μέρος (δηλαδή τις μετρήσεις που έλαβαν χώρα στο εργαστήριο κοσμικών ακτίνων του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου), καλό είναι να περιγράψουμε περιληπτικά τις κύριες συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα πειραματικής φυσικής.

##### 6.1.1 Σωλήνες

Το καλώδιο, είναι μια συσκευή που έχει σκοπό την μεταφορά του ηλεκτρικού ρεύματος ή των μηχανικών δυνάμεων. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται δυο ή περισσότερα σύρματα, συνήθως πλεγμένα το ένα με το άλλο. Στην ηλεκτρολογία, καλώδιο, ονομάζεται ένας μονωμένος αγωγός που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά ηλεκτρικού φορτίου, ενώ στην μηχανική, ονομάζονται εύκαμπτα στοιχεία που μπορούν να φέρουν φορτία. Ένα σημαντικό φαινόμενο των καλωδίων, είναι οι απώλειες ενέργειας, λόγω της θερμικής ενέργειας Joule. Η ποσότητά της, συμβολίζεται με  $Q$  και δίνεται από τη σχέση:

$$Q = I R t \quad (6.1.1a)$$

όπου  $R$  είναι η ωμική αντίσταση του υλικού,  $I$  η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος και  $t$ : ο χρόνος διέλευσης του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα στο καλώδιο. Παρόλα αυτά, τα καλώδια παραμένουν η καλύτερη επιλογή για την μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας.

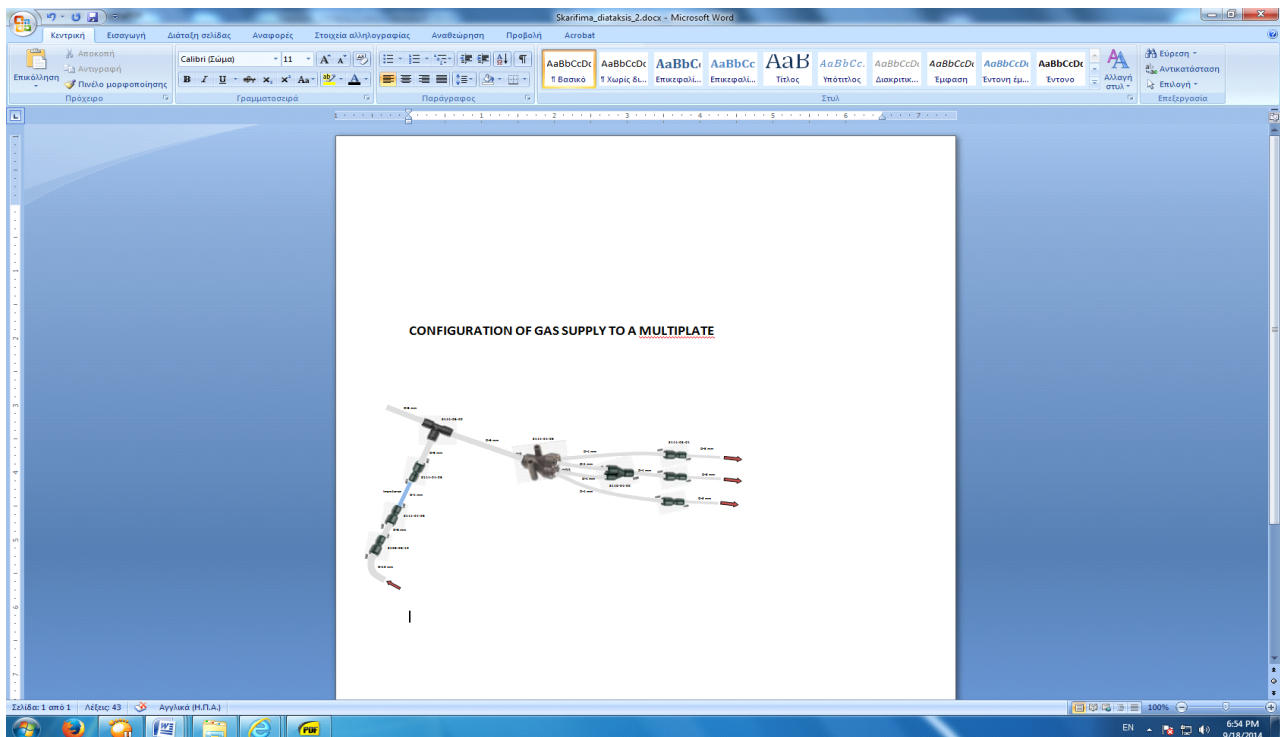
##### 6.1.2 Ομοαξονικοί σωλήνες

Το ομοαξονικό καλώδιο (Coaxial cable ή coax), είναι ένας τύπος καλωδίων, ο οποίος αποτελείται από έναν εσωτερικό αγωγό (inner conductor) ο οποίος περιβάλλεται από ένα σωληνοειδές μονωτικό στρώμα (*tubular insulating layer*), το οποίο με τη σειρά του περικλείεται από μια σωληνοειδή αγωγίμη θωράκιση (*tubular conducting shield*). Πολλά ομοαξονικά καλώδια, φέρουν ένα επιπρόσθετο εξωτερικό μονωτικό κάλυμμα (*insulating\_ outer sheath or jacket*). Συνήθως, αποτελούνται από 1 έως 4 στρώματα, όπου το ένα είναι κατασκευασμένο από ένα μεταλλικό πλέγμα (woven metallic braid) αλλά και από μια μεταλλική ταινία (metallic tape). Ο όρος ομοαξονικό, προέρχεται από τον κοινό γεωμετρικό άξονα του εσωτερικού αγωγού και της εξωτερικής θωράκισης. Το συγκεκριμένο είδος καλωδίων, ανακαλύφθηκε από ένα Αγγλο μηχανικό και μαθηματικό, τον *Oliver Heaviside*, το 1880. Στον παρακάτω πίνακα, φαίνεται η τυπική διάταξη ενός τυπικού ομοαξονικού καλωδίου.

<b>Structure Figure</b>				
<b><u>Conductor</u></b>	<b><u>Insulation</u></b>	<b><u>Binder</u></b>	<b><u>Single Braid</u></b>	<b><u>Jacket</u></b>
<u>Material</u> :Solid Copper Claded Aluminum Wire	<u>Material</u> : Foam polyethylene	<u>Material</u> :Aluminum/PE Tape	<u>Material</u> :Tinned copper wire	<u>Material</u> :PE/PVC
<u>Diameter</u> :Approx. 2.74 mm	<u>Diameter</u> : Approx. 7.24 mm	<u>Diameter</u> :Approx. 7.35 mm	<u>Coverage</u> : 85%	<u>Color</u> :Black
_____	_____	_____	<u>Diameter</u> :Approx. 8.1 mm	<u>Diameter</u> :Approx. 10.3 mm

Τα ομοαξονικά καλώδια, μεταφέρουν το ηλεκτρικό σήμα με τη βοήθεια του εσωτερικού αγωγού, ο οποίος έχει κατασκευαστεί από χαλκό. Συνήθως, η θωράκιση του καλωδίου, γειώνεται ενώ το δυναμικό εφαρμόζεται μόνο στον εσωτερικό αγωγό, με αποτέλεσμα σε αυτόν να μεταφέρονται και τα ηλεκτρικά σήματα. Το πλεονέκτημα στο σχεδιασμό ενός ομοαξονικού καλωδίου, έγκειται στο γεγονός ότι το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο περιορίζονται στην περιοχή του διηλεκτρικού με ένα πολύ μικρό ποσοστό διαρροής του έξω από τη θωράκιση. Αντίθετα, στην περιοχή έξω από την θωράκιση τα πεδία δεν μπορούν να εισχωρήσουν στο εσωτερικό του και να προκαλέσουν παρεμβολές στο σήμα. Αυτή τους την ιδιότητα, τα κάνει καταλλήλους υποψηφίους για τη μεταφορά των ασθενών σημάτων. Η χαρακτηριστική αντίσταση ( $Z_0$ , *impedance*) του καλωδίου προσδιορίζεται από τη σταθερά του διηλεκτρικού του εσωτερικού μονωτικού και από την ακτίνα του εσωτερικού αγωγού. Η χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση του καλωδίου, είναι σημαντική γιατί πρέπει να επιτύχουμε ταίριασμα (*matching*) των αντιστάσεων για αποφυγή ανακλάσεων, για μέγιστη μεταφορά ισχύος αλλά και για να ελαχιστοποιήσουμε το ρυθμό στάσιμων κυμάτων εντός του καλωδίου. Άλλοι σημαντικοί παράγοντες ενός καλωδίου, είναι η εξασθένιση του σήματος σαν συνάρτηση της συχνότητας, η ικανότητα ελέγχου τάσης και η ποιτική θωράκιση.

### 6.1.3 Διανομέας ροής του αερίου



**Εικόνα 45** : Το τρισδιάστατο διάγραμμα του διανομέα ροής αερίου (*manifold*)

Στο παραπάνω σχήμα, παραθέτουμε την συνολική εικόνα της πειραματικής διάταξης του διανομέα ροής αερίου έτσι όπως κατασκευάστηκε στο εργαστήριο κοσμικών ακτίνων του τομέα Φυσικής στο Ε.Μ.Π για τη μελέτη της παροχής του αερίου αργού στο διανομέα ροής αερίου. Στη συνέχεια, παραθέτουμε αναλυτικά τα εξαρτήματα από τα οποία αποτελείται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στο εργαστήριο για την λήψη των πειραματικών μας μετρήσεων.

Ποσότητα	Περιγραφή	Κώδικας	Πλήθος
1	Unequal elbow	3102	a
8	Unequal tee	3104	b
1	Unequal tube / tube connectors	3106	c
1	Single “Y” piece – equal & unequal	3140	d
1	Double “Y” piece – equal & unequal	3144	e
	Plug-in equal & unequal compact elbow with plastic tailpiece	3182	f
11			sum

### Σειρά Εξαρτημάτων Legris

Περιγραφή	Πλήρης Κωδικός	D2	D1	Κωδικός	Σειρά
Unequal tube / tube connector	14 12 3106	14	12	3106	1c
Unequal tube / tube connector	12 10 3106	12	10	3106	2c
Unequal tube / tube connector	10 06 3106	10	6	3106	3c
Unequal tube / tube connector	04 06 3106	6	4	3106	4c
Unequal tube / tube connector	04 06 3106	6	4	3106	5c
Equal tee	06 06 3104	6	6	3104	6b
Double “Y” piece – equal & unequal	04 06 3144	4	6	3144	7e
Single “Y” piece – equal & unequal	04 04 3140	4	4	3140	8d
Unequal tube / tube connector	03 04 3106	3	4	3106	9c
Unequal tube / tube connector	03 04 3106	3	4	3106	10c
Unequal tube / tube connector	03 04 3106	3	4	3106	11c

### Κατάλογος Σωληνώσεων Legris

L (m)	W(kg)	R (mm)	Input diameter (mm)	Part Nb	Χρώμα	Output diameter (mm)
5	0.138	8	1.8	1025U03 0418	blue	3
5	0.235	10	2.5	1025U04 04	blue	4
5	0.595	15	4	1025U06 04	blue	6
5	1.56	25	7	1025U10 04	blue	10
5	1.6	35	8	1025U12 04	blue	12
5	22.16	45	9.5	1025U14 0495	blue	14

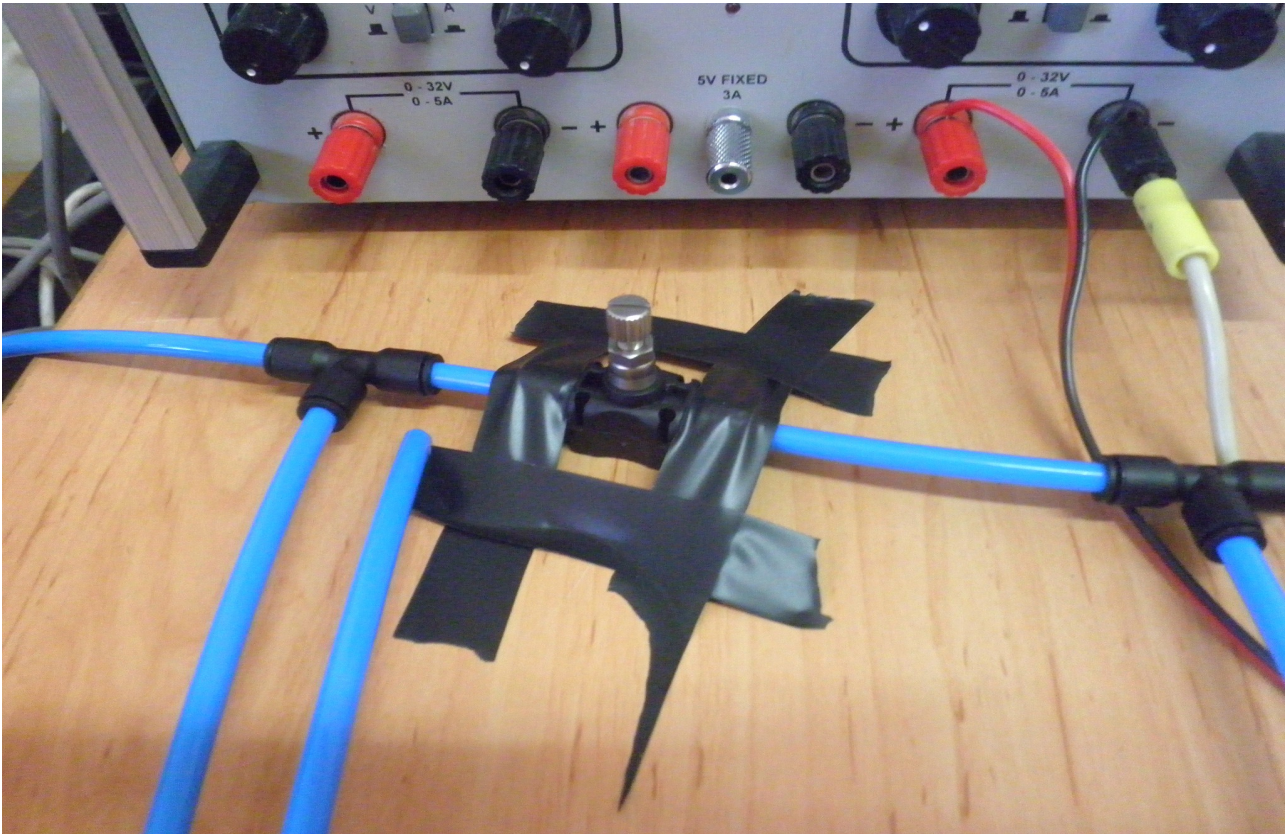
Μετά από τον κατάλογο των σωληνώσεων που καταγράψαμε, παραθέτουμε τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται η πειραματική διάταξη του διανομέα ροής αερίου:

- (I) 1 φιάλη παροχής του αερίου αργού (*ARGON 100%*) με μια μόνο αναλογία 100%
- (ii) 1 χειροκίνητος ρυθμιστής ροής (*Gas Flow Controller*)
- (iii) 2 μανόμετρα υψηλής ακρίβειας (*manometers*)
- (iv) 4 βαθμονομημένους αισθητήρες OMRON (*OMRON flow meters*)
- (v) 1 βολτόμετρο
- (vi) 1 αμπερόμετρο
- (vii) 1 γεννήτρια υψηλής τάσης MKS (*High Voltage Power Supply*)
- (ix) 5m σωληνώσεων Legris χρώματος μπλε διαφόρων διαμέτρων (4,6,10,12 mm)
- (x) 1 πλακίδιο Balun ( *Balanche – unbalanche φίλτρο*)
- (xi) 4 tee – connectors ( 4 – 6 mm)
- (xii) 1 control Valve LEGRIS 7770
- (xiii) 1 double “Y” – tube connector
- (xiv) 2 tube connectors ( 3 – 4 mm)
- (xv) 2 single “Y” – tube connectors

Στη συνέχεια, παραθέτουμε δυο φωτογραφίες από το προσωπικό αρχείο του συγγραφέα που μας δείχνουν ολοκληρωμένα την πειραματική διάταξη του διανομέα ροής αερίου που χρησιμοποιήσαμε στο εργαστήριο.



**Εικόνα 46:** Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε την πειραματική διάταξη του διανομέα ροής αερίου. Παρατηρούμε όλα τα όργανα και εξαρτήματα από τα οποία αποτελείται η πειραματική διάταξη του εργαστηρίου κοσμικών ακτίνων του τομέα Φυσικής του Ε.Μ.Π. Τη φωτογραφία την έβγαλε ο συνάδελφος Αντώνης Γιαννόπουλος.



**Εικόνα 47:** Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε τη βαλβίδα ελέγχου ροής (control valve) του αερίου αργού. Η βαλβίδα αυτή είναι κολλημένη στο τραπέζι του εργαστηρίου γιατί θέλουμε να βρίσκεται σε θέση όσο το δυνατόν περισσότερο σταθερή για τις πειραματικές μας μετρήσεις.



**Εικόνα 48:** Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε τη φιάλη παροχής του αερίου ARGON καθώς και τον χειροκίνητο ρυθμιστή ροής (Gas Flow Controller). -119-

## 6.1.4 Αισθητήρας OMRON (mass flow meter)

Σε αυτή την παράγραφο θα παρουσιάσουμε τον αισθητήρα που χρησιμοποιήσαμε στη εργαστηριακή διάταξη στο εργαστήριο κοσμικών ακτίνων του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου (Ε.Μ.Π.). Συνολικά στο εργαστήριο έχουν χρησιμοποιηθεί έξι αισθητήρες.

### 6.1.4.1 Βαθμονόμηση της διάταξης (OMRON calibration curve)

Δύο από τους σημαντικότερους παράγοντες που υπάρχουν για να μελετήσουμε τη λειτουργία των αισθητήρων στο εργαστήριο είναι: a) παροχή του αερίου (Flow rate) & b) εξωτερική τάση (Output Voltage). Για να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο εργαστήριο θα πρέπει να υπάρχει μια χαρακτηριστική αντιστοιχία. Όπως γνωρίζουμε χρησιμοποιούμε στο εργαστήριο το αέριο αργό (*Argon*). Επομένως η χαρακτηριστική αντιστοιχία της παροχής του αερίου Argon με την εξωτερική τάση δίνεται στον παρακάτω πίνακα.

#### 1. Characteristic of Ar gas (Πίνακας I)

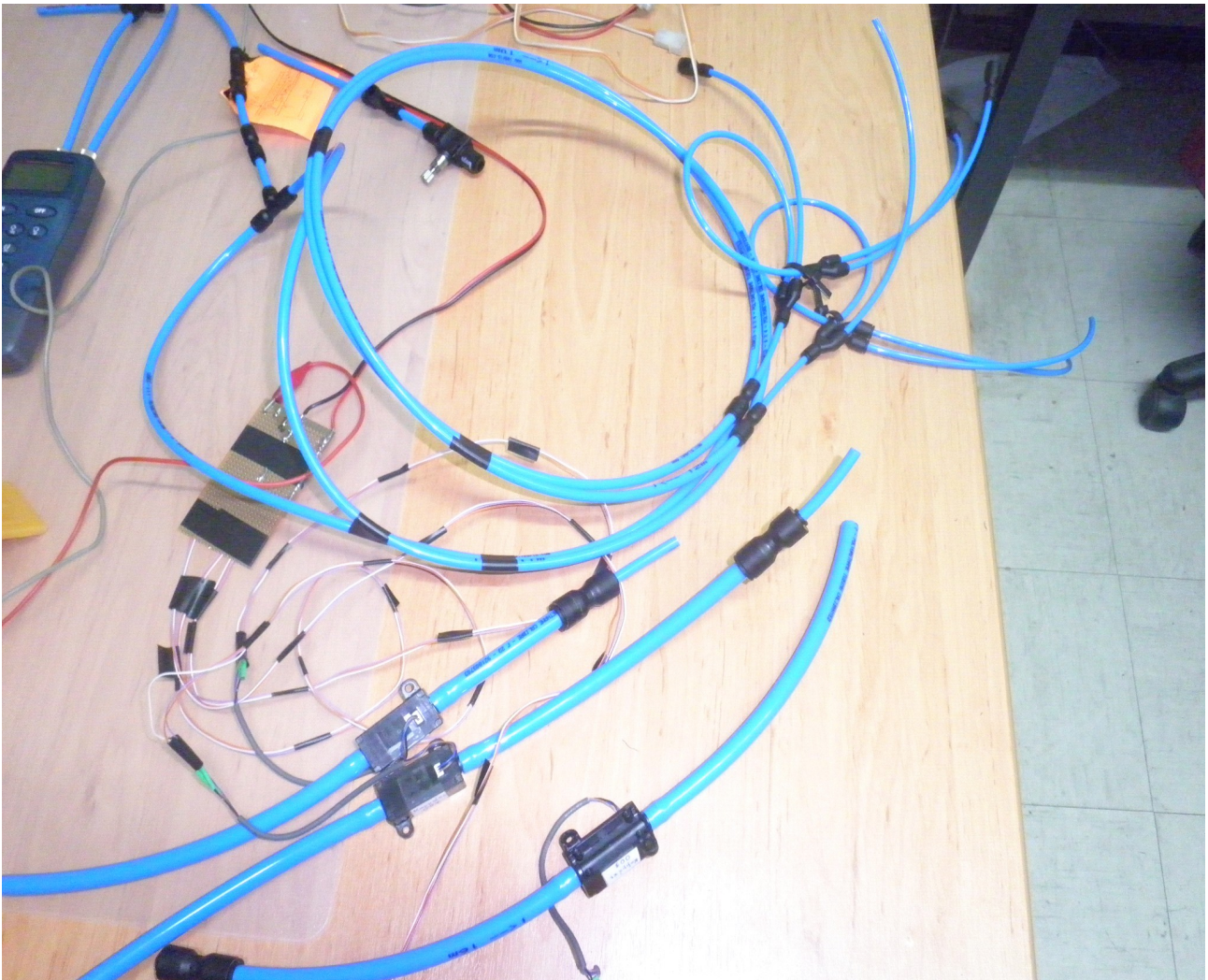
Output Voltage [V]						
Flow rate [L/min]	0	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0
No.001	1.042	2.689	3.618	4.232	4.646	4.939
No.002	1.014	2.579	3.485	4.115	4.574	4.925
No.003	0.970	2.560	3.472	4.090	4.526	4.855
No.004	1.055	2.599	3.519	4.160	4.627	4.987
AVG	1.009	2.609	3.525	4.146	4.582	4.906

Ένα άλλο αέριο με παρόμοια viscosity με το αέριο αργό είναι το αέριο Air (αέρας). Η χαρακτηριστική αντιστοιχία της παροχής του αερίου Air με την εξωτερική τάση δίνεται στον παρακάτω πίνακα.

#### 2. Characteristic of Air gas (Πίνακας II)

Output Voltage [V]						
Flow rate [L/min]	0	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0
Standard	1.000	2.59	3.53	4.18	4.65	5.000
No.001	1.002	2.643	3.614	4.255	4.691	5.003
No.002	0.997	2.566	3.514	4.166	4.638	4.999
No.003	1.002	2.599	3.562	4.212	4.668	5.011
No.004	0.999	2.577	3.520	4.169	4.641	5.005
AVG	1.000	2.603	3.563	4.211	4.666	5.004





**Εικόνα 49:** Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε τους τρεις από τους τέσσερις βαθμονομημένους αισθητήρες OMRON (OMRON mass flow meters) στον διανομέα ροής αερίου.

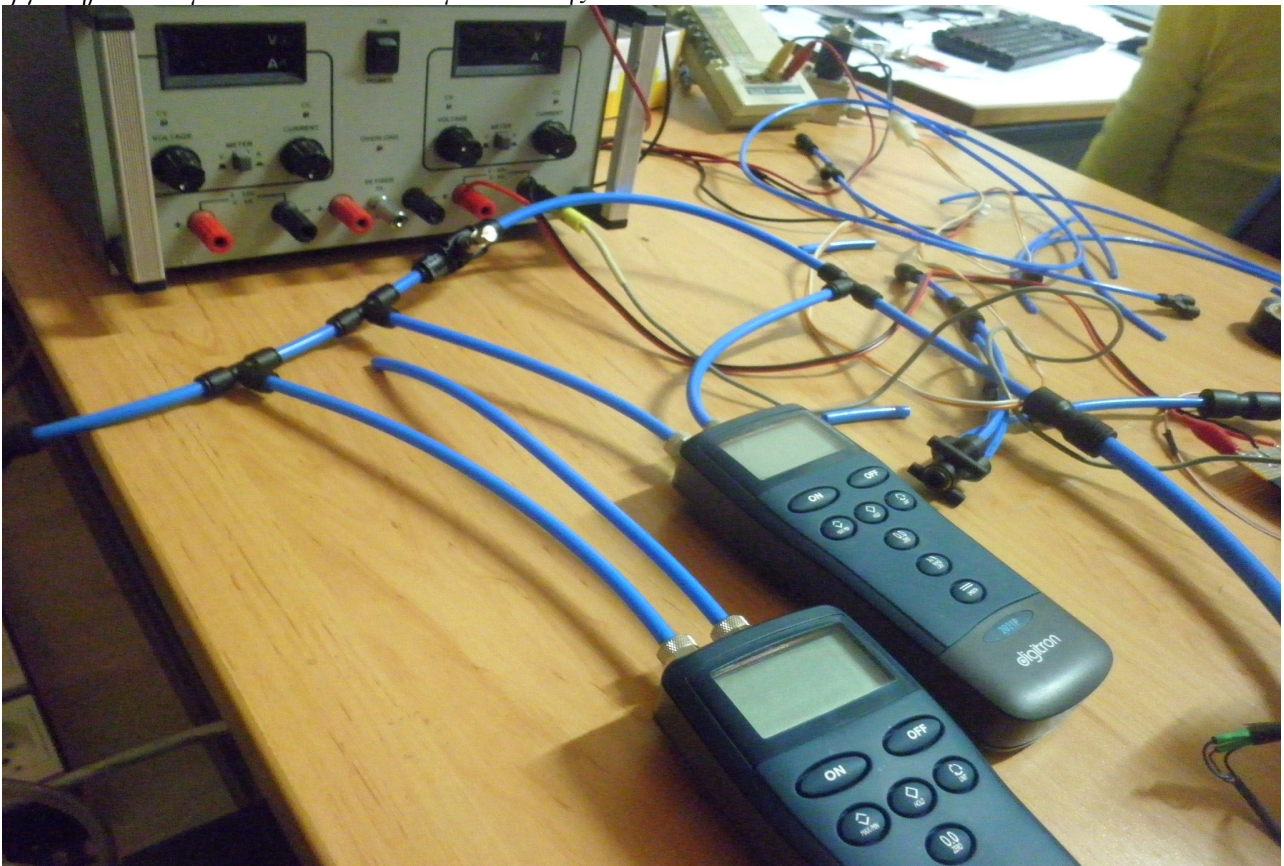
### 6.1.5 Μανόμετρα

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παραθέσουμε τα μανόμετρα που χρησιμοποιήσαμε κατά την εκτέλεση του πειράματος στο εργαστήριο κοσμικών ακτίνων του τομέα Φυσικής του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου (Ε.Μ.Π). Τα όργανα αυτά τα έχουμε βάλει σε συγκεκριμένες θέσεις που έχουμε καθορίσει εκ των προτέρων και τα χρησιμοποιούμε για να μετρήσουμε την εσωτερική πίεση στον εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου.

Όπως γνωρίζουμε και από τη θεωρία, οι βασικές μεταβλητές που είναι χρήσιμες για τη μελέτη της κυκλοφορίας του αερίου στον εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου είναι η ταχύτητα (*velocity*) ροής του αερίου, η εσωτερική πίεση (*pressure*) της ροής του αερίου και η χαρακτηριστική αντίσταση  $Z$  (*impedance*) της ροής του αερίου. Χρησιμοποιώντας τα μανόμετρα, έχουμε γνώση της τιμής της εσωτερικής πίεσης στον εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου και της τιμής της ατμοσφαιρικής πίεσης σε συγκεκριμένα σημεία. Έτσι έχουμε γνώση της κατανομής τιμών της εσωτερικής πίεσης και της χαρακτηριστικής αντίστασης  $Z$  και με πολύ καλή ακρίβεια εξαιτίας του γεγονότος ότι τα όργανα αυτά έχουν πολύ καλή ακρίβεια. Έτσι παίρνουμε τις παρακάτω εικόνες.



*Εικόνα 50: Στην παραπάνω εικόνα στα αριστερά παρατηρούμε τα δύο μανόμετρα υψηλής ακρίβειας του εργαστηρίου κοσμικών ακτίνων του τομέα Φυσικής του Ε.Μ.Π.*



*Εικόνα 51: Στην παραπάνω εικόνα, βλέπουμε από κοντινή απόσταση τα 2 μανόμετρα υψηλής ακρίβειας του εργαστηρίου κοσμικών μιονίων.*

### 6.1.6 Βαθμονόμηση της πειραματικής διάταξης του manifold

Κατά τη διάρκεια αυτής της διπλωματικής εργασίας μελετήθηκε ένας διανομέας ροής αερίου (*manifold*) στο εργαστήριο κοσμικών ακτίνων του τομέα Φυσικής του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου (Ε.Μ.Π). Ο σκοπός της εργασίας μας αυτής είναι η μελέτη της κυκλοφορίας του αερίου μέσα στην πειραματική μας διάταξη, η οποία σκοπό έχει να συνδεθεί με τον ανιχνευτή Micromegas στην πειραματική διάταξη του CERN. Πριν αρχίσουμε την περιγραφή της πειραματικής διάταξης, θα πρέπει να τονίσουμε ότι χρησιμοποιήσαμε το αέριο Αργό (Argon 100%) γιατί πληρεί τις προδιαγραφές που θέλουμε (τιμή *viscosity*, τιμή *ιξώδους* κ.τ.λ.π) και από άποψη κόστους είναι σχετικά φθηνό αέριο.

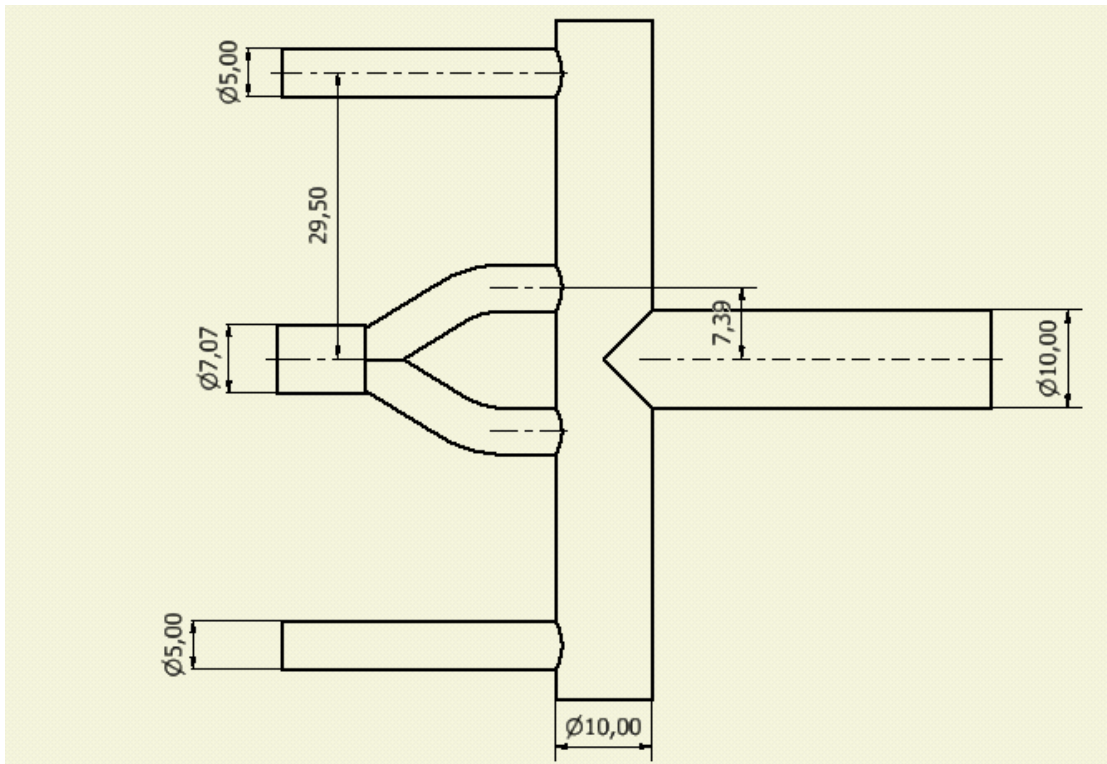
Στην παρακάτω εικόνα, παραθέτουμε την πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στο εργαστήριο για την μελέτη της παροχής του αερίου Argon 100% στον διανομέα ροής αερίου.



**Εικόνα 52:** Στην παραπάνω εικόνα, παρατηρούμε την συνδεσμολογία της πειραματικής διάταξης του διανομέα ροής αερίου και παρατηρούμε όλα τα εξαρτήματά του ( 2 μανόμετρα, αμπερόμετρο στα αριστερά κ.τ.λ.π). Η φωτογραφία ανήκει στο προσωπικό αρχείο του συγγραφέα (Γιάννη Κολυβοδιάκου).

Για να φέρουμε εις πέρας την εργαστηριακή μας άσκηση, απαιτείται να ακολουθήσουμε μια συγκεκριμένη διαδικασία για την καλή και σωστή χρήση των μονάδων που χρησιμοποιούνται σε αυτή. Τα βήματα της πειραματικής διαδικασίας είναι τα εξής:

1. Κάνουμε την παραπάνω συνδεσμολογία (εικόνα 8).
2. Ανοίγουμε την παροχή του αερίου (περιμένουμε  $\sim 10 - 15 \text{ min}$ )
3. Ανοίγουμε τη βαλβίδα της μπουκάλας, με πίεση στα 2bar (εικόνα 7).
4. Ανοίγουμε τη βαλβίδα 2η βαλβίδα στο NIM (εικόνα 7).
5. Ανοίγουμε το NIM και βάζουμε τασεις με τη βοήθεια της τροφοδοσίας υψηλής τάσης MKS, βάζοντας για τιμή της τάσης στα  $V = 12.3V$  & βάζουμε τη τιμή της έντασης του ρεύματος  $I = 0.99 \text{ A}$  στο αμπερόμετρο.
6. Παίρνουμε τον διανομέα ροής αερίου και με την αίσθηση της αφής αντιλαμβανόμαστε ότι η ροή στον 1ο σωλήνα είναι διπλάσια σε σχέση με τη ροή στις άλλες 2 σωληνώσεις.
7. Για το κλείσιμο της διάταξης μας ακολουθούμε την αντίστροφη διαδικασία.



Σχήμα 53α: Ο 3 - D διανομέας ροής αερίου (manifold)

Στην συνέχεια, η εκτέλεση της βαθμονόμησης του 1ου αισθητήρα συνίσταται στην τοποθέτηση χειροκίνητα διαφόρων τιμών της τάσης  $V$  και αναμένουμε να βρούμε τις τιμές των ροών στα ροόμετρα. Έτσι παίρνουμε τον ακόλουθο πίνακα:

Όλα αυτά τα εξαρτήματα που βρίσκονται πάνω τοποθετήθηκαν στην πειραματική διάταξη. Ύστερα από την ολοκλήρωση της κατασκευής της πειραματικής διάταξης, στην συνέχεια ακολούθησαν οι πειραματικές μετρήσεις. Το σύνολο των πειραματικών μετρήσεων παρουσιάζεται παρακάτω:

Αρχικά, ορίζουμε την βαθμονόμηση του 1ου αισθητήρα (Omron mass flow meters) της πειραματικής διάταξης, όταν το αέριο που διατρέχει το εσωτερικό του διανομέα ροής αερίου είναι το αργό. Έτσι βγάζουμε τον παρακάτω πίνακα (Calibration curve) κατά την πειραματική διαδικασία μαζί με την αντίστοιχη γραφική παράσταση ροής Q (L /hr) και τάσης V(Volt).

**ΠΙΝΑΚΑΣ 6.1.1**

<b>CALIBRATION OMRON MASS FLOW METER ARGON 100%</b>		
Τάση V(V)	POH ( L / hr)	POH ( L / min )
1.009	0	0
2.609	24	0.4
3.525	48	0.8
4.146	72	1.2
4.582	96	1.6
4.906	120	2.0

Παρατηρώντας τη παραπάνω γραφική παράσταση παρατηρούμε ότι υπάρχει γραμμικότητα στη σχέση μεταξύ τάσης V(Volt) και παροχής Q (L/hr) πειραματικά. Από την εταιρεία που μας προμήθευσε τους αισθητήρες, υπάρχουν θεωρητικές τιμές της τάσης V(Volt) για τις δεδομένες τιμές της παροχής Q(L/hr). Όλα αυτά τα παρατηρούμε στο παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 6.1.2**

<b>CALIBRATION OMRON MASS FLOW METER ARGON 100%</b>				
POH Q (L/min)	POH Q (L/hr)	Experimental ΤΑΣΗ V(Volt)	Theoretical ΤΑΣΗ V(Volt)	Συστηματικό Σφάλμα (%)
0	0	1.009	1.042	3 %
0.4	24	2.609	2.689	3%
0.8	48	3.525	3.618	3%
1.2	72	4.146	4.232	3%
1.6	96	4.582	4.646	1%
2.0	120	4.906	4.939	1%

Από την παρατήρηση του παραπάνω πίνακα (ΠΙΝΑΚΑΣ II) και κάνοντας τους υπολογισμούς, βλέπουμε ότι υπάρχει μια μέση απόκλιση της τάξης του 3% μεταξύ της θεωρητικής και της πειραματικής τιμής της τάσης V(Volt). Η απόκλιση αυτή μπορεί να οφείλεται σε συστηματικά σφάλματα της πειραματικής μας διάταξης.

Με βάση τη βαθμονόμηση του 1ου αισθητήρα, κάνουμε και την βαθμονόμηση των υπόλοιπων τριών αισθητήρων OMRON MASS FLOW METERS.

## 6.2 Πειραματικές μετρήσεις του διανομέα ροής αερίου ARGON

Στη συνέχεια, ακολουθεί ο πίνακας τιμών διαφορά πίεσης ( $\Delta P$ ) – παροχής ( $Q$ ) μαζί με το αντίστοιχο διάγραμμά του, όταν στην πειραματική διάταξη χρησιμοποιούμε την βαλβίδα ροής αερίου (control valve). Δεν πρέπει να ξεχάσουμε ότι οι μετρήσεις γίνονται στην πειραματική διάταξη του διανομέα ροής αερίου όταν το αέριο είναι το αργό.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 6.2.1**

<b>CALIBRATION CURVE OF CONTROL VALVE LEGRIS 7770 (D = 0.700)</b>				
<b>Selected FLOW Q (L/hr)</b>	<b>OMRON V_out ΤΑΣΗ V (Volt)</b>	<b>ZLM – 700 – 9790 – 25 – Q10 Experimental Pressure Drop (mbar)</b>	<b>Theoretical Pressure Drop <math>\Delta P</math> (mbar)</b>	<b>Σφάλμα πειραματικής – θεωρητικής τιμής της πίεσης (%)</b>
0	0.990	0.00	0.00	0%
1	1.082	0.08	0.11	27%
2	1.171	0.14	0.23	39%
3	1.257	0.23	0.36	36%
4	1.341	0.36	0.51	29%
5	1.422	0.49	0.67	27%
6	1.502	0.65	0.84	23%
7	1.578	0.81	1.03	21%
8	1.653	0.99	1.22	19%
9	1.726	1.19	1.43	15%
10	1.796	1.40	1.65	15%
11	1.865	1.62	1.89	14%
12	1.932	1.88	2.13	12%
13	1.997	2.13	2.39	11%
14	2.060	2.46	2.66	8%
15	2.121	2.73	2.95	8%
16	2.181	3.00	3.24	7%
17	2.240	3.36	3.55	11%
18	2.296	3.64	3.87	6%
19	2.352	4.01	4.21	5%
20	2.406	4.31	4.55	5%
21	2.458	4.66	4.91	<b>5%</b>
22	2.510	5.03	5.28	5%
23	2.560	5.38	5.66	5%
24	2.609	5.77	6.06	5%
25	2.657	6.18	6.47	5%
26	2.704	6.46	6.89	6%
27	2.749	6.95	7.32	5%
28	2.794	7.25	7.77	7%
29	2.838	7.81	8.23	5%
30	2.880	8.22	8.70	6%
31	2.922	8.65	9.18	6%
32	2.963	9.12	9.68	6%
33	3.003	9.60	10.18	6%
34	3.043	9.99	10.70	7%
35	3.081	10.51	11.24	7%

36	3.119	11.03	11.78	6%
37	3.156	11.55	12.34	6%
38	3.193	12.07	12.91	7%
39	3.229	12.65	13.49	6%
40	3.264	13.09	14.09	7%

Παρατηρώντας τις παραπάνω γραφικές παράστασεις, παρατηρούμε ότι υπάρχει γραμμικότητα στη σχέση μεταξύ Διαφορά Πίεσης  $\Delta P$ (mbar) και ροής  $Q$ (L/hr) τόσο πειραματικά όσο και θεωρητικά. Από την εταιρεία που μας προμήθευσε τους αισθητήρες, υπάρχουν θεωρητικές τιμές της τάσης  $V$  για δεδομένες τιμές της ροής  $Q$ .

Από την παρατήρηση του παραπάνω πίνακα (ΠΙΝΑΚΑΣ III) και κάνοντας τους υπολογισμούς, βλέπουμε ότι υπάρχει μια μέση απόκλιση της τάξης του 6% μεταξύ της θεωρητικής και της πειραματικής τιμής της διαφοράς πίεσης  $\Delta P$  (mbar). Η απόκλιση αυτή μπορεί να οφείλεται σε συστηματικά σφάλματα της πειραματικής μας διάταξης.

### 6.3 Ανάλυση των πειραματικών μετρήσεων

Σκοπός της ανάλυσης των πειραματικών μετρήσεων που πάρθηκαν κατά την εκτέλεση της πειραματικής διαδικασίας είναι η απόδειξη μέσω του πειράματος ότι η ροή στον 2ο σωλήνα του *διανομέα ροής αερίου* είναι διπλάσια σε σχέση με την αντίστοιχη ροή στις άλλες δύο σωληνώσεις (*1ο tube + 3ο tube*) του *διανομέα ροής αερίου*. Για του λόγου του αληθές, παραθέτουμε τις πειραματικές μετρήσεις που πήραμε στο εργαστήριο που επαληθεύουν τον ισχυρισμό μας.

#### ΠΙΝΑΚΑΣ 6.3.1

TEST 20 CM DISTANCE BETWEEN Y TUBE CONNECTORS							
FLOW METER NUMBER	3(double)		4		2		Sum
TEST NUMBER	V(Volt)	Q (L / hr)	V(Volt)	Q (L / hr)	V(Volt)	Q (L / hr)	Q (L / hr)
1	1.96	12.01	1.61	6.99	1.64	7.38	26.28
2	1.65	7.51	1.39	4.25	1.41	4.48	16.25
3	1.13	1.31	1.06	0.56	1.06	0.55	2.42
4	1.60	6.85	1.37	4.02	1.38	4.13	14.99

#### ΠΙΝΑΚΑΣ 6.3.2

TEST 20 CM DISTANCE BETWEEN Y TUBE CONNECTORS		
FL3 / FL3	FL4 / FL3	FL2 / FL3
3	4	2
1.000	0.582	0.614
1.000	0.566	0.597
1.000	0.428	0.420
1.000	0.587	0.602

**ΠΙΝΑΚΑΣ 6.3.3**

TEST 25 CM DISTANCE BETWEEN Y TUBE CONNECTORS							
FLOW METER NUMBER	3 (double)		4		2		Sum
TEST NUMBER	V(Volt)	Q (L / hr)	V(Volt)	Q(L / hr)	V(Volt)	Q(L / hr)	Q(L / hr)
1	1.61	6.98	1.35	3.78	1.36	3.89	14.66
2	1.96	12.01	1.57	6.47	1.60	6.85	25.33

25 CM DISTANCE BETWEEN Y – TUBE CONNECTORS		
FL3 / FL3	FL4 / FL3	FL2 / FL3
3	4	2
1.000	0.542	0.558
1.000	0.539	0.570

30 CM DISTANCE BETWEEN Y – TUBE CONNECTORS							
FLOW METER NUMBER	3 (double)		4		2		Sum
TEST NUMBER	V(Volt)	Q (L / hr)	V(Volt)	Q(L / hr)	V(Volt)	Q (L / hr)	Q(L / hr)
1	1.59	6.72	1.31	3.32	1.32	3.43	13.47
2	1.96	12.01	1.54	6.09	1.56	6.33	24.43

30 CM DISTANCE BETWEEN Y – TUBE CONNECTORS		
FL3 / FL3	FL4 / FL3	FL2 / FL3
3	4	2
1.000	0.495	0.510
1.000	0.507	0.527

60 CM DISTANCE BETWEEN Y TUBE CONNECTORS							
FLOW METER NUMBER	3 (double)		4		2		Sum
TEST NUMBER	V(Volt)	Q (L / hr)	V(Volt)	Q (L / hr)	V(Volt)	Q (L / hr)	Q (L / hr)
1	1.61	6.91	1.24	2.50	1.24	2.54	11.96
2	1.97	12.22	1.42	4.66	1.44	4.87	21.74

60 CM DISTANCE BETWEEN Y – TUBE CONNECTORS		
FL3 / FL3	FL4 / FL3	FL2 / FL3
3	4	5
1.000	0.361	0.368
1.000	0.381	0.398



Το παρακάτω test του διανομέα ροής αερίου πραγματοποιήθηκε στις 25/11/2014 σε συνεργασία με τον συνάδελφο **Αντώνη Γιαννόπουλο**.

### **ΠΙΝΑΚΑΣ 6.3.9**

30 CM DISTANCE BETWEEN Y TUBE CONNECTORS							
FLOW METER NUMBER	3 (double)		4		2		Sum
TEST NUMBER	V(Volt)	Q (L / hr)	V(Volt)	Q (L / hr)	V(Volt)	Q (L / hr)	Q (L / hr)
1	2.10	14.29	1.63	7.25	1.62	7.11	28.66
2	2.00	12.65	1.39	4.25	1.00	0.10	16.81
3	1.6	6.85	1.34	3.67	1.33	3.54	14.06
4	1.6	6.85	1.31	3.32	1.31	3.31	13.49
5	2.70	25.98	2.31	18.04	2.31	18.03	25.98

### **ΠΙΝΑΚΑΣ 6.3.10**

30 CM DISTANCE BETWEEN Y- TUBE CONNECTORS			
FL3 / FL3	FL4 / FL3	FL2 / FL3	
1.000	0.507	0.497	
1.000	0.336	0.008	Without mass flow meter 2
1.000	0.536	0.517	Correct, flow 13 * flow 13*1.1 =14.1
1.000	0.485	0.484	Correct, flow 13 * flow 13*1.1 = 14.2
1.000	0.694	0.694	

## **6.4 Υπολογισμός της χαρακτηριστικής αντίστασης**

Η επεξεργασία των πειραματικών μετρήσεων περιλαμβάνει τον υπολογισμό της χαρακτηριστικής αντίστασης  $Z$  από την γραφική παράσταση της διαφοράς πίεσης  $\Delta P$  και της ροής  $Q$  του αερίου αργού μέσα στον εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου. Από τον παρακάτω πίνακα ΙΙΙ, βρίσκουμε ένα τυχαίο σημείο και υπολογίζουμε την τιμή της χαρακτηριστικής αντίστασης του. Γνωρίζουμε προηγουμένως ότι η σχέση που μας δίνει την τιμή της χαρακτηριστικής αντίστασης  $Z$  (impedance) του διανομέα ροής αερίου (*manifold*) δίνεται από τον τύπο:

$$Z_{(1 \rightarrow 4)} = \frac{(P_{(1 \rightarrow 4)} - P_a)}{Q_{(1 \rightarrow 4)}} \quad (6.4.1)$$

Επειδή ο διανομέας ροής αερίου έχει τέσσερις εξόδους, αυτό σημαίνει ότι ο διανομέας ροής αερίου για κάθε έξοδο θα παίρνει και μια διαφορετική τιμή της εμπέδησης  $Z$ . Παρατηρώντας την παραπάνω σχέση, αντιλαμβανόμαστε ότι ο διανομέας ροής αερίου θα παίρνει τέσσερις διαφορετικές τιμές για την παροχή  $Q$ , μια για κάθε έξοδο. Έτσι έχουμε τις παρακάτω τιμές της παροχής  $Q$ :

$$Q_1=0.6225 \frac{L}{hr}, Q_2=0.6249 \frac{L}{hr}$$

$$Q_3=0.6216 \frac{L}{hr}, Q_4=0.6188 \frac{L}{hr} \quad (6.4.2)$$

Επίσης, αντιλαμβανόμαστε ότι ο διανομέας ροής αερίου θα παίρνει τέσσερις διαφορετικές τιμές της εσωτερικής πίεσης P της ροής αερίου αργού, μια για κάθε έξοδο. Έτσι έχουμε τις παρακάτω τιμές της εσωτερικής πίεσης ροής του αερίου αργού:

$$P_1=0.061 Pa \rightarrow 0.00061 mbar, P_2=0.062 Pa \rightarrow 0.00062 mbar$$

$$P_3=0.059 Pa \rightarrow 0.00059 mbar, P_4=0.058 Pa \rightarrow 0.00058 mbar \quad (6.4.3)$$

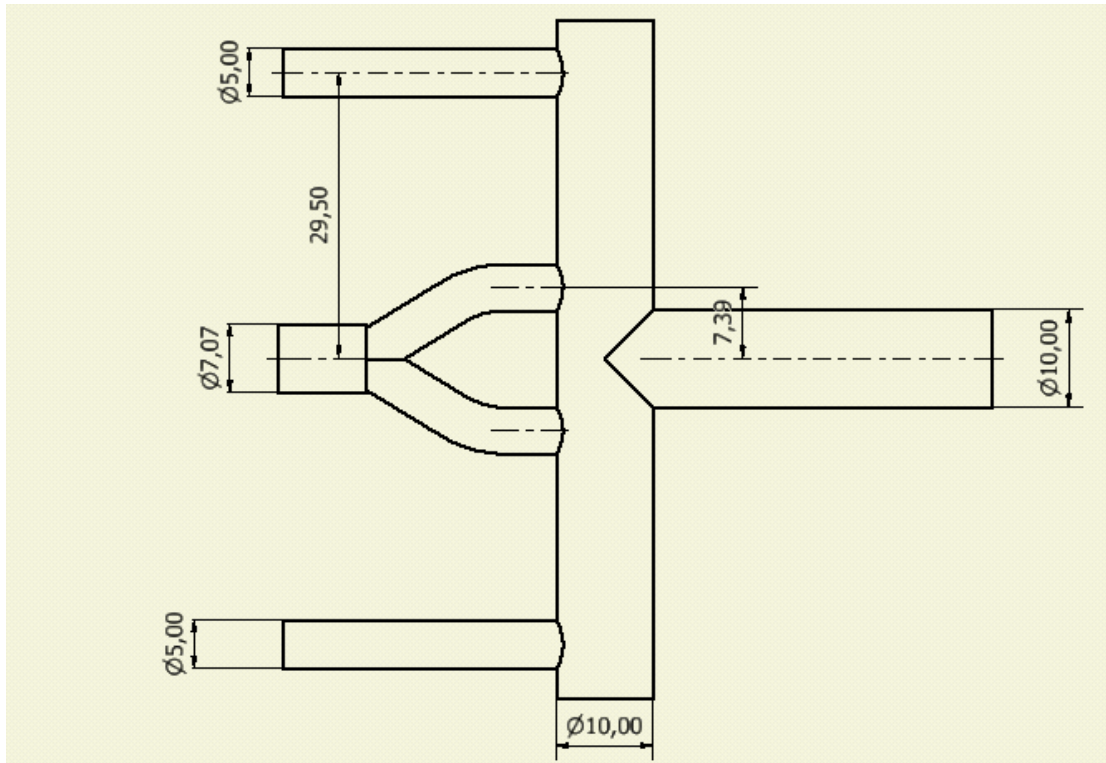
Επίσης, επιλέγουμε ένα συγκεκριμένο σημείο στην αρχή του διανομέα ροής αερίου, το οποίο παίρνει μια συγκεκριμένη τιμή της εσωτερικής πίεσης ροής του αερίου αργού Pa:

$$P_a=0.245 Pa=0.00245 mbar \quad (6.4.4)$$

Τέλος, παίρνοντας τις παραπάνω σχέσεις και κάνοντας τους υπολογισμούς, έχουμε τις τέσσερις διαφορετικές τιμές της εμπέδησης Z:

### **ΠΙΝΑΚΑΣ 6.4.11**

<b>ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΜΠΕΔΗΣΗΣ Z (IMPEDANCES) ΤΩΝ ΔΙΑΚΛΑΔΩΣΕΩΝ ΤΟΥ MANIFOLD</b>	
1η διακλάδωση:	$Z_1 = (P_1 - P_a) / Q_1 = (0.185 Pa) / 0.6225 L/hr = 0.00297 hr mbar / L$
2η διακλάδωση:	$Z_2 = (P_2 - P_a) / Q_2 = (0.185 Pa) / 0.6249 L/hr = 0.00296 hr mbar / L$
3η διακλάδωση:	$Z_3 = (P_3 - P_a) / Q_3 = (0.185 Pa) / 0.6216 L/hr = 0.00298 hr mbar / L$
4η διακλάδωση:	$Z_4 = (P_4 - P_a) / Q_4 = (0.185 Pa) / 0.6188 L/hr = 0.00299 hr mbar / L$



**Εικόνα 53b:** Στην παραπάνω εικόνα, βλέπουμε την μετατροπή των τεσσάρων διασταρώσεων του διανομέα ροής αερίου σε τρεις σωλήνες εξόδου. Αυτό συμβαίνει για να εφαρμοστεί ο διανομέας ροής αερίου σωστά στα τρία βύσματα του ανιχνευτή Micromegas.

Όπως γνωρίζουμε ο ανιχνευτής Micromegas έχει τρία βύσματα, τα οποία του παρέχουν το απαραίτητο ποσό αερίου που του είναι απαραίτητο για την σωστή του λειτουργία. Σε αυτό το σημείο έρχεται ο διανομέας ροής αερίου που εξασφαλίζει τη σωστή του λειτουργία. Όπως γνωρίζουμε, ο διανομέας ροής αερίου είναι ένα εξάρτημα που παρέχει στον ανιχνευτή Micromegas το απαραίτητο αέριο για την σωστή λειτουργία του.

Από όλα τις πειραματικές μετρήσεις του διανομέα ροής αερίου αποδεικνύεται η ομοιομορφία της κυκλοφορίας του αερίου (αργού, Ar 93% - CO<sub>2</sub> 7%) όταν αυτό διέρχεται στον εσωτερικό χώρο των τεσσάρων διακλαδώσεων του σωλήνα εξόδου του διανομέα ροής αερίου. Αυτό το φαινόμενο είναι πολύ χρήσιμο γιατί εξασφαλίζει την ισοκατανομή της κυκλοφορίας του υπό μελέτη αερίου (αργού, Ar 93% - CO<sub>2</sub> 7%) στα τρία βύσματα εισόδου του ανιχνευτή Micromegas.

Η παρακάτω σχέση (1η εξίσωση συνέχειας) (6.4.1) αποδεικνύει τον παραπάνω ισχυρισμό:

$$Q_{2a} = Q_{2b} = Q_{2c} = Q_{2d} \quad (6.4.1)$$

Επίσης, αποδεικνύεται η ομοιομορφία της παροχής του αερίου στο εσωτερικό του σωλήνα εισόδου σε σχέση με τον εσωτερικό χώρο του τεσσάρων σωλήνων εξόδου του διανομέα ροής αερίου.

Η παρακάτω σχέση (2η εξίσωση συνέχειας) (6.4.2) αποδεικνύει τον παραπάνω ισχυρισμό:

$$Q_{in} = Q_{out1} + Q_{out2} + Q_{out3} + Q_{out4} \quad (6.4.2)$$

Με αυτό το τρόπο, μέσω του διανομέα ροής αερίου εξασφαλίζεται η σωστή τροφοδοσία του ανιχνευτή Micromegas σε αέριο (αργό, Ar 93% - CO<sub>2</sub> 7%).

## 6.5 Σύγκριση των τιμών της εμπέδησης Z από τις προσομοιώσεις και από τις πειραματικές μετρήσεις του διανομέα ροής αερίου

Σε αυτό το κεφάλαιο, καλούμαστε να συγκρίνουμε τις τιμές της εμπέδησης Z από τις πειραματικές μετρήσεις, με τις αντίστοιχες τιμές της εμπέδησης Z από τις προσομοιώσεις για κάθε περίπτωση ξεχωριστά. Από τις πειραματικές μετρήσεις, η τιμή της εμπέδησης είναι μια, όπου χρησιμοποιήσαμε ως αέριο μόνο το αργό. Από τις προσομοιώσεις, οι συνολικές περιπτώσεις μέτρησης της τιμής της εμπέδησης είναι οι παρακάτω έξι, όσον αναφορά τον τρόπο κυκλοφορίας του αερίου και το είδος του αερίου που μετακινείται εσωτερικά του διανομέα ροής αερίου.

**ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ I.** Ο τρόπος κυκλοφορίας του αερίου αργού (*ARGON 100%*) είναι η στρωτή ροή (laminar flow).

**ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ II.** Ο τρόπος κυκλοφορίας του μείγματος Ar 93% - CO<sub>2</sub> 7% είναι η στρωτή ροή (laminar flow).

**ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ III.** Ο τρόπος κυκλοφορίας του αερίου αργού είναι η τυρβώδης ροή (turbulent flow).

**ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ IV.** Ο τρόπος κυκλοφορίας του μείγματος Ar 93% - CO<sub>2</sub> 7% είναι η τυρβώδης ροή (turbulent flow).

**ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ V.** Ο τρόπος κυκλοφορίας του αερίου αργού είναι η τυρβώδης + στρωτή ροή (turbulent + laminar flow).

**ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ VI.** Ο τρόπος κυκλοφορίας του μείγματος Ar 93% - CO<sub>2</sub> 7% είναι η τυρβώδης + στρωτή ροή (turbulent + laminar flow).

Όταν έχουμε την κατανομή της εσωτερικής πίεσης εσωτερικά του διανομέα ροής αερίου, υπάρχουν δυο τρόπου υπολογισμού της διαφοράς πίεσης ( $\Delta P$ ) και κατ' επέκταση της εμπέδησης.

**1ος τρόπος Average Pressure :** Όταν από την κατανομή της πίεσης, επιλέγουμε τιμές της πίεσης που είναι κοντά στη μέση τιμή της πίεσης. (Ο τρόπος αυτός ανταποκρίνεται καλύτερα στη φύση).

**2ος τρόπος Higher Pressure:** Όταν από την κατανομή της πίεσης, επιλέγουμε τις τιμές της πίεσης που έχουν την μεγαλύτερη τιμή.

Από τις πειραματικές μετρήσεις όταν χρησιμοποιούμε το αέριο αργό και τον τρόπο υπολογισμού Average Pressure, λαμβάνουμε την παρακάτω τιμή της εμπέδησης Z:

$$Z = 0.0029745 \text{ (hr mbar)/L} = 0.29745 \text{ (hr Pa)/L}$$

Με τη βοήθεια του προγράμματος COMSOL MULTIPHYSICS 4.4 πραγματοποιήσαμε μια σειρά από προσομοιώσεις και βρήκαμε τις τιμές της εμπέδησης Z για κάθε μια περίπτωση ξεχωριστά. Όλες αυτές οι τιμές καταγράφονται στον παραπάνω πίνακα:

### ΠΙΝΑΚΑΣ 6.5.1

ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ	ΕΜΠΕΔΗΣΗ (Average Pressure) (hr mbar) / L	Σφάλμα πειραματικής – θεωρητικής τιμής της πίεσης (%)	ΕΜΠΕΔΗΣΗ (Higher Pressure) (hr mbar) / L	Σφάλμα πειραματικής – θεωρητικής τιμής της πίεσης (%)
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Ι	0.0029	2.5%	0.0039	31%
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΙΙ	0.0027	9.2%	0.0037	24.4%
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΙΙΙ	0.0039	31%	0.0049	64.7%
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΙV	0.0033	10.9%	0.0043	44.6%
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ V	0.0034	14.3%	0.0044	47.9%
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ VI	0.0030	0.9%	0.0040	34.5%

Σαν τελικό συμπέρασμα αυτού του κεφαλαίου είναι ότι προτιμούμε τον τρόπο υπολογισμού της εμπέδησης Average Pressure και ακυρώνουμε τον τρόπο υπολογισμού της εμπέδησης Higher Pressure. Αυτό συμβαίνει γιατί ο Higher Pressure μας δίνει μεγάλες τιμές της εμπέδησης που οδηγεί σε μεγάλο σφάλμα. Έτσι συμπεραίνουμε ότι ο τρόπος υπολογισμού Average Pressure μας δίνει τιμές της εμπέδησης που είναι πιο κοντά στη φύση.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο

### ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΝΔΕΧΟΜΕΝΩΝ ΔΙΑΡΡΟΩΝ ΑΕΡΙΟΥ ΣΤΟΝ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ MICROMEGAS

Το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται στη μελέτη μιας διαρροής αερίου του συστήματος του διανομέα ροής αερίου με τον ανιχνευτή Micromegas. Καλούμαστε να μελετήσουμε τις προσομοιωμένες διαρροές με τη βοήθεια του προγράμματος COMSOL MULTIPHYSICS 4.4. Στο τέλος, καλούμαστε να διερευνήσουμε σε πρώτο επίπεδο την επίδραση μιας ενδεχόμενης διαρροής στην αύξηση ή στην ελάττωση της τιμής της ενίσχυσης G του ανιχνευτή Micromegas και σε δεύτερο επίπεδο, να διερευνήσουμε σε περίπτωση αλλαγής της σύστασης του μείγματος, ποια είναι η επίδραση της αλλαγής αυτής στην ενίσχυση του συστήματός μας.

#### 7.1 Μελέτη των προσομοιωμένων διαρροών του διανομέα ροής αερίου

Σε αυτό το κεφάλαιο καλούμαστε να μελετήσουμε τις ιδιότητες του διανομέα στην περίπτωση που υπάρχει κάποια αστοχία σε κάποιο σημείο των σωληνώσεων ή υπάρχει κάποια διαρροή σε κάποιο σημείο των σωληνώσεών του. Επίσης μπορούμε να υπολογίσουμε το ποσοστό της διαφυγής του αερίου από μια οπή διαμέτρου 0.5mm από τον εσωτερικό χώρο του διανομέα. Γνωρίζοντας αυτό το ποσοστό της διαφυγής του υπό μελέτη αερίου (αργού, Ar 93% - CO<sub>2</sub> 7%) μπορούμε να υπολογίσουμε θεωρητικά την επίδραση της διαφυγής του αερίου από μια οπή 0.5mm στην τιμή της ενίσχυσης του ανιχνευτή Micromegas.

Έστω ότι υπάρχει μια οπή διαμέτρου 0.5mm σε κάποιο σημείο στο τέλος του σωλήνα εισόδου του διανομέα ροής αερίου. Η παροχή Q του αερίου στον εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου όταν δεν υπάρχει διαρροή παίρνει την τιμή Q = 26 L / hr. Η οπή των 0.5 mm θα μειώσει την ποσότητα του αερίου (αργού, Ar 93% - CO<sub>2</sub> 7%) στο εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου. Ένα ποσοστό του αερίου θα οδηγηθεί στον εξωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου.

Πραγματοποιώντας την προσομοίωση του διανομέα ροής αερίου με τη βοήθεια του προγράμματος COMSOL MULTIPHYSICS 4.4, παρατηρούμε ότι ισχύει η εξίσωση συνέχειας της παροχής του αερίου στον εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου:

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (7.1.1)$$

όπου Q = είναι η παροχή του αερίου (αργού, Ar 93% – CO<sub>2</sub> 7%) στον εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου όταν δεν υπάρχει διαρροή.

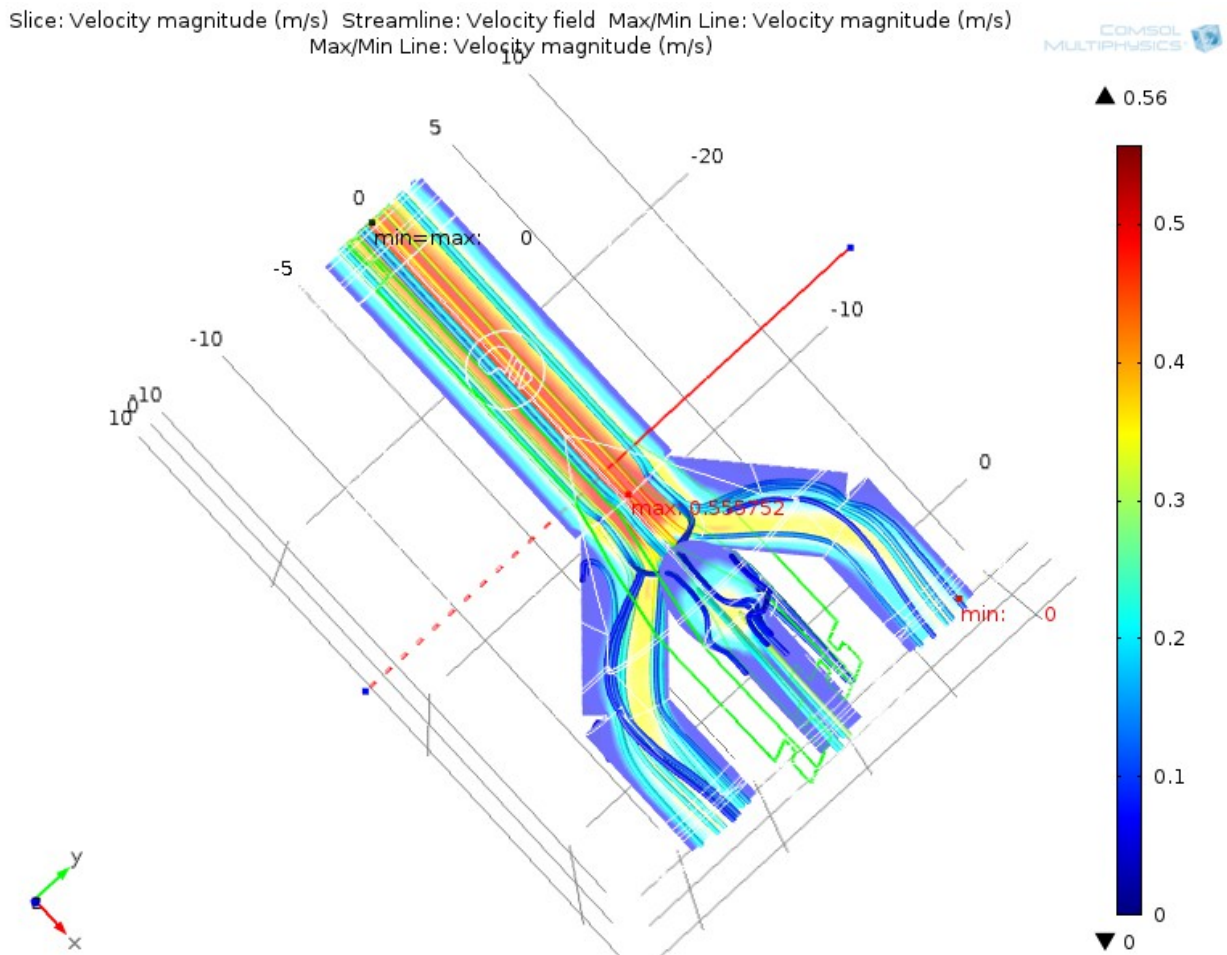
Q<sub>1</sub> = είναι η παροχή του αερίου (αργού, Ar 93% – CO<sub>2</sub> 7%) που βγαίνει από την οπή 0.5 mm στον εξωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου. Πραγματοποιώντας την προσομοίωση με τη βοήθεια του προγράμματος COMSOL MULTIPHYSICS 4.4, η παροχή αυτή παίρνει την παρακάτω τιμή Q<sub>1</sub> = 3 L/hr.

Q<sub>2</sub> = είναι η μειωμένη παροχή του αερίου (αργού, Ar 93% – CO<sub>2</sub> 7%) όταν υπάρχει διαρροή στον εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου. Πραγματοποιώντας την προσομοίωση με τη βοήθεια του προγράμματος COMSOL MULTIPHYSICS 4.4, η παροχή αυτή παίρνει την παρακάτω τιμή Q<sub>2</sub> = 23 L/hr.

Η οπή των 0.5mm θα μειώσει την παροχή του αερίου (αργού, Ar 93% - CO<sub>2</sub> 7%). Πραγματοποιώντας την προσομοίωση, παρατηρούμε ότι η οπή των 0.5mm θα μειώσει την παροχή του αερίου κατά 12%. Αυτό το γεγονός με τη σειρά του θα οδηγήσει στη μείωση της μέσης τιμής της εμπέδησης Z κατά ένα ποσοστό που μεταβάλλεται ανάλογα με το είδος του μείγματος (Αργό 100%, Ar 93% - CO<sub>2</sub> 7%) και τον τρόπο που κυκλοφορεί το μείγμα του αερίου στον εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου (στρωτή ροή, τυρβώδης ροή, στρωτή + τυρβώδης ροή).

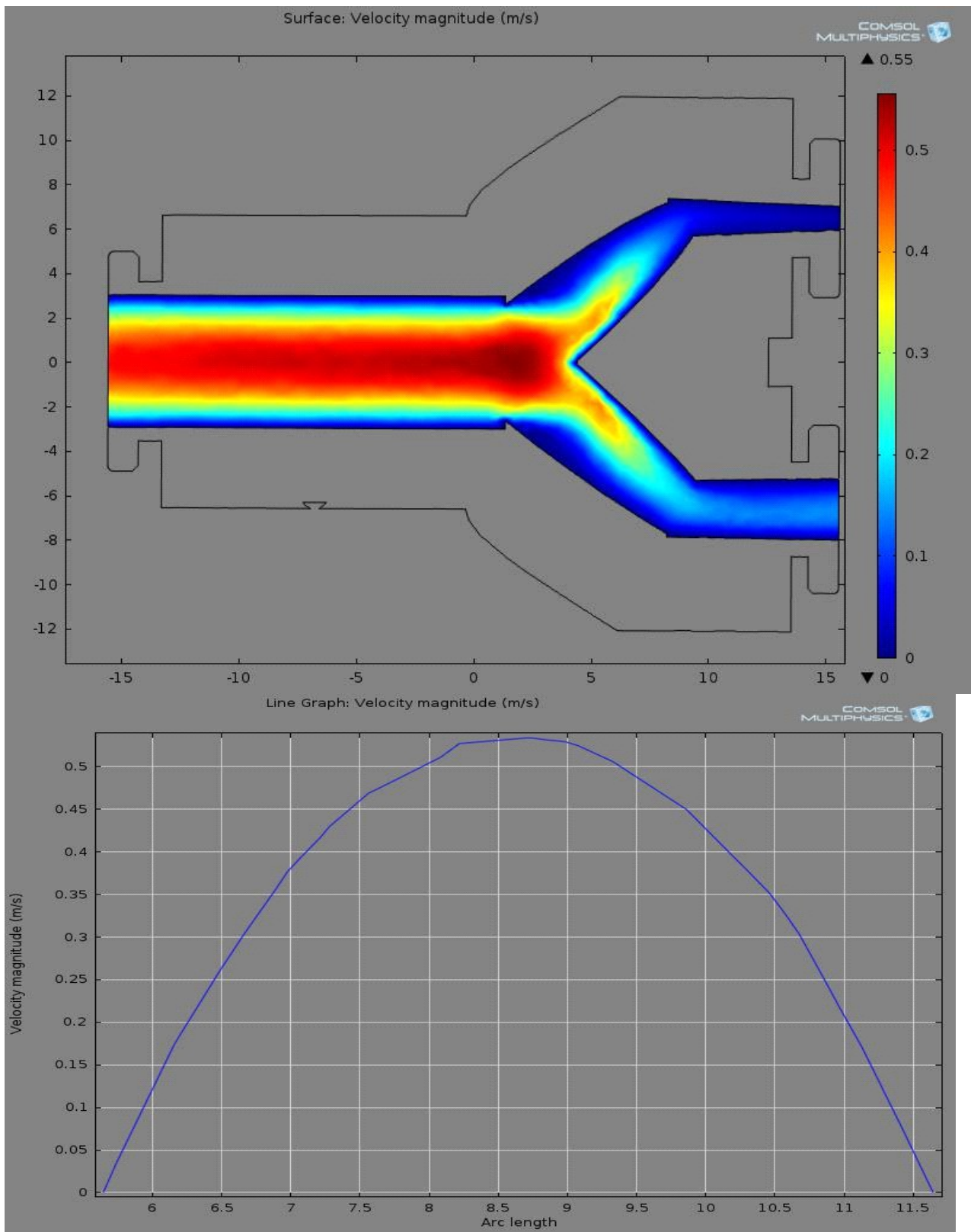
Επίσης, η οπή στο σωλήνα εισόδου δεν πρόκειται να αλλοιώσει την ομοιομορφία της παροχής στις τέσσερις διακλαδώσεις του διανομέα ροής αερίου. Ένα φαινόμενο που παρατηρείται εξίσου και στην περίπτωση που δεν έχουμε διαρροή στον διανομέα ροής αερίου. Απλώς, η ύπαρξη της οπής οδηγεί σε μείωση της τιμής της παροχής του αερίου στον εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου.

Στην παρακάτω εικόνα, παραθέτουμε την κάτοψη κατά τον άξονα - xy της εσωτερικής πίεσης του πεδίου του διανομέα ροής αερίου όταν υπάρχει κάποια διαρροή από μια οπή 0.5mm του μείγματος Ar 93% - CO<sub>2</sub> 7% στον εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου:



**Εικόνα 52:** Η κατανομή του πεδίου της εσωτερικής πίεσης (pressure) όταν υπάρχει κάποια διαρροή αερίου από οπή 0.5mm του μείγματος Ar 93% - CO<sub>2</sub> 7% στον εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου. Παρατηρούμε με το μπλε χρώμα στο τέλος του σωλήνα εισόδου του διανομέα, το διαφυγόν αέριο από την οπή των 0.5mm στην ατμόσφαιρα. Λόγω της ύπαρξης του ατμοσφαιρικού αέρα (70% N<sub>2</sub>, 20% O<sub>2</sub>) στον εξωτερικό χώρο του διανομέα, θα υπάρξει μια εισροή μικρής ποσότητας οξυγόνου, που θα αλλάξει τη σύσταση του μείγματος από Ar 93% - CO<sub>2</sub> 7% σε Ar 92% - CO<sub>2</sub> 7% - O<sub>2</sub> 1%.

Στην παρακάτω εικόνα 53, παραθέτουμε την κάτοψη κατά τον άξονα -yz της ταχύτητας πεδίου του διανομέα ροής αερίου όταν δεν υπάρχει διαρροή στον εσωτερικό της χώρο.

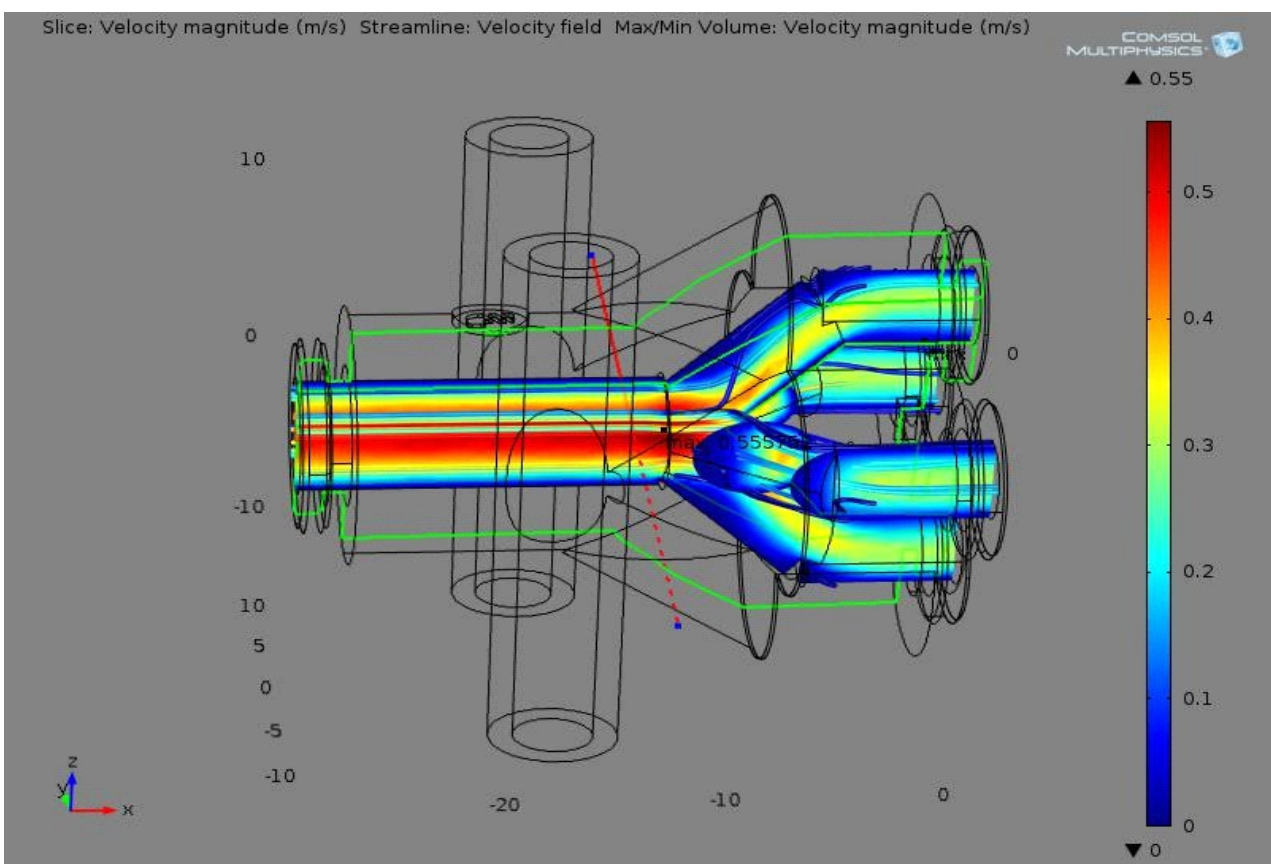


**Εικόνα 53:** Η κατανομή της ταχύτητας πεδίου (velocity magnitude) όταν δεν υπάρχει διαρροή αερίου στο εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου (magnitude). **Διάγραμμα 1:** Η γραφική παράσταση της ταχύτητας του πεδίου (velocity magnitude) συναρτήσει της απόστασης. Παρατηρούμε ότι η μέγιστη τιμή της ταχύτητας πεδίου (0.55 m/s) παρατηρείται στο κέντρο του διανομέα ενώ η ελάχιστη τιμή της ταχύτητας πεδίου (0.02 m/s) παρατηρείται στα ακριανά τοιχώματα.



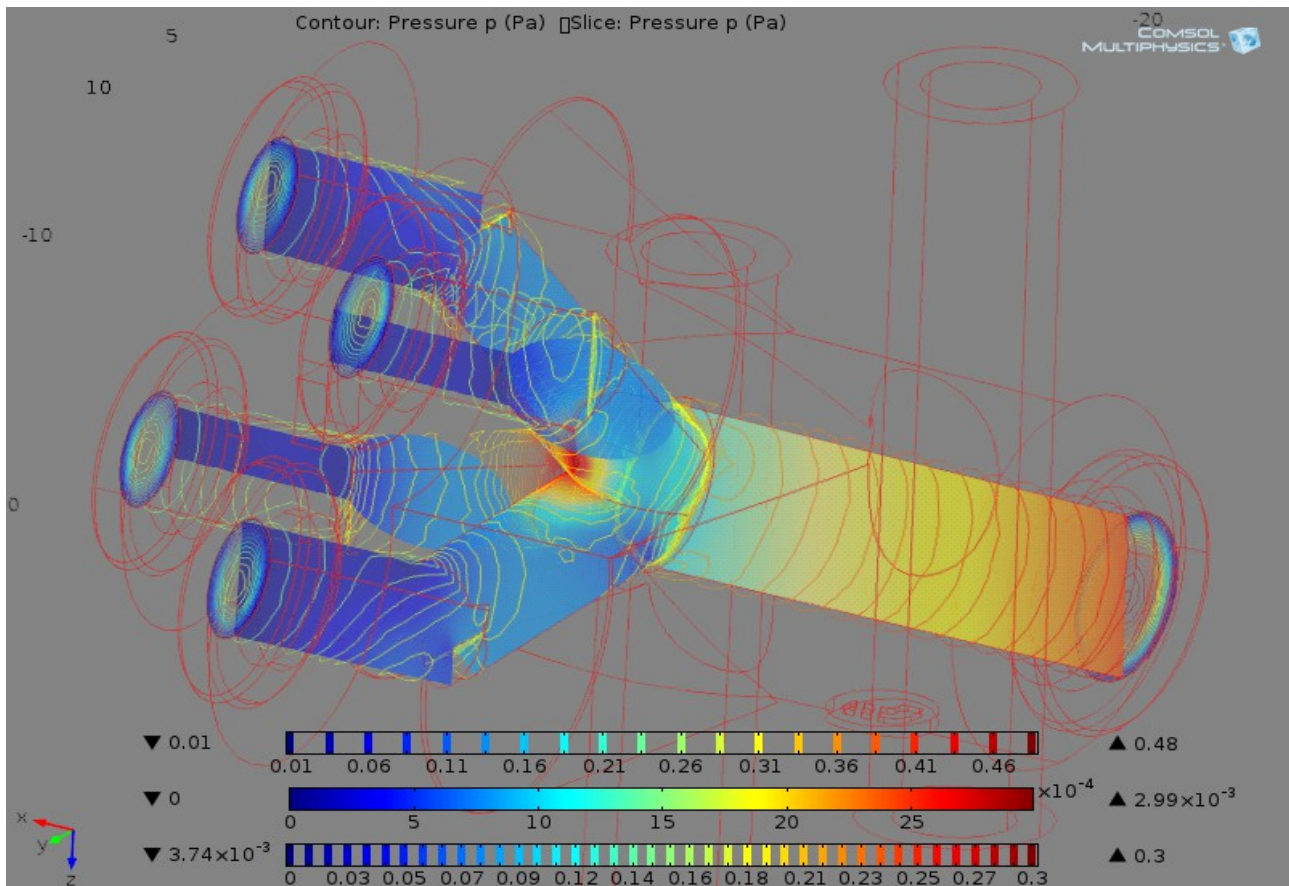
Στην επόμενη εικόνα 54, παρουσιάζονται οι δυναμικές γραμμές (streamlines) της ταχύτητας πεδίου στον εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου. Αυτό που παρατηρούμε, είναι ότι η προσομοίωση επιβεβαιώνει την θεωρητικά αναμενόμενη μορφή. Δηλαδή η μέγιστη τιμή της ταχύτητας πεδίου παρατηρείται στο κέντρο του εξαρτήματος (κόκκινη γραμμή) ενώ η ελάχιστη τιμή της ταχύτητας πεδίου παρατηρείται στα ακριανά τοιχώματα του διανομέα ροής αερίου μας. Επίσης, η πυκνότητα των δυναμικών γραμμών είναι μεγαλύτερη στο κέντρο του διανομέα σε σχέση με τα τοιχώματα του διανομέα που η πυκνότητα είναι ελάχιστη.

Παρατηρούμε με το κόκκινο χρώμα στο τέλος του σωλήνα εισόδου του διανομέα, το διαφυγόν αέριο του μείγματος από την οπή των 0.5mm στην ατμόσφαιρα. Λόγω της ύπαρξης του ατμοσφαιρικού αέρα (70% N<sub>2</sub>, 20% O<sub>2</sub>) στον εξωτερικό χώρο του διανομέα, θα υπάρξει μια εισροή μικρής ποσότητας οξυγόνου, που θα αλλάξει τη σύσταση του μείγματος από Ar 93% - CO<sub>2</sub> 7% σε Ar 92% - CO<sub>2</sub> 7% - O<sub>2</sub> 1%.



**Εικόνα 54:** Οι δυναμικές γραμμές (streamlines) του πεδίου ταχυτήτων (Velocity field) στον εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου όταν υπάρχει διαρροή από οπή 0.5mm του αερίου αργού. Φαίνονται πεντακάθαρα τα σημεία όπου παρατηρούνται η μέγιστη (**0.56 m/s**) και ελάχιστη τιμή (**0.005 m/s**) της ταχύτητας πεδίου.

Στην παρακάτω εικόνα 55, παρουσιάζεται η κατανομή του πεδίου της εσωτερικής πίεσης όταν δεν υπάρχει διαρροή στον εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου. Αυτό που παρατηρούμε είναι ότι η προσομοίωση επιβεβαιώνει την θεωρητικά αναμενόμενη τιμή που περιμένουμε. Ο σωλήνας εισόδου έχει μεγαλύτερη τιμή της πίεσης στα τοιχώματά του σε σχέση με τους τέσσερις σωλήνες εξόδου γιατί ο σωλήνας εισόδου έχει μεγαλύτερη διάμετρο σε σχέση με τους σωλήνες εξόδου. Τέλος, εξασφαλίζεται και η ομοιομορφία στην παροχή του αερίου αργού στις τέσσερις διακλαδώσεις του διανομέα ροής αερίου.



**Εικόνα 55:** Η κατανομή του πεδίου εσωτερικής πίεσης (pressure field) στον εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου, όταν δεν υπάρχει διαρροή εξαιτίας οπής διαμέτρου 0.5mm στον εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου.

## 7.2 Επίδραση των διαρροών αερίου του διανομέα ροής αερίου στην ενίσχυση (Gain) του ανιχνευτή Micromegas

Το 2018 κατά το LHC shutdown προβλέπεται αναβάθμιση του LHC σε sLHC(superLHC) αυξάνοντας την τιμή της φωτεινότητας ( $L=2*10^{35} cm^{-2}s^{-1}$ ) και της ενέργειας σε (14 TeV). Εξαιτίας αυτής της αύξησης στη φωτεινότητα και στην ενέργεια, προβλέπεται αντικατάσταση των θαλάμων μιονίων στην πρόσθια περιοχή του ATLAS cavern. Οι έλεγχοι που έχουν γίνει στο εργαστήριο όλα αυτά τα χρόνια μας δείχνουν ότι η τεχνολογία Micromegas μπορεί να ανταποκριθεί στις ακόμα πιο δύσκολες απαιτήσεις του περιβάλλοντος του superLHC. Συνεπώς για την αναβάθμιση του ανιχνευτή ATLAS στο New Small Wheel θα χρησιμοποιηθούν 128 Micromegas chambers ως ανιχνευτές τροχιών.

Σε αυτό το υποκεφάλαιο, προσπαθούμε να απαντήσουμε στο ερώτημα ποια είναι η επίδραση μιας ενδεχόμενης διαρροής του αερίου (αργού 100%, Ar 93% - CO<sub>2</sub> 7%) στις σωληνώσεις του διανομέα ροής αερίου ή ποια η επίδραση της εισαγωγής μιας μικρής ποσότητας κάποιου ηλεκτραρνητικού αερίου (π.χ. Οξυγόνου O<sub>2</sub>) στην τιμή της ενίσχυσης (Gain) του σήματος στους ανιχνευτές Micromegas.

Σε αυτό το σημείο, θα πρέπει να εξηγήσουμε τη σχέση μεταξύ του διανομέα ροής αερίου και της ενίσχυσης του ανιχνευτή Micromegas. Άμεσα δεν υπάρχει σχέση. Άλλα έμμεσα όταν υπάρχει μια διαρροή αερίου στον διανομέα ροής αερίου, η ποσότητα του αργού που τροφοδοτεί τον ανιχνευτή Micromegas είναι μικρότερη με αποτέλεσμα και ο ανιχνευτής MM να μην λειτουργεί στις βέλτιστες συνθήκες. Αυτό το αντιλαμβανόμαστε από τη μέτρηση μιας σημαντικής μεταβλητής του ανιχνευτή Micromegas, που είναι η τιμή της ενίσχυσης του ανιχνευτή. Πράγματι, θα υπάρχει μια μικρή μείωση της τιμής της ενίσχυσης του ανιχνευτή Micromegas.

Η επιλογή του αερίου που θα γεμίσει τον διανομέα ροής αερίου για αναλογικές μετρήσεις κυριαρχείται από διάφορους παράγοντες: α) *χαμηλή τάση εργασίας*, β) *υψηλή ενίσχυση*, γ) *καλή αναλογικότητα* και δ) *υψηλού εύρους χωρητικότητα*. Γενικά, αυτές οι συνθήκες παρατηρούνται όταν χρησιμοποιείται ένα μείγμα αερίων και όχι ένα καθαρό αέριο. Για την ελάχιστη τάση εργασίας, τα ευγενή αέρια συνήθως επιλέγονται από τη στιγμή που απαιτούνται οι ελάχιστες εντάσεις ηλεκτρικού πεδίου για τον σχηματισμό του φαινομένου της “χιονοστοιβάδας”. Το μείγμα αερίων δεν θα πρέπει να προκαλεί φθορά στον ανιχνευτή. Μέχρι στιγμής έχει αποδειχθεί ότι τα πιο αποδοτικά μείγματα αερίων έχουν ως βάση τα ευγενή αέρια. Εξαιτίας του μοναδικά υψηλού ιονισμού και του χαμηλού κόστους, προτιμάται το αέριο αργό.

Ο θάλαμος του ανιχνευτή περιέχει αέριο μείγμα που αποτελείται από το αργό (ευγενές αέριο) και ένα δεύτερο αέριο που συνήθως είναι είτε ένα πολυατομικό αέριο (π.χ. το ισοβουτάνιο) είτε ένα ανόργανο αέριο (π.χ. το διοξείδιο του άνθρακα). Ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή ποικίλει και η αναλογία των δυο αερίων του μείγματος.

Σε αυτό το σημείο καλούμαστε να εξηγήσουμε την αρχή λειτουργίας των ανιχνευτών Micromegas. Όταν ένα φορτισμένο σωματίδιο (ή ένα φωτόνιο) εισέλθει στον θάλαμο του conversion gap, αλληλεπιδρά με τα άτομα του αργού μέσω γνωστών μηχανισμών και ιονίζει τα άτομα του αερίου. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται τα ζεύγη ελευθέρων ηλεκτρονίων – ιόντων. Αυτά τα ελεύθερα ηλεκτρόνια ονομάζονται ηλεκτρόνια ιονισμού (primary ionization electrons) λόγω της διαμόρφωσης του ηλεκτρικού πεδίου του conversion gap. Τελικά, σχεδόν όλα τα ηλεκτρόνια περνάνε στο δεύτερο περιοχή του θαλάμου (amplification gap). Σε αυτή την περιοχή λόγω της μικρής απόστασης μεταξύ του mesh και των strips, το ηλεκτρικό πεδίο στην περιοχή αυτή να είναι ακόμα ισχυρότερο με αποτέλεσμα την επίτευξη περαιτέρω ιονισμού του αερίου (secondary ionization gap).

Έτσι πραγματοποιείται πολλαπλασιασμός στα ζεύγη ηλεκτρονίων – ιόντων και έχουμε την εμφάνιση του φαινομένου της χιονοστοιβάδας. Λόγω του ηλεκτρικού πεδίου, τα ηλεκτρόνια κινούνται προς την άνοδο (strips) ενώ τα θετικά ιόντα κινούνται προς το mesh. Η περίσσεια φορτίου που δημιουργείται, συλλέγεται από τα strips. Η ποσότητα του φορτίου που συλλέγεται είναι ανάλογη της αρχικής ενέργειας του σωματιδίου ή φωτονίου που ήταν υπεύθυνο για τον αρχικό ιονισμό του μορίου του αργού. Επομένως, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις παραμέτρους (γεωμετρία, ηλεκτρικό πεδίο, είδος αερίου), η ενέργεια του αρχικού σωματιδίου μπορεί να υπολογιστεί.

Στη συνέχεια, διεγερμένα άτομα αργού που σχηματίζονται κατά το φαινόμενο της χιονοστοιβάδας, στη συνέχεια αποδιεγείρονται δίνοντας υψηλή ενέργεια στα ηλεκτρόνια, τα οποία καθίστανται ικανά να ιονιστούν στην κάθοδο και να προκαλέσουν επιπλέον φαινόμενα “χιονοστοιβάδας”.

Αυτό το πρόβλημα μπορεί να διορθωθεί με τη προσθήκη ενός πολυατομικού αερίου, όπως το μεθάνιο (methane) και η αλκοόλη (alcohol). Μπορεί να χρησιμοποιηθούν και μερικά ανόργανα αέρια, όπως τα CO<sub>2</sub>, BF<sub>3</sub>. Αυτά τα μόρια δρουν σαν απορροφητές (quenchers) απορροφώντας τα ακτινοβολούμενα φωτόνια και έπειτα διασκορπίζουν την ενέργεια διαμέσου της απόσπασης ή των ελαστικών συγκρούσεων. Ένα μικρό ποσοστό του πολυατομικού αερίου ήδη παράγει δραματικές αλλαγές στη λειτουργία του ανιχνευτή. Πράγματι, παρατηρείται η τιμή της ενίσχυσης να φτάνει μέχρι το 10<sup>6</sup>. Στους αναλογικούς μετρητές της μεταφοράς ρεύματος, ένα μείγμα που χρησιμοποιείται συχνά είναι το 90% Ar και 10% μεθάνιο (CH<sub>4</sub>). Αυτό το μείγμα είναι γνωστό και ως **αέριο P10**.

Η ενίσχυση μπορεί να αυξηθεί επιπλέον προσθέτοντας μια συνετή ποσότητα ηλεκτραρνητικού αερίου όπως το freon ή το ethyl bromide. Εκτός από την απορρόφηση φωτονίων, τα αέρια αυτά μπορούν επίσης να παγιδεύουν ηλεκτρόνια από την κάθοδο πριν φτάσουν στην άνοδο και να προκαλέσουν το φαινόμενο της “χιονοστοιβάδας”. Η τιμή της ενίσχυσης μπορεί να επιτευχθεί μέχρι 100000.

Η χρήση του οργανικού απορροφητή, δυστυχώς, οδηγεί σε επιπλέον προβλήματα μετά από την απορρόφηση μιας μεγάλης ροής ακτινοβολίας. Στην επίδραση, ο συνδυασμός των αποσπασμένων οργανικών μορίων έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό των αερίων ή υγρών πολυμερών, τα οποία συσσωρεύονται στην άνοδο και κάθοδο του ανιχνευτή. Θετικά ιόντα φτάνουν στην κάθοδο και στη συνέχεια πρέπει να διαχυθούν αργά διαμέσου του επιπέδου αυτού και να ουδετεροποιηθούν. Όταν μια απερίγραπτα μεγάλη ροή ακτινοβολίας είναι παρούσα, το ποσοστό των ιόντων που παράγονται είναι μεγαλύτερο από τον αντίστοιχο αριθμό ιόντων που διαρρέεται από τη κάθοδο. Έτσι αυτό που συμβαίνει είναι η δημιουργία θετικού φορτίου. Αυτό προκαλεί μια συνεχιζόμενη εκφόρτωση φορτίου στον μετρητή που συνεχίζεται ακόμα και μετά την αποχώρηση της ακτινοβολίας. Μόνο ένα ολοκληρωμένο καθάρισμα μπορεί να αναγεννήσει το ανιχνευτή.

Για ανιχνευτές αερίου καλής στεγανότητας, ένα επιπρόσθετο πρόβλημα που προκύπτει είναι ένα μεγάλο ποσοστό του αερίου απορρόφησης που καταναλώνεται σε κάθε ανιχνευόμενο γεγονός. Όταν έχουμε ενίσχυση της τάξης του αερίου και υποθέσουμε ότι προκύπτουν 100 ζευγάρια ηλεκτρονίου - ιόντος για κάθε γεγονός, μερικά μόρια αποσπώνται ανά γεγονός. Όταν έχουμε έναν ανιχνευτή αερίου με μείγμα αερίου Ar 90% - CO<sub>2</sub> 10% σε ατμοσφαιρική πίεση, τότε οι αλλαγές στα χαρακτηριστικά λειτουργίας του ανιχνευτή θα παρατηρηθούν μετά από κάποια γεγονότα.

Σε αυτό το επίπεδο πολλαπλότητας, τα σήματα είναι έντονα και για αυτό είναι ανεξάρτητα της ενέργειας. Ωστόσο, είναι γρήγορα εξαιτίας της μοναδικής συμβολής των ηλεκτρονίων και προβλέπουν καλή χρονική ανάλυση (time resolution). Ο ανιχνευτής, ωστόσο, είναι εξαιρετικά αποτελεσματικός και τα μεγάλα πλάτη του σήματος απλοποιούν πολύ τα ηλεκτρονικά ανάγνωσης.

Με χαμηλό θόρυβο, γρήγορα ηλεκτρονικά, άλλα και μείγματα αερίων με χαμηλότερη ενίσχυση, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εμφανίσουν άλλα χαρακτηριστικά, όπως για παράδειγμα, η ευαισθησία σε συγκεκριμένο τύπο ακτινοβολίας, η ανάλυση της ενέργειας (*energy resolution*), ο υψηλός ρυθμός χωρητικότητας κ.τ.λ.

Στη συνέχεια, θα παρουσιάσουμε δυο πινακία με τα χαρακτηριστικά λειτουργίας και τα δομικά στοιχεία του ανιχνευτή Micromegas (MM), ο οποίος πρόκειται να τοποθετηθεί στον NSW στο CERN.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.1: Χαρακτηριστικές τιμές Παραμέτρων Λειτουργίας του MM.**

<b>ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ</b>	<b>ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΤΙΜΗ</b>
<b>Χωρική Διακριτική Ικανότητα</b>	12 μm (rms)
<b>Χρονική Διακριτική Ικανότητα</b>	0.2 ns (rms)
<b>Ενεργειακή Διακριτική Ικανότητα</b>	11,00%
<b>Rise Time για γρήγορο Σήμα</b>	<1ns
<b>Signal to Noise (S/N) για MIP</b>	>100

## ΠΙΝΑΚΑΣ 7.2: Δομικά στοιχεία του ανιχνευτή Micromegas

Άνω πλάκα	Ηλεκτρόδιο ολίσθησης – Κάθοδος
Περιοχή μετατροπής (conversion gap) ~ mm	Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο & 1ος ιονισμός $E \sim 1 - 2 \text{ keV/m}$
Μικροπλέγμα (micromesh)	Πάχος ~ 5 $\mu\text{m}$ (εφαρμόζεται $V < 500 \text{ V}$ )
Περιοχή ενίσχυσης (amplification gap) ~ 50 – 100 $\mu\text{m}$	$E \sim 50 \text{ keV/m}$ , ζεύγη υπόκεινται στο φαινόμενο χιονοστοιβάδας
Κάτω ηλεκτρόδιο ανόδου	Χάλκινες λωρίδες 150 $\mu\text{m}$ x 200 $\mu\text{m}$ γειωμένες μέσω προενισχυτών υψηλής ενίσχυσης και χαμηλού εσωτερικού θορύβου
Πολυμερές	kapton

Έστω λοιπόν ότι έχουμε μια οπή 0.5mm στο τέλος του σωλήνα εισόδου του διανομέα ροής αερίου, που οδηγεί σε διαρροή αερίου παροχής  $Q_1 = 3 \text{ L/hr}$ . Όπως γνωρίζουμε, ο διανομέας ροής αερίου είναι ένα εξάρτημα που συνδέεται στα βύσματα του ανιχνευτή Micromegas για την όσο καλύτερη διανομή του αερίου. Γνωρίζουμε ότι μια σημαντική μεταβλητή των ανιχνευτών Micromegas είναι η ενίσχυση (Gain) του σήματός της. Επομένως μια διαρροή του διανομέα ροής αερίου θα οδηγήσει σε μεταβολή της ενίσχυσης του σήματος του ανιχνευτή Micromegas.

Σε αυτό το σημείο έχουμε δύο περιπτώσεις. Η πρώτη περίπτωση έχει να κάνει με το γεγονός ότι το σύστημα του διανομέα ροής αερίου + ανιχνευτή Micromegas βρίσκεται σε ένα θάλαμο όπου εσωτερικά υπάρχει το κενό. Αυτό σημαίνει ότι λόγω της διαρροής θα υπάρξει ένα ποσοστό αερίου (αργό, Ar 93 % – CO<sub>2</sub> 7%) όπου θα διαχυθεί στο θάλαμο και το υπόλοιπο ποσοστό θα βρίσκεται στον εσωτερικό χώρο του συστήματος διανομέα ροής αερίου + ανιχνευτή Micromegas.

Η δεύτερη περίπτωση έχει να κάνει με το ότι το σύστημά μας βρίσκεται σε θάλαμο όπου εσωτερικά υπάρχει ατμοσφαιρικός αέρας (70% N, 21% O<sub>2</sub>, κτ.λ). Αυτό σημαίνει ότι λόγω της διαρροής, όπως και πριν θα υπάρξει ένα ποσοστό αερίου (αργό, Ar 93 % – CO<sub>2</sub> 7%) που θα διαχυθεί στο θάλαμο, ένα ποσοστό θα συνεχίσει να κυκλοφορεί στον εσωτερικό χώρο του διανομέα ροής αερίου και ένα μικρό ποσοστό O<sub>2</sub> ή N θα προσπαθήσει να εισέλθει στον εσωτερικό χώρο του συστήματος διανομέα ροής αερίου + ανιχνευτή Micromegas.

Τρεις καλές ερωτήσεις που μπορούμε να κάνουμε αλλά και να υπολογίσουμε πειραματικά είναι οι εξής: α) Ποια είναι η επίδραση των ενδεχόμενων διαρροών στην τιμή της ενίσχυσης του ανιχνευτή Micromegas? β) Ποια είναι η επίδραση της εισερχόμενης ποσότητας του O<sub>2</sub> στην τιμή της ενίσχυσης του ανιχνευτή Micromegas? γ) Σε πόση ώρα θα μπορέσει να αλλάξει η σύσταση του μείγματος σε Ar 92% – CO<sub>2</sub> 7% – O<sub>2</sub> 1%?

Αυτό που μπορούμε να κάνουμε για να απαντήσουμε σε αυτές τις ερωτήσεις είναι να περιγράψουμε την μεθοδολογία υπολογισμού της ενίσχυσης του σήματος του ανιχνευτή Micromegas. Η μεθοδολογία υπολογισμού της ενίσχυσης του σήματος του ανιχνευτή Micromegas περιγράφεται παρακάτω:

Η ενίσχυση που παρέχει ο ανιχνευτής Micromegas στο σήμα μας δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$Gain = \frac{N_{sec}}{N_{prime}} \quad (7.2.1)$$

όπου  $N_{sec}$  = ο αριθμός των δευτερογενών ηλεκτρονίων που παράγονται εξαιτίας του δευτέρου ιονισμού του ενεργού αερίου (Argon, Ar 93% - CO<sub>2</sub> 7%) από το φαινόμενο της χιονοστοιβάδας και φθάνουν στα strips και

$N_{prime}$  = ο αριθμός των πρωταρχικών ηλεκτρονίων που παράγονται εξαιτίας του ιονισμού του ενεργού αερίου (Argon, Ar 93% - CO<sub>2</sub> 7%) από το φαινόμενο της χιονοστοιβάδας.

Η σταθερά ιονισμού του αργού αντιστοιχεί σε ενέργεια 26.2 eV.

Όπως γνωρίζουμε από το προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 7.1), η οπή διαμέτρου 0.5mm θα μειώσει την ποσότητα του αερίου (Αργό 100%, Ar 93% - CO<sub>2</sub> %) κατά ~ 11.5%. Αυτό από μόνο του σημαίνει αυτομάτως ότι θα μειωθεί ο αριθμός των δευτερογενών ηλεκτρονίων  $N_{sec}$  (αριθμητής) και θα μειωθεί ελάχιστα ο αριθμός των πρωτογενών ηλεκτρονίων  $N_{prime}$  (παρονομαστής). Επομένως η πιθανή επίδραση της διαρροής του αερίου στις σωληνώσεις του διανομέα ροής αερίου στην τιμή της ενίσχυσης του ανιχνευτή Micromegas είναι η μείωση της τιμής της ενίσχυσης του σήματος που παρέχει ο ανιχνευτής Micromegas.

Έστω λοιπόν ότι έχουμε χρησιμοποιήσει την ραδιενεργή πηγή του σιδήρου (Fe – 55). Το γράφημα της συγκεκριμένης πηγής έχει δυο κορυφές: a) κορυφή Argon Escape και b) κορυφή σιδήρου. Τα φωτόνια που εξέρχονται από τη κορυφή Argon Escape φέρουν ενέργεια 2.9 keV = 2900 eV ενώ τα φωτόνια που εξέρχονται από τη κορυφή σιδήρου φέρουν ενέργεια 5.97 keV = 5970 eV. Ο αριθμός των μορίων αργού που θα ιονίσει ένα φωτόνιο ενέργειας 2.9 keV και 5.97 keV μέχρι να χάσει όλη του την ενέργεια δίνεται από το παρακάτω τύπο:

$$N_{prime}^{(Argon\ Escape)} = \frac{(2900\ eV)}{(26.2\ eV)} = 110.69\ e^- \simeq 111\ e^- \quad (7.2.2a)$$

$$N_{prime}^{(2\eta\ \text{κορυφή}\ Fe)} = \frac{(5970\ eV)}{(26.2\ eV)} = 227.86\ e^- \simeq 228\ e^- \quad (7.2.2b)$$

Ο πολυκαναλικός αναλυτής (MCA) του εργαστηρίου παρέχει κέρδος μετατροπής ίσο με 102.4. Ο παλμός πριν φτάσει στον πολυκαναλικό αναλυτή έχει ύψος που δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$Ampl(ampl) = \frac{centroid}{102.4} \quad (7.2.3)$$

Ο ενισχυτής EG & G571 ORTEC παρέχει ενίσχυση σήματος που δίνεται από το γινόμενο. Στην πειραματική διαδικασία του εργαστηρίου, οι τιμές των μεταβλητών της ενίσχυσης είναι οι ακόλουθες: Coarse Gain = 100 και Fine Gain = 0.5. Επομένως η ενίσχυση του σήματος θα παίρνει την ακόλουθη τιμή: G = 50.

Άρα το ύψος του παλμού πριν φτάσει στον ενισχυτή θα δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$Ampl(preampl) = \frac{Ampl(ampl)}{Gain} \quad (7.2.4)$$

Με δεδομένο ότι ο προενισχυτής (ORTEC 142 B) του εργαστηρίου έχει ευαισθησία περίπου  $72.4 * 10^{-9}$  V, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι ο αριθμός των δευτερογενών ιόντων που φθάνουν στο ηλεκτρόδιο του mesh (ή των  $e^-$  που φθάνουν στα strips) δίνεται από τον τύπο:

$$N_{sec} = \frac{Ampl(preampl)}{(72.4 * 10^{-9}\ V)} \quad (7.2.5)$$

Αρχικά, θα κάνουμε τους υπολογισμούς της ενίσχυσης στην περίπτωση που δεν έχουμε διαρροή του αερίου αργού στις σωληνώσεις του διανομέα ροής αερίου. Στη συνέχεια, θα κάνουμε τους υπολογισμούς της ενίσχυσης στην περίπτωση που έχουμε διαρροή αργού στις σωληνώσεις του διανομέα ροής αερίου. Έπειτα καλούμαστε να συγκρίνουμε τις δυο τιμές της ενίσχυσης και να αποφανθούμε για την απόκλιση της τιμής της ενίσχυσης ως πιθανή επίδραση ενδεχόμενης διαρροής του ενεργού αερίου στις σωληνώσεις του διανομέα ροής αερίου.

Τελικά, αυτό που πρέπει να γίνει είναι να αλλάξει η σύσταση του μείγματος Ar 93% - CO<sub>2</sub> 7% στο καινούργιο μείγμα Ar 92% - CO<sub>2</sub> 7% - O<sub>2</sub> 1%. Από την οπή 0.5 mm θα υπάρξει μια διαρροή αργού (Ar 93% → Ar 92%). Λόγω του φαινομένου της διάχυσης, επειδή ο εξωτερικός θάλαμος έχει εσωτερικά ατμοσφαιρικό αέρα, από την οπή θα εισέλθει μικρή ποσότητα οξυγόνου (1% O<sub>2</sub>). Έτσι, η τελική σύσταση του μείγματος είναι η παρακάτω: Ar 92% - CO<sub>2</sub> 7% - O<sub>2</sub> 1%.

---

Οι παραπάνω τύποι και οι πληροφορίες παίρνονται από τα paper:

[1] “Experiments in Modern Physics”, book of Adrian C.Melissinos, Jim Napolitano.

[2] Κολυβοδιάκος Ιωάννης, “Μελέτη του ανιχνευτή Micromegas R11 σε συγκεκριμένες συνθήκες αναλογίας του μείγματος αερίων I. Ar 93% - CO<sub>2</sub> 7%, II. Ar 80% - CO<sub>2</sub> 20%, III. Ar 70% - CO<sub>2</sub> 30%”, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (Ε.Μ.Π.), Αθήνα 2012.

[3] Κιλιντάρη Σοφία, Ο ανιχνευτής Micromegas στο Upgrade του ATLAS για το superLHC, Σχολή Θετικών Επιστημών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8ο

### Μελλοντικά Projects για την πειραματική διάταξη του LHC

Μετά την ολοκλήρωση αυτής της πειραματικής διπλωματικής εργασίας, καλούμαστε να αναφερθούμε στην αναβάθμιση της πειραματικής διάταξης στις εγκαταστάσεις του LHC. Έτσι μετά την ολοκλήρωση αυτής της αναβάθμισης, οι καινούργιες πειραματικές εγκαταστάσεις θα καλούνται SLHC(Super Large Hadron Collider) ή HL-LHC(High Luminosity Large Hadron Collider) σε θεωρητικό επίπεδο.

#### 8.1a Πρώτο λειτουργικό run (2010 – 2013)

Στις 20 Νοεμβρίου 2009, για πρώτη φορά κύκλωσαν το τούνελ του LHC δέσμες χαμηλής ενέργειας μετά το ατύχημα, και λίγο αργότερα, στις 30 Νοεμβρίου, ο LHC κατάφερε 1.18 TeV ανά δέσμη και έγινε ο υψηλότερης ενέργειας επιταχυντής σωματιδίων του κόσμου, κερδίζοντας το προηγούμενο ρεκόρ του επιταχυντή Tevatron με 0.98 TeV ανά δέσμη που κρατούσε για 8 χρόνια. Στις 30 Μαρτίου 2010, ο LHC δημιούργησε ένα καινούργιο ρεκόρ για τις συγκρούσεις υψηλών ενεργειών με τη σύγκρουση δεσμών πρωτονίων σε συνδυασμένο ενεργειακό επίπεδο των 7 TeV. Η προσπάθεια έγινε την τρίτη ημέρα, μετά από δυο ανεπιτυχείς προσπάθειες στις οποίες τα πρωτόνια ξέφυγαν από τη σύγκρουση και καινούργιες δέσμες έπρεπε να εισαχθούν. Αυτό αποτέλεσε την αρχή της κυρίως ερευνητικού προγράμματος.

Το πρώτο run πρωτονίων τελείωσε στις 4 Νοεμβρίου 2010. Ένα run με ιόντα μολύβδου άρχισε στις 8 Νοεμβρίου 2010 και τελείωσε στις 6 Δεκεμβρίου 2010, επιτρέποντας στο πείραμα ALICE να μελετήσει την ύλη υπό εξιδικευμένες συνθήκες κοντά σε αυτές που επικρατούσαν αμέσως μετά το Big Bang. Το CERN επισήμως προγραμμάτισε ότι το LHC θα τρέξει μέχρι το τέλος του 2012, με ένα σύντομο διάλειμα στα τέλη του 2011 για να επιτρέψει την αύξηση της δέσμης ενέργειας από το 3.5 στο 4 TeV ανά δέσμη. Στο τέλος του 2012 το LHC έκλεισε μέχρι περίπου το 2015 για να επιτρέψει την αναβάθμιση σε μια σχεδιασμένη δέσμη ενέργειας πάνω από 7 TeV ανά δέσμη. Στις αρχές του 2012, μετά την ανακάλυψη τον Ιούλιο του 2012 ενός καινούργιου σωματιδίου, το κλείσιμο αναβλήθηκε για μερικές εβδομάδες στις αρχές του 2013, για να παρατηρηθούν επιπρόσθετα data πριν το κλείσιμο.

#### 8.1b Αναβάθμιση (2013 – 2015)

Ο LHC έκλεισε στις 13 Φεβρουαρίου 2013 για την συμφωνημένη διετή αναβάθμιση του, που πρόκειται να αγγίξει πολλά θέματα του LHC: να καταστήσει ικανό για συγκρούσεις στα 14 TeV, να συγκρατήσει τους ανιχνευτές και προ - επιταχυντές του (μιλάμε για το Proton Synchrotron and Super Proton Synchrotron(SPS)), όπως και η αντικατάσταση του συστήματος αερισμού και των 100 km των καλωδίων που έχουν εξασθενήσει από τις συγκρούσεις υψηλής ενέργειας από το πρώτο run.



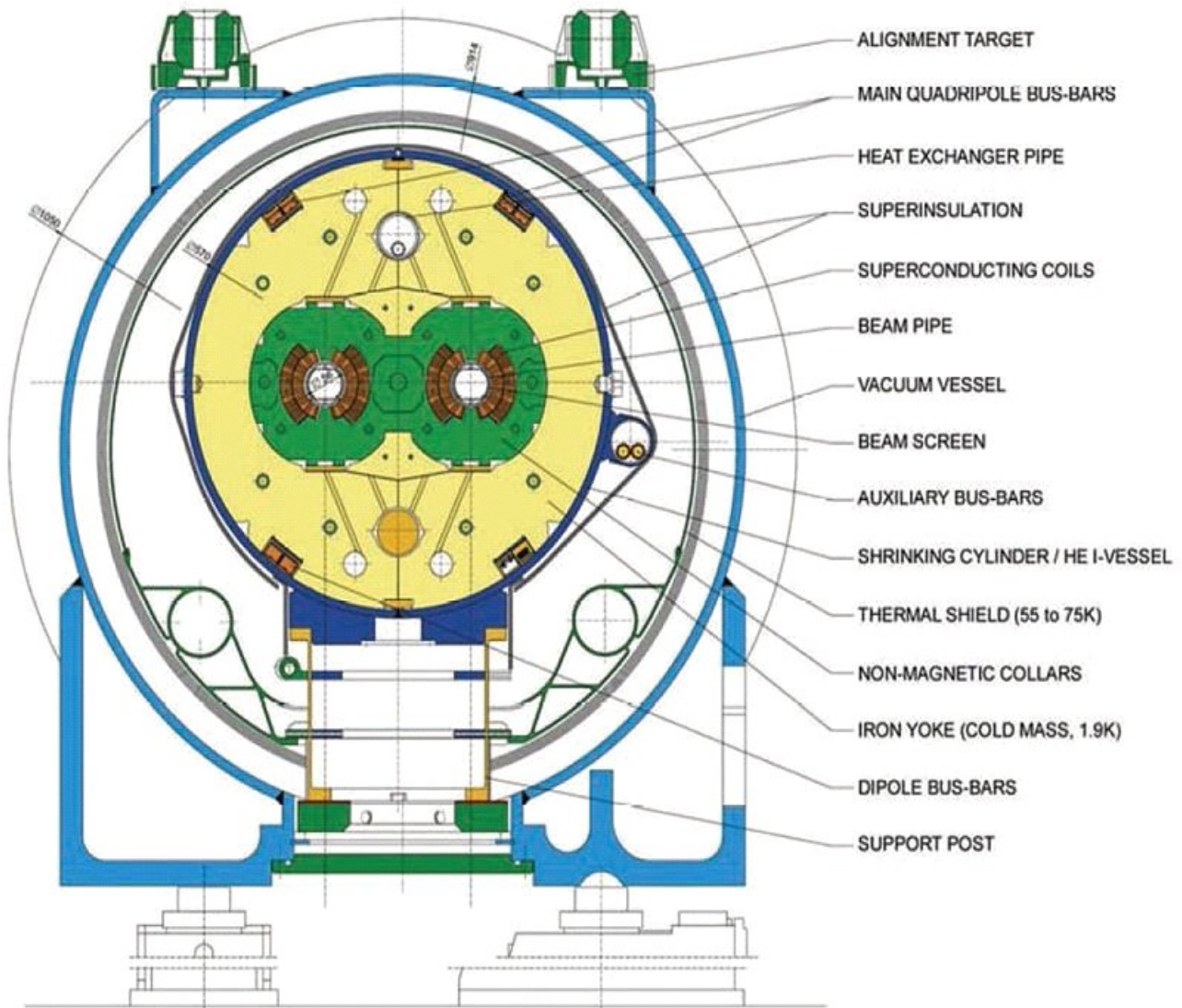
Η αναβαθμισμένη σύγκρουση αρχίζει την μεγάλη εκκίνησή της και την πρόοδο του τεστ τον Ιούνιο του 2014 με το Proton Synchrotron Booster που αρχίζει στις 2 Ιουνίου 2014, η τελική διχοτόμηση μεταξύ των συμπληρωματικών μαγνητών και των κυκλικά κινούμενων σωματιδίων του Proton Synchrotron έγινε στις 18 Ιουνίου 2014 και το πρώτο τμήμα του συστήματος των υπερμαγνητών του LHC φτάνει την λειτουργική θερμοκρασία των 1.9 K πάνω από το απόλυτο μηδέν μερικές μέρες αργότερα. Οι πρώτες από τους υπερμαγνήτες του κυρίως LHC αναφέρονται ότι έχουν εκπαιδευτεί για να τρέξουν επιτυχημένα στα 11.000 amps (το παρόν προυποθέτει συγκρούσεις ενέργειας 6.5TeV) στις 9 Δεκεμβρίου 2014, με τα άλλα τμήματα μαγνητών που έχουν σχεδιαστεί να τελειώσουν η εκπαίδευσή τους την άνοιξη του 2015.

### 8.1c Δεύτερο λειτουργικό run (από το 2015 και μετά)

Στις 5 Απριλίου 2015 το LHC επισήμως επαναρχίζει τη λειτουργία του μετά από διάλειμα δυο ετών στην διάρκεια των οποίων αναβαθμίστηκε έτσι ώστε να το run να φτάσει τις ενέργειες λειτουργίας των 7 TeV ανά δέσμη (14 TeV συνολικά), ωστόσο αρχικά έτρεχε στα 6.5 TeV ανά δέσμη (13 TeV συνολικά) ενώ οι μαγνήτες ασκούσαν. Ωστόσο δέσμες σωματιδίων ταξιδεύουν και στις δυο κατευθύνσεις, διαμέσου παράλληλων καλωδίων, ενεργές συγκρούσεις περιμένουμε να αρχίσουν τον Ιούνιο. Η πρώτη κλίση τον Απρίλιο του 2015 έδωσε αξιοσημείωτα αποτελέσματα καθώς έφτασε τα 6.5 TeV. Οι αναβαθμίσεις μεσουραρούν στις συγκρούσεις πρωτονίων με συνδυασμένη ενέργεια των 13TeV. Στις 3 Ιουνίου 2015 ο LHC αρχίζει να παραδίδει data φυσικής μετά από σχεδόν 2 χρόνια εκτός λειτουργίας για επανεντολή.

#### ΠΙΝΑΚΑΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΩΝ 8.1.I

Date	Event
30 Nov 2009	LHC becomes the world's highest-energy particle accelerator achieving 1.18 TeV per beam, beating the <a href="#">Tevatron</a> 's previous record of 0.98 TeV per beam held for eight years.
early Feb 2010	First proton-proton collisions beyond FermiLab's energies, published by the <a href="#">CMS</a> team.
30 Mar 2010	The two beams collided at 7 TeV (3.5 TeV per beam) in the LHC at 13:06 CEST, marking the start of the LHC research program.
23 Oct 2011	The high luminosity experiments ATLAS and CMS reach 5 fb <sup>-1</sup> of collected data.
22 Dec 2011	First new composite particle discovery, the $\chi_b(3P)$ <a href="#">bottomonium</a> meson, observed with proton-proton collisions in 2011.
4 Jul 2012	First new elementary particle discovery, a new boson observed that is "consistent with" the theorized Higgs boson. (This has now been confirmed as the Higgs boson itself.
8 Nov 2012	First observation of the very rare decay of the <a href="#">B<sub>s</sub> meson</a> into two <a href="#">muons</a> ( $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ ), a major test of <a href="#">supersymmetry</a> theories, <a href="#">[106]</a> shows results at 3.5 sigma that match the Standard Model rather than many of its super-symmetrical variants.
20 May 2015	Protons collided in the LHC at the record-breaking energy of 13TeV. <a href="#">[</a>



**Εικόνα 59 :** Η παραπάνω εικόνα δείχνει την εσωτερική τομή των μαγνητικών καλωδίων που χρησιμοποιούνται στο CERN.

### 8.2a Σχεδιαζόμενη αναβάθμιση της υψηλής φωτεινότητας

Μετά από κάποια χρόνια τρεξίματος, οποιοδήποτε πείραμα σωματιδιακής φυσικής τυπικά αρχίζει να υποφέρει από μειωμένες επιστροφές: όσο τα αποτελέσματα – κλειδιά που φτάνονται από τη συσκευή αρχίζουν να ολοκληρώνονται, στα επόμενα χρόνια της λειτουργίας ανακαλύπτονται αναλογικά λιγότερα από τα αρχικά χρόνια. Μια κοινή έκβαση είναι το να αναβαθμίσεις τις συσκευές που εμπλέκονται, τυπικά στην ενέργεια, στη φωτεινότητα ή σε σχέση με τους βελτιωμένους ανιχνευτές. Όσο τα σχέδια 2013 – 2015 αυξάνουν την επιδίωξη της ενέργειας σύγκρουσης στα 14 TeV, η αναβάθμιση της φωτεινότητας στο LHC, που ονομάζεται High Luminosity LHC, έχει προταθεί να γίνει το 2022.

Ο καλύτερος δρόμος για την αναβάθμιση της φωτεινότητας του LHC περιλαμβάνει την αύξηση της ποσότητας της δέσμης (π.χ. τον αριθμό των σωματιδίων της δέσμης) και η τροποποίηση των δυο υψηλής φωτεινότητας περιοχών αλληλεπίδρασης, του ATLAS και του CMS. Για να καταφέρουμε αυτές τις αυξήσεις, η ενέργεια των δεσμών στο σημείο που εισάγονται μέσα στο super LHC θα πρέπει να αυξηθεί κατά 1 TeV.

Αυτό θα απαιτεί μια αναβάθμιση ολόκληρου του συστήματος προ – εισαγωγής, όπου οι πιο σημαντικές αλλαγές μέσα στο Super Proton Synchrotron θα είναι και οι πιο ακριβές. Επομένως η συνεργατική προσπάθεια έρευνας του Προγράμματος Έρευνας Επιταχυντή LHC (LARP), είναι μια συντακτική έρευνα στο πως θα φτάσουμε σε αυτούς τους στόχους.

## **8.2b Η αναβάθμιση της πειραματικής διάταξης του LHC σε SLHC (Super Large Hadron Collider)**

Ο High Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC) ή αλλιώς ο Super Large Hadron Collider (SLHC) είναι μια προβλεπόμενη αναβάθμιση του Large Hadron Collider που θα φτιαχτεί μετά από δέκα χρόνια λειτουργίας. Οι στόχοι της αναβάθμισης είναι να αυξηθεί η φωτεινότητα της μηχανής κατά ένα παράγοντα του 10, πάνω από  $10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ , δίνοντας μια καλύτερη ευκαρία για να παρατηρήσουμε σπάνιες διαδικασίες και να καλυτερεύσουμε στατιστικά περιθωριακές μετρήσεις.

Υπάρχουν πολλοί τρόποι για να αναβαθμίσουμε τον επιταχυντή. Μια συλλογή διαφορετικών σχεδίων των υψηλής φωτεινότητας περιοχών αλληλεπίδρασης έχει κατατεθεί από το CERN. Ένα συνέδριο που πραγματοποιήθηκε το 2006 για να δημοσιεύσει ποια αυτά είναι οι πιο υποσχόμενες επιλογές. Αυξάνοντας την φωτεινότητα του LHC συνεπάγεται μείωση του μεγέθους της δέσμης στο σημείο σύγκρουσης και είτε μείωση του μήκους της δέσμης μήκους και χώρου ή σημαντική αύξηση του μήκους της δέσμης και του πληθυσμού. Η μέγιστη ολοκληρωμένη αύξηση της φωτεινότητας των υπάρχοντων επιλογών είναι ενός παράγοντα 4 υψηλότερα από την εναλλακτική επιλογή του LHC, δυστυχώς πολύ χαμηλότερη από την αρχική φιλοδοξία του project αναβάθμισης με ένα παράγοντα του 10. Ωστόσο, στο τελευταίο LUMI'06 συνέδριο, διάφορες προτάσεις προτάθηκαν που θα μπορούσαν να προωθήσει την φωτεινότητα της κορυφής του LHC κατ'ένα παράγοντα 10 παρα πέρα ονομαστικός προς  $10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Το αποτελεσματικό υψηλότερο αναλογικό γεγονός περιπλέκει σημαντικές προκλήσεις για τους ανιχνευτές σωματιδίων που τοποθετούνται στις περιοχές σύγκρουσης.

## **8.2c Αναβάθμιση του injector**

Ως μέρος της Φάσης 2 του Super LHC, σημαντικές αλλαγές πρόκειται να γίνουν στο σιφώνι πρωτονίων.

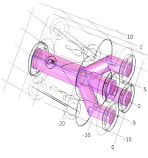
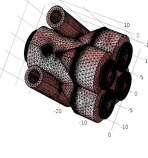
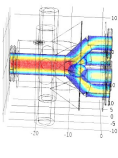
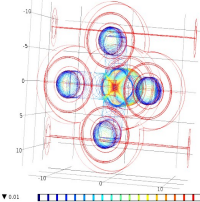
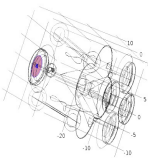
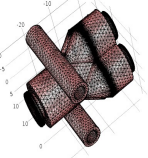
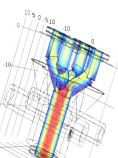
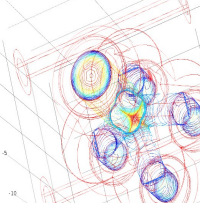
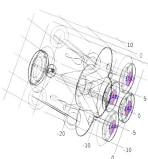
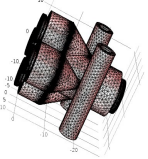
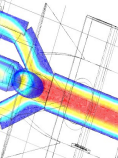
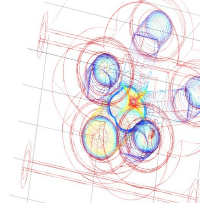
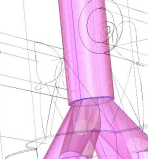
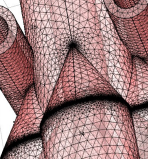
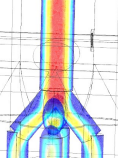
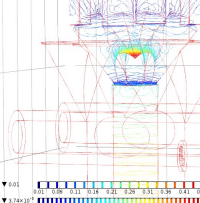
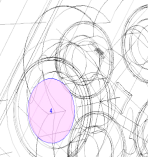
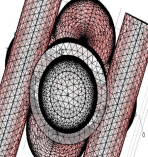
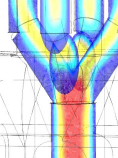
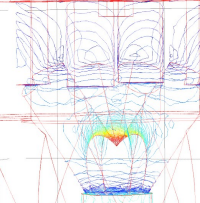
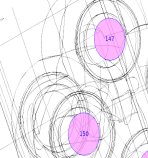
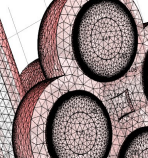
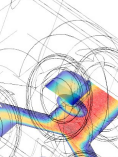
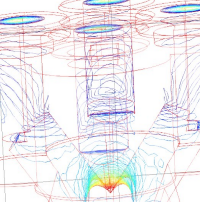
Superconducting Proton Linac (SPL): Επιταχύνει πρωτόνια με υπεραγώγιμες κοιλότητες ραδιοσυχνότητας μέχρι την ενέργεια των 5 GeV.

Proton Synchrotron 2 (PS2): Επιταχύνει τη δέσμη από τα 5 GeV σε έγχυση στα 50 GeV σε απόσταση.

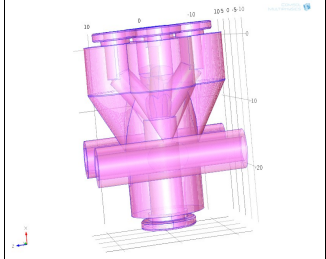
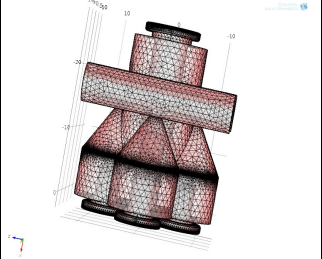
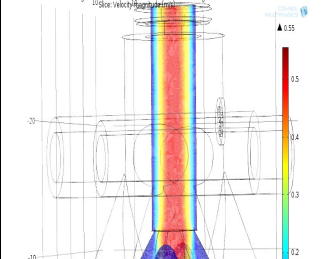
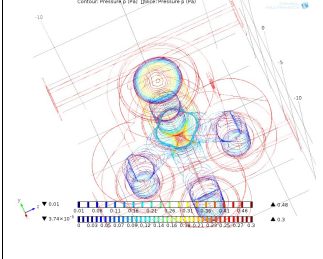
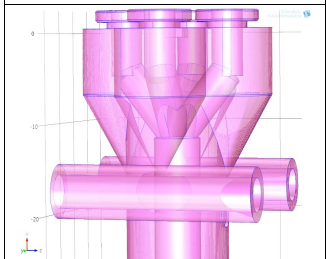
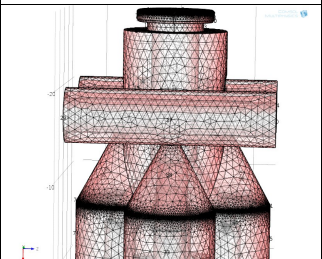

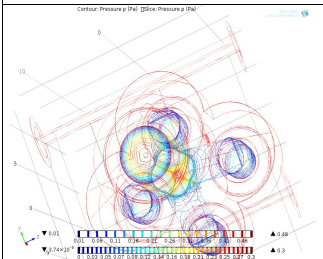
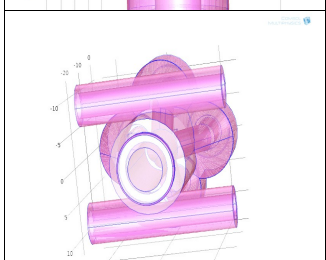
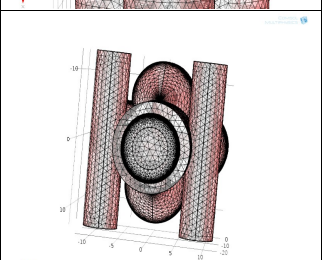
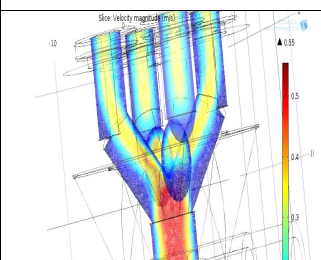
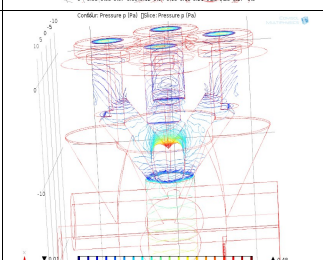
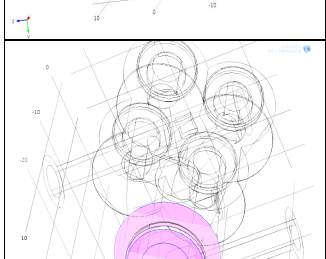
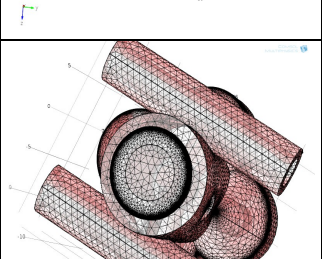
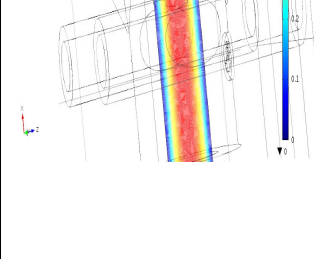
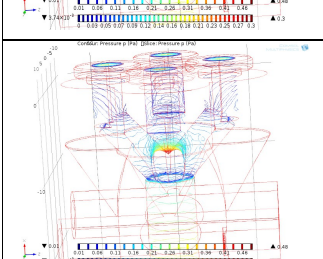
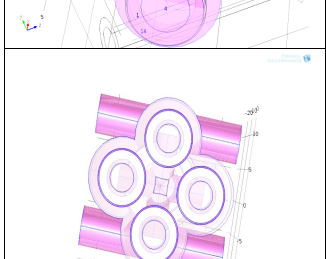
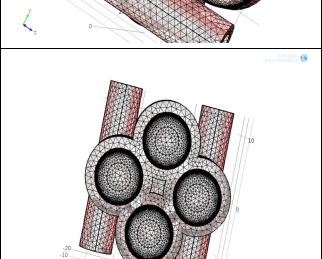
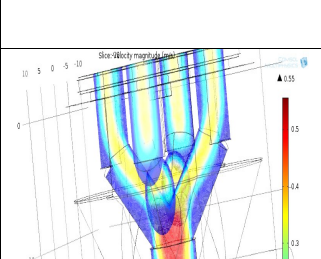
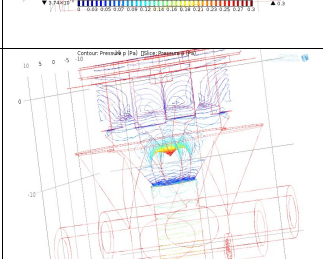
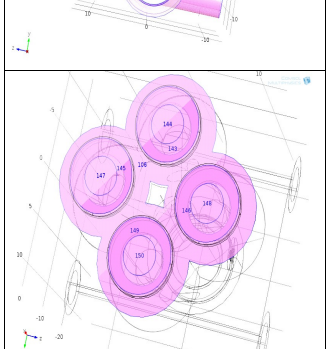
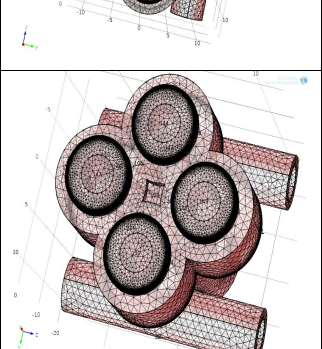
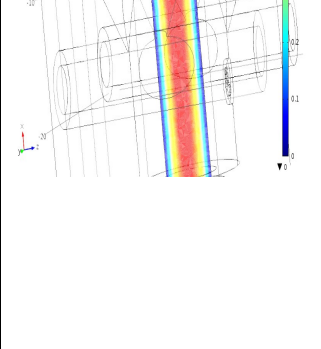
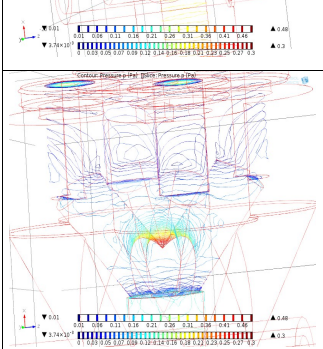
[Super Proton Synchrotron \(SPS\) Upgraded](#): Το τωρινό SPS πρόκειται σταδιακά να αναβαθμιστεί για να διαχειριστεί μια αυξανόμενη χωρητικότητα δεσμών από το PS2.

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

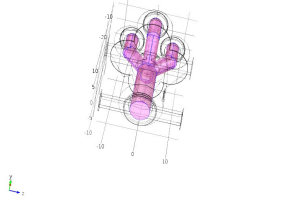
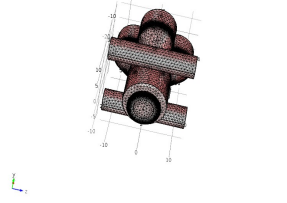
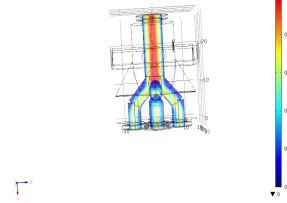
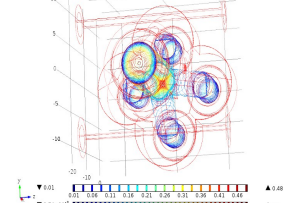
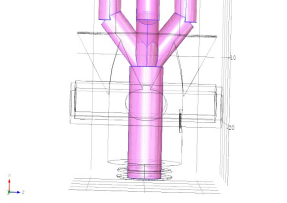
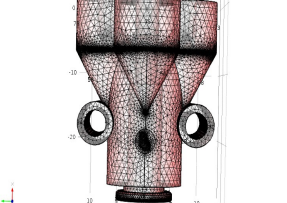
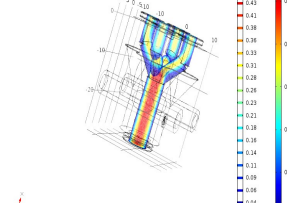
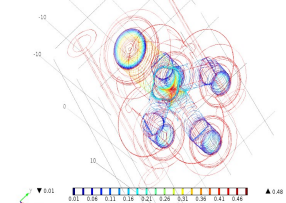
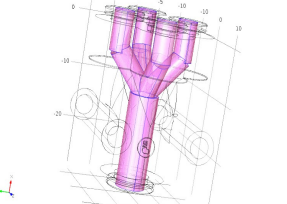
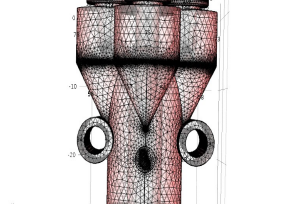
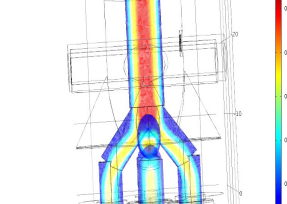
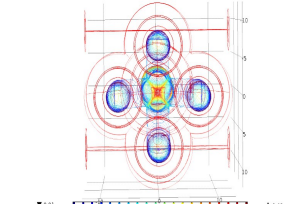
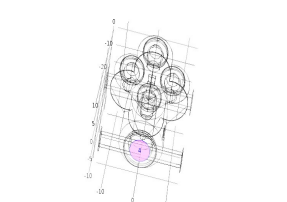
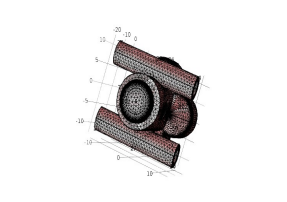
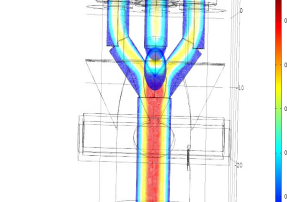
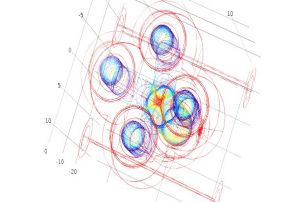
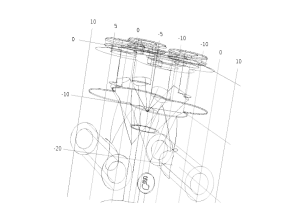
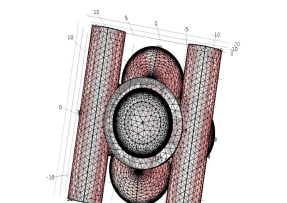
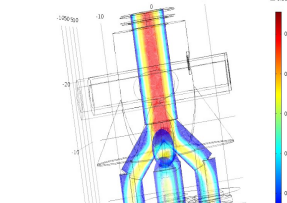
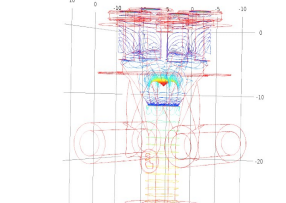
## Images (double “Y” – tube, ARGON, laminar flow)

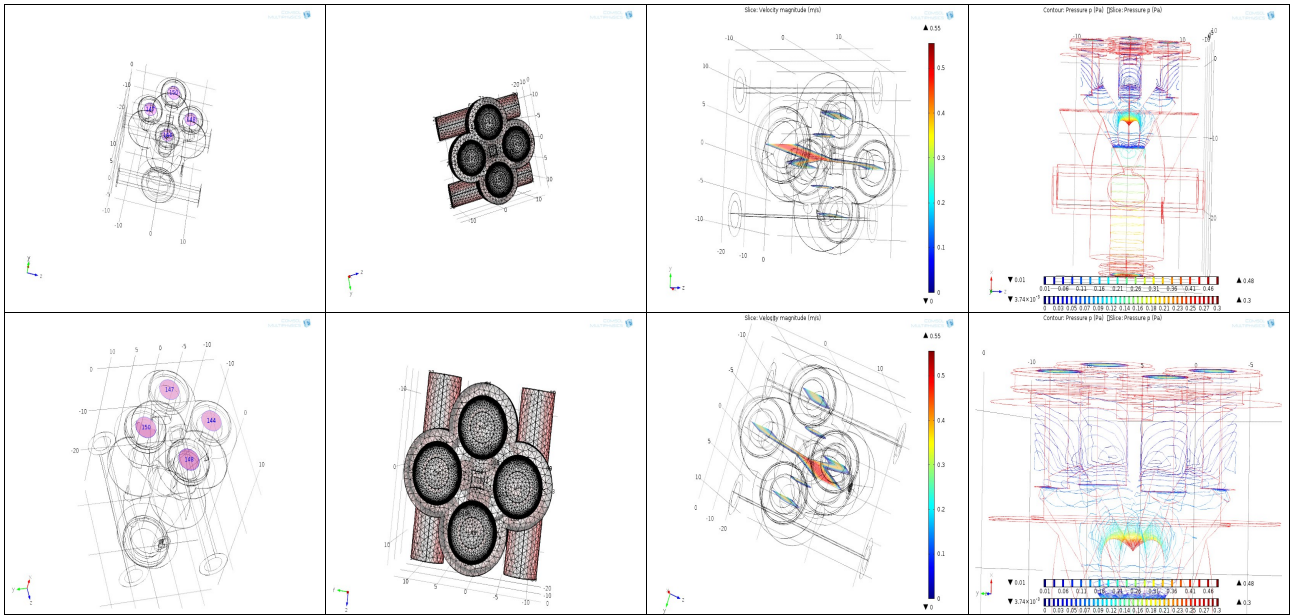
Fluid properties – inlet – outlet	Mesh	Velocity	Pressure
			
			
			
			
			
			

## Images(double "Y" – tube, argon, turbulent flow)

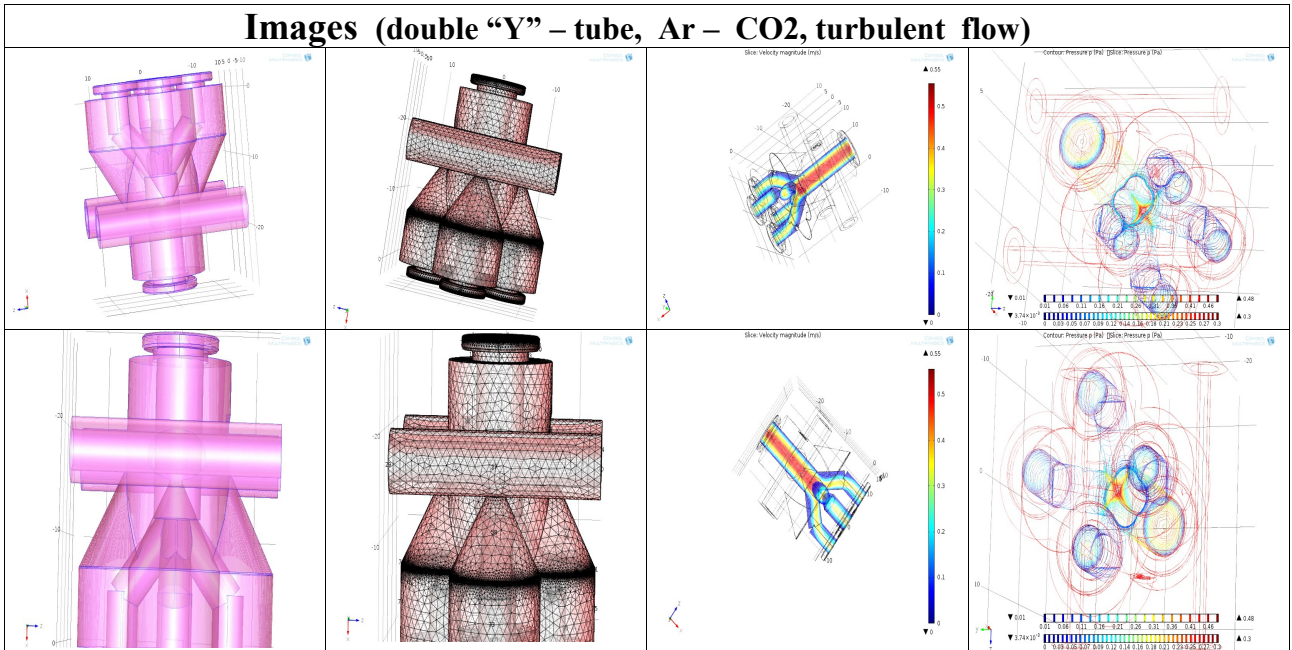
Fluid properties – inlet – outlet	Mesh	Velocity	Pressure
			
			
			
			
			
			

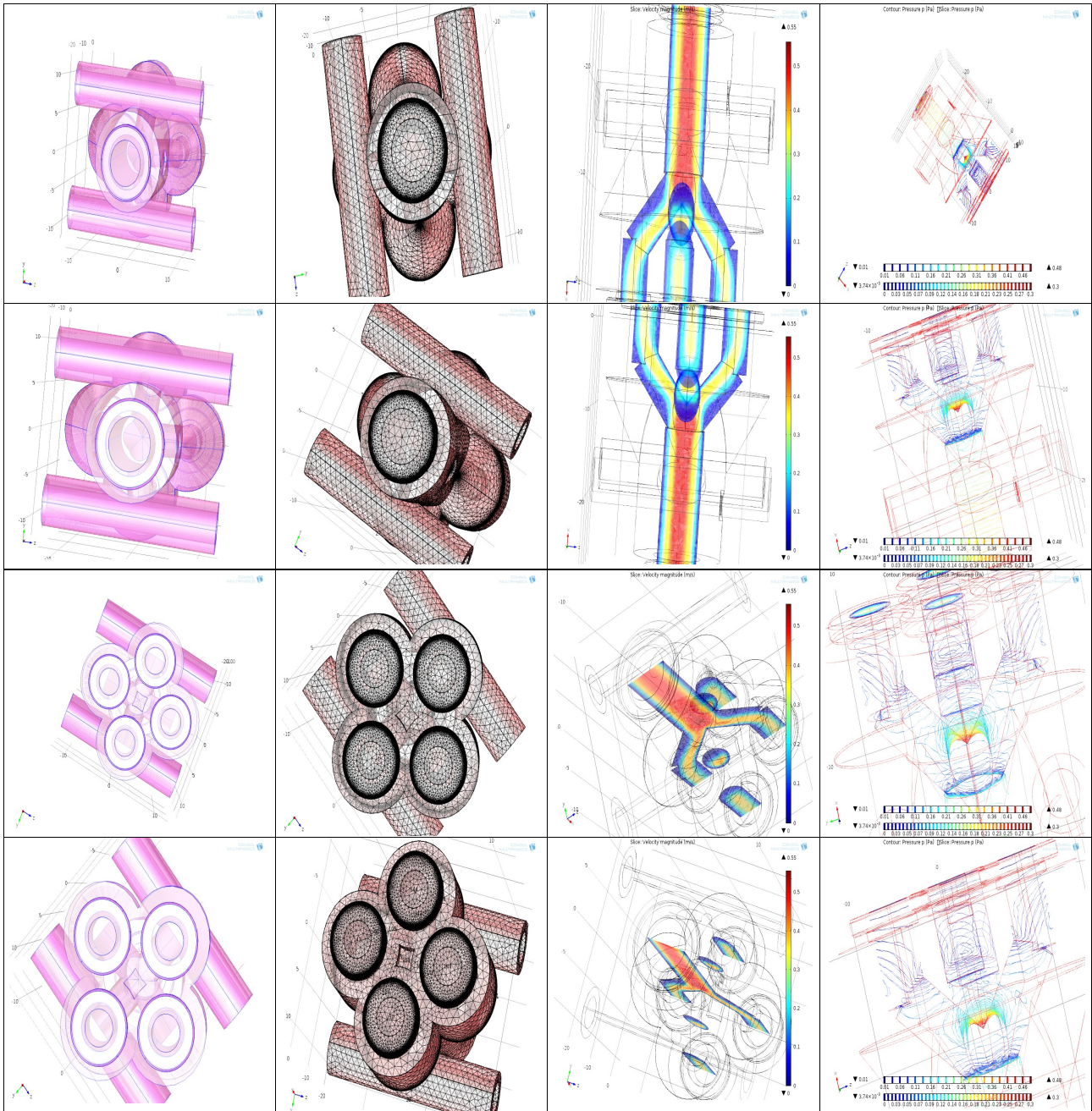
## Images(double “Y” – tube, Ar – CO2, laminar flow)

Fluid properties – inlet – outlet	Mesh	Velocity	Pressure
			
			
			
			
			



**Images (double “Y” – tube, Ar – CO<sub>2</sub>, turbulent flow)**



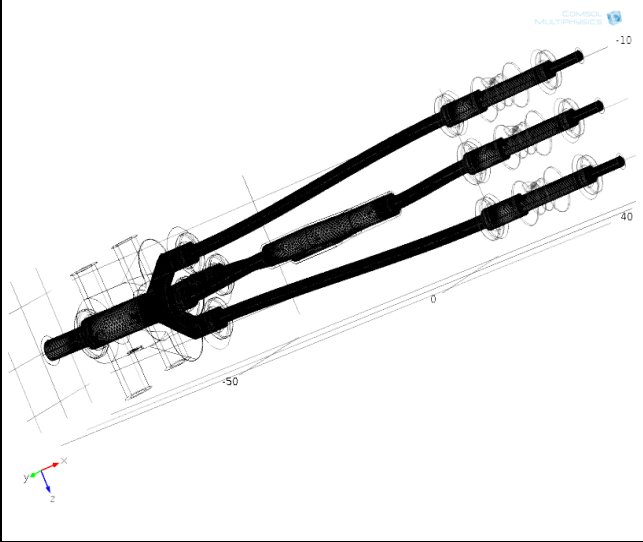
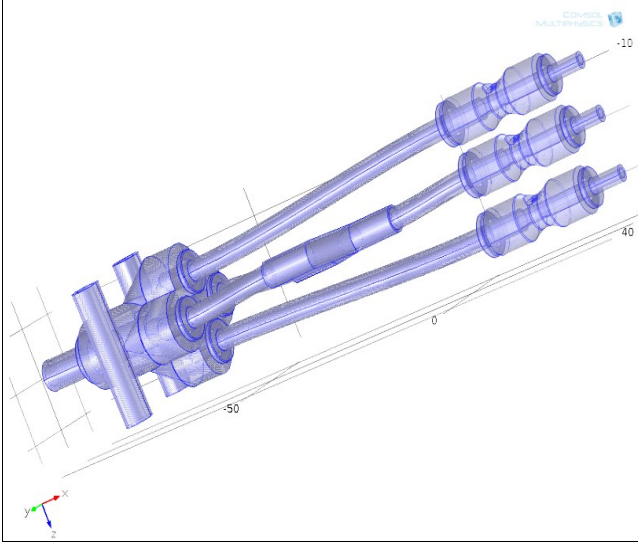
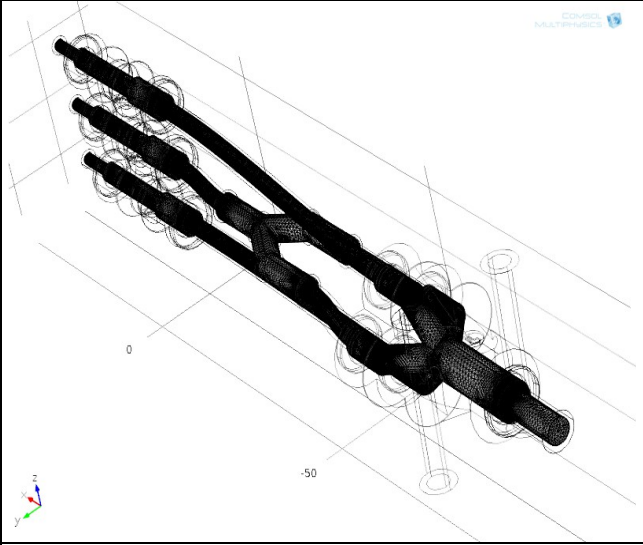
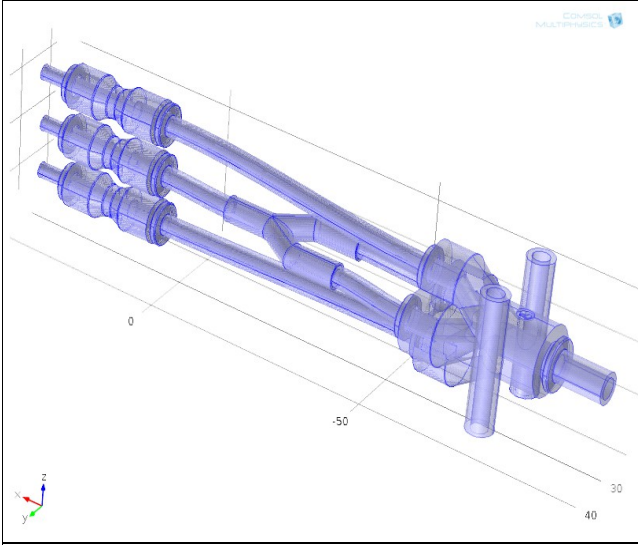
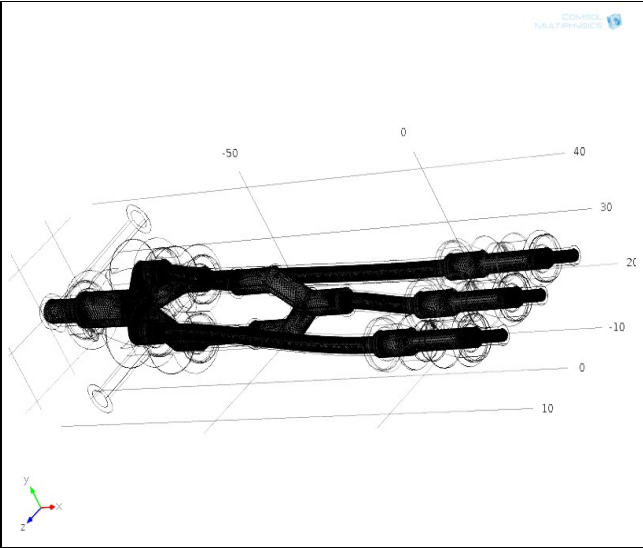
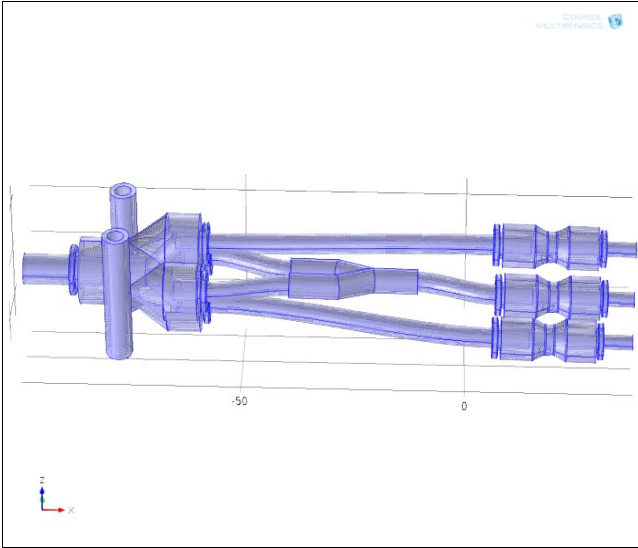


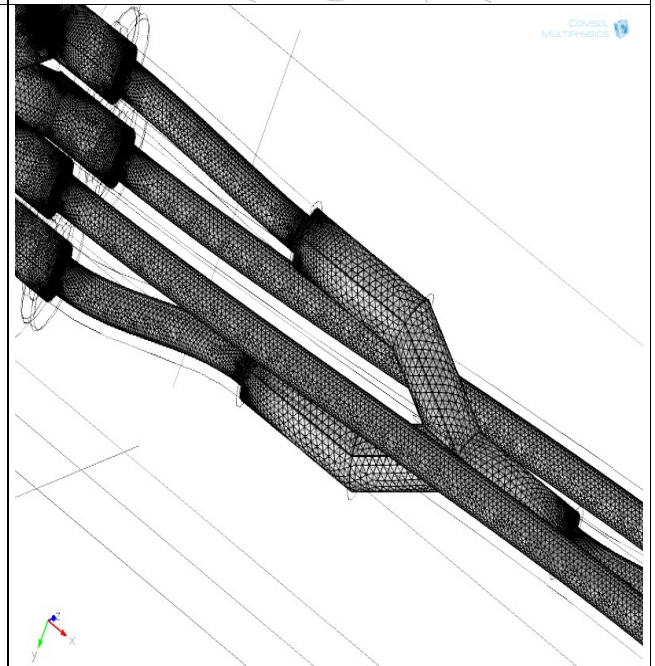
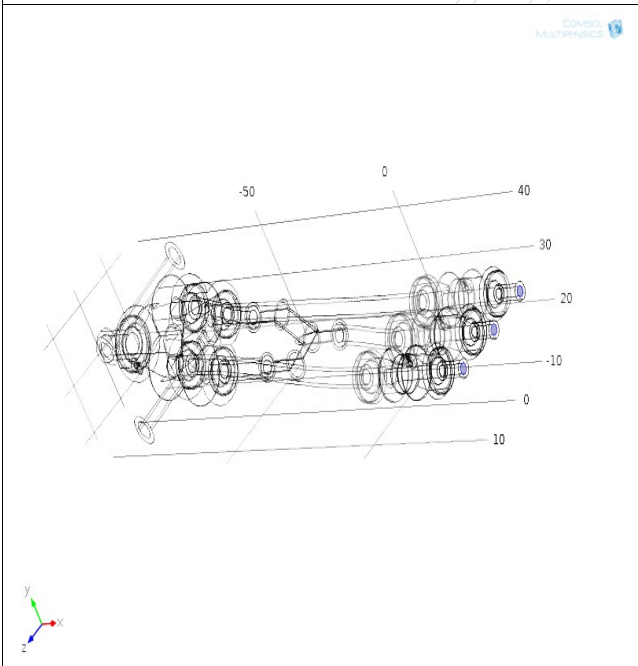
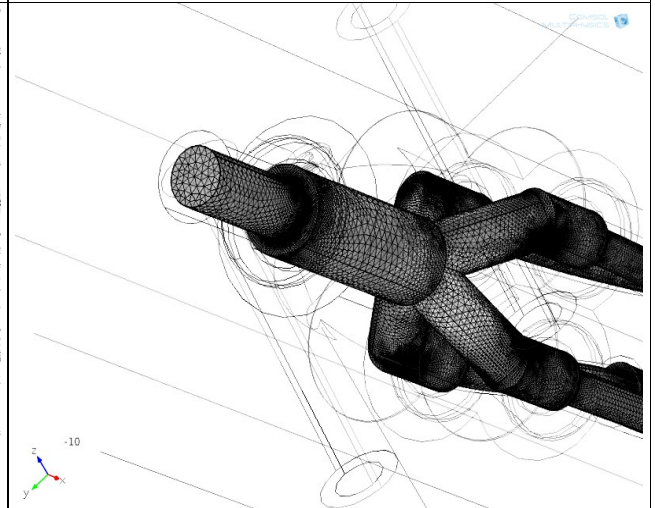
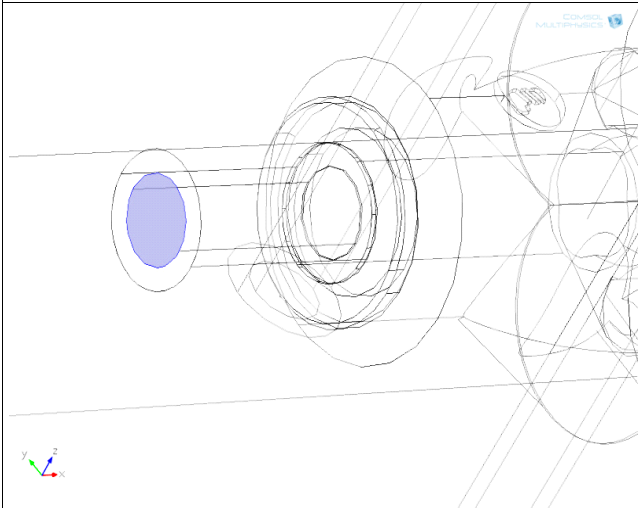
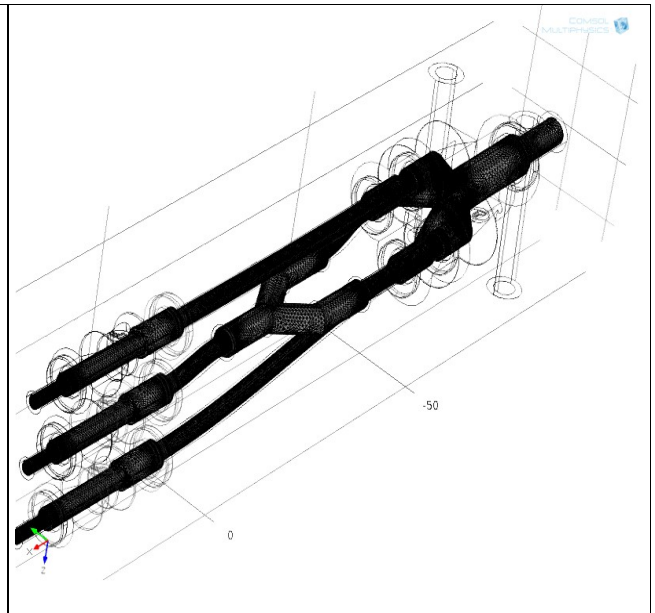
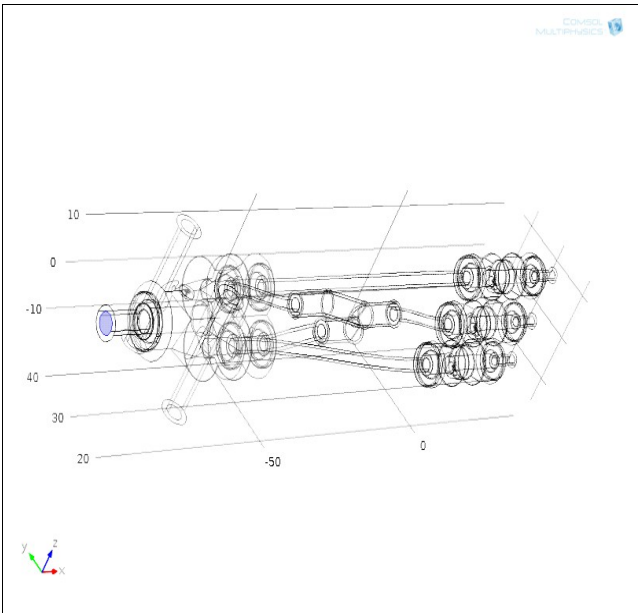
**Images(manifold, Argon, laminar flow)**

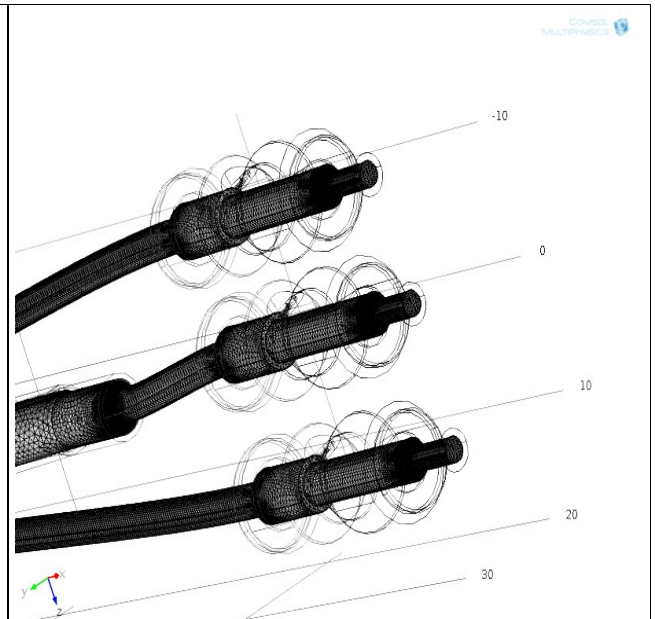
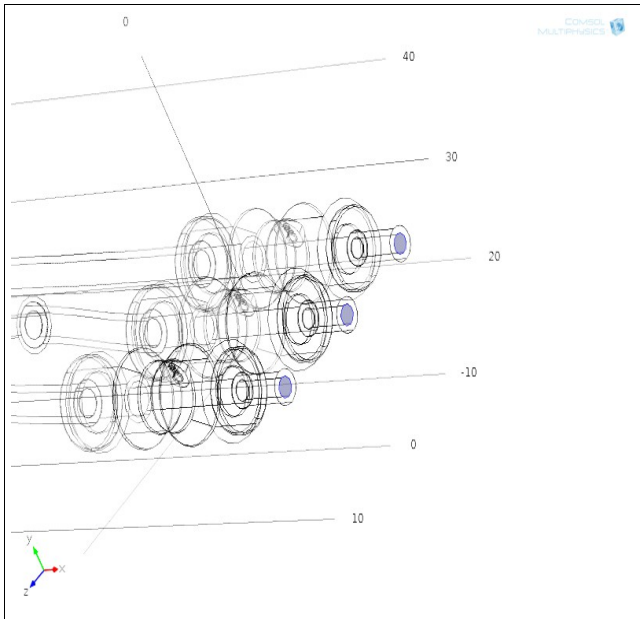
**MESH**

**Fluid properties – inlet – outlet**

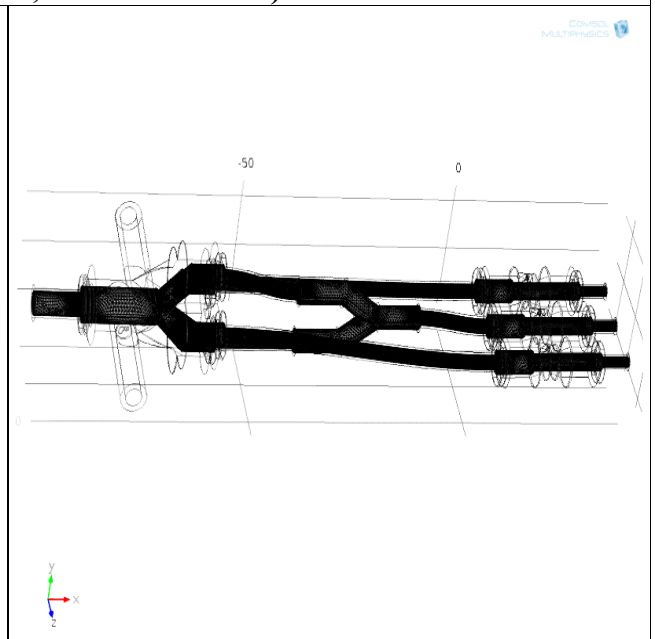
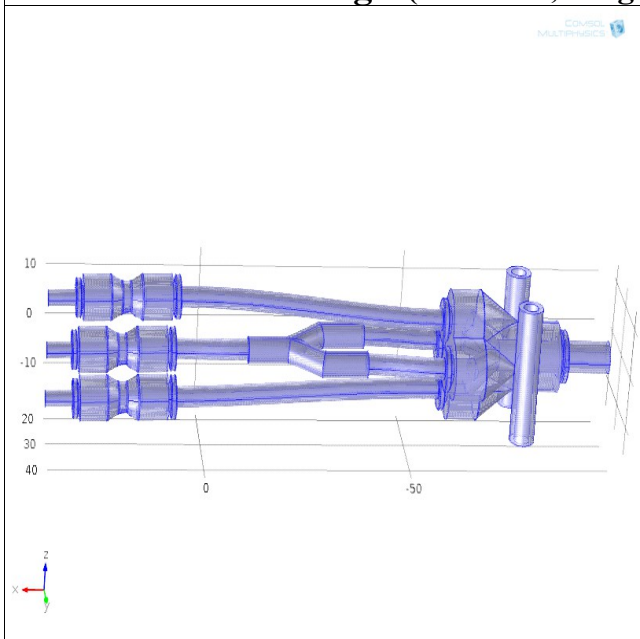


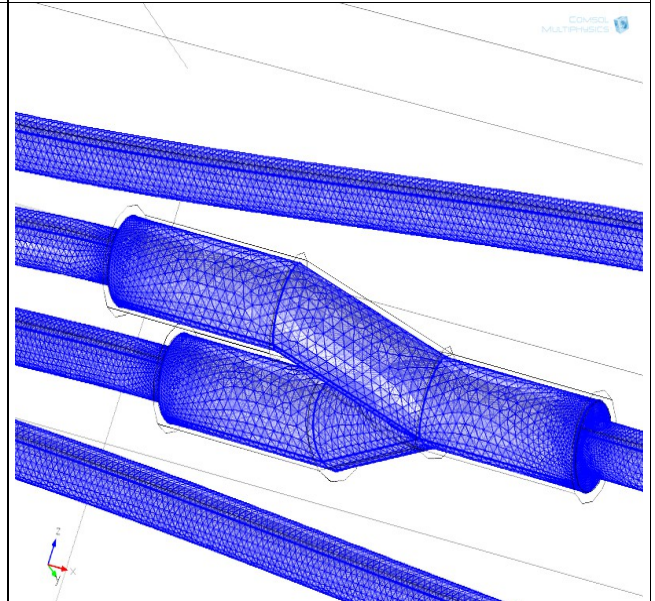
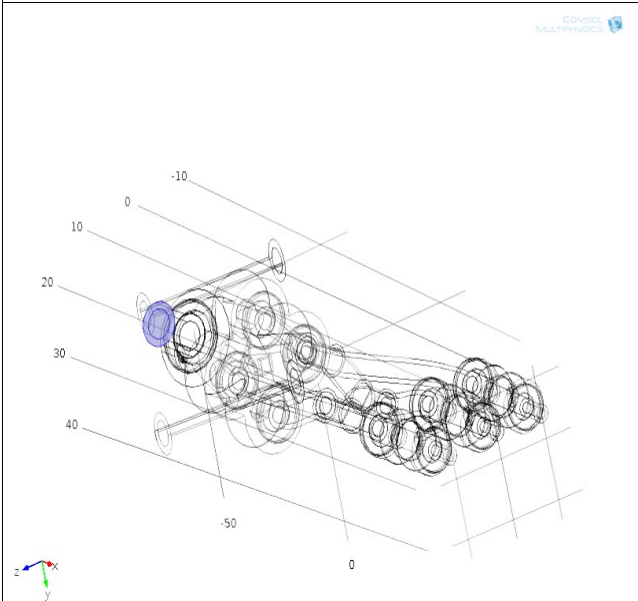
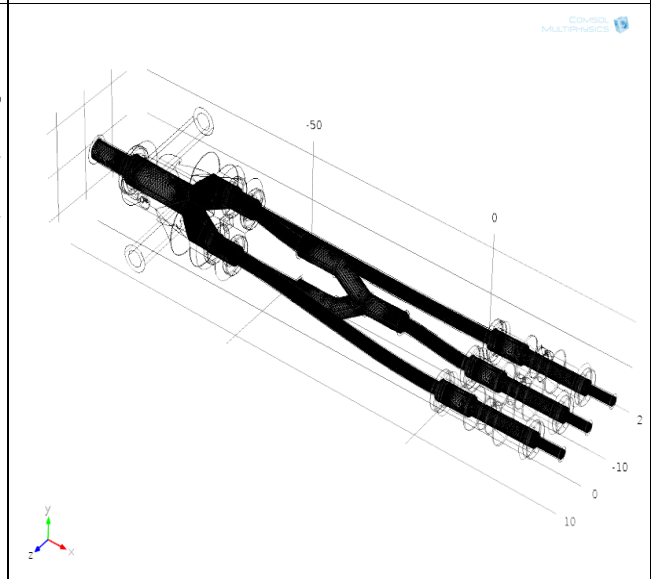
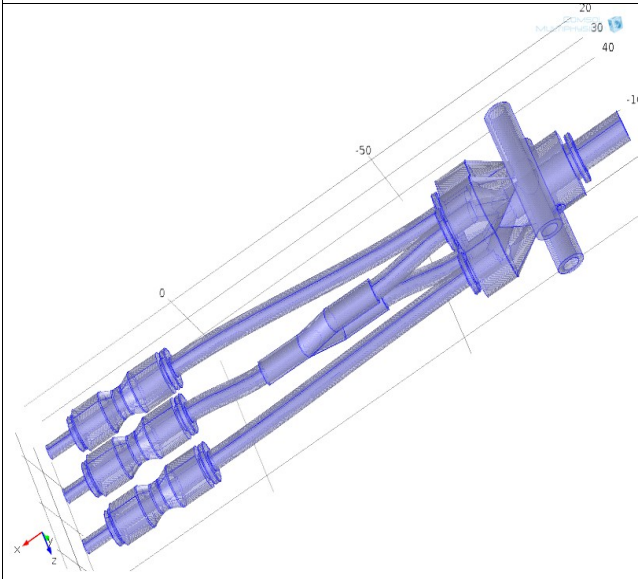
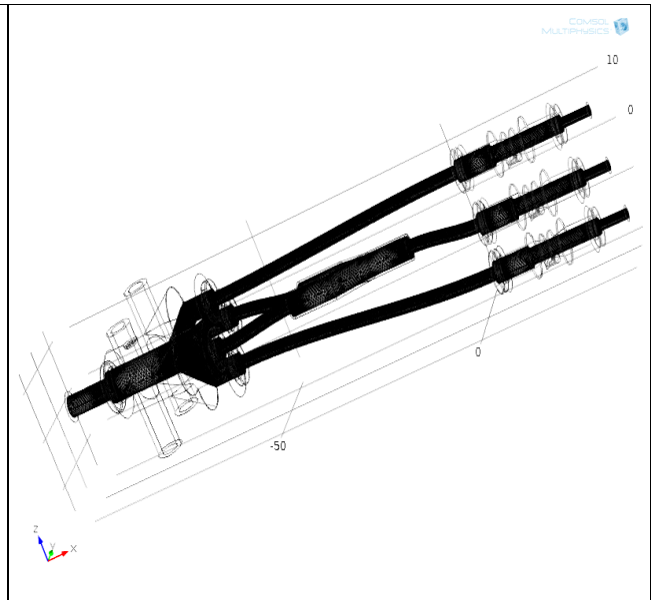
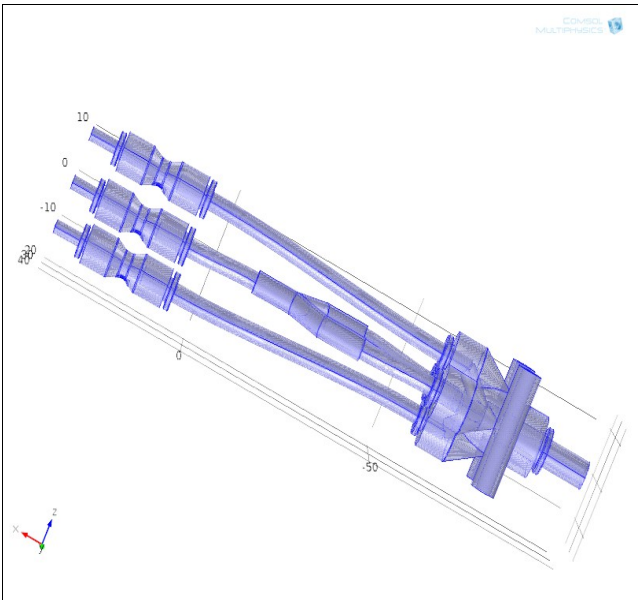


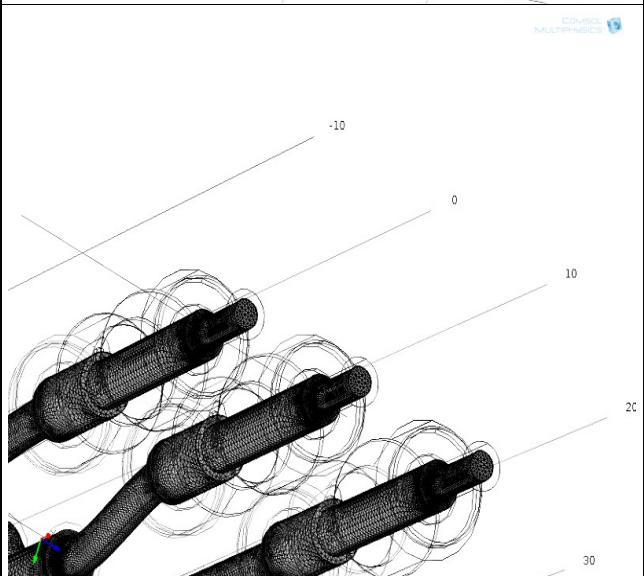
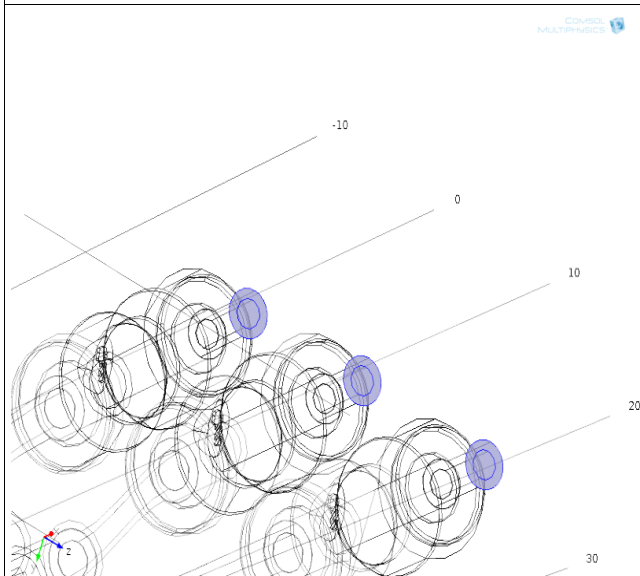
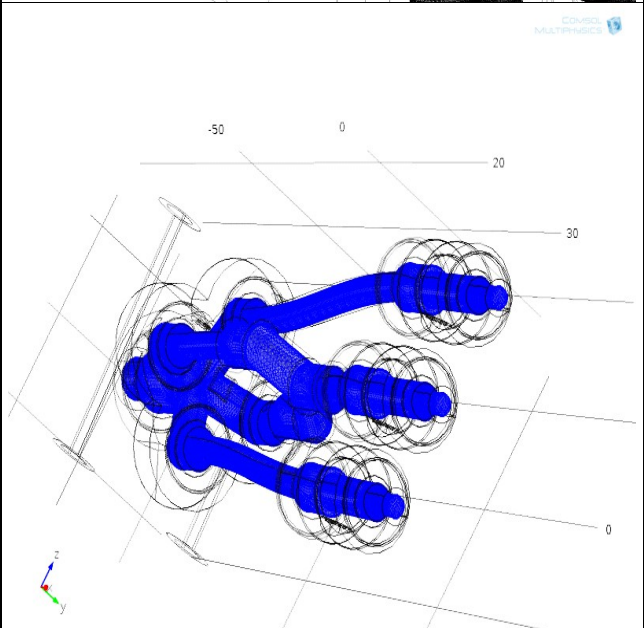
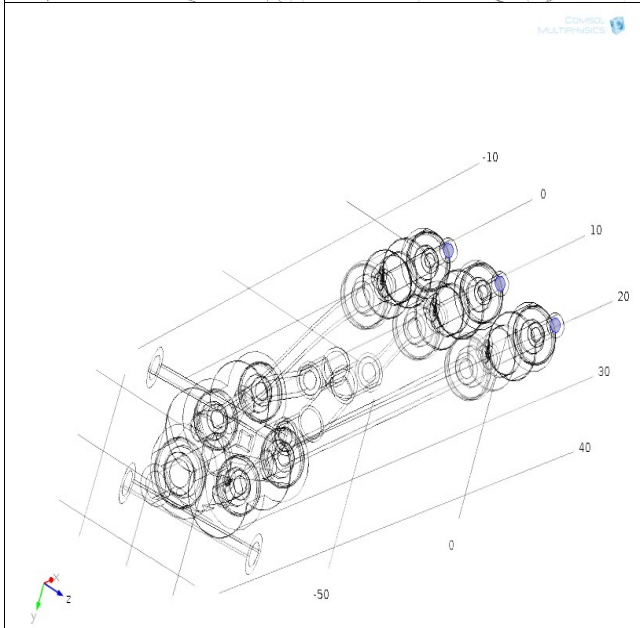
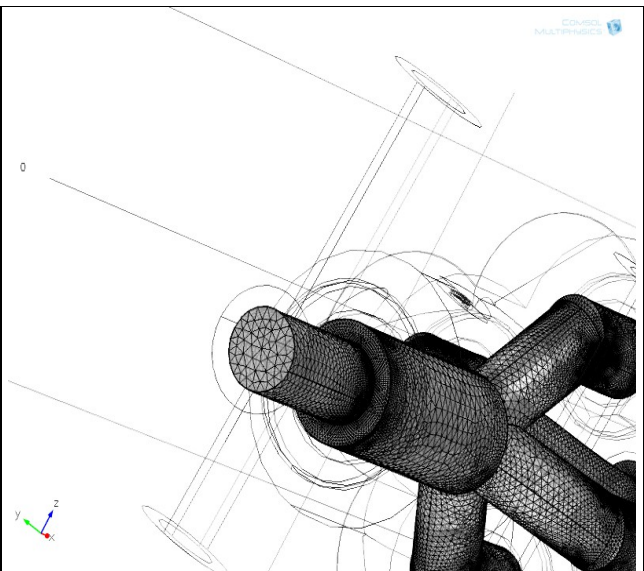
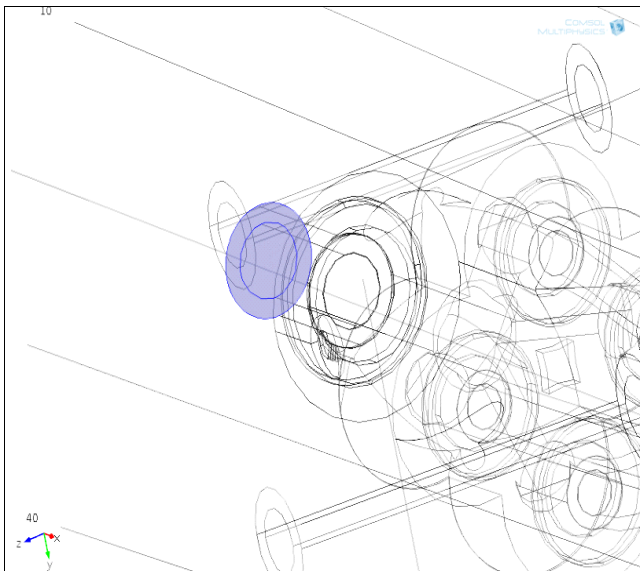




**Images(manifold, Argon, turbulent flow)**







## **BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] "Large Hadron Collider", book of CERN
- [2] **COMSOL MULTIPHYSICS 4.4's manual**
- [3] "Experiments in Modern Physics", book of Adrian C. Melissinos, Jim Napolitano
- [4] Καρέντζος Στάθης, "Μελέτη της παροχής του αερίου στους ανιχνευτές Micromegas". Master's thesis, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (Ε.Μ.Π.), ΑΘΗΝΑ 2013.
- [5] Κιλιντάρη Σοφία, "Ο ανιχνευτής Micromegas στο Upgrade του ATLAS για το superLHC", Σχολή Θετικών Επιστημών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη 2012.
- [6] Κασσάρας Γιώργος, "Μελέτη των παραμέτρων του ανιχνευτή MicroMeGaS και του φάσματος ενεργειακών απωλειών των κοσμικών μιονίων", Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (Ε.Μ.Π.), ΑΘΗΝΑ 2011.
- [7] Κολυβοδιάκος Ιωάννης, "Μελέτη του ανιχνευτή MicroMeGaS R11 σε συγκεκριμένες συνθήκες αναλογίας του μείγματος αερίων I. Ar - CO<sub>2</sub> = 92.8% - 7.2%, II. Ar - CO<sub>2</sub> = 80% - 20%, III. Ar - CO<sub>2</sub> = 70% - 30%", Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο(Ε.Μ.Π.), ΑΘΗΝΑ 2012.
- [8] Development of large size Micromegas detector for the upgrade of the ATLAS Muon System.
- [9] Spatial resolution and rate capability of MicroMeGaS detector, J.Derre, I.Giomataris.
- [10] Micromegas as a large microstrip detector for the COMPASS experiment.
- [11] Micro – pattern gas detector, Fabio Sauli.
- [12] The use of the MicroMeGaS technology for a new imaging system X.
- [13] Test of the spatial resolution of MicroMeGaS detectors.
- [14] MICROMEGAS: a high – granularity position – sensitive gaseous detector for high particle – flux environments.
- [15] Development and prospects of the new gaseous detector "Micromegas".
- [16] MicroMeGaS, a multipurpose gaseous detector, G.Charpak, J.Derre, Y.Giomataris, Ph.Rebourgeard.
- [17] GEM: A new concept for electron amplification in gas detectors, F. Sauli.
- [18] Fast signals and single electron detection with a MicroMeGaS photodetector.
- [19] First beam test results with MicroMeGaS, a high – rate, high – resolution detector.
- [20] New developments of Micromegas detector.
- [21] On the geometrical design of intergrated MicroMeGaS detectors.
- [22] MicroMeGaS in a bulk.
- [23] Development of a fast gaseous detector: "MICROMEGAS".

### **websites**

- [1] [www.legris.com](http://www.legris.com)
- [2] [www.cern.ch](http://www.cern.ch)
- [3] [www.google.com](http://www.google.com)
- [4] [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com)
- [5] [http://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/TDR/physics\\_tdr/printout/VolumeI.pdf](http://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/TDR/physics_tdr/printout/VolumeI.pdf)
- [6] <http://pediapress.com/books/show/large-hadron-collider-experiments-technol-bb9083ed/#>
- [7] [en.wikipedia.org/wiki/laminar\\_flow](http://en.wikipedia.org/wiki/laminar_flow)
- [8] [en.wikipedia.org/wiki/turbulent\\_flow](http://en.wikipedia.org/wiki/turbulent_flow)
- [9] [en.wikipedia.org/wiki/Reynolds\\_number](http://en.wikipedia.org/wiki/Reynolds_number)
- [10] [en.wikipedia.org/wiki/viscosity](http://en.wikipedia.org/wiki/viscosity)
- [11] [en.wikipedia.org/wiki/Fluid\\_dynamics](http://en.wikipedia.org/wiki/Fluid_dynamics)
- [12] [en.wikipedia.org/wiki/Poiseuille's\\_law](http://en.wikipedia.org/wiki/Poiseuille's_law)
- [13] [en.wikipedia.org/wiki/Reynolds\\_number](http://en.wikipedia.org/wiki/Reynolds_number)