



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

**ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ, ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΕΤΡΗΤΙΚΗΣ
ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΣΤΟΜΙΩΝ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ**

ΑΝΤΩΝΙΟΥ ΑΛΚΙΒΙΑΔΗΣ

Επιβλέπων Καθηγητής: Δ. ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΣΠΙΤΑΣ

ΑΘΗΝΑ 2021

Περίληψη

Στόχος της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη κατασκευής μιας μετρητικής διάταξης αεροδυναμικής. Πιο αναλυτικά θα παρουσιαστεί το κατασκευαστικό τμήμα της αεροσήραγγας του εργαστηρίου και θα μελετηθεί η ροή και τα φαινόμενα που επικρατούν στην κατασκευή. Σκοπός της μετρητικής διάταξης είναι να έχει τη δυνατότητα να λαμβάνει μετρήσεις ταχύτητας, πίεσης και θερμοκρασίας του αέρα με τελικό σκοπό την κατασκευή τεχνικών φυλλαδίων για στόμια κλιματισμού.

Η συγκεκριμένη μελέτη βασίστηκε στο κανονιστικό πλαίσιο ΕΛΟΤ - EN 12238, λαμβάνοντας υπόψη το συνδυασμό τεχνολογίας – κόστους καθώς και τα τα περιορισμένα διαθέσιμα μέσα για την υλοποίησή της προσομοίωσης. Το κανονιστικό πλαίσιο είναι ένα από τα σημαντικότερα βήματα καθώς δίνει την κατευθυντήρια γραμμή για την κατασκευή, τις απαιτήσεις και την διαδικασία λήψης μετρήσεων. Στη συνέχεια βάσει του κανονιστικού πλαισίου γίνεται ο σχεδιασμός της κατασκευής, ο οποίος πραγματοποιείται με τη χρήση υπολογιστικών προγραμμάτων τύπου CAD. Για τη συγκεκριμένη κατασκευή θα χρησιμοποιηθεί το σχεδιαστικό πρόγραμμα Solidworks για τις τρισδιάστατες απεικονίσεις και το AutoCAD για τις δισδιάστατες όψεις του χώρου.

Θα προσομοιωθεί η ροή του αέρα που λαμβάνει μέρος στη μετρητική διάταξη με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων. Η προσομοίωση γίνεται με τη βοήθεια υπολογιστικών προγραμμάτων ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη εργασία είναι το ANSYS. Τα συμπεράσματα που θα εξαχθούν από την προσομοίωση είναι ζωτικής σημασίας καθώς υποδεικνύουν φαινόμενα της ροής τα οποία πρέπει να ληφθούν υπόψη και βοηθούν στην κατάλληλη επιλογή αισθητήρων αλλά και στην υπόδειξη του σωστού τρόπου λειτουργίας τους καθώς και των σημείων στα οποία πρέπει να γίνουν οι μετρήσεις.

Κλείνοντας, θα προταθούν πιθανές αναβαθμίσεις για τη διαδικασία των προσομοιώσεων, για τη διαδικασία των πειραματικών μετρήσεων καθώς και για τον υλικοτεχνικό εξοπλισμό. Τέλος θα γίνει αναφορά σε μελλοντικές μελέτες που μπορεί να προκύψουν από την παρούσα διπλωματική.



Abstract

The object of this diplomatic thesis is the research on the design and assembly of an aerodynamics measuring array. More specifically, the construction of the wind tunnel of the measuring array will be presented. The air flow along with the phenomena taking place throughout the whole constructing process will be studied. The measuring array is manufactured so as to take measurements of the air speed, air pressure and air temperature. Those measurements will eventually provide technical data for air grills.

The present research is based on the regulatory framework EN 12238, taking into consideration the combination of technology- cost, within the limited technological means concerning the simulation. The regulatory framework is of critical importance because it defines the design requirements, the steps of the construction and the process of the measurements expected to be taken. Subsequently, the construction is designed in line with the regulatory framework using CAD software. For the aforementioned design, the designing program Solidworks is being used for the three-dimensional representations and the designing program AutoCAD is being used for the two-dimensional space representation.

Furthermore, the simulation of the air flow through the measuring array will be applied, with a view to drawing conclusions. The air flow simulation is applied using CFD analysis software. For this study, ANSYS program is used. The conclusions drawn after the simulation are essential for the selection of the right sensors and their effective operation. Those conclusions indicate the spots where the measurements should be taken, too.

Finally, suggestions for improvement and development related to the process of the simulations, the experimental measurements and the technical equipment will be given. Recommendations for future research will be arisen out of the research limitations of the dissertation as well.

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον κ. Βασίλειο Σπιτά, καθηγητή της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Μετσόβειου Πανεπιστημίου, για την ευκαιρία που μου παρείχε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα και για την καθοδήγηση του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, τον κ. Μανόπουλο Χρήστο, επίκουρο καθηγητή της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών και τον κ. Σολδάτο Αργύριο, μέλος Ε.Ε.ΔΙ.Π. της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών, τόσο για τις εύστοχες υποδείξεις τους όσο και για τις σημαντικές παρατηρήσεις τους, καθώς και τον διδάκτορα του εργαστηρίου Στοιχείων Μηχανών Νικόλαο Ρόγκα για την βοήθεια και την καθοδήγηση που μου πρόσφερε.

Επιπροσθέτως θα ήθελα να ευχαριστήσω την εταιρεία Air Grilles, και πιο συγκεκριμένα την κυρία Λιόλη Ι. και τον κύριο Σουσαλή Γ. οι οποίοι με ενέπνευσαν και με ενθάρρυναν να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα, δίνοντάς μου πρόσβαση στις σύγχρονες εγκαταστάσεις του εργαστηρίου τους στο Κορωπί.

Τέλος θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στη γυναίκα μου, Εύα, για την ηθική υποστήριξη, από την αρχή έως και το πέρας της δύσκολης αυτής διαδρομής.

Περιεχόμενα

Περίληψη	3
Abstract	4
ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	9
Δομή Εργασίας.....	15
Πρόλογος	16
Κεφάλαιο 1 ^ο	18
1.1 Στόμα κλιματισμού	18
1.2 Περιγραφή μετρητικής διάταξης αεροδυναμικής	25
1.3 Κανονιστικό πλαίσιο.....	26
1.4 Θεωρητικό υπόβαθρο.....	32
1.5 Σχεδιασμός μετρητικής διάταξης.....	39
Κεφάλαιο 2 ^ο	44
2.1 Γεωμετρικά μοντέλα	44
2.2 Προσομοίωση 1 ^η	48
2.2.1 Αποτελέσματα 1 ^{ης} προσομοίωσης.....	50
2.3 Προσομοίωση 2 ^η	53
2.3.1 Αποτελέσματα 2 ^{ης} προσομοίωσης.....	55
2.4 Προσομοίωση 3 ^η	57
2.4.1 Αποτελέσματα 3 ^{ης} προσομοίωσης.....	59
2.5 Προσομοίωση 4 ^η	61
2.5.1 Προσομοίωση I.....	64
2.5.2 Προσομοίωση II.....	67
2.5.3 Προσομοίωση III	70
2.5.4 Προσομοίωση IV	72
2.5.5 Προσομοίωση V.....	75
2.6 Προσομοίωση 5 ^η	79
2.6.1 Αποτελέσματα 5 ^{ης} προσομοίωσης.....	82
Κεφάλαιο 3 ^ο	90
3.1 Εργαστήριο αεροδυναμικής στην εταιρεία Air Grilles	90
3.2 Αρχή λειτουργίας μετρητικών	91
3.3 Επιλογή μετρητικών οργάνων.....	96
Κεφάλαιο 4 ^ο	107
4.1 Βελτιώσεις στην προσομοίωση.....	107
4.2 Προτάσεις για την εγκατάσταση.....	108

4.3 Αναβάθμιση της διαδικασίας μετρήσεων	108
Appendix	109
Βιβλιογραφία	110

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Πτώση και βεληνεκές δέσμης αέρα	16
Εικόνα 2: Στόμιο WR150 σταθερών πτερυγίων	18
Εικόνα 3: Στόμιο WS-102 με κινητά πτερύγια	18
Εικόνα 4: Στόμιο LF-201 σταθερών πτερυγίων.....	18
Εικόνα 5: Στόμιο TL-200 για τοποθέτηση σε αγωγό.....	18
Εικόνα 6: Στόμιο σχισμής SL-851-L.....	19
Εικόνα 7: Στόμιο SW για τοποθέτηση σε αγωγό.....	19
Εικόνα 8: Στόμιο CM-504 με καμπύλα πτερύγια.....	19
Εικόνα 9: Στόμιο CR-700	19
Εικόνα 10: Στόμιο Multijet.....	20
Εικόνα 11: Στόμιο SW-1400.....	20
Εικόνα 12: Στόμιο SC-1550.....	20
Εικόνα 13: Στόμιο ανοιγόμενο με φίλτρο.....	20
Εικόνα 14: Ειδική κατασκευή καμπύλου στομίου.....	21
Εικόνα 15: Καμπύλο γραμμικό στόμιο	21
Εικόνα 16: Διάταξη στομίου και plenum box.....	24
Εικόνα 17: Test duct τοποθετημένο ανάντι του στομίου.....	24
Εικόνα 18: Κάτοψη χώρου εργαστηρίου.....	25
Εικόνα 19: Πλάγια όψη χώρου - αεροσήραγγας	25
Εικόνα 20: Διάταξη διάτρητου διαφράγματος.....	32
Εικόνα 21: Μοντέλα τύρβης	33
Εικόνα 22: Κάτοψη χώρου εργαστηρίου.....	35
Εικόνα 23: Σχεδιασμός κάτοψης χώρου εργαστηρίου (σκαρίφημα).....	36
Εικόνα 24: Φυγοκεντρικός ανεμιστήρας προσαγωγής.....	37
Εικόνα 25: Ανοξείδωτος αγωγός αεροσήραγγας.....	37
Εικόνα 26: Αγωγός – plenum τα οποία θα τοποθετηθούν επί μεταλλικής βάσης.....	38
Εικόνα 27: Συνολική γεωμετρία. Τέσσερις πλάκες ισοκατανομής αέρα.....	38
Εικόνα 28: Διάταξη γραμμικοποίησης στο plenum.....	39

Εικόνα 29: Πλάκα ισοκατανομής με λεπτούς επάλληλους σωλήνες.....	39
Εικόνα 30: Συνολική γεωμετρία αεροσήραγγας.....	39
Εικόνα 31: Συνολική γεωμετρία. Όψη τομής.....	41
Εικόνα 32: 2ο γεωμετρικό μοντέλο με δύο πλάκες ισοκατανομής.....	42
Εικόνα 33: 3 ^ο γεωμετρικό μοντέλο πλάκας ισοκατανομής με οπές 20mm.....	42
Εικόνα 34: 4 ^ο γεωμετρικό μοντέλο πλάκας ισοκατανομής με λεπτούς επάλληλους σωλήνες.....	43
Εικόνα 35: 5ο γεωμετρικό μοντέλο αποτελούμενο από test duct και στόμιο.....	43
Εικόνα 36: Γεωμετρία πρώτης προσομοίωσης με χρήση του Design Modeler.....	44
Εικόνα 37: Αποτελέσματα Meshing.....	44
Εικόνα 38: Χρήση προγράμματος για εύρεση πτώσης πίεσης στο αγωγό.....	45
Εικόνα 39: Ροϊκές γραμμές πρώτης προσομοίωσης.....	46
Εικόνα 40: Διάγραμμα επαναλήψεων.....	47
Εικόνα 41: Ροϊκές γραμμές τοπικά της μετρητικής διάταξης.....	48
Εικόνα 42: Γεωμετρικό μοντέλο δεύτερης προσομοίωσης.....	49
Εικόνα 43: Αποτελέσματα meshing	51
Εικόνα 44: Ροϊκές γραμμές (πλαϊνή όψη).....	51
Εικόνα 45: Ροϊκές γραμμές (όψη υπό γωνία).....	51
Εικόνα 46: Ταχύτητα εξόδου.....	52
Εικόνα 47: Γεωμετρικό μοντέλο 3ης προσομοίωσης.....	53
Εικόνα 48: Αποτελέσματα Meshing	54
Εικόνα 49: Ροϊκές γραμμές (πλαϊνή όψη).....	55
Εικόνα 50: Ροϊκές γραμμές (άνω όψη)	56
Εικόνα 51: Προφίλ ταχύτητας εξόδου	56
Εικόνα 52: Πλάκα ισοκατανομής με καλαμάκια.....	58
Εικόνα 53: Γεωμετρία προσομοιώσεων I, II, III, IV, V.....	58
Εικόνα 54: Γεωμετρικό μοντέλο κοινό.....	59
Εικόνα 55: Ορισμός διεπιφανειών 4ου τεταρτημορίου.....	59
Εικόνα 56: Διεπιφάνειες προσομοιώσεων I,II,III,IV.....	60

Εικόνα 57: Ροϊκές γραμμές.....	61
Εικόνα 58: Προφίλ ταχύτητας εξόδου.....	62
Εικόνα 59: Ροϊκές γραμμές (όψη υπό γωνία).....	64
Εικόνα 60: Ροϊκές γραμμές (πλάγια όψη).....	64
Εικόνα 61: Προφίλ ταχύτητας εξόδου.....	64
Εικόνα 62: Ροϊκές γραμμές.....	66
Εικόνα 63: Προφίλ ταχύτητας εξόδου.....	67
Εικόνα 64: Ροϊκές γραμμές (πλάγια όψη).....	69
Εικόνα 65: Ροϊκές γραμμές (όψη υπό γωνία).....	69
Εικόνα 66: Προφίλ ταχύτητας εξόδου.....	69
Εικόνα 67: Ροϊκές γραμμές.....	71
Εικόνα 68: Ροϊκές γραμμές (όψη υπό γωνία).....	72
Εικόνα 69: Προφίλ ταχύτητας εξόδου.....	72
Εικόνα 70: Επιφάνειες επιρροής	74
Εικόνα 71: Γεωμετρία S^{15} προσομοίωσης.....	75
Εικόνα 72: Διακριτοποίηση πλέγματος πλάγια όψη.....	76
Εικόνα 73: Διακριτοποίηση πλέγματος άνω όψη.....	77
Εικόνα 74: Ροϊκές γραμμές πλάγια όψη.....	78
Εικόνα 75: Ροϊκές γραμμές αριστερή όψη.....	78
Εικόνα 76: Προφίλ ταχύτητας εισόδου.....	78
Εικόνα 77: Χαρτογράφηση ταχύτητας εξόδου.....	79
Εικόνα 78: Σημεία μετρήσεων στο χώρο.....	80
Εικόνα 79: Σημεία μετρήσεων – χαρτογράφηση ταχύτητας.....	80
Εικόνα 80: Διορθωμένη γωνία λήψης μετρήσεων στο άξονα στο επίπεδο xz.....	82
Εικόνα 81: Διορθωμένη γωνία λήψης μετρήσεων στο άξονα στο επίπεδο yz.....	82
Εικόνα 82: L pitot tube.....	89
Εικόνα 83: U pitot tube.....	89
Εικόνα 84: Σωλήνας Prandtl.....	90

Εικόνα 85: Μετατροπή αναλογικού σε ψηφιακό σήμα.....	91
Εικόνα 86: Διαδικασία ψηφιοποίησης μετρήσεων.....	92
Εικόνα 87: Debimo blades pitot tube.....	92
Εικόνα 88: Εγκατάσταση Debimo blades σε αγωγό.....	93
Εικόνα 89: Λειτουργία Debimo blades	94
Εικόνα 90: αισθητήριο PT 100	95
Εικόνα 91: Αντιστάθμιση μετρήσεων.....	95
Εικόνα 92: Αισθητήριο SF50	95
Εικόνα 93: Μεταδότης CP212.....	96
Εικόνα 94: Αισθητήριο SVO omnidirectional.....	97
Εικόνα 95: Αισθητήριο SVS 14.....	98
Εικόνα 96: Μεταδότης C310-BO.....	99
Εικόνα 97: Μετρητική διάταξη αεροσύραγγας	100
Εικόνα 98: Μετρητική διάταξη αεροσύραγγας (πλάγια όψη).....	101
Εικόνα 99: Πλάκες ισοκατανομής στο plenum box.....	102
Εικόνα 10015: Πλάκες ισοκατανομής στο plenum box.....	102

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Συσχέτιση ταχύτητας Vt αέρα με εφαρμογές αερισμού.....	18
Πίνακας 2: Συσχέτιση ταχύτητας εξόδου στομίου (V_k) με εφαρμογές κλιματισμού	21
Πίνακας 3: Επιτρεπτά όρια θορύβου	21
Πίνακας 4: Απαίτηση ακρίβειας μετρητικών παροχής αέρα.....	27
Πίνακας 5: Εύρος μέτρησης και βαθμονόμηση μετρητικών πίεσης	27
Πίνακας 6: Γράφημα παροχής – στατικής πίεσης ανεμιστήρα	37
Πίνακας 7: Πίνακας τιμών για έξοδο πρώτης προσομοίωσης	51
Πίνακας 8: Πίνακας αποτελεσμάτων δεύτερης προσομοίωσης	56
Πίνακας 9: Πίνακας αποτελεσμάτων 3 ^{ης} προσομοίωσης.....	61
Πίνακας 10: Πίνακας εισόδου προσομοίωσης I	66
Πίνακας 11: Πίνακας αποτελεσμάτων προσομοίωσης I	66
Πίνακας 12: Προφίλ εισόδου προσομοίωσης II	69
Πίνακας 13: Αποτελέσματα προσομοίωσης II.....	69
Πίνακας 14: Προφίλ εισόδου προσομοίωσης III	71
Πίνακας 15: Αποτελέσματα εξόδου προσομοίωσης III	72
Πίνακας 16: Προφίλ εισόδου προσομοίωσης IV	74
Πίνακας 17: Αποτελέσματα εξόδου προσομοίωσης IV.....	74
Πίνακας 18: Προφίλ εισόδου προσομοίωσης V	77
Πίνακας 19: Αποτελέσματα προσομοίωσης V	77
Πίνακας 20: Πίνακας ταχυτήτων εξόδου	79
Πίνακας 21: Πίνακας αποτελεσμάτων για τις πρώτες τέσσερις μετρήσεις	85
Πίνακας 22: Πίνακας γωνιών pitot tube	85
Πίνακας 23: Πίνακας αποτελεσμάτων 5 ^{ης} προσομοίωσης.....	87
Πίνακας 24: Τεχνικό φυλλάδιο στομίου	88

Δομή Εργασίας

Η εργασία χωρίζεται σε τέσσερα μέρη:

1^ο Κεφάλαιο: Μελέτη και σχεδιασμός του έργου.

- 1.1 Εισαγωγή στα στόμια
- 1.2 Περιγραφή εργαστηρίου
- 1.3 Κανονιστικό πλαίσιο
- 1.4 Θεωρητικό υπόβαθρο
- 1.5 Σχεδιασμός χώρου – σχεδιασμός των επιμέρους components (fan, pipe, box, grilles)

2^ο Κεφάλαιο: Προσομοίωση της ροής του αέρα στο τούνελ και εξαγωγή συμπερασμάτων.

- 2.1 Γεωμετρικά μοντέλα
- 2.2 Προσομοίωση 1^η
- 2.3 Προσομοίωση 2^η
- 2.4 Προσομοίωση 3^η
- 2.5 Προσομοίωση 4^η
- 2.6 Προσομοίωση 5^η

3^ο Κεφάλαιο: Τεχνολογικός εξοπλισμός έργου.

- 3.1 Βασικές αρχές λειτουργίας μετρητικών
- 3.2 Παρουσίαση μετρητικών που θα εγκατασταθούν
- 3.3 Συνολική παρουσίαση έργου - εγκατάστασης

4^ο Κεφάλαιο: Βελτιώσεις και προτάσεις

- 4.1 Βελτιώσεις για την προσομοίωση
- 4.2 Προτάσεις για την εγκατάσταση
- 4.3 Αναβάθμιση της διαδικασία μετρήσεων

Πρόλογος

Από τις απαρχές των πρώτων οργανωμένων κοινωνιών του ανθρώπου δημιουργήθηκε η ανάγκη για χρήση τυποποιημένων μέτρων και εργαλείων που θα εξυπηρετούσαν την κατασκευή κτηρίων και όπλων, την συλλογή και εμπορία τροφής και τους εδαφικούς διαχωρισμούς. Η πρώτη χρήση προτύπων μέτρησης χρονολογείται στο 3.000 π.Χ από τους αρχαίους Αιγύπτιους, όταν καθορίστηκε η πρώτη πρότυπη μονάδα μέτρησης μήκους βάσει του Αιγυπτιακού Βασιλικού Πήχη, ο οποίος ήταν ίσος με το μήκος από τον αγκώνα έως την άκρη του μεσαίου δακτύλου του εκάστοτε κυβερνώντος Φαραώ. Αντίγραφα του προτύπου αποτυπώνονταν σε γρανίτη και ξύλο με σκοπό να εφαρμοστούν σε αρχιτεκτονικά και κατασκευαστικά έργα. Καθότι το ανθρώπινο σώμα αποτέλεσε την πρωταρχική πηγή των πρώτων συστημάτων μέτρησης, οι συγκεκριμένες μονάδες μέτρησης, όπως η παλάμη, ο βραχίονας και το ανθρώπινο βήμα ονομάστηκαν «ανθρωπομετρικές». Την ίδια περίπου χρονική περίοδο στην Μεσοποταμία, χρησιμοποιούνταν το πόδι ενός αγάλματος του κυβερνήτη της πόλης Lagash για την μέτρηση μήκους, ενώ για την μέτρηση μεγαλύτερων αποστάσεων επινοήθηκαν και άλλες μονάδες μέτρησης, όπως η απόσταση βολής πέτρας, η περίοδος ηλίου ή σελήνης και η ημερήσια διαδρομή ενός πεζού. Ήταν αναμενόμενο, έτσι, να αναπτυχθούν διαφορετικά συστήματα μέτρησης ανά τον κόσμο και να προκληθούν λόγω αυτής της ανομοιομορφίας προβλήματα στις ανθρώπινες συναλλαγές (Δούκας, 2005).

Οι σημαντικότερες κατασκευές της αρχαιότητας λειτούργησαν ως έργα-εργαστήρια όπου εκεί εφαρμόστηκαν καινοτόμες για την εποχή ιδέες και τεχνικά μέσα που εξελίσσονταν με την πάροδο του έργου. Ένα από τα μεγαλύτερα κατασκευαστικά έργα για την επιστήμη της Μετρολογίας ήταν ο Παρθενώνας της Αθήνας (447-433 π.Χ), ο οποίος αποτέλεσε τον τελειότερο και μεγαλύτερο δωρικό ναό του ελληνικού κόσμου. Εφαρμόστηκαν τεχνικές λάξευσης μαρμάρου με σχολαστική ακρίβεια, αλλά η τελειότητα της κατασκευής οφείλεται κυρίως στις γνώσεις των αρχαίων λιθοξόνων και μεταλλουργών. Επόμενο ορόσημο αποτέλεσε η κατασκευή του Σινικού τείχους στην Κίνα (214 π.Χ), το οποίο λογίζεται ως η μεγαλύτερη σε μήκος γραμμή οχύρωσης που κατασκευάστηκε ποτέ και χτίστηκε αποκλειστικά και μόνο με χειρωνακτική εργασία. Η κατασκευή του Κολοσσαίου της Ρώμης, ήταν ένας ακόμα σταθμός της επιστήμης της Μετρολογίας, καθώς το εντυπωσιακό σύστημα ψύξης και το σύστημα εισόδου- εξόδου των θεατών επέφεραν σημαντικές κατασκευαστικές καινοτομίες. Στα πρώτα χρόνια της μετά Χριστών εποχής, παρατηρείται εκρηκτική εξέλιξη των επιστημών ολόπλευρα και ειδικότερα της Μετρολογίας, αρχής γενομένης από την θέσπιση της μίας ίντσας της τότε αποχής από τον Βασιλιά Εδουάρδο II της Αγγλίας και έπειτα, από την κατασκευή του πρώτου θερμόμετρου από τον Ιταλό Galileo Galilei, την πρώτη επιτυχή μέτρηση της ταχύτητας του φωτός του Δανού Olaus Roemer και την καθιέρωση της γνωστής θερμομετρικής κλίμακας από τον Σουηδό Anders Celsius .

Κατά την εξέλιξη της ιστορίας αναδύεται ένα ακόμη ορόσημο στην επιστήμη της Μετρολογίας, η ανάδειξη των όρων της ακρίβειας και της αξιοπιστίας. Με το πέρασμα του χρόνου, ο στόχος της εκάστοτε μέτρησης δεν περιορίστηκε στον προσδιορισμό μιας αριθμητικής τιμής του μετρούμενου μεγέθους, αλλά επεκτάθηκε στον προσδιορισμό της βεβαιότητας της μέτρησης αυτής. Κατόπιν, μελετήθηκαν εντατικά οι παράγοντες που επηρεάζουν την αξιοπιστία των μετρήσεων και αναπτύχθηκε η μεθοδολογία διασφάλισης αξιοπιστων αποτελεσμάτων μετρήσεων, καθώς επίσης και τα πρότυπα υψηλότερης ακρίβειας. Για την διασφάλιση της αξιοπιστίας των μετρήσεων, δημιουργήθηκε το 1799 στο Παρίσι το Δεκαδικό Μετρητικό Σύστημα το οποίο αποτελείται από δύο πρότυπα. Στη συνέχεια, το 1960 θεσμοθετήθηκε το Διεθνές Σύστημα Μονάδων (International Systems of Units – S.I.System) το οποίο αποτελούνταν από έξι θεμελιώδεις μονάδες για την μέτρηση του μήκους, της μάζας, του χρόνου, της ηλεκτρικής έντασης, της θερμοκρασίας και της φωτεινότητας. Το σημερινό Διεθνές Σύστημα Μονάδων αποτελείται από επτά βασικές μονάδες, από τις οποίες παράγονται όλες οι άλλες (Κοκκώνης, 2010).

Μέσω της σύντομης αυτής ιστορικής αναδρομής είναι προφανές ότι οι μετρήσεις έπαιξαν ρόλο μείζονος σημασίας στην εξέλιξη του ανθρώπινου πολιτισμού και η ανάγκη για την οργάνωσή τους ξεκίνησε ταυτόχρονα με την οργάνωση των πρώτων κοινωνιών, γι' αυτό και η Μετρολογία κατατάσσεται σε μία από τις αρχαιότερες επιστήμες στον κόσμο. Απώτερος σκοπός της είναι η δημιουργία ενός κώδικα επικοινωνίας που επιτρέπει στους ανθρώπους να συγκρίνουν τα φυσικά μεγέθη, ενώ παράλληλα οι γνώσεις των αρχών της Μετρολογίας επιτρέπουν την πρόοδο σε όλες τις άλλες επιστήμες και τις εφαρμογές τους. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση η Μετρολογία διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες, την Επιστημονική, την Βιομηχανική και την Νομική. Η Επιστημονική Μετρολογία στοχεύει στην οργάνωση, την ανάπτυξη και την τήρηση των προτύπων μέτρησης. Η Βιομηχανική μετρολογία έχει ως αντικείμενο την ποιοτική λειτουργία των μετρητικών οργάνων στην βιομηχανία, την παραγωγή και τις δοκιμές, ενώ η Νομική Μετρολογία αποσκοπεί στην ακρίβεια των μετρήσεων που σχετίζονται με την διαφάνεια των οικονομικών συναλλαγών, την υγεία και την ασφάλεια των πολιτών. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι το κόστος των μετρήσεων στις Ευρωπαϊκές χώρες αποτελεί περίπου το 6% του Ακαθάριστου Εθνικού Προϊόντος (ΑΕΠ) .

Για να αντιληφθεί κανείς την επιστημονική και πρακτική αξία των μετρήσεων, αρκεί να αναλογιστεί τους τομείς της καθημερινής μας δραστηριότητας που καθορίζονται από μετρήσεις. Η διακίνηση των καταναλωτικών αγαθών στην αγορά και το εμπόριο με βάση το μέγεθος και την ποσότητά τους, οι μετρήσεις και οι ρυθμίσεις των συσκευών που εφαρμόζονται στην Ιατρική, οι μετρήσεις στο περιβάλλον, ο έλεγχος των τροφίμων και των καυσίμων, ο έλεγχος της ποιότητας στη σύγχρονη βιομηχανία, οι μετρήσεις των κυμάτων σε περιπτώσεις σεισμών είναι μόνο μερικά από τα πεδία στα οποία εφαρμόζονται οι αρχές της επιστήμης της Μετρολογίας. Η επίδραση των μετρήσεων διατρέχει όλο το φάσμα των ανθρώπινων αναγκών, με αποτέλεσμα να καθορίζει το βιοτικό μας επίπεδο, αλλά και να διαμορφώνει την ανθρώπινη παγκόσμια ιστορία (Δούκας, 2005).

Ο διεπιστημονικός και πολυδιάστατος χαρακτήρας της Μετρολογίας αποδεικνύεται από την αμφίδρομη σχέση που διαμορφώνει το Εθνικό Μετρολογικό Σύστημα της κάθε χώρας με το τεχνολογικό, οικονομικό και βιομηχανικό της επίπεδο. Η σημερινή εφαρμογή των αρχών της Μετρολογίας συγκροτήθηκε μέσω της εντεινόμενης οικονομικής παγκοσμιοποίησης, του διεθνούς εμπορικού ανταγωνισμού και της αυξανόμενης ανάγκης παροχής αξιόπιστων μετρολογικών υπηρεσιών (Δούκας, 2005).

Κεφάλαιο 1°

1.1 Στόμια κλιματισμού

Τα στόμια κλιματισμού αποτελούν τεχνολογικά προϊόντα και ως τέτοια οφείλουν να φέρουν τις απαραίτητες τεχνικές προδιαγραφές. Στο στάδιο της μελέτης ενός συστήματος θέρμανσης, ψύξης ή κλιματισμού όπου γίνεται χρήση στομιών ο μελετητής πρέπει να γνωρίζει την στατική πίεση που επικρατεί στον αγωγό πριν το στόμιο, την πτώση πίεσης που οφείλεται στο στόμιο καθώς και την ταχύτητα του αέρα μετά το στόμιο.

Σκοπός των στομιών είναι η κατανομή του αέρα στο χώρο ώστε να δημιουργηθεί ο κατάλληλος συνδυασμός θερμοκρασίας, υγρασίας και κίνησης αέρα στον αεριζόμενο χώρο. Οι τιμές των μεγεθών αυτών κυμαίνονται σε συγκεκριμένα όρια και εξαρτώνται από την εκάστοτε εφαρμογή. Κύριος στόχος είναι η δημιουργία μιας ομοιόμορφης και ομαλής ατμοσφαιρικής συνθήκης ώστε όλα τα σημεία του χώρου να έχουν όσο το δυνατόν μικρότερες μεταβολές. Τοπικές μεταβολές όπως της θερμοκρασίας, ταχύτητας αέρα και κατανομής αέρα μπορεί να επιφέρουν αίσθηση δυσφορίας.

Έχει παρατηρηθεί πως μια μεταβολή της τάξης των 10°C είναι η μέγιστη δυνατή ανεκτή χωρίς παράπονα. Επίσης πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ότι αλλαγές της θερμοκρασίας επιφέρουν και αλλαγές στην ταχύτητα του αέρα. Μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα κατά 0,50 °C ισοδυναμεί με 0,08 m/s μεταβολή της ταχύτητας του.

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται τα όρια για την ταχύτητα του αέρα, βάσει της εφαρμογής του κλιματισμού – αερισμού ενός χώρου.

Ταχύτητα αέρα δωματίου V_t (m/s)	Αντίδραση ατόμων	Συνιστώμενη εφαρμογή
0 – 0,08	Παράπονα για πνιγηρή ατμόσφαιρα.	Καμία.
0,13	Η καλύτερη ταχύτητα.	Όλες οι εφαρμογές.
0,25	Αρκετά καλή κίνηση του αέρα. Η τιμή των 0,25 m/s πλησιάζει την μέγιστη ανεκτή για καθισμένα άτομα.	Όλες οι εφαρμογές.
0,33	Δυσμενής. Ελαφριά χαρτιά παρασύρονται από το γραφείο.	Οι περισσότερες εφαρμογές.
0,38	Άνω όριο για άτομα κινούμενα σε χώρο εργασίας.	Εμπορικά καταστήματα.
0,38 – 1,52	Οι ταχύτητες αυτές συναντώνται σε βιομηχανικές εφαρμογές.	Εφαρμογές απομάκρυνσης συγκεκριμένων τοπικών φορτίων η σωματιδίων

Πίνακας 1: Συσχέτιση ταχύτητας V_t αέρα με εφαρμογές αερισμού

Για να επιτευχθούν οι επιθυμητές συνθήκες πραγματοποιείται προσαγωγή και επιστροφή αέρα στο χώρο μέσω των κατάλληλων στομιών κλιματισμού, τα οποία είναι κατασκευασμένα ώστε να ρυθμίζουν την παροχή, την ταχύτητα και τέλος την κατεύθυνση του αέρα.

Ο αέρας εξέρχεται από τα στόμια σε ταχύτητες πολύ μεγαλύτερες και θερμοκρασίες διαφορετικές από τις ανεκτές στον χώρο. Χάρη στην διάχυση η ταχύτητα και οι θερμοκρασιακές διαφορές μειώνονται σταδιακά, μέχρι να φτάσουν στα επιθυμητά όρια. Το φαινόμενο το οποίο λαμβάνει χώρα είναι πρακτικά η μίξη δύο ρευμάτων αέρα, ώστε να επιτευχθούν οι τελικές συνθήκες. Ο αέρας από την έξοδο του στομιού παρασύρει τον ήδη υπάρχοντα αέρα στο χώρο και δημιουργεί ένα νέο ρεύμα.

Τα μεγέθη τα οποία μας βοηθούν στην κατάλληλη επιλογή στομιών για την εκάστοτε εφαρμογή είναι τα παρακάτω:

1. Παροχή αέρα

Το μέγεθος του στομιού καθορίζεται κυρίως από την παροχή αέρα στην οποία λειτουργεί στις κατάλληλες συνθήκες. Η απαιτούμενη παροχή σε συνδυασμό με το βεληνικές, την πτώση πίεσης και την επιτρεπόμενο θόρυβο καθορίζουν το μέγεθος και το είδος του στομιού.

2. Βεληνικές

Ως βεληνικές ορίζεται η οριζόντια απόσταση από το στόμιο ως το σημείο στο οποίο η συνιστώσα της ταχύτητας του αέρα στον άξονα ροής δεν υπερβαίνει την V_t , όπου η V_t εξαρτάται από την εφαρμογή του εκάστοτε στομιού. Η τιμή αυτή κυμαίνεται μεταξύ 0.2 m/sec και 0.5 m/sec .

Το βεληνικές βρίσκεται σε άμεση εξάρτηση με την ταχύτητα του αέρα. Η μείωση της ταχύτητας του αέρα είναι αποτέλεσμα της ανάμιξης του αέρα προσαγωγής (πρωτεύον ρεύμα) με τον αέρα που βρίσκεται μέσα στο δωμάτιο (δευτερεύον ρεύμα).

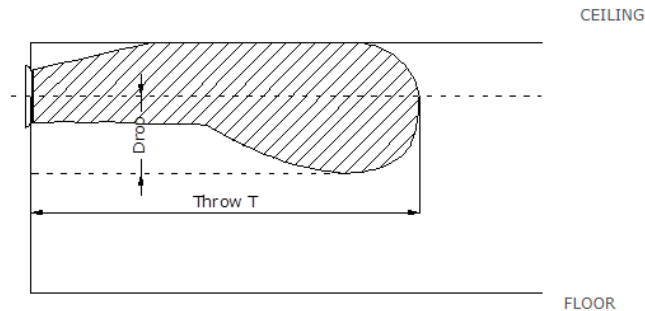
Συμπερασματικά αποδεικνύεται πως το βεληνικές μειώνεται καθώς η περίμετρος ενός στομιού αυξάνεται, όταν συγκρίνονται δύο στόμια με το ίδιο εμβαδόν.

3. Πτώση

Ως πτώση ορίζεται η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ άξονα στομιού και της εγκάρσιας τομής του ρεύματος αέρα στο τέλος του βεληνικού.

Η πτώση οφείλεται κυρίως στη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος ρεύματος. Καθώς ο αέρας προσαγωγής είναι ψυχρότερος διαθέτει μεγαλύτερη πυκνότητα από τον αέρα του δωματίου με αποτέλεσμα να κατέλθει σαν βαρύτερος που είναι. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται επίσης και στη μετατροπή της δυναμικής πίεσης σε στατική.

Η πτώση είναι ανάλογη της θερμοκρασιακής διαφοράς ΔT μεταξύ της ψυχρής δέσμης και του αέρα του δωματίου και του βεληνικού, ενώ είναι αντιστρόφως ανάλογη με την ταχύτητα εξόδου από το στόμιο V_k . Αν δεν υπάρχει θερμοκρασιακή διαφορά, το ρεύμα αέρα παρουσιάζει μικρότερη πτώση, λόγω της κατακόρυφης διεύρυνσης του, καθώς συμπαρασύρει τον αέρα του δωματίου.



Εικόνα 16: Πτώση και βεληνεκές δέσμης αέρα

4. Διάχυση και απόκλιση

Ο αέρας που βγαίνει από ένα στόμιο, όταν δεν συναντά εμπόδια στην διαδρομή του, παίρνει την μορφή συμμετρικής δέσμης (κατά κανόνα κωνικής). Αν για μία δεδομένη απόσταση από το στόμιο θεωρηθεί μία διατομή κάθετη προς τον άξονα συμμετρίας της δέσμης, ορίζεται η απόκλιση (s) ως η μέγιστη απόσταση από τον άξονα συμμετρίας της δέσμης. Διάχυση (h) ονομάζεται η συνολική μέγιστη απόσταση (Διάχυση = 2 x Απόκλιση).

Η απόσταση των κέντρων δύο παρακείμενων στομιών πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση της διάχυσης του ενός στομιού για το απαιτούμενο βεληνεκές. Η απόσταση του κέντρου ενός στομιού από τον παρακείμενο τοίχο πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση της απόκλισης του στομιού για το απαιτούμενο βεληνεκές.

5. Πτώση πίεσης αέρα

Τα στόμια προκαλούν μία πτώση πίεσης του αέρα που πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν στον υπολογισμό της απαιτούμενης πτώσης πίεσης του ανεμιστήρα. Η διέλευση του αέρα μέσα από ένα στόμιο συνεπάγεται με μία πτώση πίεσης η οποία οφείλεται στην μετατροπή της ενέργειας του αέρα σε ταχύτητα και σε φαινόμενα τριβής στο ίδιο το στόμιο.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στα στόμια απαγωγής, καθώς η αναγκαία διαφορά πίεσης για να ωθήσει μία μάζα αέρα σε ένα άνοιγμα πρέπει να επαρκεί και για να την επιταχύνει από την μικρή ταχύτητα που έχει μέσα στον χώρο, μέχρι την ταχύτητα του αεραγωγού στο οποίο είναι προσαρμοσμένο το στόμιο.

6. Ταχύτητα εξόδου, Τελική ταχύτητα βεληνεκούς και Ταχύτητα δωματίου

Ταχύτητα εξόδου V_k ονομάζεται η ταχύτητα του αέρα που διέρχεται από το στόμιο, μετρούμενη σε απόσταση 2,5 cm από το στόμιο. Τελική ταχύτητα βεληνεκούς V_t ονομάζεται η μέγιστη ταχύτητα στο όριο συγκεκριμένου βεληνεκούς, ενώ ταχύτητα δωματίου V_r ονομάζεται η ταχύτητα του αέρα μέσα στον χώρο. Η ταχύτητα δωματίου είναι αυτή που επηρεάζει τις συνθήκες άνεσης και είναι συνάρτηση του βεληνεκούς (T), της τελικής ταχύτητας (V_t), της θερμοκρασιακής διαφοράς, καθώς και τυχών εμποδίων που συναντά το ρεύμα αέρα (δοκάρια, φωτιστικά σώματα, κλπ). Ο ακόλουθος πίνακας δίνει τις συνιστώμενες ταχύτητες για διάφορες εφαρμογές.

Ταχύτητα εξόδου V_k (m/s)	Εφαρμογές
1,5 – 2,5	Βιβλιοθήκες, Στούντιο
2,5 – 3,8	Κατοικίες, Γραφεία, Ξενοδοχεία
4,0	Καταστήματα, Εστιατόρια
5,0	Αίθουσες εκδηλώσεων, Γυμναστήρια
7,0	Εργοστάσια, Μεγάλα καταστήματα

Πίνακας 2: Συσχέτιση ταχύτητας εξόδου στομίου (V_k) με εφαρμογές κλιματισμού

7. Στάθμη θορύβου

Καθώς ο αέρας διέρχεται από ένα στόμιο δημιουργείται θόρυβος. Η μέτρηση θορύβου κρίνεται αναγκαία ώστε να μην υπερβαίνει τα όρια της άνεσης. Καθώς ο θόρυβος σχετίζεται με την ταχύτητα εξόδου, ο περιορισμός της ταχύτητας συγκρατεί τον θόρυβο σε ομαλά επίπεδα. Στον ακόλουθο πίνακα δίνονται ενδεικτικές τιμές για την στάθμη θορύβου, σύμφωνα με τις τεχνικές οδηγίες του TEE.

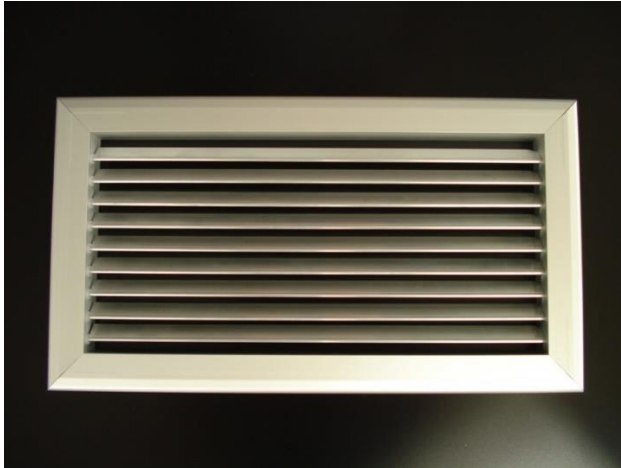
Είδος χώρου	Θόρυβος (dB(A))
Αίθουσες συναυλιών, Στούντιο ηχογραφήσεων	25
Υπνοδωμάτια σπιτιών, Αίθουσες διαλέξεων, Βιβλιοθήκες	30
Καθιστικά σπιτιών, Υπνοδωμάτια ξενοδοχείων, Δωμάτια νοσοκομείων, Γραφεία, Εστιατόρια, Κινηματογράφοι	35
Καταστήματα, Εργαστήρια, Χώροι αναμονής	40
Κουζίνες, Server room, Super market	50
Ελαφρές βιομηχανίες	60

Πίνακας 3: Επιτρεπτά όρια θορύβου

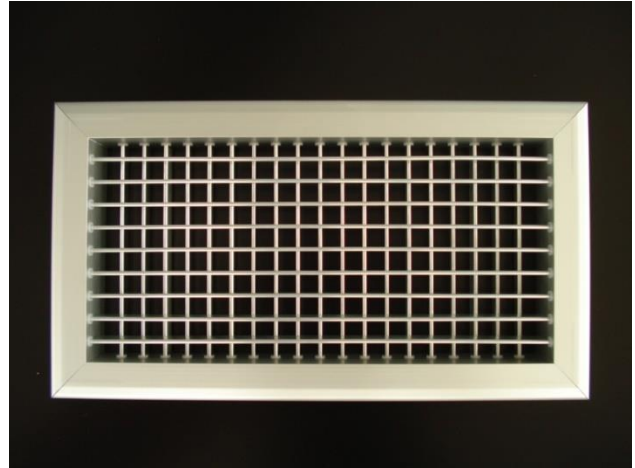
Συνεπώς σκοπός του εργαστηρίου είναι να εξάγει πίνακες όπου θα δίνει πληροφορίες για την επιλογή στομίων. Τα μεγέθη της ογκομετρικής παροχής αέρα, του βεληνεκούς, της πτώσης, της διάχυσης, της απόκλισης και της στάθμης θορύβου είναι συνάρτηση της πίεσης και της ταχύτητας του αέρα τα οποία και θα μετρώνται. Η στάθμη θορύβου αποτελεί ένα διαφορετικό φυσικό μέγεθος το οποίο απαιτεί και διαφορετικού είδους όργανα μέτρησης τα οποία δε θα αναλυθούν στην παρούσα εργασία.

Τα στόμια χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με την εφαρμογή τους. Οι κυριότερες κατηγορίες είναι οι παρακάτω:

Στόμια τοίχου:

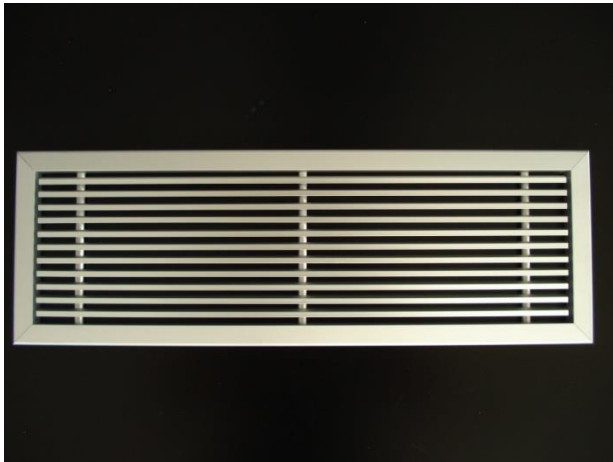


Εικόνα 17: Στόμιο WR150 σταθερών πτερυγίων

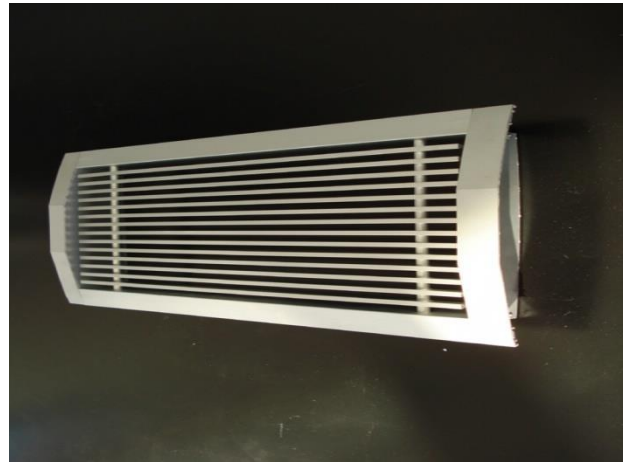


Εικόνα 18: Στόμιο WS-102 με κινητά πτερύγια

Στόμια γραμμικά:



Εικόνα 19: Στόμιο LF-201 σταθερών πτερυγίων αγωγό

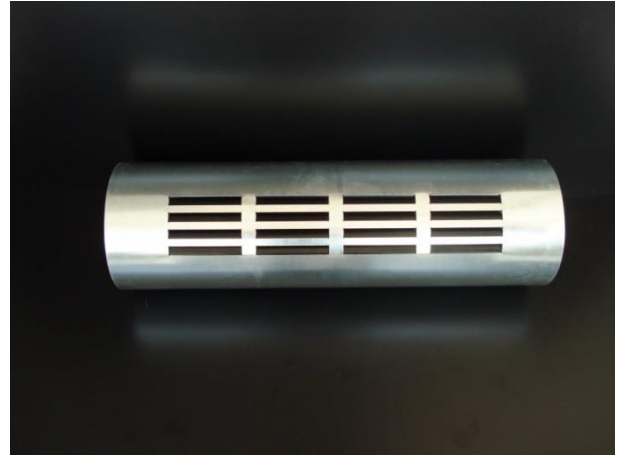


Εικόνα 20: Στόμιο TL-200 για τοποθέτηση σε

Στόμια τύπου Slot:



Εικόνα 21 : Στόμιο σχισμής SL-851-L
αγωγό



Εικόνα 22: Στόμιο SW για τοποθέτηση σε

Στόμια οροφής:

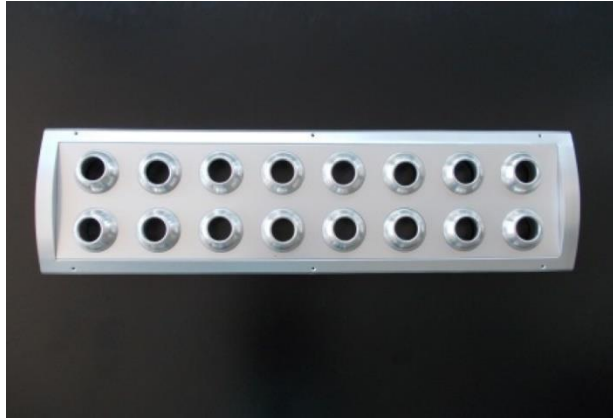


Εικόνα 23: Στόμιο CM-504 με καμπύλα πτερόγυια



Εικόνα 24: Στόμιο CR-700

Στόμια για μεγάλη ύψη:



Εικόνα 25: Στόμιο Multijet



Εικόνα 26: Στόμιο SW-1400

Στόμια για διάφορες εφαρμογές:



Εικόνα 27: Στόμιο SC-1550



Εικόνα 28: Στόμιο ανοιγόμενο με φίλτρο

Ειδικές κατασκευές στομίων για καμπύλο τοίχωμα:



Εικόνα 14: Ειδική κατασκευή καμπύλου στομίου



Εικόνα 15: Καμπύλο γραμμικό στόμιο

Όπως μπορεί εύκολα να παρατηρήσει κανείς η ποικιλία των στομίων είναι πολύ μεγάλη καθώς είναι ανάλογη των εφαρμογών και των απαιτήσεων που υπάρχουν. Κατά συνέπεια η μετρητική διάταξη πρέπει να κατασκευαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να προσφέρει την ελευθερία και τη δυνατότητα στο χρήστη να μπορεί να μετρήσει στόμια ειδικών κατασκευών.

1.2 Περιγραφή μετρητικής διάταξης αεροδυναμικής

Οι αποδόσεις των στομίων (παροχή, βεληνεκές, πτώση πίεσεως, στάθμη θορύβου, δέσμη κλπ) είναι στοιχεία απαραίτητα για την σωστή επιλογή και τη διαστασιολόγησή τους.

Το εργαστήριο θα αποτελείται από δύο αίθουσες. Στην πρώτη αίθουσα θα γίνονται μετρήσεις που αφορούν την πίεση (στατική, δυναμική), την ταχύτητα του αέρα, τη θερμοκρασία καθώς και τη στάθμη θορύβου. Η διάταξη θα προσομοιώνει την κλιματιστική εγκατάσταση μέχρι μια συγκεκριμένη απόσταση μετά την έξοδο του στομίου. Το ενδιαφέρον στην αίθουσα αυτή επικεντρώνεται στον προσδιορισμό των αναγκών ενός στομίου ώστε να παρουσιάζει την επιθυμητή συμπεριφορά στην έξοδό του.

Η διάταξη αποτελείται από δύο ανεμιστήρες προσαγωγής οι οποίοι ελέγχονται με inverter και μπορούν να παρέχουν έως και $15.000 \text{ m}^3/\text{hr}$ αέρα στο χώρο. Οι ανεμιστήρες αυτοί μπορούν να απομονωθούν με διατάξεις damper και να οδηγήσουν έτσι τον αέρα στον κατάλληλο χώρο. Στη συνέχεια το δίκτυο ενώνεται με έναν αγωγό προσαγωγής, ένα κουτί ισοκαταμερισμού αέρα και τέλος το προς μέτρηση στόμιο.

Οι κύριες μετρήσεις που πρέπει να γίνουν είναι οι εξής:

- 1) Στον αγωγό: Μέτρηση στατικής και δυναμικής πίεσης, μέτρηση θερμοκρασίας
- 2) Πριν την έξοδο του στομίου: Μέτρηση στατικής πίεσης
- 3) Μετά την έξοδο του στομίου: Μέτρηση δυναμικής πίεσης και θερμοκρασίας
- 4) Στάθμης θορύβου στην έξοδο του στομίου

Στην δεύτερη αίθουσα διενεργούνται μετρήσεις για την απόδοση του στομίου στο χώρο. Ο εξοπλισμός πρέπει να προσομοιώνει μια ρεαλιστική ροή στο χώρο. Για τον λόγο αυτό, η κλιματιστική μονάδα θα πρέπει να έχει πρόσβαση σε στόμια τοίχου και οροφής καθώς επίσης και να συνδέεται με στόμια επιστροφής. Ακριβώς όπως συμβαίνει σε μια κλασική εγκατάσταση κλιματισμού με σύστημα διανομής αέρα με κανάλια και στόμια. Στην αίθουσα αυτή θα λαμβάνονται μετρήσεις ταχύτητας αέρα σε όλο το χώρο του δωματίου.

Οι κύριες μετρήσεις που πρέπει να γίνουν είναι οι εξής:

- 1) Μέτρηση της ταχύτητας σε διάφορα σημεία του χώρου
- 2) Μέτρηση θερμοκρασίας
- 3) Μέτρηση στατικής πίεσης πριν την έξοδο του στομίου

Στην παρούσα διπλωματική θα ασχοληθούμε μόνο με τα φαινόμενα ροής της πρώτης διάταξης, της σήραγγας αερισμού.

1.3 Κανονιστικό πλαίσιο

Το κανονιστικό πλαίσιο στο οποίο θα βασιστεί η μετρητική διάταξη είναι το ΕΛΟΤ - EN12238 (Αερισμός κτιρίων - Στόμια αέρα - Αεροδυναμικές δοκιμές και χαρακτηρισμός για εφαρμογή μεικτής ροής) και αποτελεί ευρωπαϊκό και ταυτόχρονα εθνικό πρότυπο για τον προσδιορισμό αεροδυναμικών δοκιμών. Το κανονιστικό πλαίσιο ορίζει:

- Τα απαραίτητα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της αίθουσας του εργαστηρίου
- Τα απαραίτητα χαρακτηριστικά των οργάνων μέτρησης
- Διάφορες μεθόδους μέτρησης της πίεσης, της θερμοκρασίας και της ταχύτητας του αέρα
- Την διάταξη της εγκατάστασης λεπτομερώς
- Την διαδικασία των μετρήσεων
- Διορθώσεις οι οποίες πρέπει να γίνουν αναλόγως των εξωτερικών συνθηκών
- Τον τρόπο παρουσίασης των αποτελεσμάτων

Μέτρηση Ογκομετρικής παροχής

Για την μέτρηση της ογκομετρικής παροχής τα όργανα τα οποία θα χρησιμοποιηθούν θα πρέπει να είναι τυποποιημένα κατά EN ISO 5167-1.

Η ελάχιστη απαίτηση σε ακρίβεια για τα όργανα αυτά δίνεται από τον παρακάτω πίνακα

ΕΥΡΟΣ m^3/h	Ακρίβεια %
250-25000	$\pm 2,5$
25-250	± 5

Πίνακας 4: Απαίτηση ακρίβειας μετρητικών παροχής αέρα

Τα όργανα μέτρησης παροχής πρέπει να ελέγχονται κάθε 12 μήνες το μέγιστο. Ο έλεγχος αυτός μπορεί να γίνει με μία από τις τρεις ακόλουθες μεθόδους:

1. Διαστασιολογικός έλεγχος για όλα τα όργανα μέτρησης παροχής τα οποία δεν απαιτούν βαθμονόμηση.
2. Έλεγχος βαθμονόμησης σε όλο το εύρος λειτουργίας τους, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο με την οποία βαθμονομήθηκαν αρχικώς από τον κατασκευαστή.
3. Έλεγχος με σύγκριση του εργαστηριακού οργάνου με ένα ίδιου τύπου όργανο το οποίο είναι πιστοποιημένο κατά EN ISO 5167-1.

Μέτρηση Πίεσης

Η πίεση σύμφωνα με το ISO EN12238 πρέπει να μετρηθεί με βαθμονομημένο μανόμετρο. Η μέγιστη ενδιάμεση κλίμακα ένδειξης είναι ανάλογη του εύρους μέτρησης του οργάνου και δίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Εύρος Pa	Μέγιστη ενδιάμεση κλίμακα ένδειξης Pa
≤ 25	1
$25 < x < 250$	2,5
$250 < x < 500$	5
≥ 500	25

Πίνακας 5: Εύρος μέτρησης και βαθμονόμηση μετρητικών πίεσης

Η βαθμονόμηση των οργάνων μέτρησης πίεσης οφείλει να γίνεται:

1. Με μικρομανόμετρο ακρίβειας $\pm 0,5 Pa$, για όργανα με εύρος μέτρησης έως $25 Pa$.
2. Με μικρομανόμετρο ακρίβειας $\pm 1 Pa$, για όργανα με εύρος μέτρησης $100 Pa$.
3. Με μικρομανόμετρο ακρίβειας $\pm 1\%$ της ένδειξης, για όργανα με εύρος μέτρησης πάνω από $100 Pa$.

Μέτρηση ταχύτητας

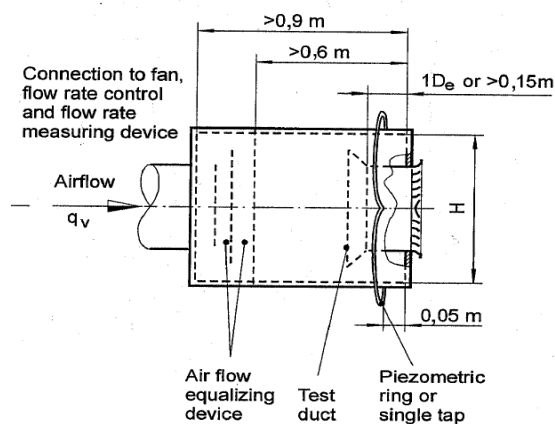
Η μέτρηση της ταχύτητας του αέρα, ειδικά στα σημεία όπου είναι ιδιαίτερα χαμηλή, για τον προσδιορισμό της απόδοσης των στομίων πρέπει να γίνεται με μετρητικά όργανα τα οποία ακολουθούν το EN 13182:1998.

Μέτρηση θερμοκρασίας

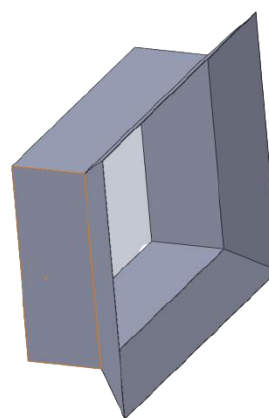
Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας πρέπει να γίνουν με θερμομέτρα υδραργύρου, θερμομέτρα αντίστασης, θερμοζεύγη ή άλλα κατάλληλα όργανα. Οφείλουν να έχουν διακριτική ικανότητα κατά μέγιστο $0,5 K$ και να έχουν βαθμονομηθεί σε ακρίβεια της τάξης των $0,25 K$.

Μέτρηση της απαιτούμενης στατικής πίεσης και της ενεργού ταχύτητας V_k

Η απαιτούμενη πίεση ενός στομίου, για δεδομένη ογκομετρική παροχή εξαρτάται από τον τύπο, το μέγεθος και την ταχύτητα του αέρα πριν από αυτό. Το προς εξέταση στόμιο πρέπει να εφαρμόσει πάνω σε έναν τυποποιημένο αγωγό, ο οποίος θα έχει μήκος ίσο με τη διάμετρο του στομίου (αν αυτό είναι κυκλικό) ή ίσο με $0,15 m$ (αν αυτό είναι ορθογώνιο). Η είσοδος του αγωγού αυτού πρέπει να είναι κωνική και φαίνεται στο παρακάτω σχέδιο.



Εικόνα 16: Διάταξη στομίου και plenum box



Εικόνα 17: Test duct τοποθετημένο ανάντι του στομίου

Στην περίπτωση όπου το στόμιο διαθέτει κάποιο επιπλέον εξάρτημα (damper, flow equalizer) ο τυποποιημένος αεραγωγός τοποθετείται πριν από αυτά.

Για κάθε στόμιο γίνονται μετρήσεις ώστε να εξαχθεί μια σχέση μεταξύ πίεσης και ογκομετρικής παροχής. Για να υπολογισθεί η ελάχιστη απαιτούμενη πίεση στο στόμιο οι μετρήσεις πρέπει να γίνουν με το damper να έχει τα φύλλα του σε τέσσερις θέσεις (25%, 50%, 75%, 100%). Επίσης πρέπει να αναφέρεται ακριβώς το σημείο το οποίο λαμβάνεται η μέτρηση στα αποτελέσματα.

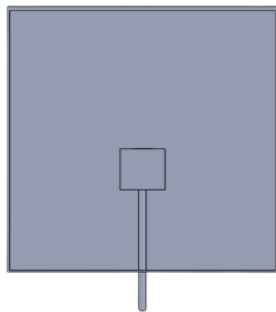
Στο πρότυπο EN 12238 αναφέρονται δύο μέθοδοι μέτρησης της στατικής πίεσης των στομιών ανάλογα με το είδος του στομιού.

- Η πρώτη μέθοδος αναφέρεται σε στόμια τα οποία τοποθετούνται σε αγωγούς
- Η δεύτερη μέθοδος αναφέρεται σε στόμια τα οποία τοποθετούνται σε plenum

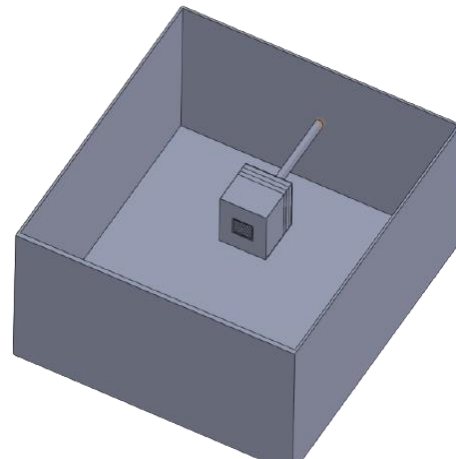
Η συγκεκριμένη εγκατάσταση θα είναι κατάλληλη για την άμεση μέτρηση στομιών τοίχου και οροφής στα οποία συνίσταται η ύπαρξη plenum για την τοποθέτησή τους, ενώ θα μπορεί με μικρές τροποποιήσεις του plenum να δεχθεί οποιοδήποτε στόμιο, ειδικής ή μη κατασκευής.

Μέτρηση της στατικής πίεσης

Η εγκατάσταση αυτή είναι κατάλληλη για στόμια τοίχου ή οροφής τα οποία συνδέονται συνήθως σε plenum box. Η εγκατάσταση φαίνεται στις παρακάτω τρισδιάστατες όψεις όπου απεικονίζεται η διάταξη της σήραγγας και του χώρου.



Εικόνα 18: Κάτοψη χώρου εργαστηρίου



Εικόνα 19: Πλάγια όψη χώρου - αεροσήραγγας

Οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες πρέπει να είναι τέτοιες ώστε να ικανοποιούν την παρακάτω ανισότητα:

$$\frac{q_v}{A} < \sqrt{\frac{p_s}{5\rho}} \quad (1)$$

όπου

q_v : είναι η ογκομετρική παροχή σε m^3/sec

A : η εσωτερική επιφάνεια του θαλάμου που φαίνεται και στη φωτογραφία $A = WH$ σε m^2

p_s : η στατική πίεση σε Pa

ρ : η πυκνότητά του αέρα σε Kg/m^3

Η απαιτούμενη στατική πίεση μετράται μέσω, τουλάχιστον ενός, στατικού pitot το οποίο θα βρίσκεται σε απόσταση 0,05 m από την εσωτερική επιφάνεια του θαλάμου.

Η αεροσήραγγα οφείλει να φέρει διατάξεις για την δημιουργία ομοιόμορφης στρωτής ροής απαλλαγμένη από στροβιλισμούς.

Για την εξαγωγή του διαγράμματος $Q - \Delta P$ απαιτούνται τουλάχιστον τέσσερις ογκομετρικές παροχές, ώστε να σχηματιστεί πλήρως η γραφική παράσταση συσχέτισης πτώσης πίεσης και ογκομετρικής παροχής.

Αντιστάθμιση της ολικής πίεσης

Μετά το πέρας της διαδικασίας μέτρησεων οι τιμές της στατικής πίεσης ανάγονται με την ακόλουθη εξίσωση σε στατική πίεση αέρα πρότυπων συνθηκών θερμοκρασίας 20°C.

$$p_{t1,2} = 1.2 \frac{p_t}{\rho} \quad (2)$$

Ύστερα κατασκευάζεται το διάγραμμα ολικής πίεσης – ογκομετρικής παροχής ($p_t - Q$).

Εναλλακτικά, μπορεί να παρουσιασθεί το διάγραμμα στατικής πίεσης – ογκομετρικής παροχής ($p_s - Q$).

Τέλος υπολογίζεται η σταθερά απωλειών ζ με τις παρακάτω εξισώσεις.

$$\zeta = \frac{p_t}{p_d} \quad (3)$$

$$\zeta = \frac{p_s}{p_d} + 1 \quad (4)$$

όπου p_t, p_s είναι τα μεγέθη που μετρήσαμε και p_d προκύπτει από την σχέση:

$$p_d = \frac{\rho}{2} \left(\frac{q_v}{A_d} \right)^2 \quad (5)$$

όπου ρ και q_v είναι ίδες συνθήκες της πειραματικής διαδικασίας.

Μέτρηση ενεργού ταχύτητας v_k και υπολογισμός της επιφάνειας A_k του στομίου.

Για τον προσδιορισμό της ενεργού ταχύτητας πρέπει το *damper*, αν υπάρχει, να έχει τα φύλλα του ανοικτά. Αντίστοιχα και πάλι καταγράφονται οι τιμές των παρακάτω μεγεθών για τέσσερις τουλάχιστον ογκομετρικές παροχές:

- Ογκομετρική παροχή
- Στατική πίεση

Η ταχύτητα αέρα μετράται σε διάφορα σημεία μπροστά από το στόμιο σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή. Η ενεργός ταχύτητα ορίζεται ως ο μέσος όρος των ταχυτήτων των μετρήσεων που ελήφθησαν για κάθε ογκομετρική παροχή ξεχωριστά.

$$v_{km} = \sum \frac{v_k}{n} \quad (6)$$

όπου n ο αριθμός των μετρήσεων.

Ταυτόχρονα γίνεται καταγραφή στα σημεία του χώρου στα οποία πραγματοποιούνται οι μέτρησεις. Εν συνεχεία οι τιμές της ογκομετρικής παροχής ανάγονται σε πρότυπες συνθήκες με την παρακάτω εξίσωση:

$$q_{v1,2} = q_v \left(\frac{\rho}{\rho_{1,2}} \right) \quad (7)$$

Υπολογισμός ενεργού επιφάνειας A_k

Η διορθωμένη τιμή της παροχής διαιρείται με την ενεργό ταχύτητα. Η ενεργός επιφάνεια προκύπτει ως το πηλίκο του αθροίσματος των επιμέρους ενεργών επιφανειών, που προέκυψαν από κάθε ξεχωριστή παροχή προς το αριθμό των διαφορετικών παροχών που χρησιμοποιήθηκαν.

$$A_{ki} = \frac{q_{v1,2i}}{v_{km}} \quad (8)$$

$$A_k = \sum \frac{A_{ki}}{n} \quad (9)$$

Αν η μέση τιμή της ενεργού ταχύτητας διαφέρει περισσότερο από 5% από κάθε μία τιμή της ενεργού ταχύτητας τότε η τιμή της A_k πρέπει να αναφέρεται με βάση την ογκομετρική παροχή, αλλιώς θεωρείται σταθερή.

Αν

$$|A_{ki}| > 1,025A_{ki} \quad \text{ή} \quad |A_{ki}| < 0,975A_{ki}$$

τότε

$$A_{ki} = f(Q)$$

$$\text{Αν } 0,975A_{ki} < |A_{ki}| < 1,025A_{ki}$$

τότε A_{ki} είναι σταθερό.

1.4 Θεωρητικό υπόβαθρο

Στην συνέχεια παρατίθενται κάποια στοιχεία και παραδοχές για την μαθηματική ανάλυση της ροής για την εφαρμογή. Οι βασικές εξισώσεις περιγραφής των φαινομένων ροής είναι :

- Η αρχή διατήρησης της μάζας
- Ο δεύτερος νόμος του Newton
- Η αρχή διατήρησης της ενέργειας

Από τις βασικές αυτές αρχές προκύπτουν και ακριβέστερες μαθηματικές προσεγγίσεις οι οποίες είναι κατάλληλες για συγκεκριμένα φυσικά φαινόμενα και εφαρμογές. Κάποιες από τις εξισώσεις που προκύπτουν είναι :

- Η εξίσωση συνέχειας
- Οι εξισώσεις Navier – Stokes

Εξίσωση συνέχειας

Η εξίσωση της συνέχειας βασίζεται στην αρχή διατήρησης της μάζας και για μόνιμη ροή ορίζεται ως:

$$\oint \rho(\mathbf{un})dA = 0 \quad (10)$$

Κατά μήκος ενός αγωγού η παροχή \dot{m} δεν μεταβάλλεται από διατομή σε διατομή συνεπώς

$$\dot{m} = \oint \rho u dA = \text{σταθερό} \quad (11)$$

Για μεταβαλλόμενη διατομή και ασυμπίεστη ροή η εξίσωση συνέχειας γίνεται:

$$u_1 A_1 = u_2 A_2 \quad (12)$$

Εξισώσεις Navier Stokes

Για νευτωνικά ρευστά και καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων και για τρισδιάστατο πεδίο οι εξισώσεις Navier – Stokes δίνονται παρακάτω:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \nabla \cdot \mathbf{u} \right) = \rho \mathbf{f} - \nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (13)$$

Για την παρούσα εφαρμογή η ταχύτητα που αναπτύσσει ο αέρας στον αγωγό προσδιορίζουν τη ροή ως μόνιμη, ιξώδη, ασυμπίεστη τυρβώδη ροή.

Για την μαθηματική περιγραφή της κίνησης ενός ρευστού είναι απαραίτητο να οριστεί ένας όγκος ελέγχου και να μελετηθεί η κίνησή του στις τρεις διαστάσεις του χώρου. Οι εξισώσεις Navier-Stokes αποτελούν την εφαρμογή του δεύτερου νόμου του Νεύτωνα στον στοιχειώδη όγκο ελέγχου που έχει επιλεγθεί.

Ασυμπίεστη ροή

Ονομάζεται η ροή κατά την οποία δεν πραγματοποιείται μεταβολή της πυκνότητας σε όλη την έκταση του πεδίου ροής (όγκου ελέγχου). Φαινόμενα συμπίεστικότητας εμφανίζονται σε εφαρμογές όπου το μέτρο της ταχύτητας είναι αρκετά υψηλό. Η ροή χαρακτηρίζεται ως συμπίεστη ή ασυμπίεστη με τον αριθμό Mach (Παπαϊωάννου, 2002).

$$M = \frac{u}{a} \quad (14)$$

όπου u είναι η τοπική ταχύτητα του ρευστού και a η ταχύτητα του ήχου.

Για $M \leq 0.3$ η ροή χαρακτηρίζεται ως ασυμπίεστη

Για ροές της τάξης 1 έως 10m/sec, όπου και κυμαίνονται οι κύριες εφαρμογές κλιματισμού, η ροή χαρακτηρίζεται ως ασυμπίεστη.

Τυρβώδης και στρωτή ροή

Τυρβώδης είναι η ιξώδης ροή όπου τα στοιχεία του ρευστού κινούνται σε ακανόνιστες τροχιές προς όλες τις διευθύνσεις, δημιουργώντας ανάμιξη των στοιχείων αυτών παραβιάζοντας ουσιαστικά τις γραμμές

ροής. Για τη μελέτη της τυρβώδους ροής απαιτούνται πειραματικά δεδομένα ώστε να επαληθευτεί η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου τύρβης.

Στρωτή είναι η ροή κατά την οποία τα σωματίδια κινούνται κατά στρώματα, ομαλά με ομοιόμορφη κατανομή της ταχύτητας σε κάθε στρώμα. Η επικοινωνία μεταξύ στρωμάτων πραγματοποιείται σε μοριακό επίπεδο, λόγω της μεταφοράς θερμότητας.

Η ροή χαρακτηρίζεται ως στρωτή η τυρβώδης βάσει του αριθμού Reynolds. Ο αριθμός Reynolds είναι ένας αδιάστατος δείκτης που δίνει το μέτρο της αναλογίας των αδρανειακών δυνάμεων προς τις ιξώδεις δυνάμεις ποσοτικοποιώντας τη μεταξύ τους σχέση για την εκάστοτε εφαρμογή.

Για κυκλικό αγωγό:
$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (15)$$

Όπου ρ είναι η πυκνότητα του μέσου, u η μέση ταχύτητα του, D η διάμετρος του αγωγού και μ το δυναμικό ιξώδες του μέσου.

Για τετραγωνικό αγωγό: Αντικαθιστώντας την διάμετρο του αγωγού D , με την υδραυλική διάμετρο D_h

$$D_h = \frac{4A}{C} \quad (16)$$

όπου A είναι η επιφάνεια διατομής και C η εσωτερική περίμετρος του τετραγωνικού αγωγού.

Μόνιμη ροή

Χαρακτηρίζεται η ροή της οποία το μέτρο και η διεύθυνση του ανύσματος της ταχύτητας δε μεταβάλλονται σε σχέση με το χρόνο. Εκφράζεται μαθηματικά ως:

$$\frac{du}{dt} = 0 \quad (17)$$

όπου u είναι το διάνυσμα της ταχύτητας σε δεδομένο σημείο του όγκου ελέγχου. Η ταχύτητα ροής μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο, αλλά όχι στο ίδιο σημείο.

Προβλήματα συνοριακών τιμών

Ένα πρόβλημα ονομάζεται πρόβλημα συνοριακών τιμών όταν εκφράζεται μέσω μια διαφορικής εξίσωσης η οποία συνοδεύεται από κάποιες οριακές συνθήκες. Η λύση του προβλήματος οφείλει να είναι λύση ταυτόχρονα και των οριακών συνθηκών.

Για να βρίσκουν εφαρμογή τα προβλήματα συνοριακών τιμών πρέπει να είναι καλώς τεθειμένα, δηλαδή για κάθε μια είσοδο στο σύστημα να υπάρχει μοναδική λύση – έξοδος η οποία εξαρτάται από την είσοδο αυτή (Charra & Canale, 2010). Κατά συνέπεια τα προβλήματα αυτά χαρακτηρίζονται από:

- Ύπαρξη και μοναδικότητα λύσης
- Συνεχής εξάρτηση της λύσης από τα δεδομένα εισόδου

Υπάρχουν δύο είδη συνοριακών συνθηκών.

- Συνοριακές συνθήκες Dirichlet

- Συνοριακές συνθήκες von Neumann

Οι συνοριακές συνθήκες Dirichlet δηλώνουν την τιμή της λύσης-συνάρτησης f για την διαφορική εξίσωση που περιγράφει τον όγκο ελέγχου C , την οποία πρέπει να έχει στις οριακές συνθήκες. Οι συνθήκες Dirichlet μπορεί να χαρακτηρισθούν και σαν σταθερές συνθήκες συνοριακών τιμών στις οποίες ορίζονται κινηματικά μεγέθη.

Οι συνοριακές συνθήκες Neumann δηλώνουν πως η παράγωγος της λύσης-συνάρτησης f για την διαφορική εξίσωση που περιγράφει τον όγκο ελέγχου C , πρέπει να έχει συγκεκριμένη τιμή στα όρια του όγκου ελέγχου. Στις συνοριακές συνθήκες Neumann ορίζονται δυναμικά μεγέθη.

Είναι αδύνατο σε ένα σύστημα να ορισθούν κινηματικά και δυναμικά μεγέθη ταυτόχρονα σε ένα όριο για την εύρεση λύσης σε άλλο όριο. Τα όρια του συστήματος ορίζονται, μέσα από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων στις παρακάτω κατηγορίες:

- Τοιχώματα (Walls), όπου ορίζονται αυτόματα τα κινηματικά μεγέθη ίσα με μηδέν
- Είσοδος (inlet), όπου ορίζονται μεγέθη βάσει των πληροφοριών που έχουμε για το σύστημα
- Έξοδος (outlet), όπου ορίζονται μεγέθη βάσει των πληροφοριών που έχουμε για το σύστημα
- Συμμετρικές διεπιφάνειες, όπου τα κινηματικά και δυναμικά μεγέθη ορίζονται βάσει της εισόδου

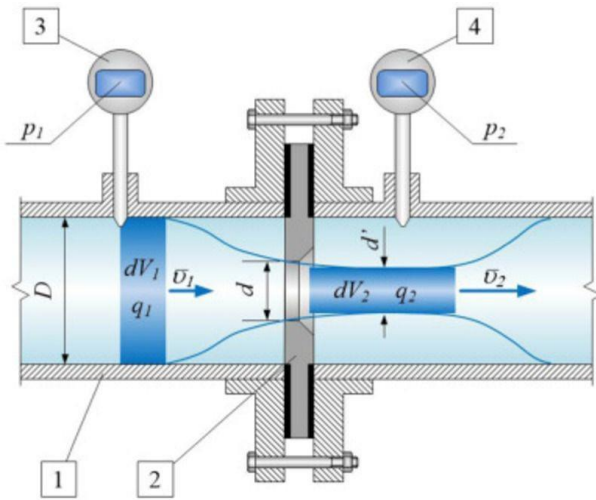
Για την παρούσα εφαρμογή είναι γνωστά τα δυναμικά και κινηματικά μεγέθη για την είσοδο του συστήματος. Κατά συνέπεια το πρόβλημα χαρακτηρίζεται ως μεικτών συνοριακών συνθηκών, εφόσον θα πρέπει να ορισθούν κινηματικά και δυναμικά μεγέθη στην είσοδο και την έξοδο του συστήματος.

Για την επίλυση του παρόντος προβλήματος θα ακολουθηθεί η παρακάτω διαδικασία:

- Ορίζονται τα κινηματικά μεγέθη (ταχύτητα) τα οποία είναι γνωστά στην είσοδο
- Γίνεται μια υπόθεση των δυναμικών μεγεθών (στατική πίεση) στην έξοδο
- Η επίλυση του προβλήματος ορίζει τη στατική πίεση στην είσοδο. Η λύση η οποία προέκυψε πρέπει να συγκλίνει με τα δεδομένα της εισόδου
- Πραγματοποιούνται τόσες επαναλήψεις έως ότου η πίεση εισόδου, που προκύπτει από την υπόθεση της πίεσης εξόδου, συγκλίνει στα πραγματικά δεδομένα
- Θέτουμε ως αποδεκτό όριο σύγκλισης σφάλμα μικρότερο των $2Pa$

Ροή αέρα σε διάτρητο διάφραγμα

Μία από τις διατάξεις για την μέτρηση της στατικής πίεσης είναι ο σωλήνας Venturi και το διάτρητο διάφραγμα. Θα παρατεθεί η μαθηματική περιγραφή της πτώσης πίεσης σε διάτρητο διάφραγμα καθώς τη γεωμετρία του θα τη συναντήσουμε, τοπικά, μέσα στην ανάλυση της ροής (Παπανίκας, 2010).



Η ροή συστέλλεται από τη διατομή d στη διατομή d' . Οι απώλειες λόγω των στροβιλισμών προκαλούν πτώση πίεσης. Συνεπώς $p_2 < p_1$ ενώ από την εξίσωση συνέχειας προκύπτει $u_2 < u_1$. Η διαφορά πίεσης προκύπτει ως

$$p_1 - p_2 = \zeta_c \frac{\rho}{2} u_1^2 = \Delta p \quad (18)$$

Όπου ζ_c είναι ο συντελεστής πτώσης πίεσης.

Προκύπτει ότι

Εικόνα 20: Διάταξη διάτρητου διαφράγματος

$$\zeta_c = \frac{2\Delta p_v}{\rho u^2} = \frac{\rho}{2} (u_2 - u_1)^2 = \frac{\rho}{2} u_1^2 \left(\frac{u_2}{u_1} - 1\right)^2 \quad (19)$$

Ο συντελεστής συστολής ορίζεται ως $\alpha = d/D$. Εισάγοντας τον γεωμετρικό λόγο των διατομών με τη σχέση (την από πάνω σχέση) προκύπτει ο συντελεστής πτώσης πίεσης:

$$m = \frac{A}{A_1} \quad (20)$$

$$\zeta_c = \left(\frac{1-\alpha m}{\alpha m}\right)^2 \quad (21)$$

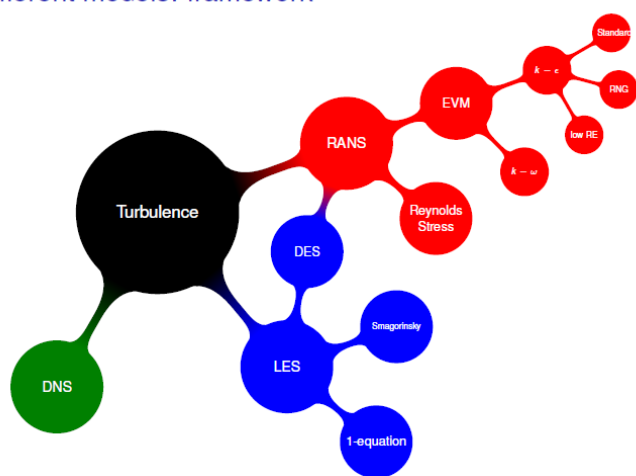
Ο συντελεστής α προκύπτει από τον εμπειρικό τύπο

$$\alpha = 0,4 + 0,6 \left(\frac{A}{A_1}\right)^2 \quad (22)$$

Επιλογή μοντέλου τύρβης

Η οικογένεια των μοντέλων RANS (Reynolds – averaged Navier Stokes) είναι η μεγαλύτερη στο πεδίο των μοντέλων τύρβης. Τα μοντέλα αυτά προσεγγίζουν τα φαινόμενα τύρβης με τη χρήση όρων ιξώδους. Η πιο κοινή μεταβλητή που υπολογίζεται στις περιπτώσεις αυτές είναι η k ή η κινητική ενέργεια ανά μονάδα μάζας με τυρβώδεις διακυμάνσεις.

Different models: framework



Εικόνα 21: Μοντέλα τύρβης

Το μοντέλο $k - \omega$ εμφανίζει πλεονεκτήματα σε υπολογισμούς κοντά σε τοιχώματα όπου εμφανίζονται αντίθετες κλίσεις πίεσης. Το μοντέλο αυτό εμφανίζει επίσης πολύ καλή πρόβλεψη στο διαχωρισμό των επιπέδων (layers) της ροής και της μετάβασης από το ένα στο άλλο. Επίσης εμφανίζει πλεονεκτήματα σε εφαρμογές ελεύθερης ροής. Το μοντέλο $k - \omega$ δεν είναι κατάλληλο για ροές τύπου jet.

Σε αντίθεση με τα μοντέλα $k - \epsilon$ όπου εμφανίζουν καλύτερα αποτελέσματα σε ροές μακριά από τοιχώματα. Ένας συνδυασμός των προτερημάτων των δύο μοντέλων είναι εφικτός με τη χρήση του μοντέλου $k - \omega$ SST.

Το μοντέλο $k - \omega$ SST έχει μια συνάρτηση διαχωρισμού όπου χρησιμοποιεί το μοντέλο $k - \omega$ κοντά σε τοιχώματα και το μοντέλο $k - \epsilon$ μακριά από αυτά (Menter, 1994). Σκοπός του μοντέλου είναι να συνδυάσει τον εύρωστο και ακριβή υπολογισμό του μοντέλου $k - \omega$ κοντά σε περιοχές με τοιχώματα με το μοντέλο $k - \epsilon$ το οποίο φέρει καλύτερα αποτελέσματα στην ελεύθερη ροή. Το μοντέλο $k - \omega$ SST είναι παρόμοιο με το μοντέλο $k - \omega$ με τις παρακάτω διαφορές:

1. Τα μοντέλα $k - \epsilon$ και $k - \omega$ πολλαπλασιάζονται με μια συνάρτηση συνδυασμού και προστίθενται μαζί. Η συνάρτηση αυτή λειτουργεί σαν διακόπτης όπου ενεργοποιεί την $k - \omega$ κοντά σε τοιχώματα και την $k - \epsilon$ μακριά από αυτά.
2. Το μοντέλο SST ενσωματώνει έναν όρο κλίσης της αποσοβούμενης διάχυσης στην εξίσωση ω .
3. Ο ορισμός του τυρβώδους ιξώδους μετατρέπεται με σκοπό να υπολογίσει τη μετατόπιση της διατμητικής τάσης λόγω τύρβης.
4. Οι σταθερές του μοντέλου αλλάζουν

Οι αλλαγές αυτές μετατρέπουν το SST $k - \omega$ μοντέλο σε ένα μοντέλο με αυξημένη ακρίβεια και πιστότητα για μεγάλο εύρος ροών σε σχέση με το παραδοσιακό $k - \omega$ μοντέλο.

Οι εξισώσεις που συνθέτουν το μοντέλο αυτό είναι οι εξής:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \widetilde{G}_k - Y_k + S_k \quad (23)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega + D_\omega \quad (24)$$

Όπου

\widetilde{G}_k : ο ρυθμός παραγωγής της κινητικής ενέργειας λόγω τύρβης υπολογισμένη από τις μέσες τιμές των κλίσεων των ταχυτήτων

G_ω : ο ρυθμός παραγωγής ω (ειδικό ποσοστό απορρόφησης)

Γ_k : αποτελεσματικότητα διάχυσης του k

Γ_ω : αποτελεσματικότητα διάχυσης του ω

Y_k : απορρόφηση του k

Y_ω : απορρόφηση του ω

D_ω : όρος διάχυσης στο κάθετο επίπεδο

S_k : όρος που προσδιορίζονται από το χρήστη ανάλογα με την εφαρμογή

S_ω : όρος που προσδιορίζονται από το χρήστη ανάλογα με την εφαρμογή

Μια περαιτέρω ανάλυση του μοντέλου είναι πέρα από τους σκοπούς αυτής της διπλωματικής.

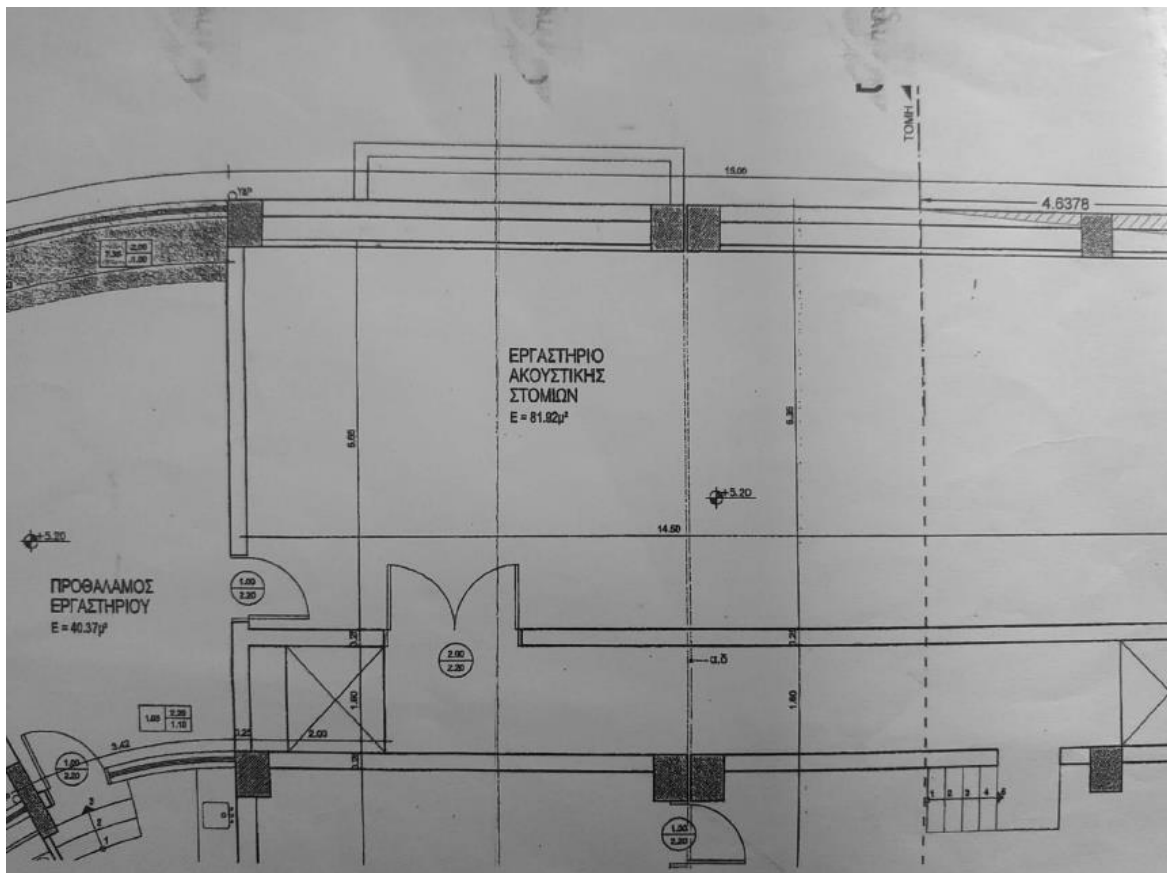
Αλγόριθμος Coupled

Ο αλγόριθμος επίλυσης του προβλήματος ο οποίος χρησιμοποιεί όρους πίεσης επιτρέπει την επιλογή η λύση να πραγματοποιηθεί είτε συζευγμένη (coupled) είτε διαχωρισμένη (segregated). Το σχήμα συζευγμένης λύσης προσφέρει κάποια πλεονεκτήματα σε σχέση με το σχήμα διαχωρισμένης λύσης. Βασικό πλεονέκτημα είναι ότι προσφέρει μια εύρωστη και αποδοτική λύση για ροές μονοφασικές σταθερής ροής, με μεγαλύτερη επίδοση σε σχέση με τη διαχωρισμένη λύση η οποία λύνει τις εξισώσεις

της ορμής και της διόρθωσης της πίεσης ξεχωριστά. Ο διαχωρισμός αυτός έχει ως αποτέλεσμα μια πιο αργή σύγκλιση.

1.5 Σχεδιασμός μετρητικής διάταξης

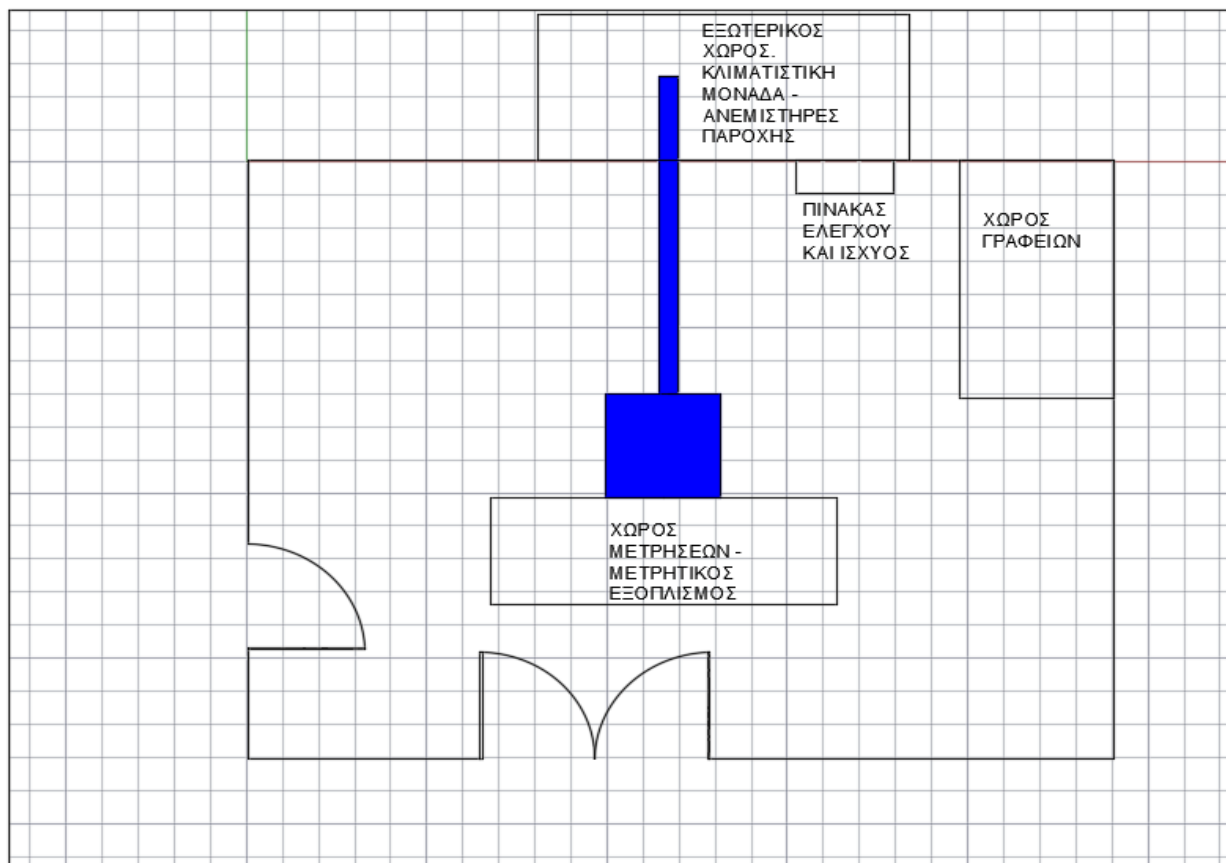
Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η κάτοψη του χώρου του εργαστηρίου.



Εικόνα 22: Κάτοψη χώρου εργαστηρίου

Ο διαθέσιμος χώρος είναι 5.6m x 7.5m με ύψος 5.2m. Ο περιβάλλοντας χώρος βρίσκεται από την απέναντι πλευρά της διπλής θύρας που φαίνεται στο σχέδιο. Εξωτερικά είναι τοποθετημένη η κλιματιστική μονάδα και οι δύο ελεγχόμενοι ανεμιστήρες παροχής αέρα. Στο χώρο θα υπάρχει γραφείο για τοποθέτηση ηλεκτρολογικού εξοπλισμού (υπολογιστής – συνδέσεις με μετρητικά, plc) ώστε να γίνεται απ' ευθείας η εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε αρχεία επεξεργάσιμα. Ο ηλεκτρολογικός πίνακας θα είναι υπεύθυνος για την διανομή της ηλεκτρικής ισχύος στο χώρο, καθώς και για τον έλεγχο των ανεμιστήρων μέσω inverter.

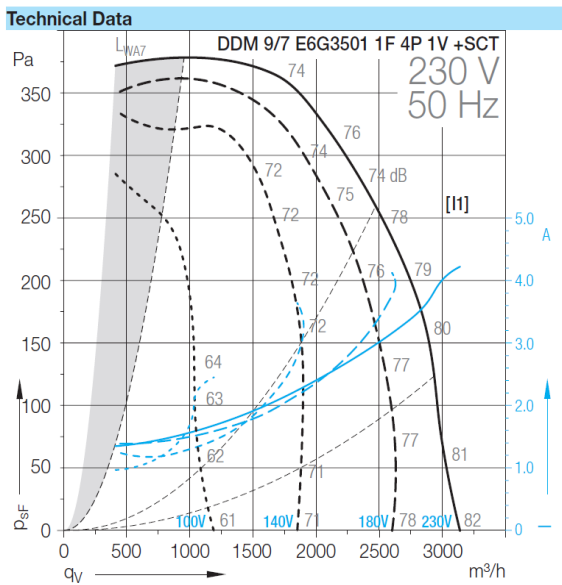
Ο χώρος των μετρήσεων επικεντρώνεται μπροστά στην έξοδο του στομίου. Εκεί θα υπάρχουν οι μετρητικές διατάξεις, και όλοι οι απαραίτητοι μηχανισμοί για την λήψη μετρήσεων στο επίπεδο μπροστά από το στόμιο. Μια περαιτέρω ανάλυση θα γίνει στο τρίτο κεφάλαιο.



Εικόνα 23: Σχεδιασμός κάτοψης χώρου εργαστηρίου (σκαρίφημα)

Η μετρητική διάταξη του εργαστηρίου θα σχεδιαστεί σύμφωνα με τις υποδείξεις του προτύπου EN12238 και θα αποτελείται από:

1. **Ανεμιστήρα προσαγωγής** αέρα οδηγούμενο από διάταξη inverter και πίνακα ρυθμίσεων ώστε να δίνει τις επιθυμητές ογκομετρικές παροχές.

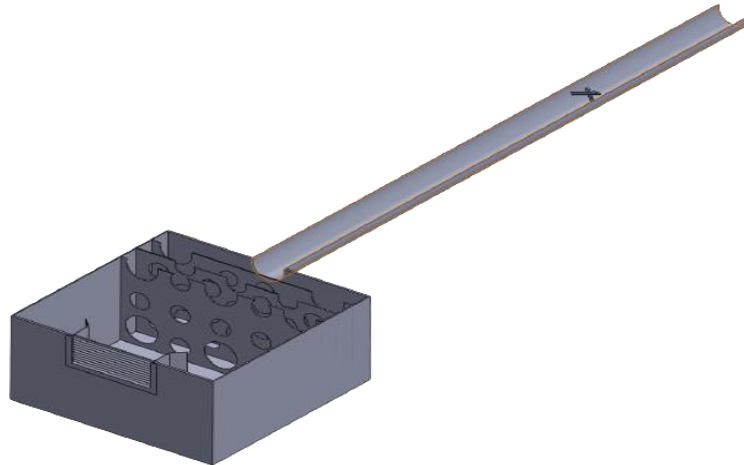


Πίνακας 6: Γράφημα παροχής – στατικής πίεσης ανεμιστήρα

Εικόνα 24: Φυγοκεντρικός ανεμιστήρας προσαγωγής

Από τα χαρακτηριστικά του ανεμιστήρα θα ληφθούν στοιχεία αρχικής ταχύτητας, στατικής πίεσης και παροχής του αέρα με σκοπό την εισαγωγή των δεδομένων για την αριθμητική επίλυση του προβλήματος της ροής του αέρα.

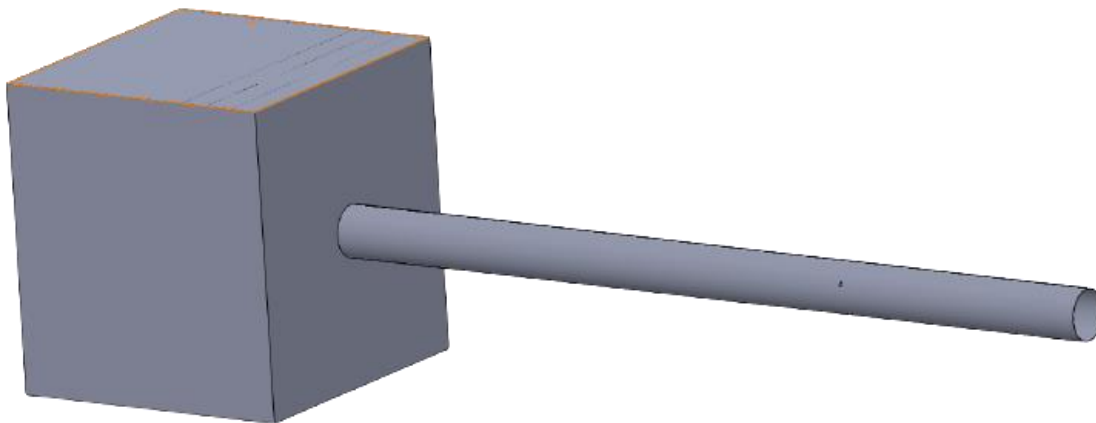
2. Έναν αγωγό με διάμετρο 165mm και μήκος 3000mm στον οποίο είναι τοποθετημένος μετρητής πίεσης (debimo blades).



Εικόνα 25: Ανοξείδωτος αγωγός αεροσήραγγας

Η αεροσήραγγα αποτελείται από αγωγό ανοξείδωτου χάλυβα.

3. Ένα **plenum box** με διατάξεις για την ισομερισμό του αέρα στο χώρο



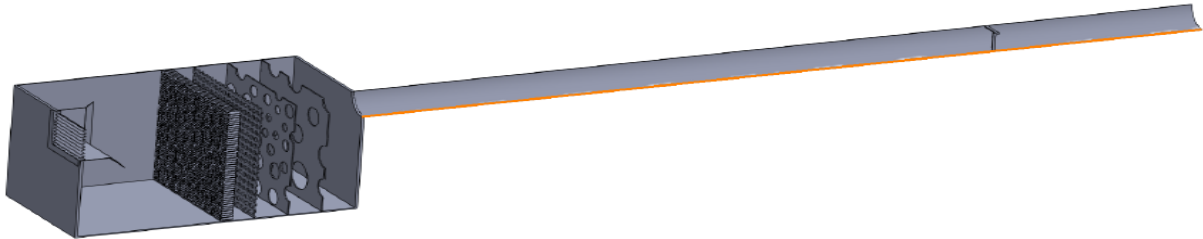
Εικόνα 26: Αγωγός – plenum τα οποία θα τοποθετηθούν επί μεταλλικής βάσης

Τα plenum είναι κιβώτια αποτελούμενα από φύλλα αλουμινίου η φύλλα χάλυβα και χρησιμοποιούνται στις διατάξεις του επαγγελματικού κλιματισμού σαν κόμβοι όπου πάνω τους ενώνονται οι γραμμές παροχής ή οι γραμμές απόρριψης, τα στόμια, τα φίλτρα και διάφορα άλλα εξαρτήματα. Στη συγκεκριμένη διάταξη θα χρησιμοποιηθεί ένα plenum από Plexiglas ώστε να υπάρχει οπτική επαφή σε περίπτωση που χρειασθεί να οπτικοποιηθεί η ροή του αέρα με σκόνη βαφής.

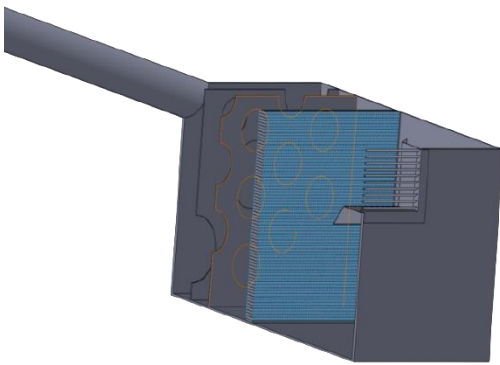
4. **Διάταξη** για δημιουργία στρωτής ροής

Η ισοκατανομή του αέρα στο χώρο πραγματοποιείται μέσω τριών πλακών από Plexiglas. Η πρώτη πλάκα έχει τρύπες με διάμετρο περίπου 100mm η δεύτερη περίπου 50mm και η τρίτη 20mm. Σκοπός

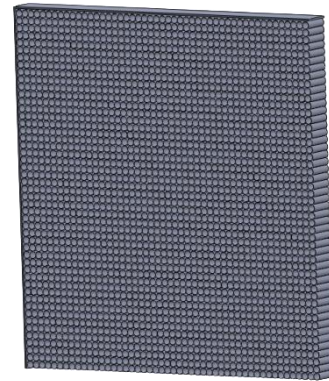
μας είναι η ισοκατανομή του αέρα όπως αυτό προέρχεται από το σωλήνα (μορφή jet). Στη συνέχεια ο αέρας περνάει μέσα από ένα προφίλ με καλαμάκια ώστε να γίνει πλήρης ομογενοποίηση της ροής και η εξάλειψη των διννορευμάτων. Η διάταξη αυτή αποτέλεσε και τη μεγαλύτερη δυσκολία που υπήρξε για την προσομοίωση καθώς το υπολογιστικό φορτίο που απαιτείται είναι τεράστιο για έναν συμβατικό υπολογιστή. Στο παρακάτω κεφάλαιο θα αναλυθεί ο τρόπος με τον οποίο αντιμετωπίστηκε η αδυναμία του υπολογιστή να αντέξει το μεγάλο υπολογιστικό φορτίο.



Εικόνα 27: Συνολική γεωμετρία. Τέσσερις πλάκες ισοκατανομής αέρα

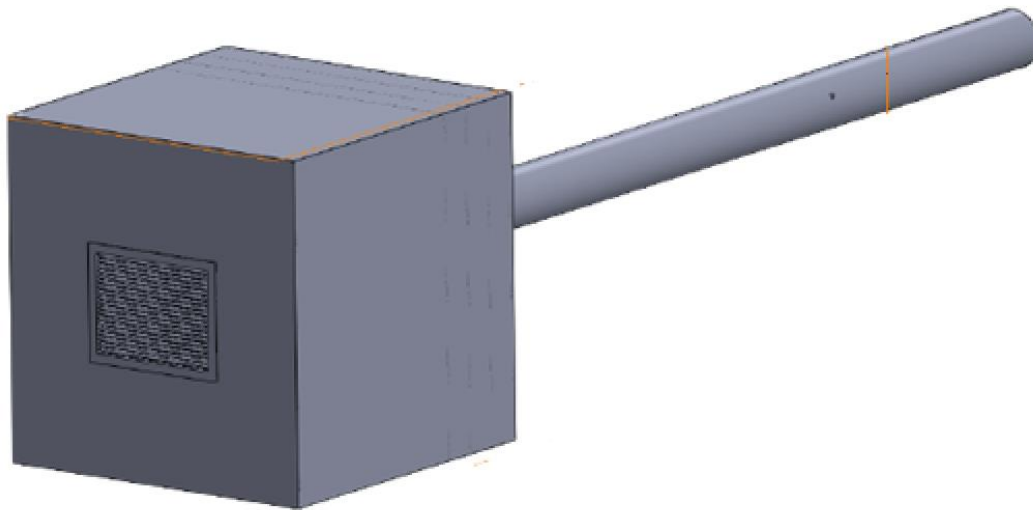


Εικόνα 28: Διάταξη γραμμικοποίησης στο plenum



Εικόνα 29: Πλάκα ισοκατανομής με λεπτές επάλληλους σωλήνες

5. **Στόμιο** προς μέτρηση και δοκιμαστικός αγωγός.



Εικόνα 30: Συνολική γεωμετρία αεροσήραγγας

Το προς μέτρηση στόμιο εγκαθίσταται μπροστά από το plenum και ανάντι αυτού εγκαθίσταται ένας κωνικού τύπου αγωγός (test duct). Βάσει της παραπάνω μηχανολογικής κατασκευής θα πραγματοποιηθεί η προσομοίωση της ροής του αέρα.

Κεφάλαιο 2^ο

Διαδικασία προσομοίωσης

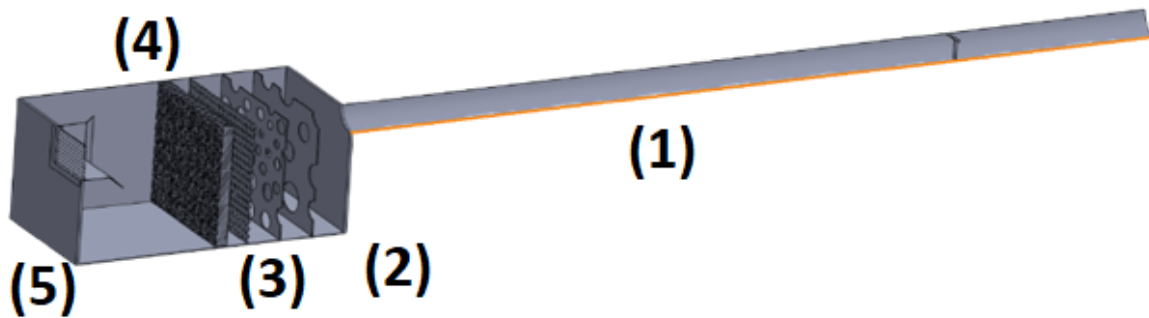
Η προσομοίωση της ροής του αέρα για τη συγκεκριμένη διάταξη αποτέλεσε και το μεγαλύτερο και δυσκολότερο μέρος αυτής της διπλωματικής. Για την ανάλυση της ροής του αέρα αρχικά δημιουργήθηκαν τα γεωμετρικά μοντέλα της αεροσήραγγας στο Solidworks με σκοπό μια ρεαλιστική απεικόνιση της κατασκευής. Μεγάλο πρόβλημα αποδείχθηκε η απαίτηση πολλών στοιχείων για έναν συμβατικό υπολογιστή με περιορισμένη επεξεργαστική ισχύ.

Για να ξεπερασθεί το πρόβλημα της επεξεργαστικής ισχύος η γεωμετρία διαιρέθηκε σε πέντε κύρια μοντέλα και κάποια δευτερεύοντα μοντέλα και στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί για το κάθε ένα ξεχωριστά. Παρακάτω θα αναλυθεί η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε.

2.1 Γεωμετρικά μοντέλα

Το συγκεκριμένο πρόβλημα απαιτεί τεράστια επεξεργαστική ισχύ και μνήμη την οποία δε διαθέτει ένας συμβατικός υπολογιστής. Το βασικό πρόβλημα έγκειται στην περιοχή των λεπτών επάλληλων σωλήνων οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την ισοκατανομή του αέρα καθώς επίσης και στη συνολική γεωμετρία η οποία κατέχει ένα αρκετά μεγάλο όγκο. Κατά τη διακριτοποίηση στο σημείο αυτό ο solver απαιτεί τεράστιο αριθμό κόμβων και στοιχειωδών όγκων (nodes και elements αντίστοιχα) με αποτέλεσμα ο χρόνος επίλυσης να είναι τεράστιος ακόμα και σε υπολογιστές μη συμβατικούς. Για το λόγο αυτό έγιναν οι παρακάτω ενέργειες ώστε να προσπερασθεί η αδυναμία των διαθέσιμων μέσων που χρησιμοποιούνται:

- Η γεωμετρία είναι συμμετρική ως προς το κέντρο της κατασκευής συνεπώς το πρόβλημα θα επιλυθεί για το $\frac{1}{4}$ της γεωμετρίας και τα υπόλοιπα αποτελέσματα θα εξαχθούν συμμετρικά ως προς το κέντρο. Πλέον η κάθε πλάκα ισοκατανομής έχει διαστάσεις 495x495mm.

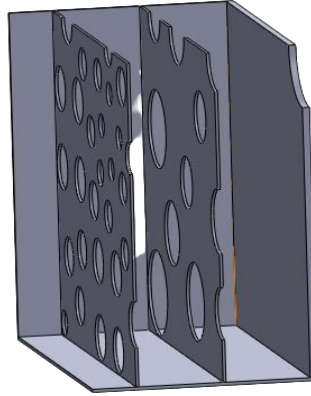


Εικόνα 31: Συνολική γεωμετρία. Όψη τομής. Από την είσοδο έως το στόμιο κατά σειρά i) αγωγός ii) μετρητική διάταξη πίεσης iii) plenum iv) 1^η πλάκα ισοκατανομής v) 2^η πλάκα ισοκατανομής vi) 3^η πλάκα ισοκατανομής vii) 4^η πλάκα ισοκατανομής – καλαμάκια viii) test duct ix) στόμιο προς μέτρηση

Η διαίρεση της γεωμετρίας αναλύεται ως εξής:

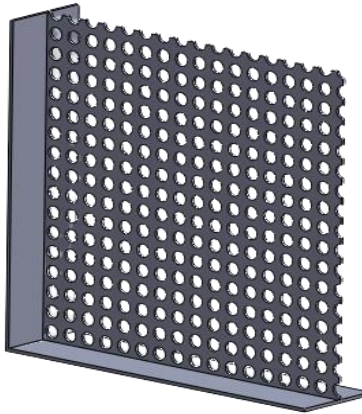
- Το πρώτο μοντέλο θα αποτελείται από τη γεωμετρία του κυκλικού αγωγού. Με την επιλογή αυτή θα υπάρχει η δυνατότητα να αναλυθεί η πτώση πίεσης που προκαλείται από την ύπαρξη της μετρητικής διάταξης debimo blades, η οποία συλλέγει μετρήσεις στατικής και δυναμικής πίεσης. Ο τρόπος λειτουργίας της και τα χαρακτηριστικά της θα παρουσιασθούν παρακάτω. Θα εξαχθεί η τελική στατική πίεση και ταχύτητα και θα εισαχθεί στην επόμενη προσομοίωση. Η έξοδος της πρώτης προσομοίωσης θα γίνει είσοδος της δεύτερης.
- Το δεύτερο μοντέλο θα αποτελείται από την έξοδο του αγωγού έως και την δεύτερη πλάκα ισοκατανομής. Στη γεωμετρία αυτή μας θα εξετασθεί το προφίλ σε μια απόσταση 60mm κατάντι

της δεύτερης πλάκας ισοκατανομής. Συνολικά υπάρχουν τρεις πλάκες ισοκατανομής με οπές και μία πλάκα ισοκατανομής αποτελούμενη από καλαμάκια. Κατά τη διεύθυνση της ροής, οι οπές στις πλάκες ισοκατανομής αυξάνονται ενώ οι διαμέτροί τους μειώνονται ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερα η διάχυση του αέρα.



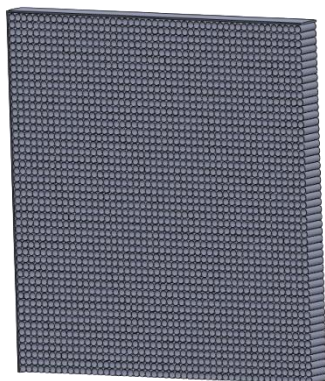
Εικόνα 3292: 2^ο γεωμετρικό μοντέλο με δύο πλάκες ισοκατανομής

- Το τρίτο μοντέλο, στη συνέχεια, αποτελείται από την τρίτη πλάκα ισοκατανομής όπου και οι οπές είναι περισσότερες αλλά και μικρότερες σε διάμετρο, με σκοπό να κατανείμουν τον αέρα καλύτερα και να διαιρέσουν φαινόμενα jet που παρουσιάζονται στη ροή. Σε συνέχεια της λογικής η έξοδος της τρίτης προσομοίωσης θα γίνει είσοδος στο επόμενο μοντέλο.



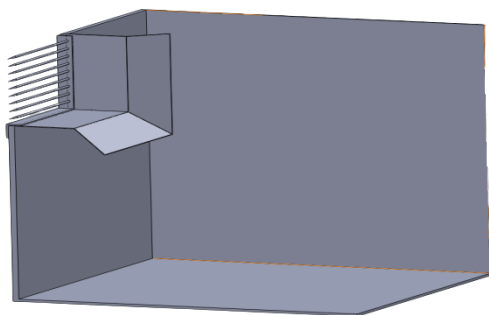
Εικόνα 33: 3^ο γεωμετρικό μοντέλο πλάκας ισοκατανομής με οπές 20mm

- Το τέταρτο γεωμετρικό μοντέλο αποτελείται από την πλάκα ισοκατανομής που φέρει λεπτές επάλληλους σωλήνες. Η γεωμετρία αυτή είναι αδύνατο να λυθεί με συμβατικό υπολογιστή. Συνεπώς θα προσομοιωθεί η ροή σε έναν μικρό όγκο ελέγχου αποτελούμενο από περίπου 50-60 σωλήνες σε διάταξη τετραγωνική χωροκεντρωμένη. Η ροή αυτή θα προσομοιωθεί σε διάφορες θέσεις και στη συνέχεια θα εξαχθεί ένα γενικό προφίλ.



Εικόνα 34: 4^ο γεωμετρικό μοντέλο πλάκας ισοκατανομής με λεπτούς επάλληλους σωλήνες

- Η πέμπτη και τελική γεωμετρία φέρει το τελικό κομμάτι του plenum ισοκατανομής, την κωνική διάταξη (test duct) και το στόμιο όπου και το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στο προφίλ της ταχύτητας εξόδου σε απόσταση 25mm μετά την έξοδο του στομίου.



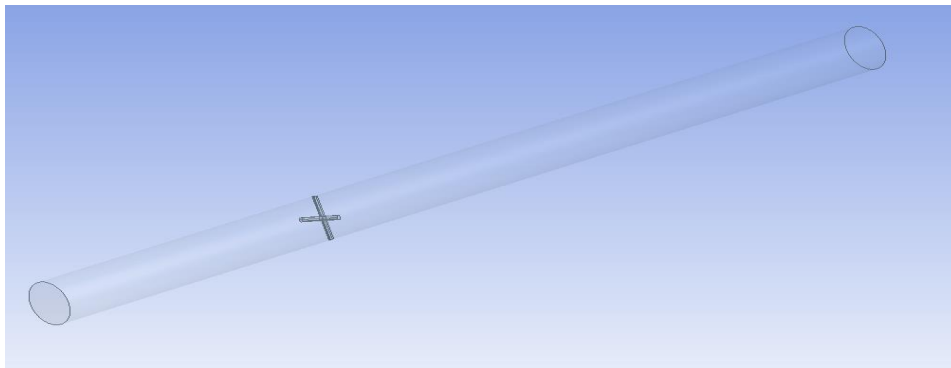
Εικόνα 35: 5^ο γεωμετρικό μοντέλο αποτελούμενο από test duct και στόμιο

Η επιλογή του διαχωρισμού των μοντέλων έγινε μετά από παρατηρήσεις και επαναλαμβανόμενες προσομοιώσεις, με σκοπό τη βελτίωση των αποτελεσμάτων καθώς και της ταχύτητας της προσομοίωσης. Εφόσον ο συνολικός όγκος ελέγχου έπρεπε να διαιρεθεί, έγινε προσπάθεια η κάθε γεωμετρία να διαιρείται σε σημείο στο οποίο να είναι εφικτή μια ρεαλιστική προσέγγιση των συνοριακών συνθηκών. Ως αποτέλεσμα, είχαμε εύκολα διαχειρίσιμα μοντέλα τα οποία απαιτούσαν λιγότερες επαναλήψεις για την εύρεση των σωστών συνοριακών συνθηκών.

2.2 Προσομοίωση 1^η

Η επιλογή της πρώτης γεωμετρίας αποτέλεσε και «οδηγό» κατά μία έννοια της συνολικής προσομοίωσης. Η επιλογή της είναι σημαντική καθώς αποτελεί ένα πρόβλημα επίλυσης για το οποίο είναι εφικτός ένας ρεαλιστικός υπολογισμός των συνθηκών στην έξοδο της. Ταυτόχρονα, θα υποδείξει και την επίδραση των μετρητικών διατάξεων στη ροή.

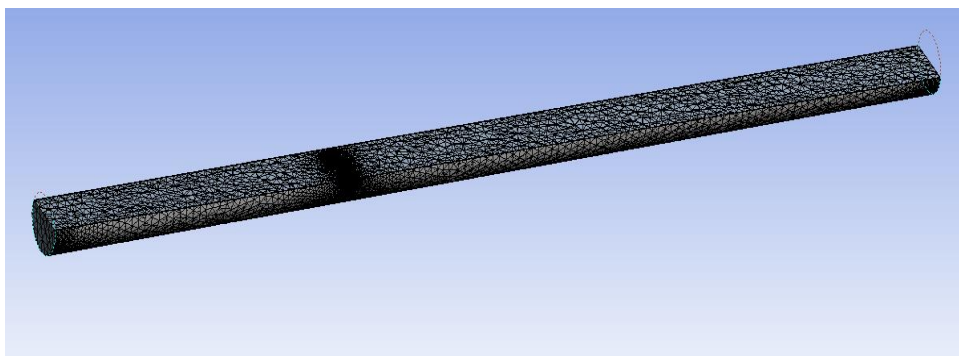
Η γεωμετρία της πρώτης προσομοίωσης σχεδιάζεται στο Solidworks και επεξεργάζεται περαιτέρω με το Design Modeler. Εδώ δηλώνεται η γεωμετρία που καταλαμβάνει το ρευστό και διαγράφονται τα σώματα τα οποία δε μας ενδιαφέρουν στην ανάλυσή (σώματα στερεής φύσεως), ώστε να επιτευχθεί εξοικονομική επεξεργαστική ισχύος του υπολογιστή.



Εικόνα 36: Γεωμετρία πρώτης προσομοίωσης με χρήση του Design Modeler

Στη συνέχεια, στο Mesh πραγματοποιείται η διακριτοποίηση με τη μέθοδο number of divisions στον αγωγό:

- σε 80 divisions για την ακμή του αγωγού στην είσοδο
- και 80 divisions για την ακμή του αγωγού στην έξοδο



Εικόνα 37: Αποτελέσματα Meshing

Στη συνέχεια δηλώνονται οι επιφάνειες ως προς το είδος τους. Είσοδος (inlet), τοιχώματα (walls), έξοδος (outlet) και επιφάνειες συμμετρίας (symmetry). Καθώς δηλώνονται οι επιφάνειες με τα συγκεκριμένα ονόματα το ansys, αυτόματα θα προσδιορίσει το είδος της εκάστοτε επιφάνειας. Στη συνέχεια στο setup θα αποδοθούν τα χαρακτηριστικά της κάθε επιφάνειας.

Κατά τη συνέχεια στο setup δίνονται όλες τις πληροφορίες του προβλήματος. Αρχικά επιλέγεται **steady state** καθώς μελετάται ροή ανεπτυγμένη και όχι κατά το μεταβατικό στάδιο. Επίσης επιλέγεται να λυθεί η ροή ως ασυμπίεστη ενεργοποιώντας την επιλογή **pressure based**.

Έπειτα επιλέγονται οι εξισώσεις που περιγράφουν το πρόβλημα. Θέτοντας το πρόβλημα αδιαβατικής ροής αέρα δεν ενεργοποιούνται οι εξισώσεις ενέργειας. Η ροή είναι τυρβώδης και συνεπώς επιλέγεται το μαθηματικό μοντέλο που την περιγράφει (**k- ω SST**).

Στην επιλογή boundary condition εισάγονται οι αρχικές ή τελικές συνθήκες του προβλήματος. Στην προκειμένη περίπτωση η είσοδος χαρακτηρίζεται ως **mass flow inlet** θέτοντας τη μάζα του αέρα που εισάγεται στον αγωγό. Στην συνέχεια θα πρέπει να γίνει υπόθεση για την τελική συνθήκη του όγκου ελέγχου. Η συνθήκη αυτή θα προσεγγισθεί βάσει του υπολογιστικού πακέτου σχεδιασμού αεραγωγών calcduct.

Duct material:	Aluminium	
Flowrate	600	m ³ /h
Diameter (mm)	168	
Velocity	7.52 m/s	
Pressure Drop	4.02 Pa/m	
Velocity pressure	33.7 Pa	

Εικόνα 38: Χρήση προγράμματος για εύρεση πτώσης πίεσης στο αγωγό

Εύρεση συνοριακών συνθηκών

Ο ανεμιστήρας της εγκατάστασης είναι εφοδιασμένος με inverter για τον έλεγχο των στροφών του βάσει της τάσης που εφαρμόζεται στα άκρα του. Η απαίτησή σε ογκομετρική παροχή, με βάση τη βιβλιογραφία για το στόμιο τοίχου σταθερών πτερυγίων με διαστάσεις 400x300mm είναι περίπου 600 m³/hr. Από το διάγραμμα του ανεμιστήρα (πίνακας 6) του εργαστηρίου δίνονται τα εξής στοιχεία. Για την απαίτηση σε ογκομετρική παροχή των 600 m³/hr η στατική πίεση είναι ίση με **380 Pa**. Οι κατάλληλες συνθήκες λειτουργίας (παροχή, πίεση) ενός στομίου είναι συνάρτηση της ενεργού επιφάνειας του, των διαστάσεων του, του είδους του (στόμιο τοίχου, δαπέδου, οροφής κλπ) καθώς και των εξαρτημάτων τα οποία φέρει (damper, φίλτρα, εσχάρες ισοκατανομής κλπ).

Για αέρα σε πρότυπες συνθήκες, δηλαδή αέρα σε θερμοκρασία $T = 20^{\circ}\text{C}$, η πυκνότητα είναι $1.2 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$.

$$\dot{m} = 600 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \cdot 1.2 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \frac{1\text{hr}}{3600\text{sec}} \approx 0.2 \frac{\text{Kg}}{\text{sec}} \quad (25)$$

Δεδομένου ότι ο όγκος ελέγχου ο οποίος χρησιμοποιείται είναι το ¼ του αρχικού η μαζική παροχή είναι

$$\dot{m} \approx 0.05 \frac{\text{Kg}}{\text{sec}}$$

Για το σύστημά ισχύουν οι εξής συνθήκες:

Συνοριακές συνθήκες εισόδου: mass flow inlet $\rightarrow 0.2 \frac{\text{Kg}}{\text{sec}}$ και $P_{gauge inlet} = 380\text{Pa}$

Συνοριακές συνθήκες εξόδου: δεν είναι γνωστές

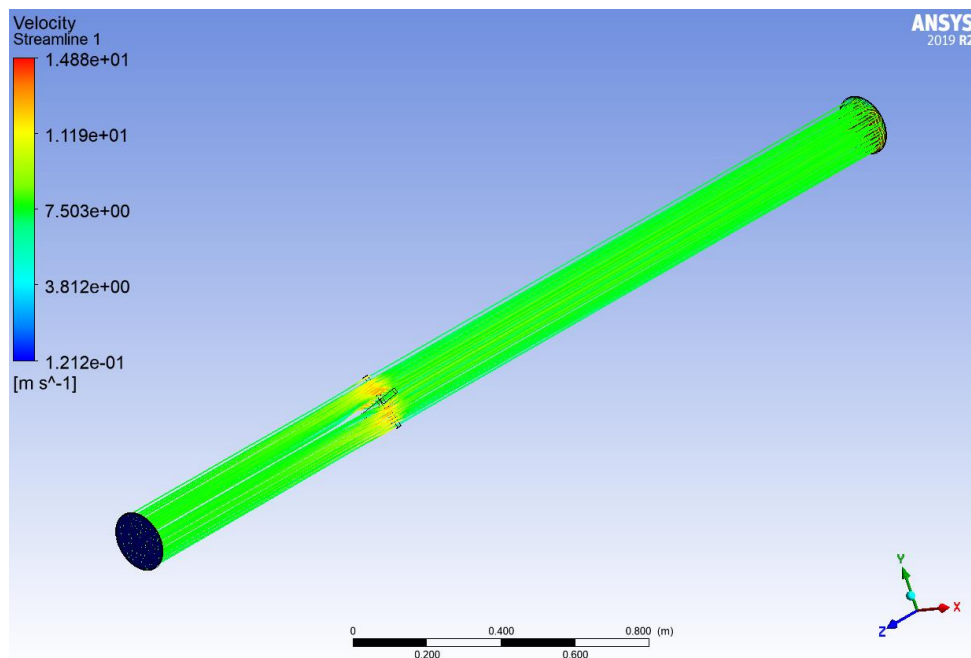
Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε πιο πάνω, στον όγκο ελέγχου θα πρέπει να εισαχθεί ένα δυναμικό μέγεθος Q_{in} (παροχή, ταχύτητα κλπ) και ένα δυναμικό μέγεθος P_{out} . Για το λόγο αυτό θα γίνει υπόθεση της συνοριακής συνθήκης εξόδου (outlet boundary condition). Ο solver θα επιλύσει τις εξισώσεις Navier Stokes για τυρβώδη ροή ανάντι έως ότου εξαχθεί και η αρχική τιμή της στατικής πίεσης ($P_{gauge inlet}$).

Ως εκ τούτου θα πραγματοποιηθεί μια επαναληπτική διαδικασία, εισάγοντας μια προσεγγιστική, ρεαλιστική τιμή για την τελική τιμή της στατικής πίεσης ($P_{gauge outlet}$) και εξαίγοντας την αρχική τιμή της στατικής πίεσης.

2.2.1 Αποτελέσματα 1^{ης} προσομοίωσης

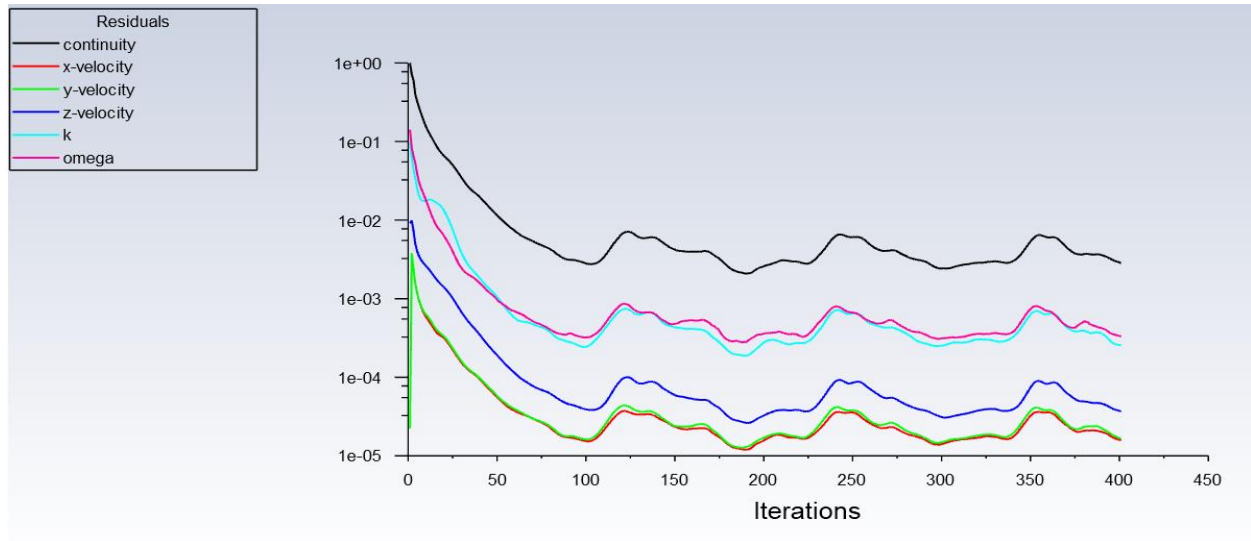
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται:

- Οι ροϊκές γραμμές



Εικόνα 39: Ροϊκές γραμμές πρώτης προσομοίωσης

- Το διάγραμμα επαναλήψεων (iterations) με τους όρους ταχύτητας και σύγκλισης της προσομοίωσης



Εικόνα 40: Διάγραμμα επαναλήψεων. Υπάρχει σύγκλιση των τιμών καθώς οι γραμμές τείνουν στο μηδέν

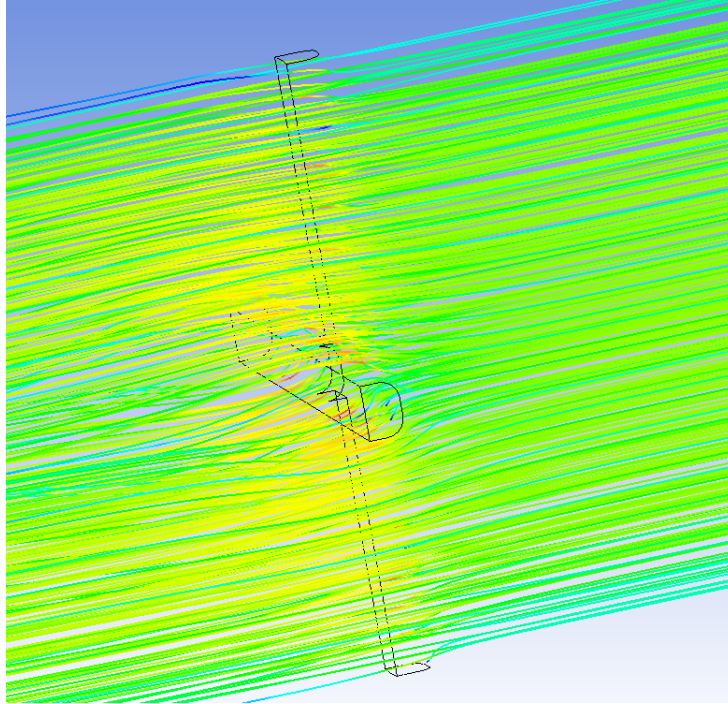
- Τιμές αποτελεσμάτων εξόδου

Προφίλ εξόδου πρώτης προσομοίωσης – εισόδου δεύτερης προσομοίωσης					
$\frac{\sum_{i=1}^n u_{x_i}}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n u_{y_i}}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n u_{z_i}}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n \omega_i}{n}$	$P_{out\ static}$
0.005 m/sec	0.005 m/sec	7.8 m/sec	0.36 m ² ·s ⁻²	251.7 s ⁻¹	340 Pa

Πίνακας 7: Πίνακας τιμών για έξοδο πρώτης προσομοίωσης

Στην παρούσα εργασία θα γίνεται παρουσίαση των μέσων όρων κάποιων τιμών, για την εξαγωγή συμπερασμάτων, καθώς είναι αδύνατον να εισαχθούν όλες τις τιμές των αποτελεσμάτων. Το προφίλ το οποίο θα εισαχθεί στην επόμενη προσομοίωση είναι σε μορφή txt, και περιέχει όλη την πληροφορία των επιμέρους στοιχειωδών ταχυτήτων και χαρακτηριστικών της ροής (K και ω).

Όπως παρατηρεί κανείς η πτώση πίεσης είναι σχετικά πιο μεγάλη σε σχέση με τη θεωρητική πτώση πίεσης η οποία θα επικρατούσε αν δεν υπήρχε ο μετρητικός αγωγός.



Εικόνα 41: Ροϊκές γραμμές τοπικά της μετρητικής διάταξης

Παρατηρούνται τοπικά φαινόμενα αύξησης της ταχύτητας της ροή λόγω μείωσης της ελεύθερης διατομής του αγωγού.

Η θεωρητική πτώση πίεσης για αγωγό διατομής $\Phi 168\text{mm}$, ανοξείδωτο με μήκος 3000mm και παροχή $700\text{m}^3/\text{hr}$ είναι 4.02 Pa/m . Προκύπτει ολική πτώση πίεσης 12.06 Pa .

Για την είσοδο του αγωγού ισχύει :

$$P_{total1} = P_{dynam1} + P_{static1} = \frac{1}{2} \rho_{air} u^2 + P_{static1} = \frac{1}{2} \cdot 1.2 \cdot 7.8^2 + 380 = 416.9\text{ Pa}$$

Για την έξοδο του αγωγού ισχύει :

$$P_{total2} = P_{dynam2} + P_{static2} = \frac{1}{2} \rho_{air} u^2 + P_{static2} = \frac{1}{2} \cdot 1.2 \cdot 7.8^2 + 340 = 376.5\text{ Pa}$$

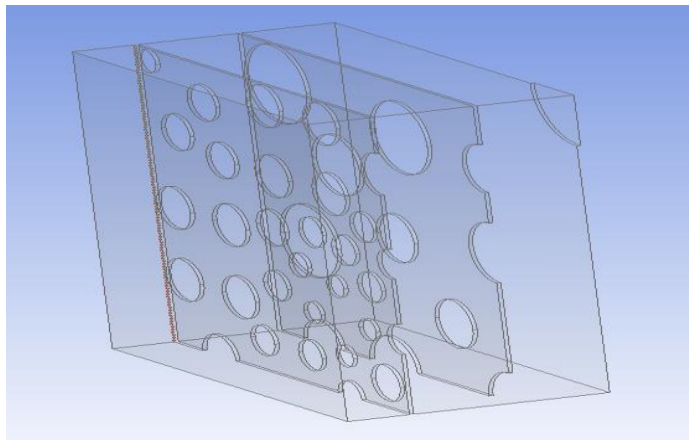
$$\Delta P = P_{total1} - P_{total2} = 40.4\text{ Pa}$$

Κατά συνέπεια η πτώση πίεσης που οφείλεται στο μετρητικό σταυρό (debimo blades) είναι ίση με

$$\Delta P_{pressure\ meter} = 40.4 - 12.06 = 28.34\text{ Pa}$$

2.3 Προσομοίωση 2^η

Το δεύτερο τμήμα της γεωμετρίας αφορά την είσοδο του αέρα στο plenum ισοκατανομής έως και την έξοδο του αέρα από την δεύτερη πλάκα ισοκατανομής. Ως είσοδο εισάγεται το προφίλ της ταχύτητας στην έξοδο της πρώτης προσομοίωσης (προσομοίωση αγωγού).



Εικόνα 42: Γεωμετρικό μοντέλο δεύτερης προσομοίωσης

Πιο αναλυτικά στο Design Modeler ορίζεται η γεωμετρία ο όγκος του αέρα. Στη συνέχεια αφαιρείται το τμήμα της στερεάς γεωμετρίας για την αποφυγή περαιτέρω υπολογισμών. Έπειτα ορίζεται το είδος της διεπιφάνειας στα όρια του συστήματος (symmetry, wall, inlet, outlet κλπ).

Για την διακριτοποίηση (Mesh) επιλέγεται η μέθοδος του ελαχίστου όγκου ελέγχου στοιχείου (element) ίση με 6mm. Η γεωμετρία διαιρείται συνολικά περίπου σε 1.000.000 στοιχεία (elements), ενώ οι κόμβοι (nodes) είναι περίπου 200.000.

Εύρεση συνοριακών συνθηκών

Οι συνθήκες εισόδου δίνονται από την πρώτη προσομοίωση (μέση ταχύτητα αέρα, στατική πίεση). Βάσει της μεθοδολογίας που περιγράφηκε παραπάνω, ορίζεται η ταχύτητα εισόδου και γίνεται εκτίμηση της στατικής πίεσης στην έξοδο. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως ότου οι υποθέσεις της στατικής πίεσης συγκλίνει στην πραγματική στατική πίεση εισόδου.

Μία ρεαλιστική τιμή για την υπόθεση της πίεσης εξόδου είναι απαραίτητη καθώς θα μας απαλλάξει από άσκοπες προσπάθειες και επαναλήψεις της προσομοίωσης. Ουπολογισμός της υπόθεσης αυτής γίνεται ως εξής:

Θα υπολογισθεί η πτώση πίεσης σύμφωνα με τη θεωρία της ροής μέσα από διάτρητο διάφραγμα.

Επιλέγονται για τη ροή του αέρα δύο σπές από τις οποίες περνάει ο κύριος όγκος του αέρα καθώς αυτός δεν έχει ακόμα διαχυθεί στο plenum. Η πρώτη είναι η μία οπή της πρώτης πλάκας ισοκατανομής με διάμετρο 80mm και η δεύτερη είναι η οπή της πλάκας ισοκατανομής και έχει διάμετρο 35mm.

Υποθέτουμε ότι από εκεί θα περάσει το 10% της συνολικής παροχής. Προκύπτει η υπόθεση της πτώσης πίεσης ως εξής:

$$\text{Συνολική μαζική παροχή} = 0.15 \cdot 0.2 = 0.03 \text{ Kg/sec}$$

$$\rho = 1,2 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$D_1 = 80\text{mm}, D_2 = 35\text{mm}$$

Προκύπτει :

$$A_1 = \frac{\pi D_1^2}{4} = 0.5024\text{m}^2$$

$$A_2 = \frac{\pi D_2^2}{4} = 0.00096\text{m}^2$$

$$m = \frac{A_2}{A_1} = 0.0019$$

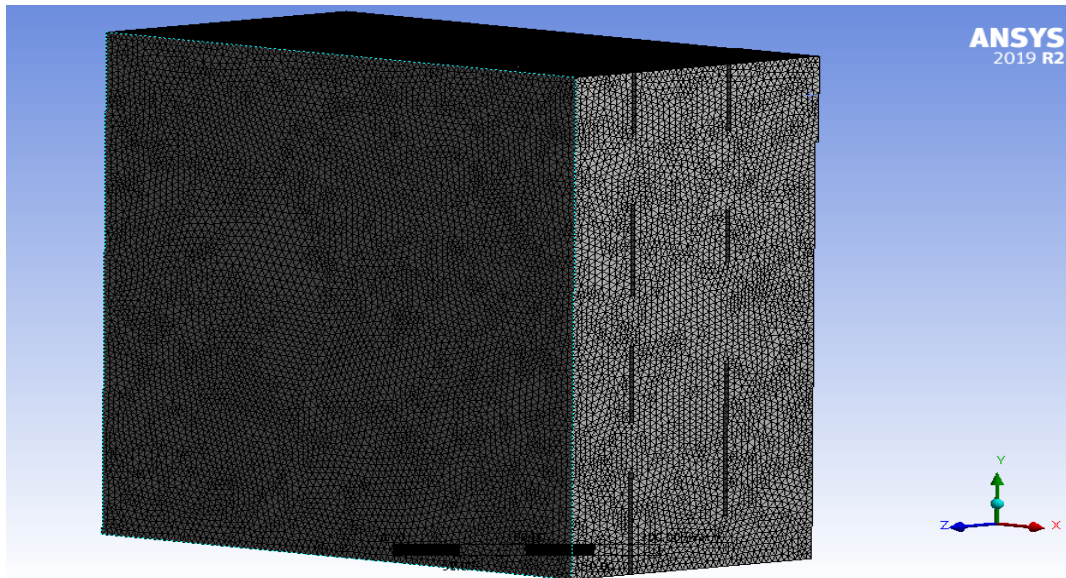
$$\alpha = 0,4 + 0,6 \left(\frac{A}{A_1} \right)^2 = 0.4$$

$$\zeta_c = \left(\frac{1 - \alpha m}{\alpha m} \right)^2 = 1703325$$

$$u = \frac{Q}{A_1} = \frac{7.57 \cdot 10^{-5}}{0.0038465} = 0.006 \text{ m/sec}$$

$$\Delta p = \zeta_c \frac{\rho}{2} u_1^2 = 36\text{Pa}$$

Η υπόθεση για την στατική πτώση πίεσης είναι 36 Pa.



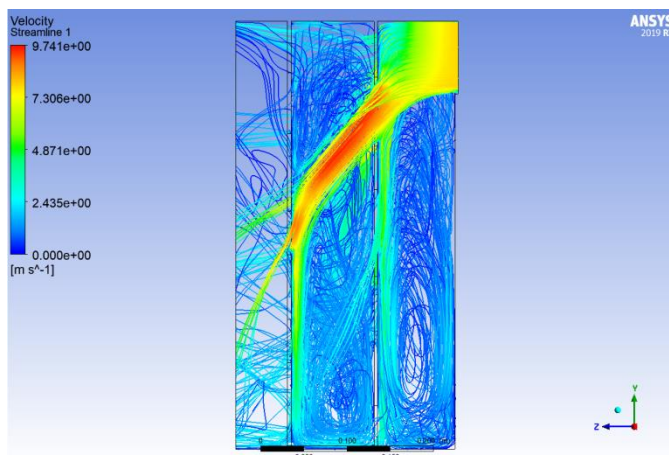
Εικόνα 303: Αποτελέσματα meshing

Για την επίλυση του προβλήματος επιλέγεται μοντέλο τυρβώδους ροής $k - \omega SST$ και επιλύεται το πρόβλημα με 300 επαναλήψεις, καθώς η σύγκλιση γίνεται σχετικά γρήγορα και σε ικανοποιητικό βαθμό.

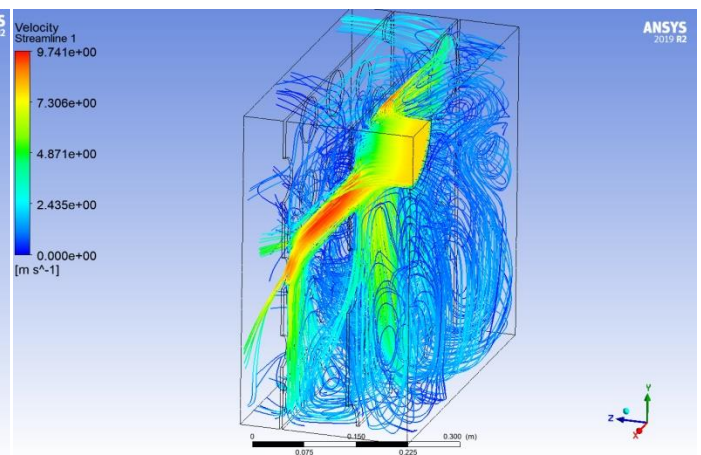
2.3.1 Αποτελέσματα 2^{ης} προσομοίωσης

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται:

- Οι ροϊκές γραμμές

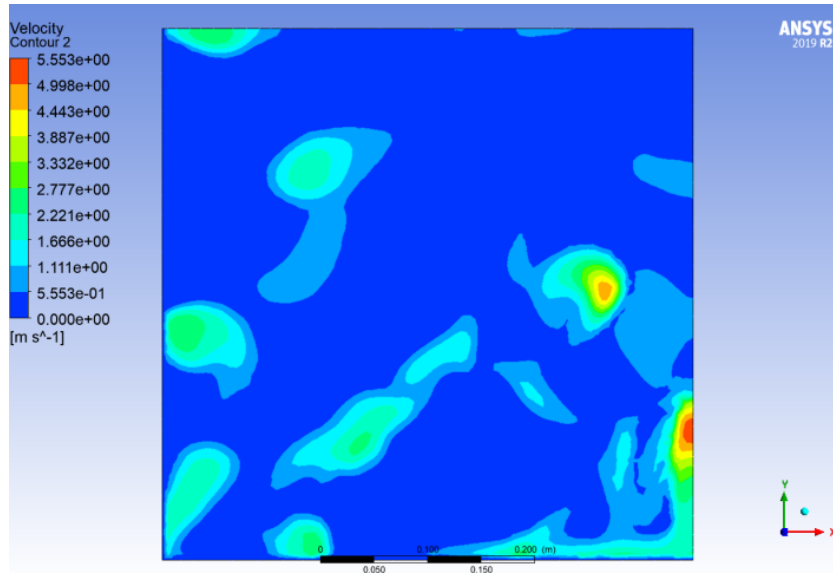


Εικόνα 44: Ροϊκές γραμμές (πλαϊνή όψη)



Εικόνα 45: Ροϊκές γραμμές (όψη υπό γωνία)

Στο πρώτο αυτό επίπεδο της διάσπασης του αέρα διακρίνονται φαινόμενα jet ροής μεγάλης ισχύος καθώς και ισχυροί στροβιλισμοί .



Εικόνα46: Ταχύτητα εξόδου

Προφίλ εξόδου προσομοίωσης 2 – προφίλ εισόδου προσομοίωσης 3					
$\frac{\sum_{i=1}^n u_{xi}}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n u_{yi}}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n u_{zi}}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n \omega_i}{n}$	$P_{out\ static}$
0.002 m/sec	0.08 m/sec	0.17 m/sec	$0.111\ m^2 \cdot s^{-2}$	$114s^{-1}$	316 Pa

Πίνακας 8: Πίνακας αποτελεσμάτων δεύτερης προσομοίωσης

Χαρακτηριστικά εισόδου:

Average Total pressure: 377 Pa

Average Dynamic pressure: 37 Pa

Static pressure: 340 Pa

Μέση ταχύτητα ($\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}$): 7.8 m/sec

Χαρακτηριστικά εξόδου:

Average Total pressure: 316.4 Pa

Average Dynamic pressure: 0.41 Pa

Static pressure: 316 Pa

Μέση ταχύτητα ($\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}$): 0.5m/sec

Average Turbulence kinetic energy: 0.111 m² · s⁻²

Average Specific dissipation rate: 114 sec⁻¹

Συσχετισμός:

$$\Delta p_{total} = 377 - 316.4 = 60.6 Pa$$

$$\Delta p_{dynamic} = 37 - 0.41 = 36.59 Pa$$

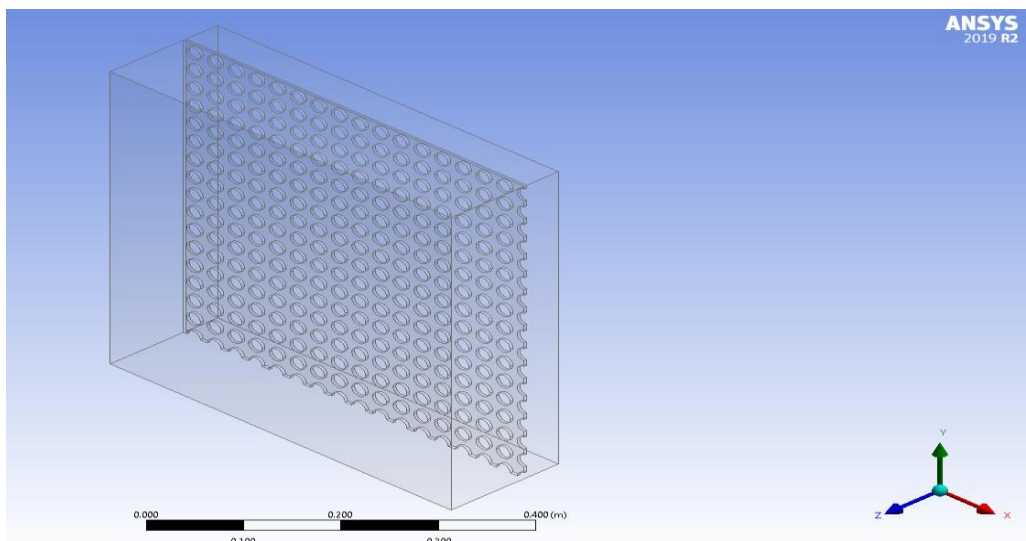
$$\Delta p_{static} = 340 - 316 = 24 Pa$$

$$|Εκτίμηση πτώσης πίεσης - Πραγματική πτώση πίεσης| = 36 - 24 = 12 Pa$$

Η πτώση πίεσης εδώ είναι κατά κύριο λόγο πτώση δυναμικής πίεσης. Η μέση ταχύτητα εξόδου είναι πλέον ελάχιστη. Η εκτίμηση της πτώσης πίεσης βοήθησε αρκετά στην εύρεση της πραγματικής πτώσης πίεσης και αποφεύχθηκαν πολλές επαναλήψεις.

2.4 Προσομοίωση 3^η

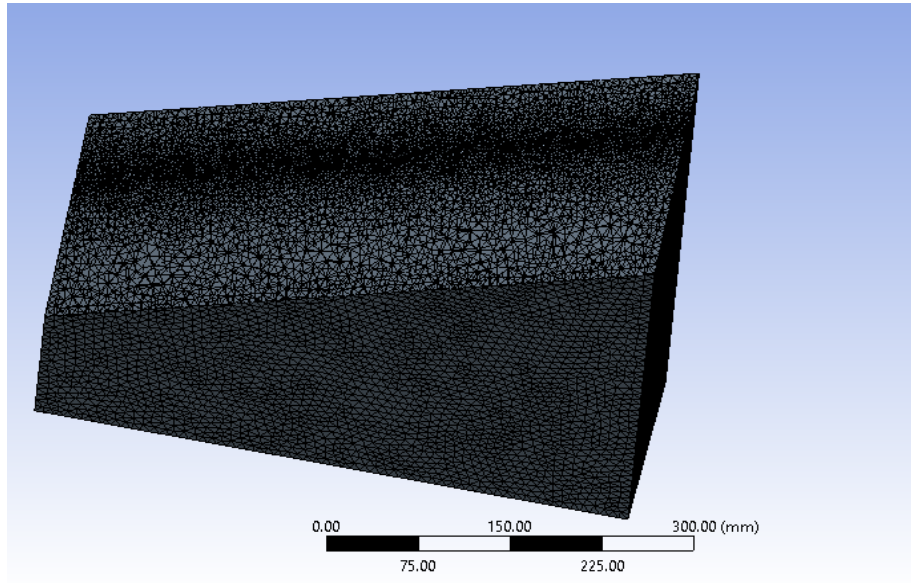
Το τρίτο τμήμα της γεωμετρίας αφορά την είσοδο του αέρα στην τρίτη πλάκα ισοκατανομής. Ως είσοδο εισάγεται το προφίλ της ταχύτητας στην έξοδο της δεύτερης προσομοίωσης.



Εικόνα 47: Γεωμετρικό μοντέλο 3^{ης} προσομοίωσης

Πιο αναλυτικά, στο Design Modeler ορίζεται η γεωμετρία και ο όγκος του αέρα. Στη συνέχεια, διαγράφεται το τμήμα της στερεάς γεωμετρίας για την αποφυγή περαιτέρω υπολογισμών. Ορίζεται το είδος των διεπιφανειών του συστήματος (symmetry, wall, inlet, outlet κλπ).

Για την διακριτοποίηση (Mesh) επιλέγεται η μέθοδος του ελαχίστου όγκου ελέγχου στοιχείου (element) ίση με 8mm. Η γεωμετρία διαιρείται συνολικά περίπου σε 2.000.000 στοιχεία (elements) ενώ οι κόμβοι (nodes) είναι περίπου 3.000.000 .



Εικόνα 48: Αποτελέσματα Meshing

Εύρεση συνοριακών συνθηκών

Οι συνθήκες εισόδου δίνονται από την δεύτερη προσομοίωση (προφίλ ταχύτητας αέρα, στατική πίεση). Αντίστοιχα με την προηγούμενη προσομοίωση εισάγεται το προφίλ ταχύτητας, έχοντας γνωστή τη στατική πίεση στην είσοδο. Κατόπιν γίνεται υπόθεση της στατικής πίεσης στην έξοδο.

Όπως και στην προηγούμενη προσομοίωση θα γίνει υπόθεση της πτώσης πίεσης βάσει της θεωρίας της ροής σε διάτρητο διάφραγμα μια προσέγγιση της πτώσης πίεσης.

Η συγκεκριμένη πλάκα ισοκατανομής διαθέτει 264.25 οπές. Ο αριθμός δίνεται σε δεκαδικό καθώς μία οπή βρίσκεται σε τομή, αφού η γεωμετρία που αναλύεται είναι το ένα τέταρτο της αρχικής (4^ο τεταρτημόριο). Θα καταμερίζοντας την παροχή σε κάθε τρύπα και με δεδομένα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά προκύπτει η πτώση πίεσης.

$$\text{Συνολική μαζική παροχή} = 0.2 \text{ Kg/sec}$$

$$\text{Αριθμός οπών} = 264.25$$

$$\text{Παροχή ανά οπή} = \frac{0,2}{264.25} = 7.57 \cdot 10^{-5} \text{ Kg/sec}$$

$$\rho = 1.2 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

Θα γίνει επίλυση της ροής ως προς μία τοπική ροή όπου ο αέρας εξέρχεται από μια οπή 70mm και εισέρχεται σε ένα διάφραγμα 20mm (οπή τρίτης πλάκας ισοκατανομής).

$$D_1 = 70mm, D_2 = 20mm$$

Προκύπτει :

$$A_1 = \frac{\pi D_1^2}{4} = 0.00385m^2 \quad \text{και} \quad A_2 = \frac{\pi D_2^2}{4} = 0.000314m^2$$

$$m = \frac{A_2}{A_1} = 0.08163$$

$$\alpha = 0,4 + 0,6 \left(\frac{A}{A_1} \right)^2 = 0.4$$

$$\zeta_c = \left(\frac{1 - \alpha m}{\alpha m} \right)^2 = 860$$

$$u = \frac{Q}{A_1} = \frac{7.57 \cdot 10^{-5}}{0.0038465} = 0.02 \text{ m/sec}$$

$$\Delta p = \zeta_c \frac{\rho}{2} u_1^2 = 0.2 Pa$$

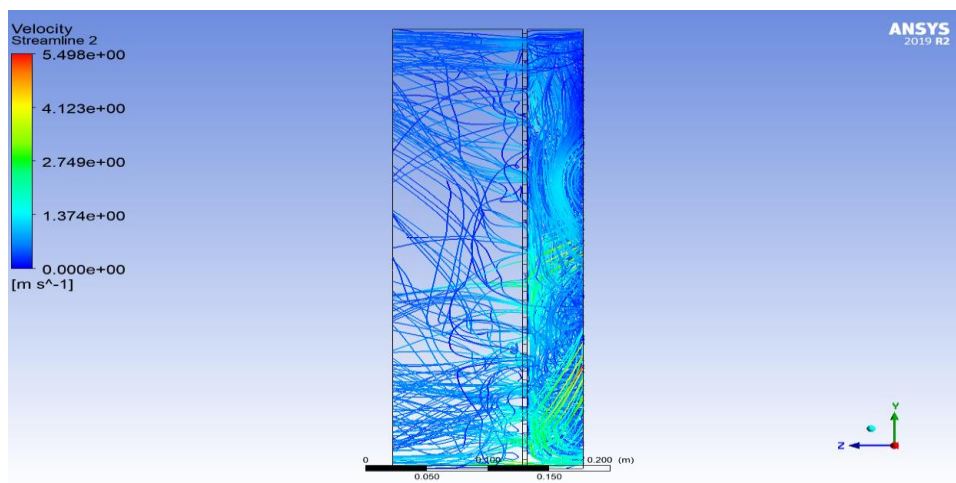
Η υπόθεση για την στατική πτώση πίεσης είναι 0.2 Pa.

Για την επίλυση του προβλήματος επιλέγεται το μοντέλο τυρβώδους ροής $k - \omega SST$ και πραγματοποιούνται 300 επαναλήψεις, καθώς η σύγκλιση γίνεται σχετικά γρήγορα και σε ικανοποιητικό βαθμό.

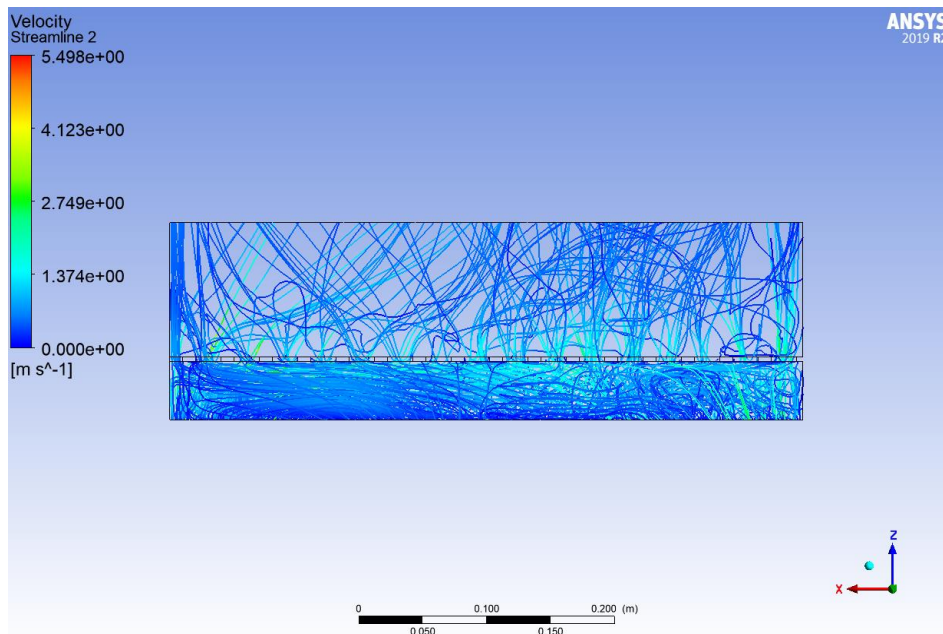
2.4.1 Αποτελέσματα 3^{ης} προσομοίωσης

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται:

- Οι ροϊκές γραμμές

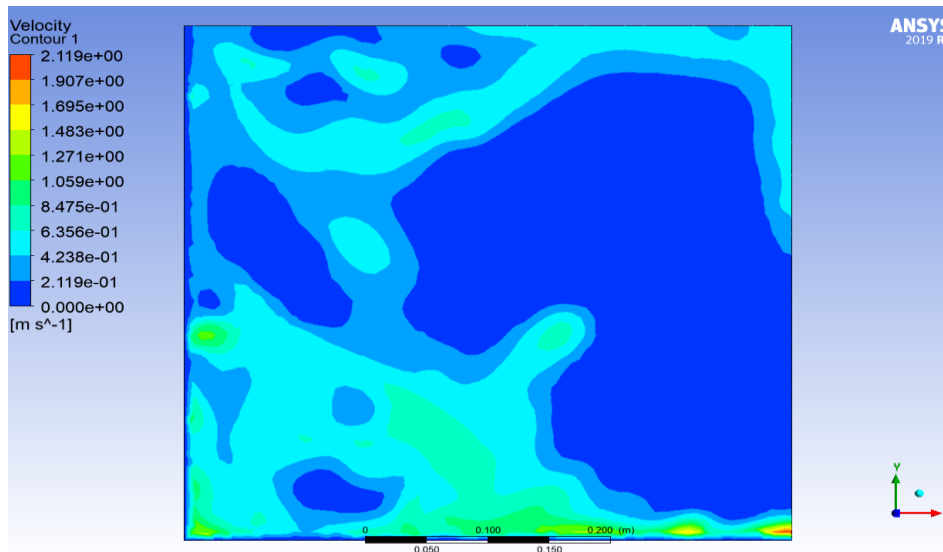


Εικόνα 49: Ροϊκές γραμμές (πλαϊνή όψη)



Εικόνα 50: Ροϊκές γραμμές (άνω όψη)

➤ Την χαρτογράφηση της ταχύτητας στην έξοδο



Εικόνα 51: Προφίλ ταχύτητας εξόδου

Προφίλ εξόδου προσομοίωσης 3 – προφίλ εισόδου προσομοίωσης 4					
$\frac{\sum_{i=1}^n u_{xi}}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n u_{yi}}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n u_{zi}}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n \omega_i}{n}$	$P_{out\ static}$
0.04m/sec	0.03 m/sec	0.17 m/sec	0.08 m ² ·s ⁻²	58 s ⁻¹	315.5 Pa

Πίνακας 9: Πίνακας αποτελεσμάτων 3^{ης} προσομοίωσης

Χαρακτηριστικά εισόδου:

Average Total pressure: 316.2 Pa

Average Dynamic pressure: 0.15Pa

Static pressure: 316 Pa

Χαρακτηριστικά εξόδου:

Average Total pressure: 315.5Pa

Average Dynamic pressure: 0.02 Pa

Static pressure: 315.5 Pa

Average Turbulence kinetic energy: 0.08 m²s⁻²

Average Specific dissipation rate: 58 sec⁻¹

Συσχετισμός:

$$\Delta p_{total} = 316.2 - 315.5 = 0.7Pa$$

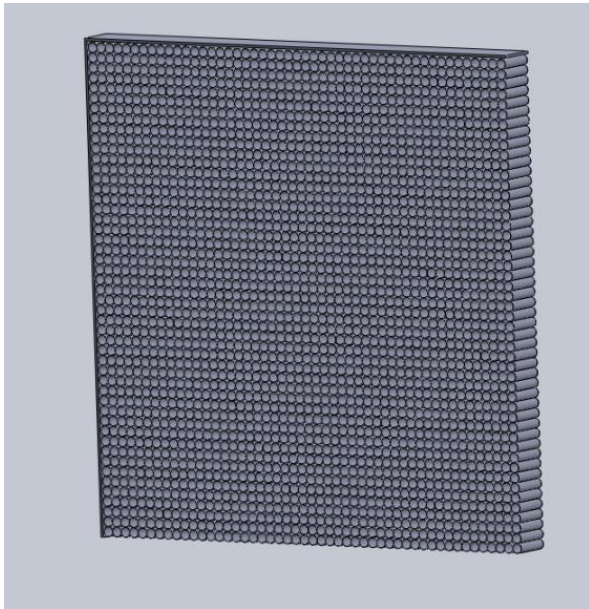
$$\Delta p_{dynamic} = 0.15 - 0.02 = 0.13Pa$$

$$\Delta p_{static} = 316.2 - 315 = 0.5Pa$$

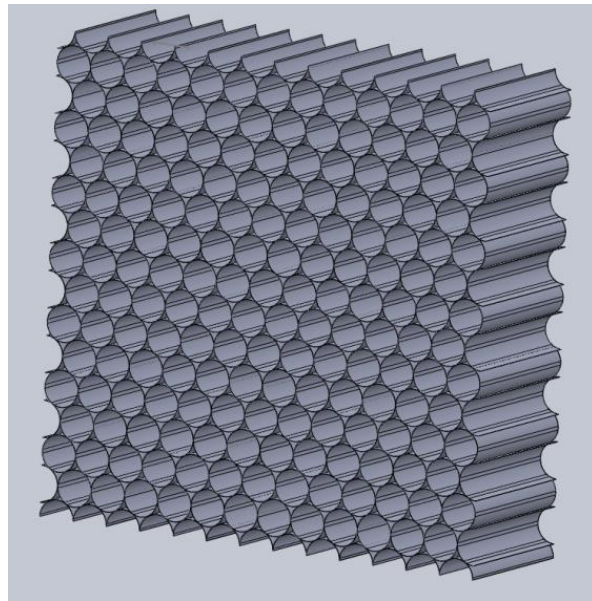
$$|Εκτίμηση πτώσης πίεσης - Πραγματική πτώση πίεσης| = 0.2 - 0.5 = 0.3Pa$$

2.5 Προσομοίωση 4^η

Το τέταρτο τμήμα της προσομοίωσης αφορά τη γεωμετρία της πλάκας ισοκατανομής αποτελούμενης από επάλληλους λεπτούς σωλήνες. Δεδομένου ότι υπάρχουν χιλιάδες σωλήνες οι οποίοι πρέπει να εισαχθούν στο πρόγραμμα το υπολογιστικό φορτίο είναι τεράστιο και δεν μπορεί να επιλυθεί με συμβατικά μέσα.



Εικόνα 52: Πλάκα ισοκατανομής με καλαμάκια

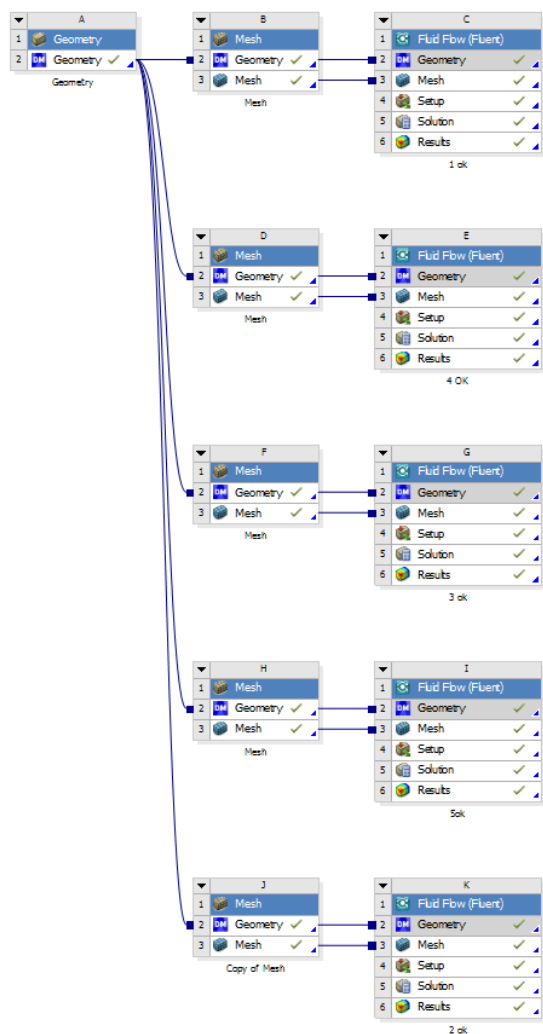


Εικόνα 53: Γεωμετρία προσομοιώσεων I, II, III, IV, V

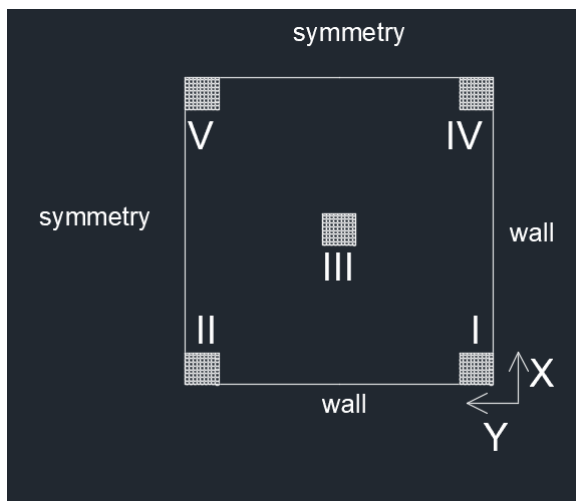
Για το λόγο αυτό θα πραγματοποιηθούν μια σειρά από προσομοιώσεις ώστε να προσεγγισθεί και να επιλυθεί το πρόβλημα όσο το δυνατόν καλύτερα. Πιο αναλυτικά θα προσομοιωθεί η ροή μιας ομάδας από λεπτούς επάλληλους σωλήνες (περίπου 160 σε πλήθος), αντί ολόκληρης της πλάκας ισοκατανομής, η οποία θα τοποθετηθεί σε στρατηγικά σημεία. Θα επιλυθούν πέντε προσομοιώσεις, εκ των οποίων τέσσερις θα βρίσκονται στις άκρες και μία στο κέντρο της πλάκας ισοκατανομής. Στη συνέχεια με τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από τις περιοχές I,II,III,IV και V θα εξαχθούν αποτελέσματα για ολόκληρο το προφίλ εξόδου.

Παρακάτω θα περιγραφεί αναλυτικά, πως θα γενικευθούν τα αποτελέσματα αυτών των προσομοιώσεων σε ολόκληρο το προφίλ, παρακάτω.

Ως είσοδο εισάγονται τα τοπικά στοιχεία u_x, u_y, u_z, k, ω τα οποία προέρχονται ως έξοδος από την προσομοίωση 3.



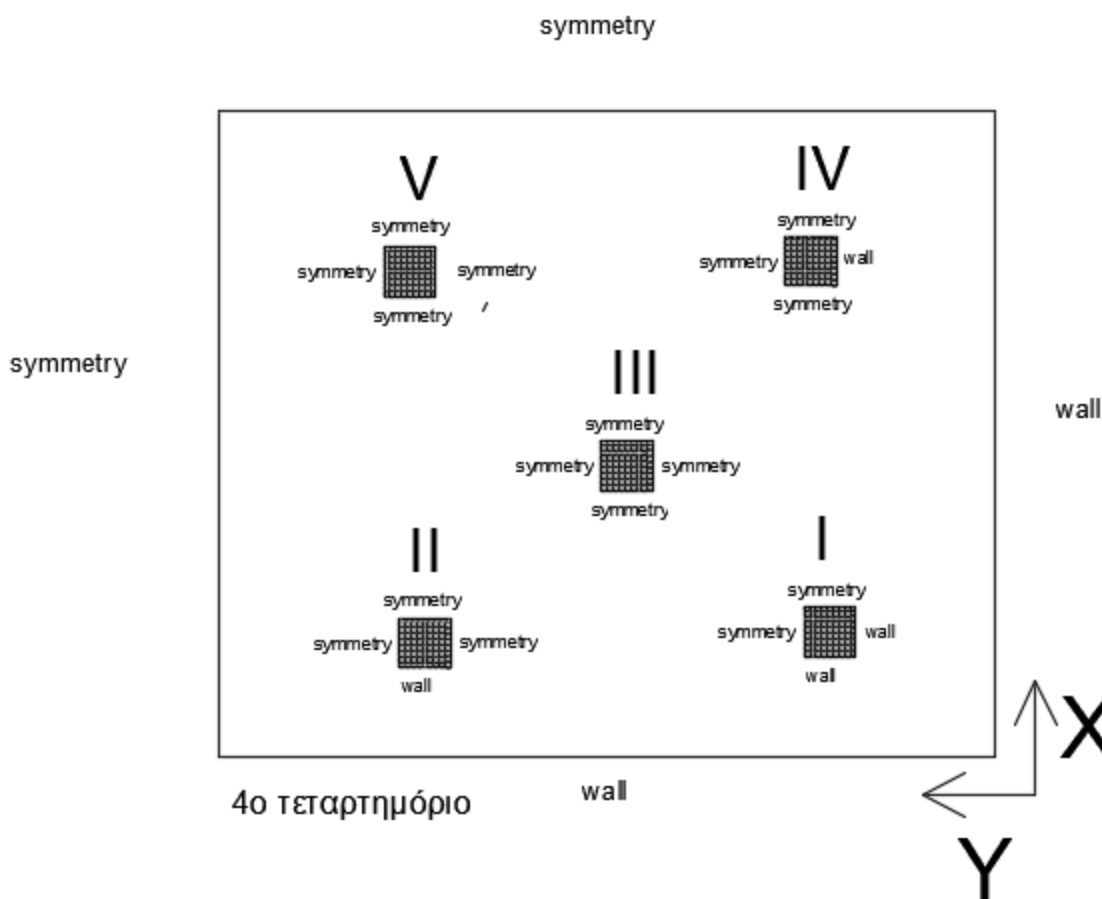
Εικόνα 54: Γεωμετρικό μοντέλο κοινό



Εικόνα 55: Ορισμός διεπιφανειών 4^{ου} τεταρτημορίου

Για τις προσομοιώσεις αυτές το γεωμετρικό μοντέλο είναι κοινό. Επίσης κοινός είναι και ο τύπος διακριτοποίησης που χρησιμοποιείται, ο οποίος είναι με την ελάχιστη διάσταση του όγκου του στοιχείου (element) το οποίο και ορίζεται ίσο με 0.7mm.

Η διαφοροποίηση κατά τη διακριτοποίηση αφορά τον χαρακτηρισμό των διεπιφανειών μεταξύ ρευστού – ρευστού και ρευστού – στερεού σε κάθε περίπτωση και απεικονίζονται παρακάτω.



Εικόνα 56: Διεπιφάνειες προσομοιώσεων I,II,III,IV

2.5.1 Προσομοίωση I

Ως είσοδο στην προσομοίωση αυτή εισάγονται όλα τα στοιχεία σε μορφή txt της εξόδου της προσομοίωσης 3, για τις παρακάτω τιμές:

$$0 < x < 53.55, \quad 0 < y < 51.53, \quad z = 0 \quad (\text{διαστάσεις σε mm})$$

Δηλαδή κάθε element το οποίο βρίσκεται στο επίπεδο το οποίο ορίζεται από τα παραπάνω σύνολα, και το οποίο χαρακτηρίζεται από u_x, u_y, u_z, k, ω θα γίνει το προφίλ εισόδου για την προσομοίωση I.

Η χαρτογράφηση του επιπέδου της ταχύτητας εισόδου φαίνεται στην επόμενη φωτογραφία.

Για το σύστημά ισχύουν οι εξής συνθήκες:

Οριακές συνθήκες εισόδου: velocity inlet \rightarrow προφίλ εξόδου από προηγούμενη προσομοίωση και στατική πίεση εισόδου $P_{gauge inlet} = 315,5Pa$

Οριακές συνθήκες εξόδου: δεν είναι γνωστές

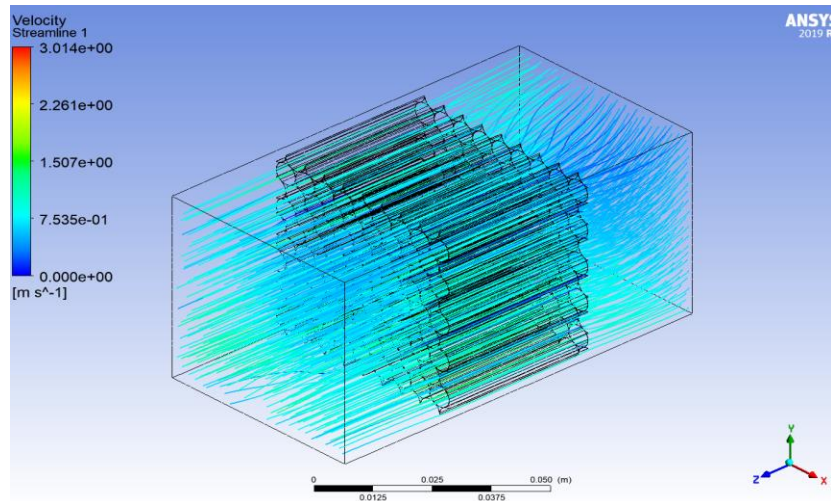
Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε παραπάνω στον όγκο ελέγχου θα πρέπει να εισαχθούν ένα μέγεθος Q_{in} (παροχή, ταχύτητα κλπ) και ένα μέγεθος P_{out} . Για το λόγο αυτό θα γίνει υπόθεση μιας συνοριακή συνθήκη εξόδου (outlet boundary condition) ώστε να δοθεί η δυνατότητα στον solver του προγράμματος ansys να επιλύσει τις εξισώσεις Navier Stokes για τυρβώδη ροή ανάντι έως ότου δοθεί και η αρχική τιμή της στατικής πίεσης ($P_{gauge inlet}$).

Ως εκ τούτου πραγματοποιείται μια επαναληπτική διαδικασία, εισάγοντας μια προσεγγιστική, ρεαλιστική τιμή για την τελική τιμή της στατικής πίεσης ($P_{gauge outlet}$) και εξάγοντας την αρχική τιμή της στατικής πίεσης ($P_{gauge inlet}$), έως ότου γίνει η σύγκλιση στην τιμή $P_{gauge inlet} = 315,5Pa$

2.5.1.1 Αποτελέσματα

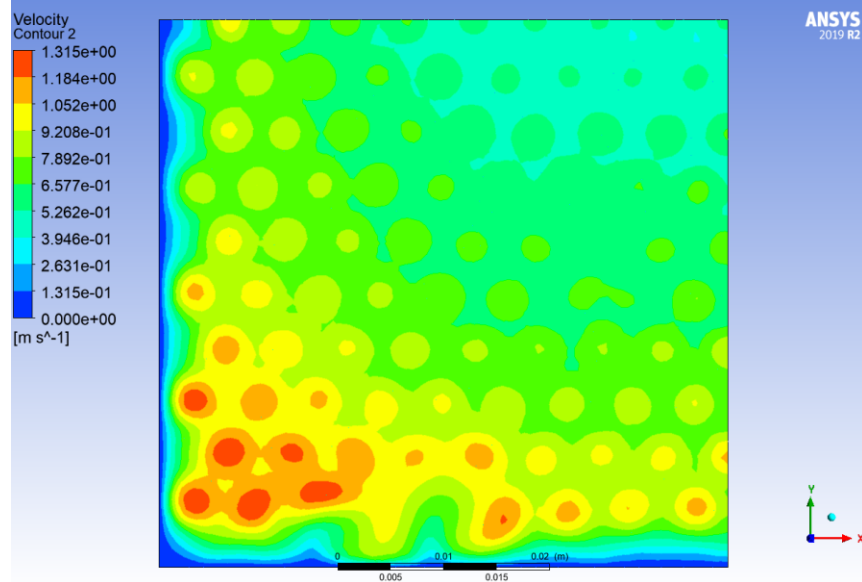
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται:

- Οι ροϊκές γραμμές



Εικόνα 57: Ροϊκές γραμμές

➤ Χαρτογράφηση ταχύτητας εξόδου



Εικόνα 58: Προφίλ ταχύτητας εξόδου

Όπως παρατηρεί κανείς από τις ροϊκές γραμμές ο όγκος ελέγχου στους λεπτούς επάλληλους σωλήνες έχει τεράστια επίδραση ως προς την γραμμικοποίηση της ροής. Για το λόγο αυτό θα παρατεθούν κάποιοι δείκτες οι οποίοι αποδεικνύουν το μέτρο της απόσβεσης των στροβιλισμών πριν την είσοδο και μετά την είσοδο στη γεωμετρία αυτή.

Προφίλ εξόδου προσομοίωσης 3 – προφίλ εισόδου προσομοίωσης I					
$\frac{\sum_{i=1}^n u_{xi}}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n u_{yi}}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n u_{zi}}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n \omega_i}{n}$	$P_{in static}$
0.058 m/sec	0.17 m/sec	0.76 m/sec	$0.07 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$	216.4 s^{-1}	315.5 Pa

Πίνακας 10: Πίνακας εισόδου προσομοίωσης I

Προφίλ εξόδου προσομοίωσης I					
$\frac{\sum_{i=1}^n u_{xi}}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n u_{yi}}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n u_{zi}}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n \omega_i}{n}$	$P_{out static}$
0.002m/sec	0.002m/sec	0.707m/sec	$0.003 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$	676.4 s^{-1}	314.6 Pa

Πίνακας 11: Πίνακας αποτελεσμάτων προσομοίωσης I

$$\text{Έξοδος προσομοίωσης 3 } \frac{\text{Average}_{u_x}}{\text{Average}_{u_z}} = \frac{0.002}{0.707} = 0.076$$

$$\text{Έξοδος προσομοίωσης 3 } \frac{\text{Average}_{u_y}}{\text{Average}_{u_z}} = \frac{0.17}{0.76} = 0.22$$

$$\text{Έξοδος προσομοίωσης I } \frac{\text{Average}_{u_x}}{\text{Average}_{u_z}} = \frac{0.002}{0.707} = 0.002828$$

$$\text{Έξοδος προσομοίωσης I } \frac{\text{Average}_{u_y}}{\text{Average}_{u_z}} = \frac{0.002}{0.707} = 0.002828$$

Βάσει αποτελεσμάτων φαίνεται πως η αποκλίνουσα συμπεριφορά της ταχύτητας στον άξονα x μειώνεται έως και 26 φορές ενώ στον άξονα y μειώνεται έως και 77 φορές.

2.5.2 Προσομοίωση II

Ως είσοδο στην προσομοίωση αυτή εισάγονται όλα τα στοιχεία σε μορφή txt της εξόδου της προσομοίωσης 3, για τις παρακάτω τιμές:

$$441.45 < x < 495, \quad 0 < y < 51,53, \quad z = 0 \quad (\text{διαστάσεις σε mm})$$

Δηλαδή κάθε element το οποίο βρίσκεται στο επίπεδο το οποίο ορίζεται από τα παραπάνω σύνολα, και το οποίο χαρακτηρίζεται από u_x, u_y, u_z, k, ω θα γίνει το προφίλ εισόδου για την προσομοίωση II.

Για το σύστημά ισχύουν οι εξής συνθήκες:

Οριακές συνθήκες εισόδου: velocity inlet \rightarrow προφίλ εξόδου από προηγούμενη προσομοίωση και στατική πίεση εισόδου $P_{gauge\ inlet} = 315,5Pa$

Οριακές συνθήκες εξόδου: δεν είναι γνωστές

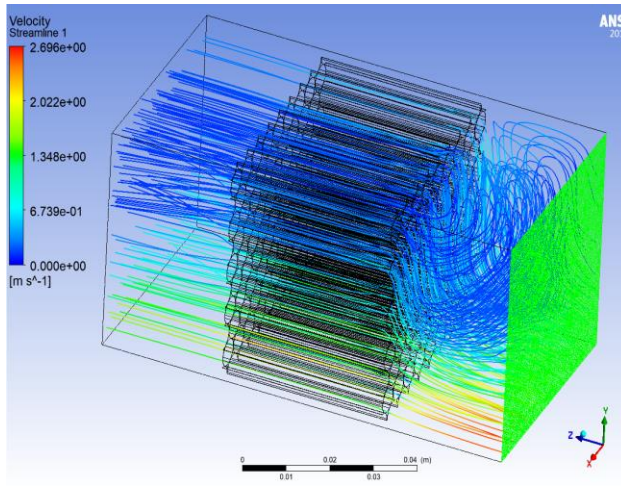
Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε παραπάνω στον όγκο ελέγχου θα πρέπει να εισαχθούν ένα μέγεθος Q_{in} (παροχή, ταχύτητα κλπ) και ένα μέγεθος P_{out} . Για το λόγο αυτό θα γίνει υπόθεση μιας συνοριακή συνθήκη εξόδου (outlet boundary condition) ώστε να δοθεί η δυνατότητα στον solver του προγράμματος ansys να επιλύσει τις εξισώσεις Navier Stokes για τυρβώδη ροή ανάντι έως ότου δοθεί και η αρχική τιμή της στατικής πίεσης ($P_{gauge\ inlet}$).

Ως εκ τούτου πραγματοποιείται μια επαναληπτική διαδικασία, εισάγοντας μια προσεγγιστική, ρεαλιστική τιμή για την τελική τιμή της στατικής πίεσης ($P_{gauge\ outlet}$) και εξάγοντας την αρχική τιμή της στατικής πίεσης ($P_{gauge\ inlet}$), έως ότου γίνει η σύγκλιση στην τιμή $P_{gauge\ inlet} = 315,5Pa$

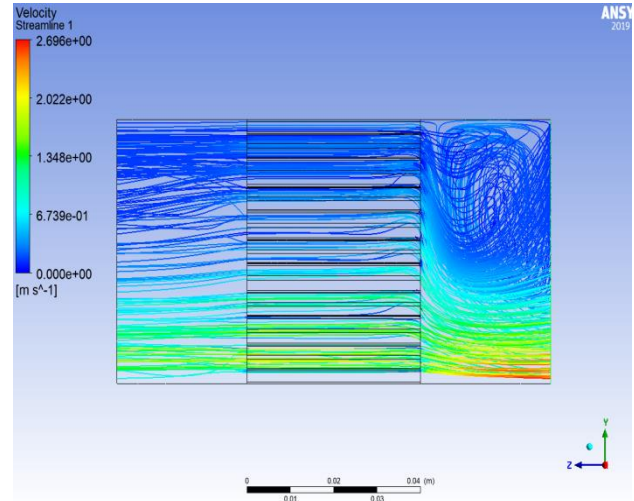
2.5.2.1 Αποτελέσματα

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται:

- Οι ροϊκές γραμμές

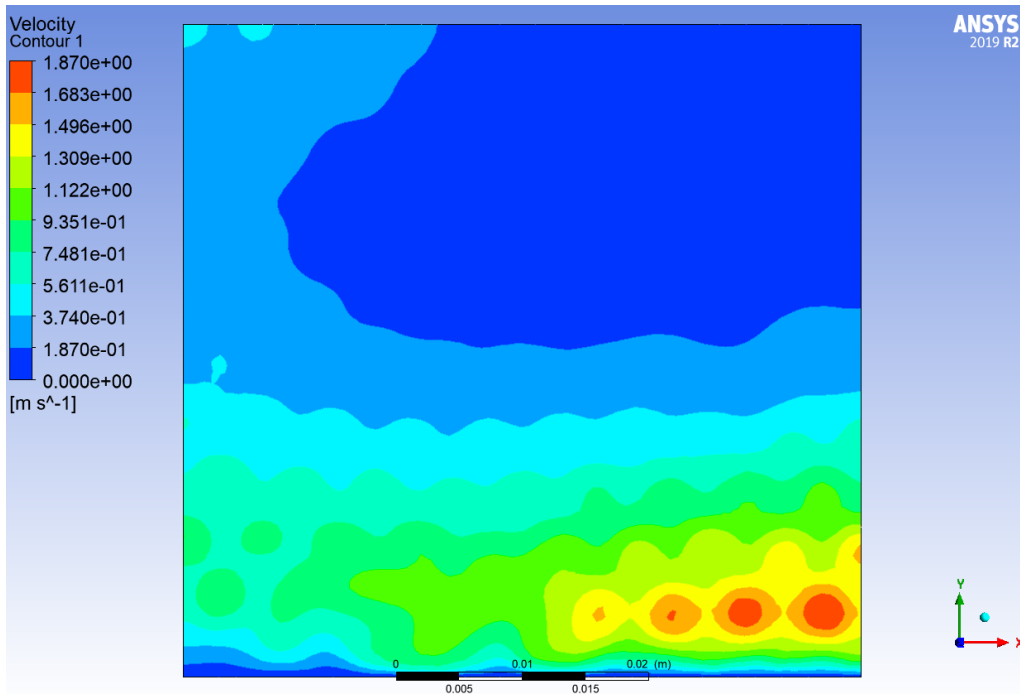


Εικόνα 59: Ροϊκές γραμμές (όψη υπό γωνία)



Εικόνα 60: Ροϊκές γραμμές (πλάγια όψη)

- Προφίλ ταχύτητας στην έξοδο



Εικόνα 61: Προφίλ ταχύτητας εξόδου

Όπως παρατηρεί κανείς από τις ροϊκές γραμμές ο όγκος ελέγχου στα καλαμάκια έχει τεράστια επίδραση ως προς την γραμμικοποίηση της ροής και εδώ. Παρατίθενται οι δείκτες οι οποίοι αποδεικνύουν το μέτρο της απόσβεσης των στροβιλισμών πριν την είσοδο και μετά την είσοδο στη γεωμετρία αυτή.

Προφίλ εξόδου προσομοίωσης 3 – προφίλ εισόδου προσομοίωσης II					
$\frac{\sum_{i=1}^n u_{x_i}}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n u_{y_i}}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n u_{z_i}}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n \omega_i}{n}$	$P_{in\ static}$
0.089 m/sec	0,093 m/sec	0,49 m/sec	0,095 m ² ·s ⁻²	171 s ⁻¹	315.5 Pa

Πίνακας 12: Προφίλ εισόδου προσομοίωσης II

Προφίλ εξόδου προσομοίωσης II					
$\frac{\sum_{i=1}^n u_{x_i}}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n u_{y_i}}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n u_{z_i}}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n \omega_i}{n}$	$P_{out\ static}$
0.005m/sec	0.005m/sec	0.44 m/sec	0.003 m ² ·s ⁻²	389.3 s ⁻¹	314.6 Pa

Πίνακας 13: Αποτελέσματα προσομοίωσης II

$$\text{Έξοδος προσομοίωσης 3 } \frac{Average_u_x}{Average_u_z} = \frac{0.089}{0.49} = 0.18$$

$$\text{Έξοδος προσομοίωσης 3 } \frac{Average_u_y}{Average_u_z} = \frac{0.093}{0.49} = 0.19$$

$$\text{Έξοδος προσομοίωσης II } \frac{Average_u_x}{Average_u_z} = \frac{0.005}{0.44} = 0.011$$

$$\text{Έξοδος προσομοίωσης II } \frac{Average_u_y}{Average_u_z} = \frac{0.005}{0.44} = 0.011$$

Βάσει αποτελεσμάτων φαίνεται πως η αποκλίνουσα συμπεριφορά της ταχύτητας στον άξονα x μειώνεται έως και 16 φορές ενώ στον άξονα y μειώνεται έως και 17 φορές.

2.5.3 Προσομοίωση III

Ως είσοδο στην προσομοίωση αυτή εισάγονται όλα τα στοιχεία σε μορφή txt της εξόδου της προσομοίωσης 3, για τις παρακάτω τιμές:

$$220.73 < x < 274.27, 221.74 < y < 273.26, z = 0 \text{ (διαστάσεις σε mm)}$$

Δηλαδή κάθε element το οποίο βρίσκεται στο επίπεδο το οποίο ορίζεται από τα παραπάνω σύνολα, και το οποίο χαρακτηρίζεται από u_x, u_y, u_z, k, ω θα γίνει το προφίλ εισόδου για την προσομοίωση III.

Για το σύστημά ισχύουν οι εξής συνθήκες:

Οριακές συνθήκες εισόδου: velocity inlet \rightarrow προφίλ εξόδου από προηγούμενη προσομοίωση και στατική πίεση εισόδου $P_{gauge\ inlet} = 315,5Pa$

Οριακές συνθήκες εξόδου: δεν είναι γνωστές

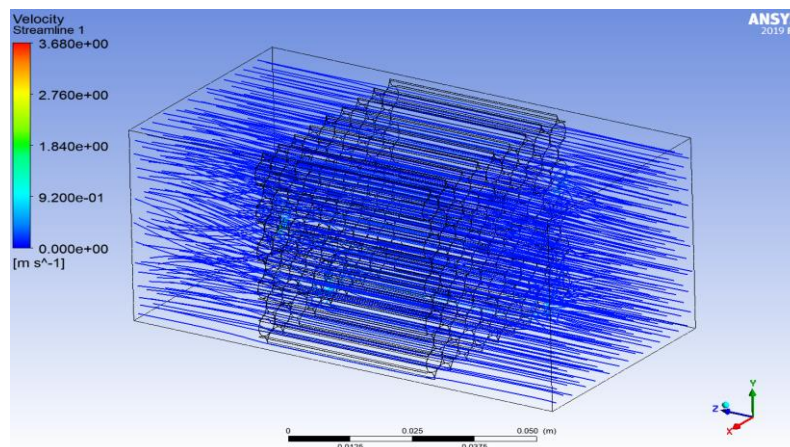
Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε παραπάνω στον όγκο ελέγχου θα πρέπει να εισαχθούν ένα μέγεθος Q_{in} (παροχή, ταχύτητα κλπ) και ένα μέγεθος P_{out} . Για το λόγο αυτό θα γίνει υπόθεση μιας συνοριακή συνθήκη εξόδου (outlet boundary condition) ώστε να δοθεί η δυνατότητα στον solver του προγράμματος ansys να επιλύσει τις εξισώσεις Navier Stokes για τυρβώδη ροή ανάντι έως ότου δοθεί και η αρχική τιμή της στατικής πίεσης ($P_{gauge\ inlet}$).

Ως εκ τούτου πραγματοποιείται μια επαναληπτική διαδικασία, εισάγοντας μια προσεγγιστική, ρεαλιστική τιμή για την τελική τιμή της στατικής πίεσης ($P_{gauge\ outlet}$) και εξάγοντας την αρχική τιμή της στατικής πίεσης ($P_{gauge\ inlet}$), έως ότου γίνει η σύγκλιση στην τιμή $P_{gauge\ inlet} = 315,5Pa$.

2.5.3.1 Αποτελέσματα

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται:

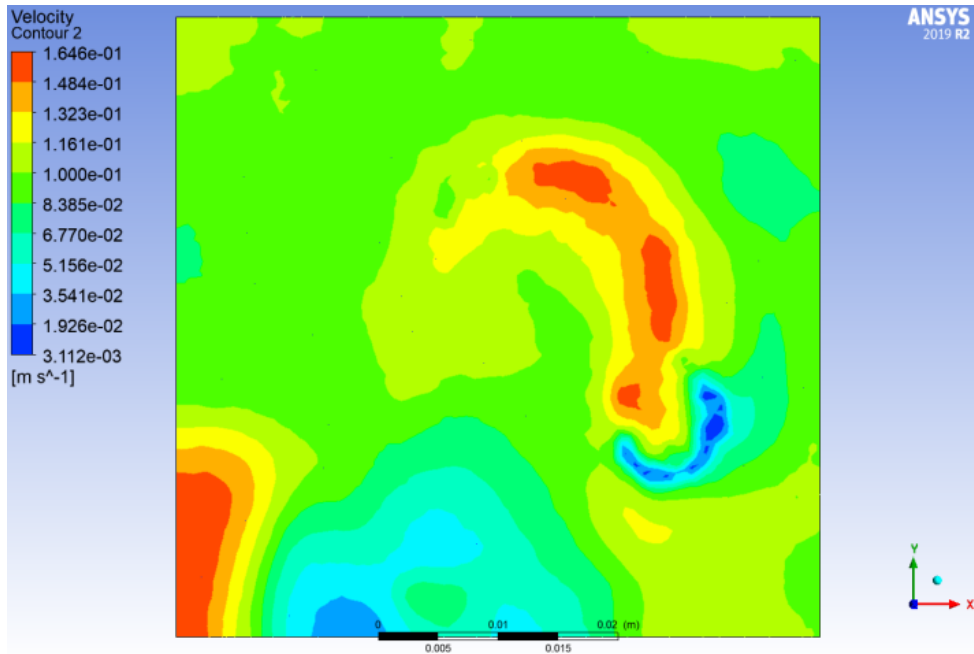
- Οι ροϊκές γραμμές



Εικόνα 62: Ροϊκές γραμμές

Η ταχύτητα στο επίπεδο αυτό είναι αρκετά χαμηλή και αυτό οφείλεται στην κατανομή του αέρα όπως αυτός έχει διαχωρισθεί μέσω των πλακών ισοκατανομής.

➤ Ταχύτητα εξόδου



Εικόνα 63: Προφίλ ταχύτητας εξόδου

Όπως παρατηρεί κανείς από τις ροϊκές γραμμές ο όγκος ελέγχου στα καλαμάκια έχει τεράστια επίδραση ως προς την γραμμικοποίηση της ροής και εδώ. Παρατίθενται οι δείκτες οι οποίοι αποδεικνύουν το μέτρο της απόσβεσης των στροβιλισμών πριν την είσοδο και μετά την είσοδο στη γεωμετρία αυτή.

Προφίλ εξόδου προσομοίωσης 3 – προφίλ εισόδου προσομοίωσης III					
$\frac{\sum_{i=1}^n u_{xi}}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n u_{yi}}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n u_{zi}}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n \omega_i}{n}$	$P_{in\ static}$
0.007m/sec	0.002m/sec	0.09m/sec	0.0006m ² ·s ⁻²	1.12s ⁻¹	315.5 Pa

Πίνακας 14: Προφίλ εισόδου προσομοίωσης III

Προφίλ εξόδου προσομοίωσης III					
$\frac{\sum_{i=1}^n u_{xi}}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n u_{yi}}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n u_{zi}}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n \omega_i}{n}$	$P_{out\ static}$
0.002m/sec	0.0007m/sec	0.09m/sec	$0.001m^2 \cdot s^{-2}$	$6.3s^{-1}$	314.6 Pa

Πίνακας 15: Αποτελέσματα εξόδου προσομοίωσης III

$$\text{Έξοδος προσομοίωσης 3 } \frac{Average_{u_x}}{Average_{u_z}} = \frac{0.007}{0.09} = 0.077$$

$$\text{Έξοδος προσομοίωσης 3 } \frac{Average_{u_y}}{Average_{u_z}} = \frac{0.002}{0.09} = 0.022$$

$$\text{Έξοδος προσομοίωσης III } \frac{Average_{u_x}}{Average_{u_z}} = \frac{0.002}{0.09} = 0.022$$

$$\text{Έξοδος προσομοίωσης III } \frac{Average_{u_y}}{Average_{u_z}} = \frac{0.0007}{0.09} = 0.0077$$

Βάσει αποτελεσμάτων φαίνεται πως η αποκλίνουσα συμπεριφορά της ταχύτητας στον άξονα x μειώνεται έως και 35 φορές ενώ στον άξονα y μειώνεται έως και 28 φορές.

2.5.4 Προσομοίωση IV

Ως είσοδο στην προσομοίωση αυτή εισάγονται όλα τα στοιχεία σε μορφή txt της εξόδου της προσομοίωσης 3, για τις παρακάτω τιμές:

$$0 < x < 53.55, 443.47 < y < 495, z = 0 \text{ (διαστάσεις σε mm)}$$

Δηλαδή κάθε element το οποίο βρίσκεται στο επίπεδο το οποίο ορίζεται από τα παραπάνω σύνολα, και το οποίο χαρακτηρίζεται από u_x, u_y, u_z, k, ω θα γίνει το προφίλ εισόδου για την προσομοίωση IV.

Για το σύστημά ισχύουν οι εξής συνθήκες:

Οριακές συνθήκες εισόδου: velocity inlet \rightarrow προφίλ εξόδου από προηγούμενη προσομοίωση και στατική πίεση εισόδου $P_{gauge\ inlet} = 315,5Pa$

Οριακές συνθήκες εξόδου: δεν είναι γνωστές

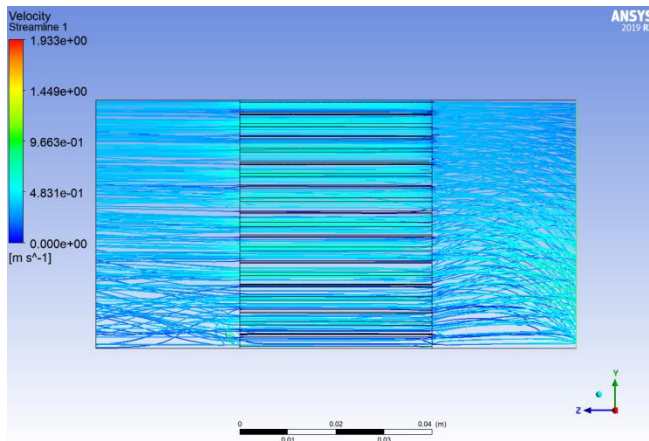
Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε παραπάνω στον όγκο ελέγχου θα πρέπει να εισαχθούν ένα μέγεθος Q_{in} (παροχή, ταχύτητα κλπ) και ένα μέγεθος P_{out} . Για το λόγο αυτό θα γίνει υπόθεση μιας συνοριακή συνθήκη εξόδου (outlet boundary condition) ώστε να δοθεί η δυνατότητα στον solver του προγράμματος ansys να επιλύσει τις εξισώσεις Navier Stokes για τυρβώδη ροή ανάντι έως ότου δοθεί και η αρχική τιμή της στατικής πίεσης ($P_{gauge\ inlet}$).

Ως εκ τούτου πραγματοποιείται μια επαναληπτική διαδικασία, εισάγοντας μια προσεγγιστική, ρεαλιστική τιμή για την τελική τιμή της στατικής πίεσης ($P_{gauge\ outlet}$) και εξάγοντας την αρχική τιμή της στατικής πίεσης ($P_{gauge\ inlet}$), έως ότου γίνει η σύγκλιση στην τιμή $P_{gauge\ inlet} = 315,5Pa$

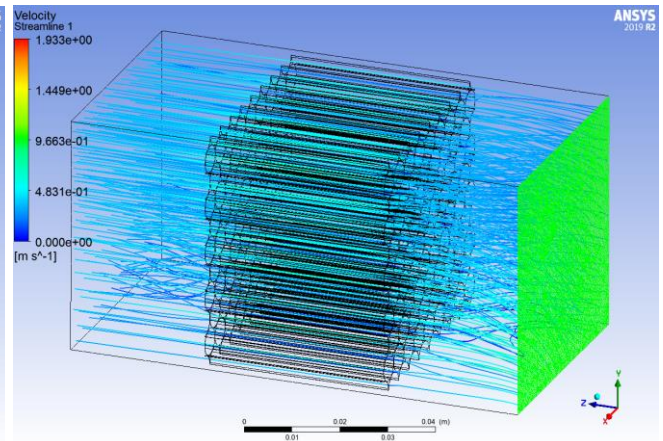
2.5.4.1 Αποτελέσματα

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται..

- Οι ροϊκές γραμμές

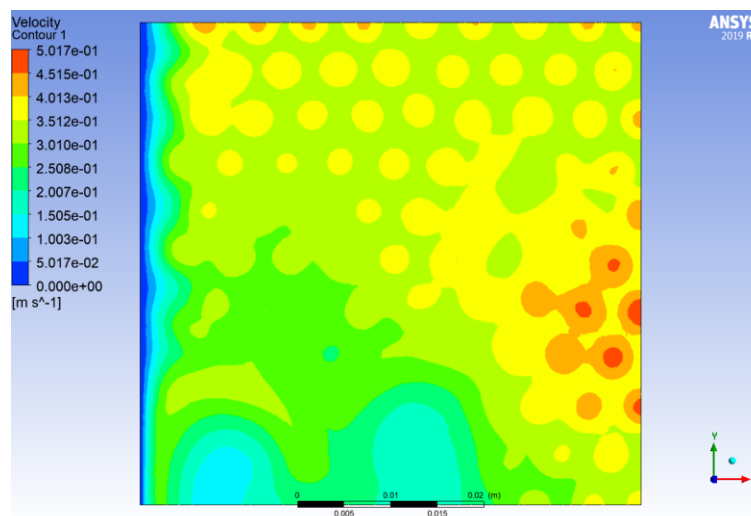


Εικόνα 64: Ροϊκές γραμμές (πλάγια όψη)



Εικόνα 65: Ροϊκές γραμμές (όψη υπό γωνία)

- Πίεση στην είσοδο



Εικόνα 66: Προφίλ ταχύτητας εξόδου

Όπως παρατηρεί κανείς από τις ροϊκές γραμμές ο όγκος ελέγχου στα καλαμάκια έχει τεράστια επίδραση ως προς την γραμμικοποίηση της ροής και εδώ. Παραθέτονται οι δείκτες οι οποίοι αποδεικνύουν το μέτρο της απόσβεσης των στροβιλισμών πριν την είσοδο και μετά την είσοδο στη γεωμετρία αυτή.

Προφίλ εξόδου προσομοίωσης 3 – προφίλ εισόδου προσομοίωσης IV					
$\frac{\sum_{i=1}^n u_{xi}}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n u_{yi}}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n u_{zi}}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n \omega_i}{n}$	$P_{in\ static}$
0.02m/sec	0.15m/sec	0.32m/sec	$0.05\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$	126.2s^{-1}	315.5 Pa

Πίνακας 16: Προφίλ εισόδου προσομοίωσης IV

Προφίλ εξόδου προσομοίωσης IV					
$\frac{\sum_{i=1}^n u_{xi}}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n u_{yi}}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n u_{zi}}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n \omega_i}{n}$	$P_{out\ static}$
0.006m/sec	0.006m/sec	0.3m/sec	$0.001\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$	291s^{-1}	314.6 Pa

Πίνακας 17: Αποτελέσματα εξόδου προσομοίωσης IV

$$\text{Έξοδος προσομοίωσης 3 } \frac{Average_{u_x}}{Average_{u_z}} = \frac{0.02}{0.32} = 0.0625$$

$$\text{Έξοδος προσομοίωσης 3 } \frac{Average_{u_y}}{Average_{u_z}} = \frac{0.15}{0.32} = 0.468$$

$$\text{Έξοδος προσομοίωσης IV } \frac{Average_{u_x}}{Average_{u_z}} = \frac{0.006}{0.3} = 0.002$$

$$\text{Έξοδος προσομοίωσης IV } \frac{Average_{u_y}}{Average_{u_z}} = \frac{0.006}{0.3} = 0.002$$

Βάσει αποτελεσμάτων φαίνεται πως η αποκλίνουσα συμπεριφορά της ταχύτητας στον άξονα x μειώνεται έως και 31 φορές ενώ στον άξονα y μειώνεται έως και 23 φορές.

2.5.5 Προσομοίωση V

Ως είσοδο στην προσομοίωση αυτή εισάγονται όλα τα στοιχεία σε μορφή txt της εξόδου της προσομοίωσης 3, για τις παρακάτω τιμές:

$$441.45 < x < 495, 443.47 < y < 495, z = 0 \text{ (διαστάσεις σε mm)}$$

Δηλαδή κάθε element το οποίο βρίσκεται στο επίπεδο το οποίο ορίζεται από τα παραπάνω σύνολα, και το οποίο χαρακτηρίζεται από u_x, u_y, u_z, k, ω θα γίνει το προφίλ εισόδου για την προσομοίωση V.

Για το σύστημά ισχύουν οι εξής συνθήκες:

Οριακές συνθήκες εισόδου: velocity inlet \rightarrow προφίλ εξόδου από προηγούμενη προσομοίωση και στατική πίεση εισόδου $P_{gauge\ inlet} = 315,5Pa$

Οριακές συνθήκες εξόδου: δεν είναι γνωστές

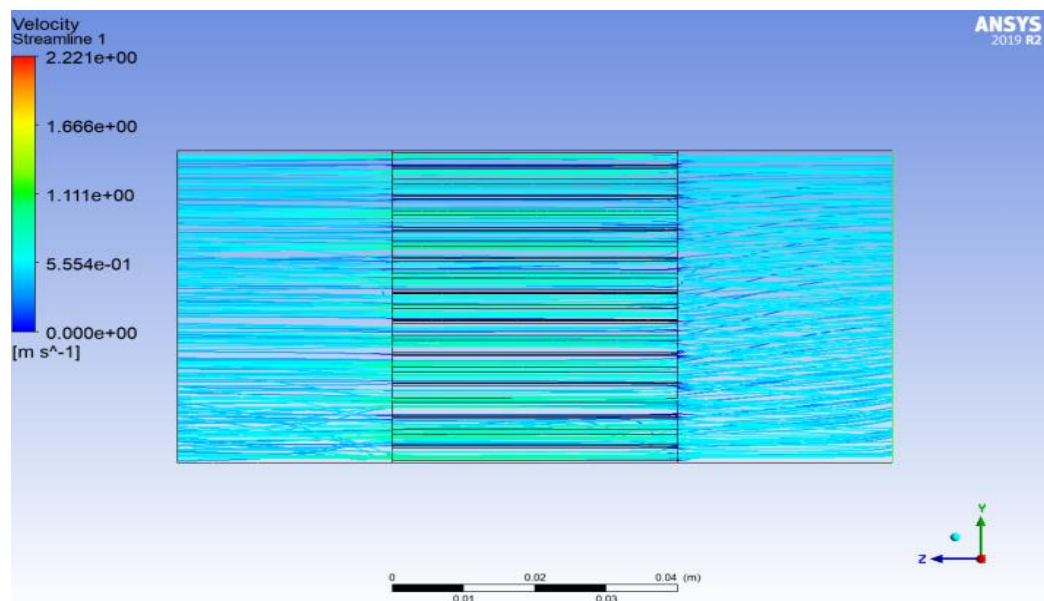
Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε παραπάνω στον όγκο ελέγχου θα πρέπει να εισαχθούν ένα μέγεθος Q_{in} (παροχή, ταχύτητα κλπ) και ένα μέγεθος P_{out} . Για το λόγο αυτό θα γίνει υπόθεση μιας συνοριακή συνθήκη εξόδου (outlet boundary condition) ώστε να δοθεί η δυνατότητα στον solver του προγράμματος ansys να επιλύσει τις εξισώσεις Navier Stokes για τυρβώδη ροή ανάντι έως ότου δοθεί και η αρχική τιμή της στατικής πίεσης ($P_{gauge\ inlet}$).

Ως εκ τούτου πραγματοποιείται μια επαναληπτική διαδικασία, εισάγοντας μια προσεγγιστική, ρεαλιστική τιμή για την τελική τιμή της στατικής πίεσης ($P_{gauge\ outlet}$) και εξάγοντας την αρχική τιμή της στατικής πίεσης ($P_{gauge\ inlet}$), έως ότου γίνει η σύγκλιση στην τιμή $P_{gauge\ inlet} = 315,5Pa$.

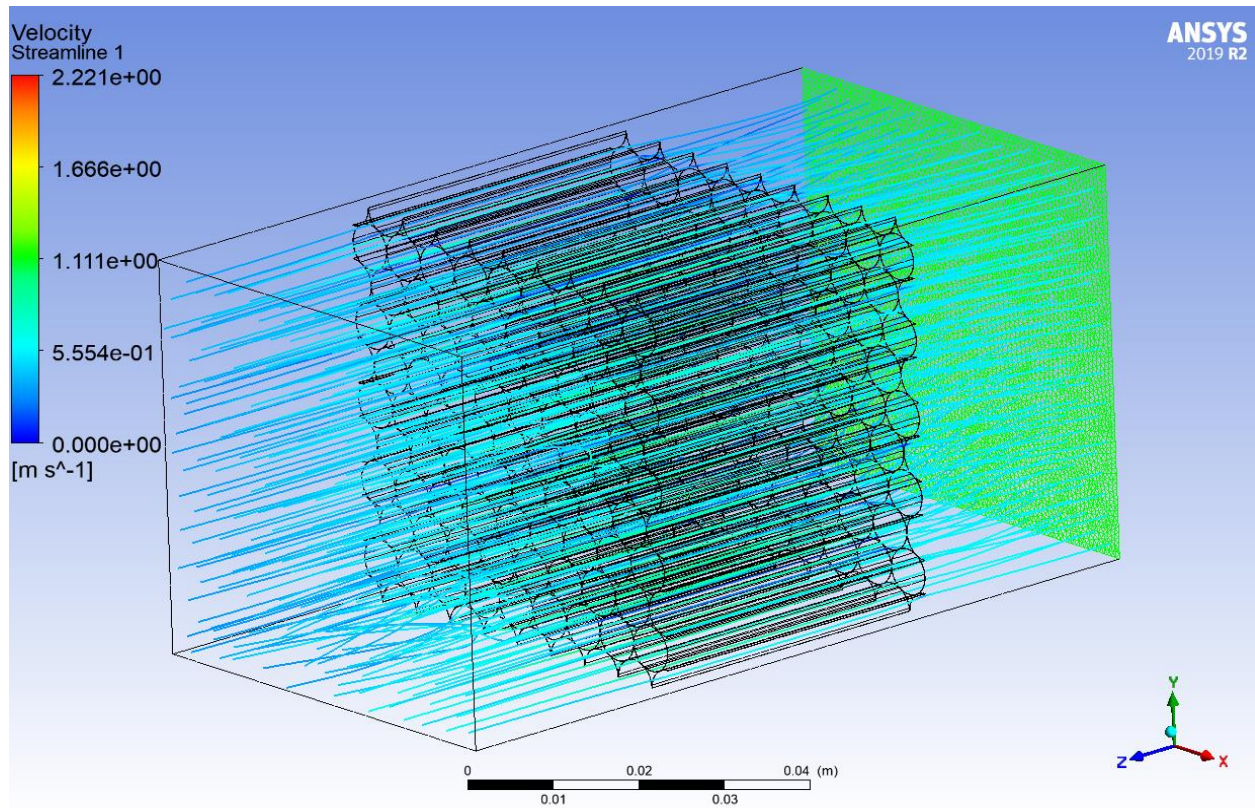
2.5.5.1 Αποτελέσματα

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται:

- Οι ροϊκές γραμμές

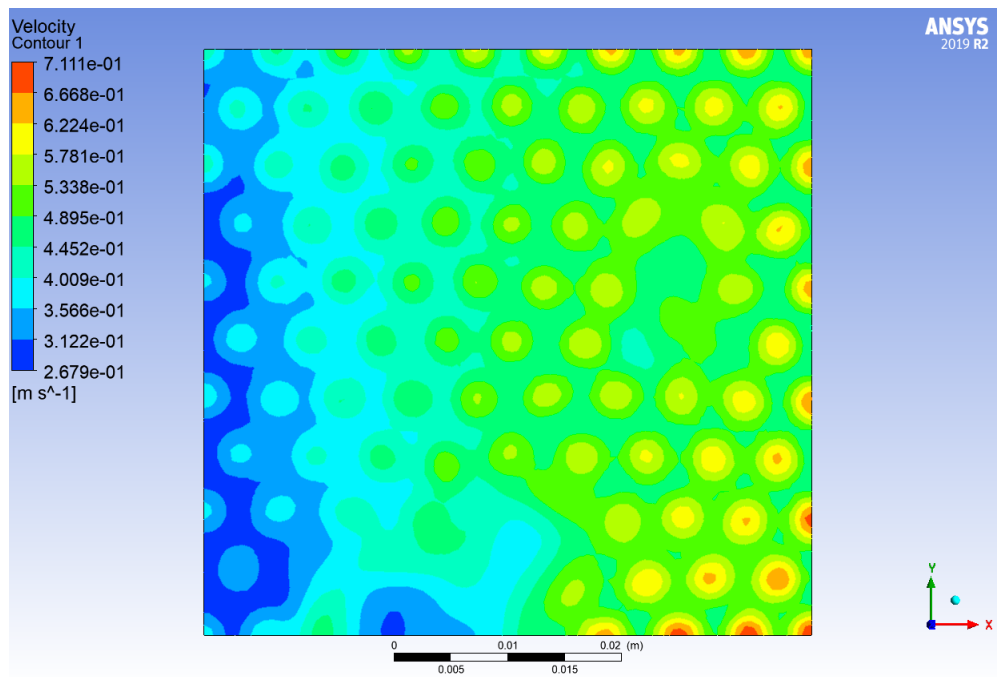


Εικόνα 67: Ροϊκές γραμμές



Εικόνα 68: Ροϊκές γραμμές (όψη υπό γωνία)

➤ Ταχύτητα εξόδου



Εικόνα 69: Προφίλ ταχύτητας εξόδου

Όπως παρατηρεί κανείς από τις ροϊκές γραμμές ο όγκος ελέγχου στους λεπτούς επάλληλους σωλήνες έχει τεράστια επίδραση ως προς την γραμμικοποίηση της ροής και εδώ. Παρατίθενται οι δείκτες οι οποίοι αποδεικνύουν το μέτρο της απόσβεσης των στροβιλισμών πριν την είσοδο και μετά την είσοδο στη γεωμετρία αυτή.

Προφίλ εξόδου προσομοίωσης 3 – προφίλ εισόδου προσομοίωσης V					
$\frac{\sum_{i=1}^n u_{xi}}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n u_{yi}}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n u_{zi}}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n \omega_i}{n}$	$P_{in\ static}$
0.11m/sec	0.03m/sec	0.44m/sec	0.012m ² ·s ⁻²	53.8s ⁻¹	315.5 Pa

Πίνακας 18: Προφίλ εισόδου προσομοίωσης V

Προφίλ εξόδου προσομοίωσης V					
$\frac{\sum_{i=1}^n u_{xi}}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n u_{yi}}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n u_{zi}}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n \omega_i}{n}$	$P_{out\ static}$
0.005m/sec	0.003m/sec	0.45m/sec	0.001m ² ·s ⁻²	230s ⁻¹	314.6 Pa

Πίνακας 19: Αποτελέσματα προσομοίωσης V

$$\text{Έξοδος προσομοίωσης 3 } \frac{Average_{u_x}}{Average_{u_z}} = \frac{0.11}{0.44} = 0.25$$

$$\text{Έξοδος προσομοίωσης 3 } \frac{Average_{u_y}}{Average_{u_z}} = \frac{0.03}{0.44} = 0.068$$

$$\text{Έξοδος προσομοίωσης V } \frac{Average_{u_x}}{Average_{u_z}} = \frac{0.005}{0.45} = 0.011$$

$$\text{Έξοδος προσομοίωσης V } \frac{Average_{u_y}}{Average_{u_z}} = \frac{0.003}{0.45} = 0.0067$$

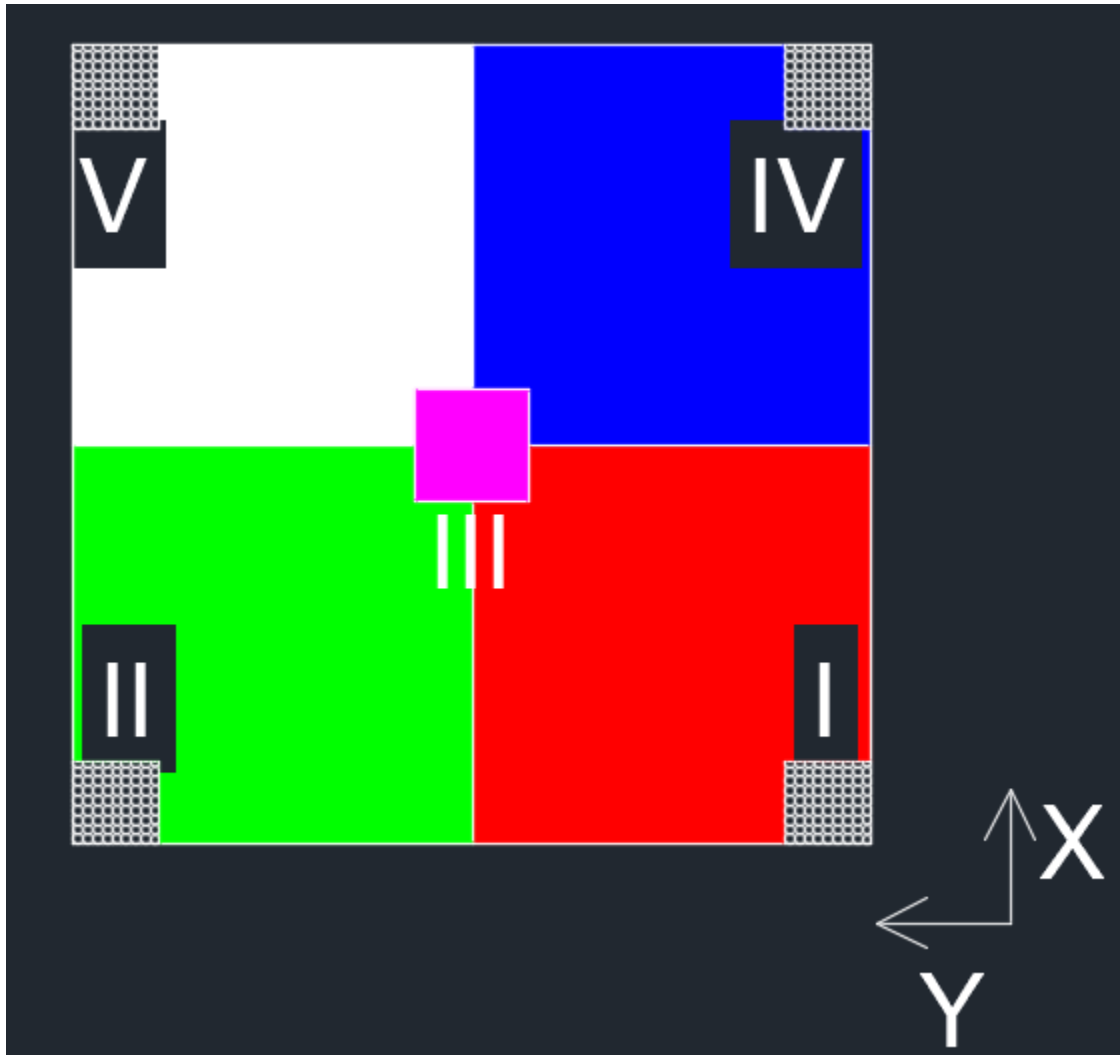
Βάσει αποτελεσμάτων φαίνεται πως η αποκλίνουσα συμπεριφορά της ταχύτητας στον άξονα x μειώνεται έως και 32 φορές ενώ στον άξονα y μειώνεται έως και 10 φορές.

Προφίλ εισόδου προσομοίωσης 5

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων I,II,III,IV και V η στατική πίεση στην έξοδο είναι ίση με 314,6Pa ενώ στην είσοδο 315,5Pa. Η πτώση πίεσης είναι ελάχιστη. Αυτό οφείλεται και στην ελάχιστη παροχή που εισάγεται σε κάθε καλαμάκι.

Στη συνέχεια θα εξαχθούν συμπεράσματα για όλο το επίπεδο βάσει των περιοχών οι οποίες επιλύθηκαν. Κάθε περιοχή στην οποία λύθηκε το πρόβλημα ροής θα γενικεύσει τα αποτελέσματά της σε μια κοντινή

περιοχή ώστε να καλυφθεί ολόκληρο το επιθυμητό προφίλ. Η επιρροή θα γίνει σύμφωνα με το παρακάτω σχέδιο.



Εικόνα 70: Επιφάνειες επιρροής

Από την προσομοίωση I θα εξαχθούν οι μέσες τιμές των u_x, u_y, u_z για την κόκκινη περιοχή, από την II θα εξαχθούν για την πράσινη περιοχή κ.ο.κ. Αυτό σημαίνει πως οι συνδυασμοί των x και y μια περιοχής επιρροής, οι οποίοι μας δίνουν και τη διακριτοποίηση της εισόδου, θα φέρουν τις ίδιες τιμές u_x, u_y, u_z .

Για την εύρεση των συνδυασμών x και y των περιοχών επιρροής (κόκκινη, πράσινη κλπ) χρησιμοποιήθηκε κώδικας ο οποίος είναι γραμμένος σε SQL γλώσσα προγραμματισμού και παρατίθεται στο παράρτημα:

Ο κώδικας εξαγεί όλους τους συνδυασμούς x και y για τα όρια που θα του ορίσουμε. Οι τιμές που είναι με κίτρινο χρώμα αλλάζουν ανάλογα την εκάστοτε περιοχή που θα εξαχθεί.

Παρακάτω δίνεται ο πίνακας μέσω τιμών των u_x, u_y, u_z για την έξοδο κάθε προσομοίωσης:

	\bar{u}_x	\bar{u}_y	\bar{u}_z
1	0.002m/sec	0.003m/sec	1 m/sec
2	0.005m/sec	0.005m/sec	0.64 m/sec
3	0.002m/sec	0.0007m/sec	0.14m/sec
4	0.006m/sec	0.006m/sec	0.44m/sec
5	0.005m/sec	0.003m/sec	0.65m/sec

Πίνακας 20: Πίνακας ταχυτήτων εξόδου

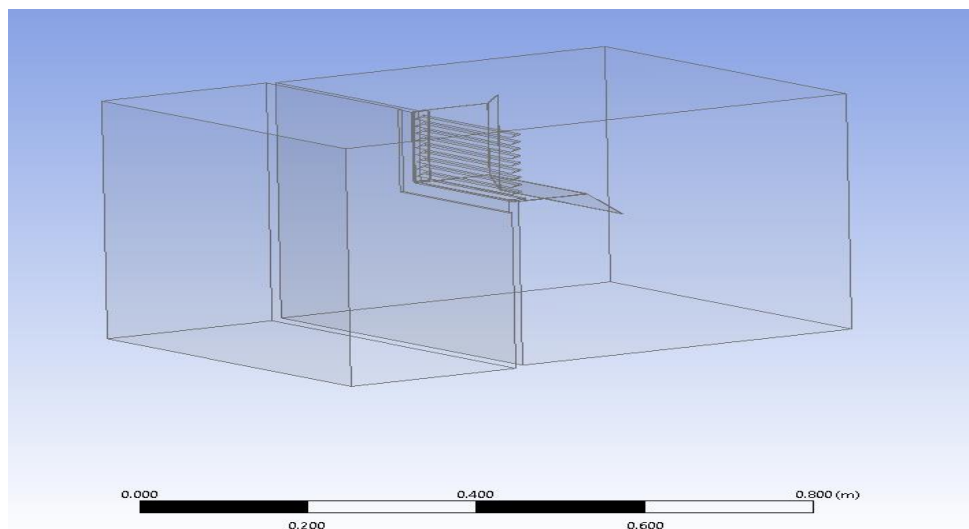
Το προφίλ εισόδου της προσομοίωσης 5 είναι πλέον έτοιμο και έχει προκύψει από τις παραπάνω τιμές του πίνακα και τους συνδυασμούς των x και y από τον κώδικα sql.

2.6 Προσομοίωση 5^η

Η πέμπτη και τελική προσομοίωση θα περιέχει το τελικό τμήμα της αεροσήραγγας και το στόμιο. Με δεδομένη την έξοδο της τέταρτης προσομοίωσης, παρέχεται η δυνατότητα αλλάζοντας τη γεωμετρία του στομίου να επιλυθεί η ροή για οποιοδήποτε στόμιο.

Στην προσομοίωση αυτή το ενδιαφέρον εστιάζεται κυρίως στην πτώση πίεσης που προκαλείται στον αέρα λόγω του στομίου, δηλαδή τη διαφορά της ολικής πίεσης πριν το στόμιο και της δυναμικής πίεσης μετά από αυτό, καθώς η στατική πίεση μετά το στόμιο είναι ίση με την ατμοσφαιρική. Η δυναμική πίεση θα μετρηθεί βάσει του προτύπου EN12238 σε απόσταση 25 cm από το στόμιο.

Μια ακόμα ενδιαφέρουσα μέτρηση, και πιθανόν η πιο σημαντική είναι να οριστεί όσο το δυνατόν με μεγαλύτερη ακρίβεια το διάνυσμα της ταχύτητας στο επίπεδο των μετρήσεων. Έχοντας γνώση του μέτρου και της γωνία που κινείται το διάνυσμα σε σχέση με το επίπεδο των μετρήσεων για κάθε σημείο στο χώρο θα τεθούν και οι θέσεις των σημείων μέτρησης καθώς και η γωνία που πρέπει να κάνουν οι μηχανισμοί που φέρουν τα pitot tubes ώστε να ‘ανιχνεύσουν’ τα κύρια ρεύματα του αέρα.

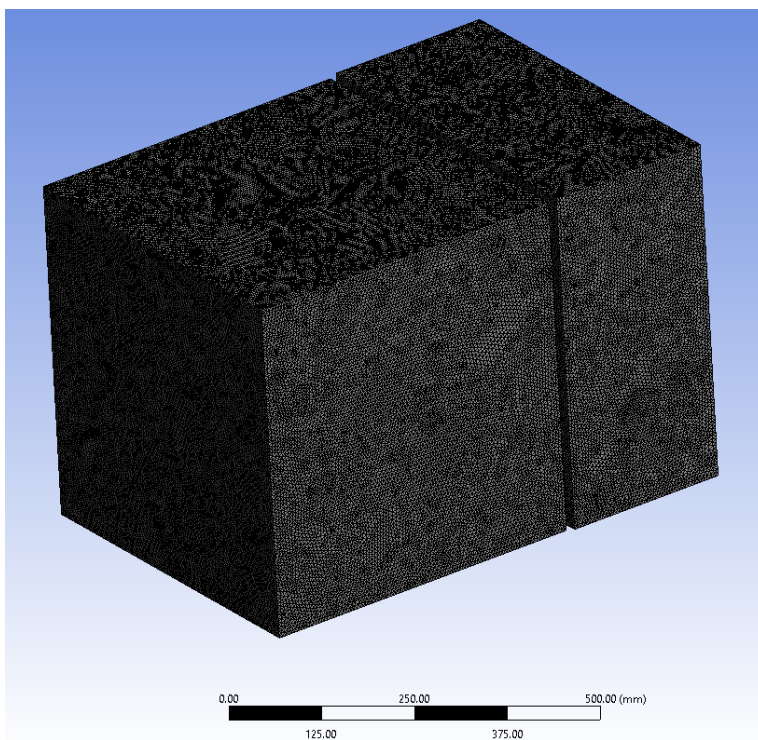


Εικόνα 71: Γεωμετρία 5^{ης} προσομοίωσης

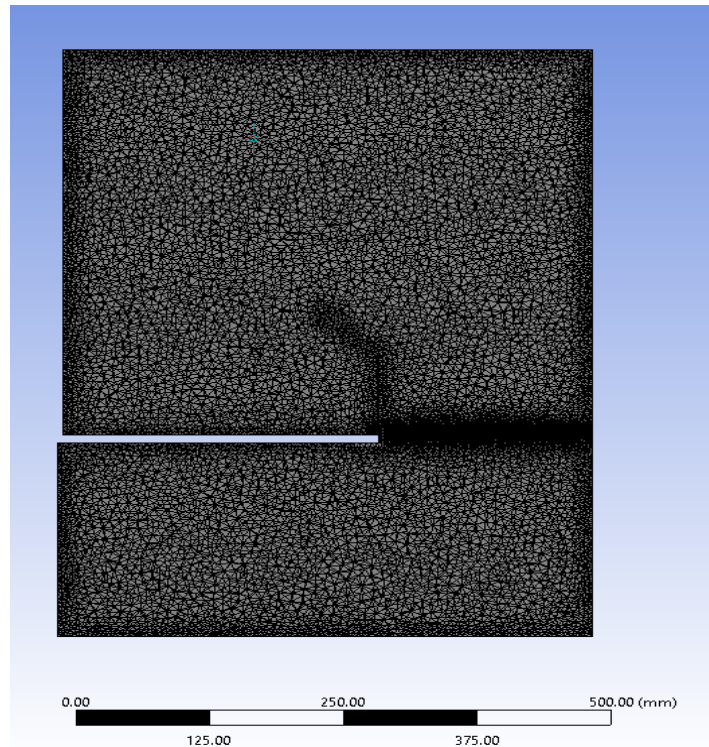
Το πέμπτο τμήμα της προσομοίωσης αφορά τον δοκιμαστικό αγωγό (test duct) και το στόμιο. Πέρα από το εσωτερικό του plenum ο αέρας θα μελετηθεί και εξωτερικά του στομίου. Στο σημείο όπου θα γίνουν και οι μετρήσεις (25cm μπροστά από το στόμιο). Εδώ η είσοδος του αέρα δίνεται από το προφίλ το οποίο προέκυψε από τις προσομοιώσεις I,II,III,IV και V.

Πιο αναλυτικά στο Design Modeler εισάγεται η γεωμετρία και ορίζεται ο όγκος του αέρα. Στη συνέχεια διάγραφονται τμήματα στερεάς γεωμετρίας για την αποφυγή περαιτέρω υπολογισμών και δηλώνονται οι επιφάνειες ως προς το είδος τους. Είσοδος (inlet), τοιχώματα (walls), έξοδος (outlet) και επιφάνειες συμμετρίας (symmetry). Καθώς δηλώνονται οι επιφάνειες με τα συγκεκριμένα ονόματα το ansys, αυτόματα θα προσδιορίσει το είδος της εκάστοτε επιφάνειας. Στη συνέχεια στο setup θα αποδοθούν τα χαρακτηριστικά της κάθε επιφάνειας.

Για την διακριτοποίηση (Mesh) επιλέγεται η μέθοδος του ελαχίστου όγκου ελέγχου στοιχείου (element) ίση με 5mm. Η γεωμετρία διαιρείται συνολικά περίπου σε 5.000.000 elements ενώ οι κόμβοι (nodes) είναι περίπου 1.000.000 .



Εικόνα 72: Διακριτοποίηση πλέγματος πλάγια όψη



Εικόνα 73: Διακριτοποίηση πλέγματος άνω όψη

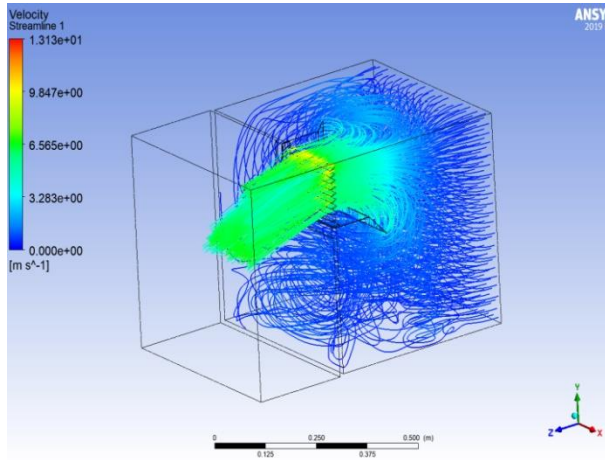
Εύρεση συνοριακών συνθηκών

Οι συνοριακές συνθήκες της εισόδου είναι γνωστές. Για την έξοδο θα ήταν βέλτιστο να υποθεθεί ότι η στατική πίεση μηδενίζεται. Μια τέτοια υπόθεση βέβαια απαιτεί το τελικό «σύνορο» να βρίσκεται μακριά από το σημείο όπου υπάρχει στατική πίεση (για την εφαρμογή μας το σημείο αυτό είναι πριν το στόμιο). Για την πραγματοποίηση μιας τέτοιας ανάλυσης, θα απαιτηθεί ακόμα μεγαλύτερος όγκος σε στοιχεία. Κάτι τέτοιο είναι πέρα από τις δυνατότητες ενός συμβατικού υπολογιστή. Συνεπώς, θα τεθεί η πίεση εξόδου ίση με 0 και επαναληπτικά θα συγκλίνει στην τιμή της στατικής πίεσης στο σύνορο (outlet). Αναμένεται στο όριο της εξόδου η στατική πίεση να μην είναι 0, καθώς η ανάλυση πραγματοποιείται πολύ κοντά στην έξοδο του στομίου.

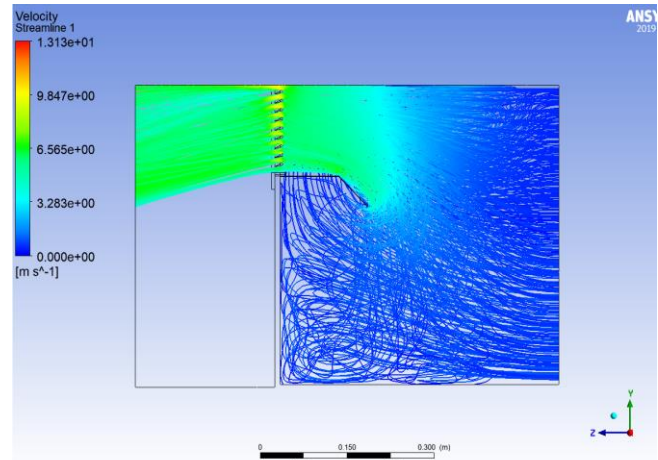
2.6.1 Αποτελέσματα 5^{ης} προσομοίωσης

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται:

- Οι ροϊκές γραμμές

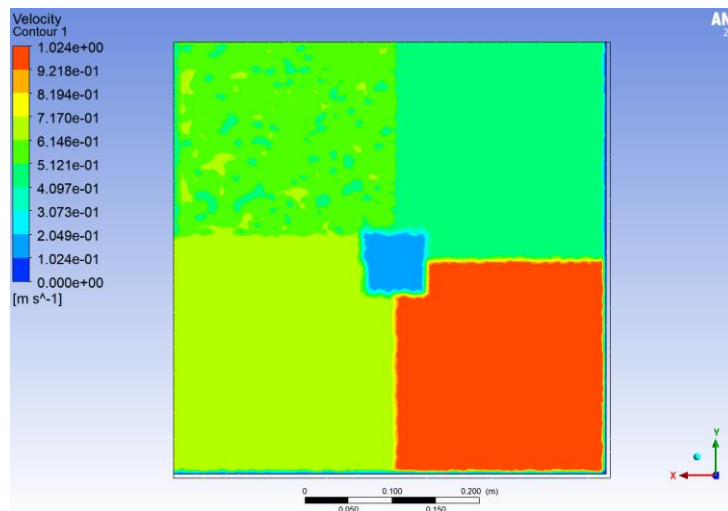


Εικόνα 74: Ροϊκές γραμμές πλάγια όψη



Εικόνα 75: Ροϊκές γραμμές αριστερή όψη

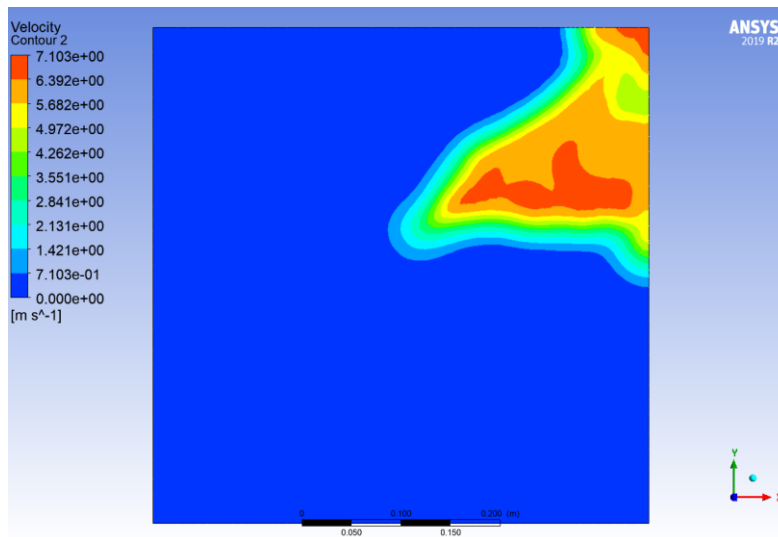
- Ταχύτητα εισόδου



Εικόνα 76: Προφίλ ταχύτητας εισόδου

Στο προφίλ ταχύτητας εισόδου είναι εμφανής ο διαχωρισμός των περιοχών επιρροής.

➤ Ταχύτητα εξόδου



Εικόνα 77: Χαρτογράφηση ταχύτητας εξόδου

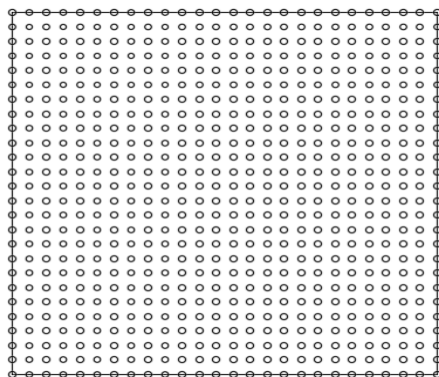
Παρατηρώντας τη χαρτογράφηση της ταχύτητας εξόδου μας δίνεται μια πρώτη εικόνα για την περιοχή την οποία θα πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις.

Μέτρο και διεύθυνση ταχύτητας για ολόκληρο το στόμιο

Η διαδικασία λήψης μετρήσεων ξεκινάει με τον προγραμματισμό της κίνησης των pitot tubes (SVO, SVS) μέσω των σερβομοτέρ. Δηλώνονται οι διαστάσεις του στομίου, οι διαστάσεις του επιπέδου x,y στο οποίο θα κινηθούν τα pitot, καθώς και η συντεταγμένη z, δηλαδή η απόσταση των pitot tubes από την έξοδο του στομίου. Επίσης εισάγεται το βήμα κίνησης, το οποίο όπως θα δηλωθεί και παρακάτω είναι κατ' ελάχιστο 10mm, και το σύνολο των μετρήσεων που θα γίνουν στο σημείο αυτό ή αλλιώς το χρονικό διάστημα το οποίο θα λαμβάνει μετρήσεις το pitot tube σε ένα συγκεκριμένο σημείο.

Για την παρούσα εφαρμογή το στόμιο είναι διαστάσεων 400x300mm. Δεδομένου πως έχει χρησιμοποιηθεί το 1/4 της γεωμετρίας του οι διαστάσεις του στην προσομοίωση είναι 200x150mm. Βάσει της τελικής προσομοίωσης αρκεί το επίπεδο μετρήσεων να είναι διαστάσεων 245x245mm καθώς η πτώση (Drop) και η διάχυση της ροής στο χώρο είναι ακόμα μικρή, όπως φαίνεται και στη χαρτογράφηση της ταχύτητας εξόδου.

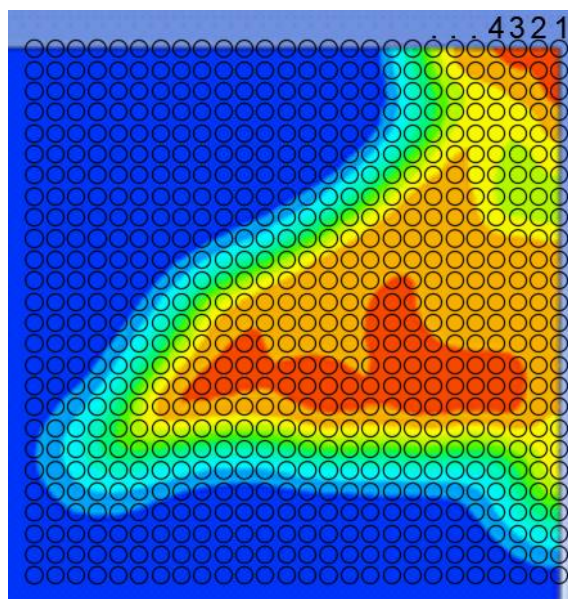
Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η θέση των pitot tubes στο επίπεδο xy σε απόσταση 25cm (άξονας z) από την έξοδο του στομίου.



Εικόνα 78: Σημεία μετρήσεων στο χώρο

Για τις θέσεις αυτές παρατίθενται από την προσομοίωση τα μέτρα της ταχύτητας στους άξονες x,y και z και την κλίση της ροής στο συγκεκριμένο σημείο. Ενδεικτικά παρατίθενται κάποιες τιμές στον παρακάτω πίνακα οι οποίες αφορούν το μέτρο της ταχύτητας και την κλίση της, για τα τέσσερα πρώτα σημεία μετρήσεων. Ορίζεται ως σημείο 1 το σημείο που βρίσκεται πάνω και δεξιά όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα και οι μετρήσεις συνεχίζονται κατά την ίδια γραμμή.

Συνολικά θα χρησιμοποιηθούν 576 σημεία για την κάλυψη του ενός τετάρτου του στομίου. Για το λόγο αυτό παρατίθενται αποτελέσματα μόνο για τα τέσσερα πρώτα σημεία μετρήσεων.



Εικόνα 79: Σημεία μετρήσεων – χαρτογράφηση ταχύτητας

Στατική πίεση (Pa)	Δυναμική πίεση (Pa)	Ολική πίεση (Pa)	V (m/sec)	V _x (m/sec)	V _y (m/sec)	V _z (m/sec)	Σημείο μέτρησης
280	18.6	298.6	5.5	0.2	-1.8	5.2	1
280	26.3	306.3	6.5	0.9	-0.1	6.5	2
280	26.3	306.3	6.5	1.4	-0.2	6.4	3
280	24.1	304.1	6.2	1.7	-0.1	6	4

Πίνακας 21: Πίνακας αποτελεσμάτων για τις πρώτες τέσσερις μετρήσεις

Έστω $\hat{\varphi}$ η γωνία που σχηματίζει το διάνυσμα της ταχύτητας στον άξονα z με το διάνυσμα της ταχύτητας στον άξονα x, και Έστω $\hat{\theta}$ η γωνία που σχηματίζει το διάνυσμα της ταχύτητας στον άξονα z με το διάνυσμα της ταχύτητας στον άξονα y.

Τότε προκύπτει

$$\hat{\varphi} = \arctan \frac{V_x}{V_z} \quad (26)$$

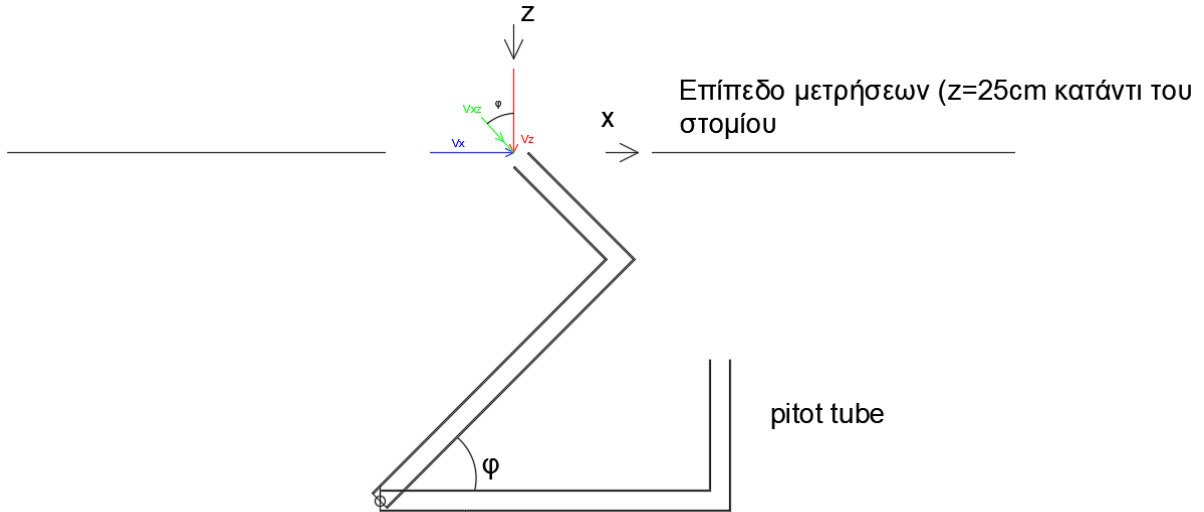
και

$$\hat{\theta} = \arctan \frac{V_y}{V_z} \quad (27)$$

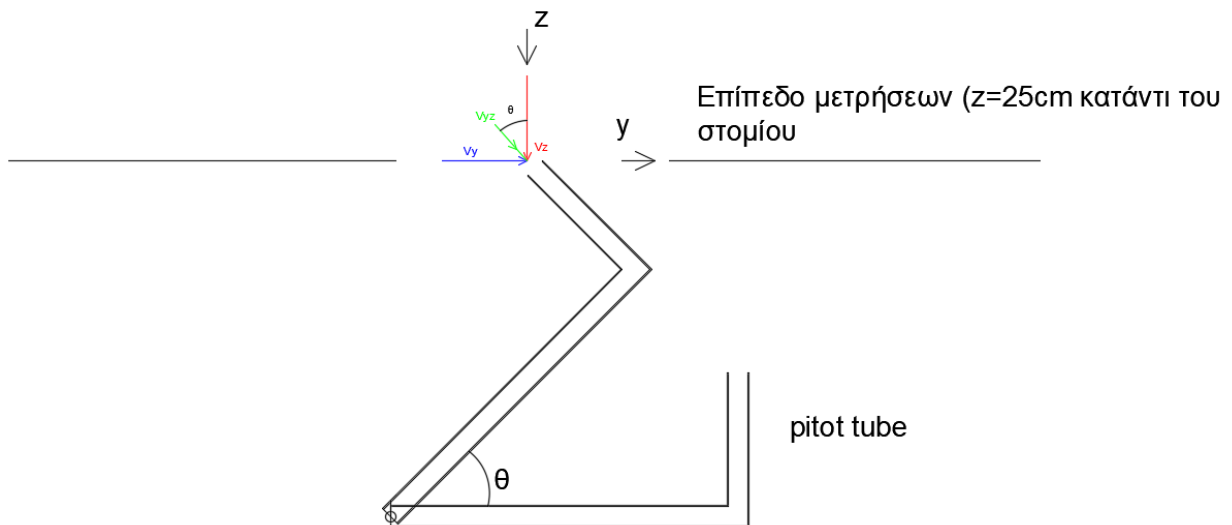
Για τα σημεία 1 έως 4 θα πρέπει να στραφεί το pitot σύμφωνα με τις γωνίες που δίνονται παρακάτω:

Σημείο μέτρησης	$\hat{\varphi}$ (°)	$\hat{\theta}$ (°)
1	2	-19
2	8	-1
3	13	-1,7
4	15,6	-0,5

Πίνακας 22: Πίνακας γωνιών pitot tube



Εικόνα 80: Διορθωμένη γωνία λήψης μετρήσεων στο άξονα στο επίπεδο xz



Εικόνα 81: Διορθωμένη γωνία λήψης μετρήσεων στο άξονα στο επίπεδο yz

Αντίστοιχα προκύπτουν τα αποτελέσματα για όλες τα σημεία μετρήσεων, και στη συνέχεια λόγω συμμετρίας για ολόκληρο το στόμιο.

Για το επίπεδο των μετρήσεων, δηλαδή το επίπεδο xy με διαστάσεις 245x245mm προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα.

Προφίλ εξόδου προσομοίωσης 5					
$\frac{\sum_{i=1}^n u_{xi}}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n u_{yi}}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n u_{zi}}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n u}{n}$	$P_{out\ dynamic}$	$P_{out\ static}$
0.1 m/sec	0.7 m/sec	2.6 m/sec	2.9 m/sec	9 Pa	280 Pa

Πίνακας 23: Πίνακας αποτελεσμάτων 5^{ης} προσομοίωσης

Πτώση στατικής πίεσης λόγω στομίου

Για την μέτρηση της πτώσης στατικής πίεσης λόγω στομίου ορίζεται ένα επίπεδο ακριβώς πριν το στόμιο, στο σημείο όπου θα γίνει μέτρηση της στατικής πίεσης με pitot tube στον δοκιμαστικό αγωγό (test duct), όπου μέσω του Ansys εξάγεται η μέτρηση.

Προκύπτει:

$$\Delta P_{static} = 314.6 - 280 = 34.6 Pa$$

Ενεργός επιφάνεια στομίου

Για να ορισθεί η ενεργός επιφάνεια του στομίου απαιτείται η επίλυση του προβλήματος για διάφορες τιμές της ογκομετρικής παροχής (τουλάχιστον τέσσερις). Τα δεδομένα τα οποία έχουν εξαχθεί αφορούν μόνο μια ογκομετρική παροχή ($600\ m^3/hr$) συνεπώς θα γίνει μια πρώτη προσέγγιση της ενεργού επιφάνειας.

$$A_{ki} = \frac{q_{v1,2i}}{v_{km}}$$

$$A_{ki} = \frac{600\ m^3/hr}{2.9\ m/sec} = 0.057 m^2$$

Η τιμή της ενεργού επιφάνειας κατά τη βιβλιογραφία είναι περίπου $0.07 m^2$, συνεπώς υπάρχει μία απόκλιση με το αποτέλεσμα της προσομοίωσης. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε σχεδιαστική ανακρίβεια του μοντέλου του στομίου ή στο μικρό πλήθος των δεδομένων που διαθέτουμε.

Σύγκριση και σχολιασμός αποτελεσμάτων

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΣΤΟΜΙΩΝ WR-150 & WR-150-D

ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ ΜΕΓΕΘΟΣ (mm)	Ak (m ²)	ΘΕΣΗ DAMPER	Q	100	150	200	250	300	400	500	700	900	1000	1250	1500	2000	2500
(300x250)	0,043	V	-	-	-	-	-	2,0	2,5	3,2	4,5	5,8	6,5	-	-	-	-
		100% ΔΡ	-	-	-	-	-	2,8	4,2	7,0	13,0	21,0	28,0	-	-	-	-
		ΑΝΟΙΚΤΟ Lα	-	-	-	-	-	<25	<25	25	30	45	50	-	-	-	-
		50% ΔΡ	-	-	-	-	-	10,0	15,0	23,0	45	78	95	-	-	-	-
		ΑΝΟΙΚΤΟ Lα	-	-	-	-	-	<25	30	35	50	>50	-	-	-	-	-
		25% ΔΡ	-	-	-	-	-	22,0	33,0	50,0	100,0	>100	-	-	-	-	-
(500x250)	0,073	V	-	-	-	-	-	1,5	1,9	2,7	3,4	3,8	4,8	5,7	7,6	-	-
		100% ΔΡ	-	-	-	-	-	1,6	25,0	5,5	7,5	9,5	14,5	20,0	36,0	-	
		ΑΝΟΙΚΤΟ Lα	-	-	-	-	-	<25	<25	<25	25	30	35	45	>50	-	
		50% ΔΡ	-	-	-	-	-	6,0	10,0	18,0	27,0	35,0	50,0	76,0	>100	-	
		ΑΝΟΙΚΤΟ Lα	-	-	-	-	-	<25	<25	30,0	35	40	50	>50	-		
		25% ΔΡ	-	-	-	-	-	12,0	19,0	40,0	58,0	78,0	>100	-	-		
(350x300)	0,061	V	-	-	-	-	-	1,8	2,3	3,2	4,1	4,6	5,7	6,8	-	-	
		100% ΔΡ	-	-	-	-	-	2,4	4,0	7,0	11,5	13,5	20,0	29,5	-		
		ΑΝΟΙΚΤΟ Lα	-	-	-	-	-	<25	<25	25,0	30	35	45	50	-		
		50% ΔΡ	-	-	-	-	-	9,0	13,5	23,0	40,0	47,0	76,0	107,0	-		
		ΑΝΟΙΚΤΟ Lα	-	-	-	-	-	<25	<25	30,0	45	50	>50	-			
		25% ΔΡ	-	-	-	-	-	17,0	28,0	53,0	85,0	102,0	>100	-			
(400x300)	0,070	V	-	-	-	-	-	1,6	2,0	2,8	3,6	4,0	5,0	6,0	-	-	
		100% ΔΡ	-	-	-	-	-	2,0	2,8	6,0	9,0	11,0	16,0	22,0	-		
		ΑΝΟΙΚΤΟ Lα	-	-	-	-	-	<25	<25	25,0	30,0	30	40	45	-		
		50% ΔΡ	-	-	-	-	-	7,0	10,0	20,0	30,0	38,0	58,0	80,0	-		
		ΑΝΟΙΚΤΟ Lα	-	-	-	-	-	<25	<25	30,0	35,0	45	50	>50	-		
		25% ΔΡ	-	-	-	-	-	15,0	22,0	44,0	62,0	80,0	>100	-			
(500x300)	0,088	V	-	-	-	-	-	1,6	2,2	2,8	3,1	4,0	4,7	6,3	8,0		
		100% ΔΡ	-	-	-	-	-	2,0	3,5	6,0	6,5	11,0	14,0	25,0	40,0		
		ΑΝΟΙΚΤΟ Lα	-	-	-	-	-	<25	<25	25	25	30	35	50	>50		
		50% ΔΡ	-	-	-	-	-	7,0	13,0	20,0	23,0	38	48	90	>100		
		ΑΝΟΙΚΤΟ Lα	-	-	-	-	-	<25	<25	30,0	30,0	45	50	>50	-		
		25% ΔΡ	-	-	-	-	-	15,0	25,0	44,0	50,0	80,0	>100	-			

Q: ΠΑΡΟΧΗ ΑΕΡΑ (m³/h)
 ΔΡ: ΠΙΩΣΗ ΠΙΕΣΗΣ (Pa)
 V: ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΕΞΟΔΟΥ (m/s)
 Lα: ΣΤΑΘΜΗ ΘΟΡΥΒΟΥ [dB(A)]

Πίνακας 24: Τεχνικό φυλλάδιο στομίου

Σύμφωνα με τον πίνακα αποδόσεων του στομίου η αναμενόμενη μέση ταχύτητα του σε απόσταση 25cm κατάντι του στομίου, με ανοικτά τα φύλλα του damper, είναι μεταξύ 2 και 2,8 m/sec . Βάσει των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης η μέση ταχύτητα προέκυψε στα 2,9 m/sec.

Η πτώση στατικής πίεσης δίνεται βάσει άλλων πειραματικών μετρήσεων περίπου 5 Pa, ενώ στην προσομοίωση είναι 35Pa.

Το σφάλμα στο μέτρο της ταχύτητας δεν είναι μεγάλης τάξης και μπορεί να οδηγήσει σε ασφαλή συμπεράσματα για τα φαινόμενα ροής στην περιοχή αυτή, αντίθετα το σφάλμα της στατικής πίεσης παρουσιάζεται μεγαλύτερο. Κανένα από τα δύο σφάλματα δεν είναι ικανό να οδηγήσει σε λανθασμένη επιλογή αισθητηρίων, καθώς τα νέα μετρητικά συνδυάζουν αρκετά μεγάλο εύρος με μικρή ανάλυση.

Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες οι οποίοι μπορεί να έχουν επηρεάσει το αποτέλεσμα. Αρχικά κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης έγινε μια παραδοχή για την ανάλυση της ροής στους λεπτούς επάλληλους σωλήνες. Η παραδοχή αυτή δεν έχει αποδειχθεί ως προς την ορθότητα των αποτελεσμάτων της με πειραματικά δεδομένα.

Ένας ακόμα παράγοντας ο οποίος επηρεάζει τη ροή είναι η ίδια η κατασκευή. Αν και δίνονται σαφείς οδηγίες για την κατασκευή της μετρητικής διάταξης δεν δίνονται κατασκευαστικά σχέδια με αποτέλεσμα η διαδικασία γραμμικοποίησης να επαφίεται κάθε φορά στον κατασκευαστή. Αποτέλεσμα είναι οι πλάκες ισοκατανομής να κατασκευάζονται με διαφορετικού πλήθους οπών οι οποίες θα έχουν διαφορετική διάμετρο. Η κατασκευαστική αυτή ιδιομορφία θα επηρεάσει την πτώση της δυναμικής πίεσης ιδιαίτερα για την παρούσα εφαρμογή όπου το μέτρο της ταχύτητας είναι μικρό. Συνεπώς το ίδιο στόμιο θα μπορεί να έχει ταχύτητα εξόδου διαφορετική όταν μετράται στην εκάστοτε μετρητική διάταξη.

Τέλος η επιλογή των μοντέλων τύρβης αποτελεί πάντα ένα δύσκολο αντικείμενο για τον μελετητή - ερευνητή και σε συνδυασμό με την έλλειψη πειραματικών δεδομένων μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα συμπεράσματα.

Κεφάλαιο 3^ο

3.1 Εργαστήριο αεροδυναμικής στην εταιρεία Air Grilles

Η εταιρία στομίων κλιματισμού «Air Grilles- I. Λιόλη & ΣΙΑ Ο.Ε» ιδρύθηκε το 1976 στην Αθήνα και δραστηριοποιείται στην κατασκευή και εμπορία όλων των τύπων στομίων κλιματισμού, καθώς και συναφών προϊόντων. Λειτουργεί βάσει της πιστοποίησης κατά το Διεθνές Πρότυπο EN ISO 9001:2015, που αφορά στην εγκατάσταση και λειτουργία Συστήματος Ποιοτικού Ελέγχου σε όλες τις φάσεις της διοικητικής και παραγωγικής διαδικασίας. Το εργοστάσιο της εταιρίας έχει αναβαθμιστεί ενεργειακά και πλέον διαθέτει νέα μονάδα παραγωγής εξοπλισμένη με μηχανήματα σύγχρονης τεχνολογίας.

Η Air Grilles δημιούργησε ένα καινοτόμο για την Ελλάδα εργαστήριο μετρήσεων στομίων κλιματισμού για την έρευνα και την ανάπτυξη νέων προϊόντων. Μέσω αυτών των εφαρμογών μετρήσεων, δοκιμών και ελέγχων η εταιρία έχει το προνόμιο να βελτιώνει συνεχώς την ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων της και καθίσταται ολοένα και πιο ανταγωνιστική προς τις ομοειδής επιχειρήσεις του εξωτερικού. Το εργαστήριο μετρήσεων στομίων κλιματισμού της Air Grilles είναι πλήρως σύμφωνο με το Σύστημα Ποιότητας κατά ISO/IEC 17025:2005 (General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories). Επίσης, η εταιρία συνεργάστηκε με το Πανεπιστήμιο Πατρών, ώστε να θέσει σε λειτουργία το εργαστήριο κατά τις απαιτήσεις του διεθνούς προτύπου ISO 5219 (Laboratory Aerodynamic Testing and Rating the Performance of Air Terminal Devices), το οποίο είναι πλήρως συμβατό και με το πρότυπο ANSI/ASHRAE 70-1991 (Method of Testing for Rating the Performance of Air Outlets and Inlets).

Ο εξοπλισμός του εργαστηρίου χωρίζεται σε τρία τμήματα. Το πρώτο αποτελείται από αίθουσα διαλέξεων και προβολών. Το δεύτερο τμήμα αποτελείται από αεροσήραγγα δοκιμών για την μέτρηση της ταχύτητας εξόδου του αέρα, της πτώσης πίεσης στο στόμιο και τον υπολογισμό της ενεργού επιφάνειας του στομίου. Οι μετρήσεις γίνονται σε λειτουργία προσαγωγής και επιστροφής αέρα για μεγάλο εύρος παροχών, μέσω ανεμιστήρων οδηγούμενων από Inverter. Η σήραγγα αυτή περιλαμβάνει ακόμα διάταξη εξομάλυνσης της ροής του αέρα, σύστημα κινητού ικρίωματος στήριξης των αισθητήρων για την πλήρη σάρωση της επιφάνειας του στομίου σε δύο άξονες, αλλά και λογισμικό ελέγχου για την καταγραφή των μετρήσεων και την μετατροπή τους σε πίνακες και διαγράμματα. Το τρίτο τμήμα του εργαστηρίου αποτελείται από τον θάλαμο των δοκιμών για την μέτρηση του βεληνεκού, της απόκλισης και πτώσης της δέσμης αέρα, καθώς και της στάθμης θορύβου. Οι μετρήσεις γίνονται τόσο για ισόθερμη, όσο και για μη ισόθερμη λειτουργία. Ο θάλαμος απαρτίζεται από δύο Κεντρικές Κλιματιστικές Μονάδες για την κάλυψη παροχών αέρα έως 15.000 m³/h. Οι ΚΚΜ φέρουν στοιχεία ψυχρού και θερμού νερού και ανεμιστήρες (plug fan) οδηγούμενους από Inverter. Το δίκτυο αεραγωγών με εσωτερική ηχομόνωση φέρει κατάλληλα διαφράγματα (damper), προκειμένου ο αέρας να οδηγηθεί προς την εκάστοτε απόληξη που φέρει το στόμιο. Οι απολήξεις είναι πέντε και είναι κατάλληλα τοποθετημένες, έτσι ώστε να καλύπτουν όλη την γκάμα των στομίων (επίτοιχα, οροφής, δαπέδου, ειδικές εφαρμογές). Τέλος, ο θάλαμος περιλαμβάνει κινητό ικρίωμα στήριξης των αισθητήρων με δυνατότητα κίνησης στους τρεις άξονες και την σάρωση ολόκληρου του εσωτερικού χώρου του θαλάμου. Η κίνηση, ο έλεγχος, η καταγραφή των μετρήσεων και η μετατροπή αυτών σε πίνακες και διαγράμματα, γίνεται μέσω ειδικού λογισμικού. Αξίζει να σημειωθεί ότι όλα τα αισθητήρια και τα όργανα μέτρησης είναι σύμφωνα με τις διατάξεις ISO, πιστοποιημένα, ενώ γίνεται συστηματικά η βαθμονόμηση τους.

3.2 Αρχή λειτουργίας μετρητικών

Η μέτρηση ενός φυσικού μεγέθους πραγματοποιείται με τη χρήση των οργάνων μέτρησης. Προκειμένου οι μετρήσεις που πραγματοποιούνται να είναι σωστές και να μπορούν να κριθούν για την ορθότητα τους, θα πρέπει να υπάρχει γνώση του τρόπου με τον οποίο τα όργανα βαθμονομούνται και χρησιμοποιούνται για να παρέχουν ορθές ενδείξεις. Η αλματώδη ανάπτυξη της τεχνολογίας και η απαίτηση για ακριβείς μετρήσεις έχει οδηγήσει αναπόφευκτα στην δομική πολυπλοκότητα των οργάνων μέτρησης έτσι ώστε να μιλάμε πλέον για συστήματα μέτρησης τα οποία αποτελούνται από ένα σύνολο οργάνων και συσκευών κατάλληλα διασυνδεμένων μεταξύ τους, ώστε να μπορούν να μετρήσουν ένα ή περισσότερα φυσικά μεγέθη (Καλοβρετάκης & Κατεβάκης, 2019).

Μια μετρητική διάταξη είναι μία αλυσίδα διάφορων λειτουργικών στοιχείων, κάθε ένα από τα οποία επιτελεί και διαφορετικό ρόλο. Η καρδιά της διάταξης αποτελείται από τον αισθητήρα (sensor) ο οποίος χρησιμοποιείται για την ανίχνευση και τη μέτρηση της τιμής X ενός φυσικού μεγέθους στην είσοδο του.

Αρχή μέτρησης ογκομετρικής παροχής

Για να μετρηθεί η ογκομετρική παροχή του αέρα σε κάποιο σημείο του αγωγού πρέπει να μελετάται το προφίλ ταχύτητας στο σημείο αυτό. Για την αποφυγή σφαλμάτων πρέπει η μέτρηση να γίνει σε σημείο όπου η ροή είναι πλήρως ανεπτυγμένη. Στην παρούσα εφαρμογή είναι γνωστό εκ των προτέρων, πως οι ταχύτητες που θα επικρατήσουν στην αρχή του αγωγού είναι περίπου της τάξης των 5 έως 10m/sec, συνεπώς η ροή του αέρα είναι τυρβώδης.

Η μέτρηση της ογκομετρικής παροχής γίνεται έμμεσα μέσω της μέτρησης της ολικής πίεσης p_{ti} και της στατικής πίεσης p_{si} . Για την ορθή μέτρηση λαμβάνονται μετρήσεις οι οποίες να σκιαγραφούν όλο το προφίλ της ταχύτητας του αέρα. Σύμφωνα με το πρότυπο EN 12238 πρέπει να ληφθούν τουλάχιστον πέντε μετρήσεις, μία στο κέντρο του αγωγού και τέσσερις περιμετρικά του κέντρου του αγωγού και σε απόσταση $r = 0,4D$ από αυτό. Στη συνέχεια, ορίζεται ως ολική πίεση p_t το μέσο όρο των επιμέρους μετρήσεων της ολικής πίεσης και αντίστοιχα ως p_s το μέσο όρο των επιμέρους στατικών πιέσεων (Streeter, Wylie, & Bedford, 1993).

$$p_t = \sum \frac{p_{ti}}{n} \quad \text{και} \quad p_s = \sum \frac{p_{si}}{n}$$

όπου n ο αριθμός των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν.

Στη συνέχεια ανάγονται οι τιμές των πιέσεων με βάση την πυκνότητα του αέρα σε θερμοκρασία 20 °C με χρήση του παρακάτω τύπου:

$$p_{t1,2} = \frac{p_t \cdot 1.2}{\rho} \quad \text{και} \quad p_{s1,2} = \frac{p_s \cdot 1.2}{\rho}$$

Τελικά ο όγκος προκύπτει ως εξής:

$$P_t = P_s + P_d$$

$$P_t = P_s + \frac{1}{2} \rho u^2$$

$$P_t = P_s + \frac{1}{2} \rho \left(\frac{Q}{A} \right)^2$$

$$\text{Όπου } A = \frac{(\pi d^2)}{4}$$

$$\text{Τελικά } Q = A \sqrt{\frac{2(P_t - P_s)}{\rho}}$$

Για την μέτρηση της στατικής και δυναμικής πίεσης θα χρησιμοποιηθεί μια διάταξη από λεπίδες μέτρησης ολικής και στατικής πίεσης, όπως φαίνεται και παρακάτω η οποία λειτουργεί με βάση την αρχή μεθοδολογίας των σωλήνων pitot.

Θερμοζεύγος

Τα θερμοζεύγη σχηματίζονται από την ένωση (κόλληση) δύο ανόμοιων μετάλλων. Κυρίως χρησιμοποιούνται χαλκός, σίδηρος και κωνσταντάνη (κράμα χαλκού-νικελίου). Όταν η ένωση αυτή θερμανθεί παράγεται μικρή τάση η οποία είναι ανάλογη της θερμοκρασίας της ένωσης. Στη συνέχεια χρησιμοποιούνται διάφορες διατάξεις για την μέτρηση του μέτρου της τάσης αυτής (μιλιβολτόμετρο, γέφυρα wheatstone με μετρητικό όργανο). Τα θερμοζεύγη χωρίζονται σε τύπους ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους. Το θερμοζεύγος τύπου J κατασκευάζεται από σύρματα σιδήρου και κωνσταντάνης. Αντίστοιχα το θερμοζεύγος τύπου K κατασκευάζεται από κράμα αλουμινίου (Alumel) και από κράμα χρωμίου (Chromel).

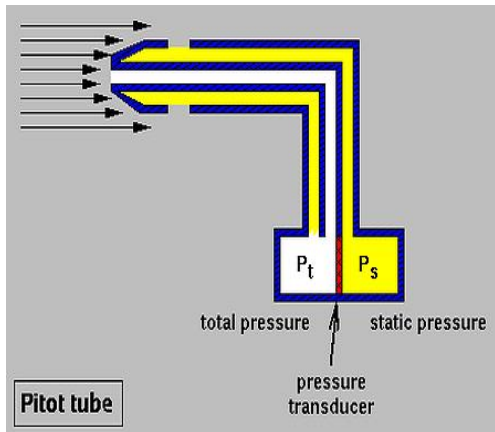
Αντίστοιχα τα θερμομέτρα αντίστασης χρησιμοποιούν την ίδια βασική αρχή. Στα άκρα των μεταλλικών αγωγών του αισθητηρίου ασκείται μια σταθερή τάση. Η αλλαγή της θερμοκρασίας επηρεάζει την αντίσταση του υλικού, με αποτέλεσμα η μετρούμενη τάση στα άκρα των μεταλλικών αγωγών του αισθητηρίου να επηρεάζεται αναλόγως. Τα θερμομέτρα αντίστασης είναι κατάλληλα για εφαρμογές μόνιμης ροής καθώς ο χρόνος απόκρισής τους είναι μεταξύ 0.5 και 5 m/sec.

Η μέτρηση της θερμοκρασίας είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό της πυκνότητας του αέρα και κατ' επέκταση την αναγωγή των τιμών της πίεσης και της ταχύτητας σε συνθήκες αναφοράς. Ο μετρητής θερμοκρασίας θα τοποθετηθεί στον εξωτερικό χώρο του εργαστηρίου ώστε να καταγράφει τη θερμοκρασία του αέρα προσαγωγής.

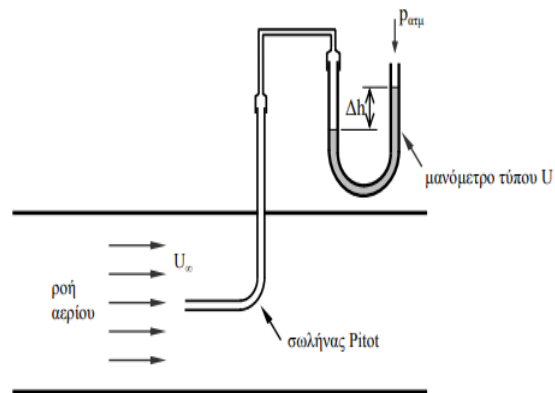
Pitot tube

Ο μετρητικός σωλήνας pitot πήρε το όνομά του από τον Γάλλο μηχανικό και εφευρέτη, Henri Pitot. Αποτελείται ουσιαστικά από ένα κομμάτι σωλήνα γνωστών διαστάσεων του οποίου το ένα άκρο είναι ανοικτό. Το άλλο άκρο του σωλήνα συνδέεται με μια διάταξη μέτρησης της πίεσης. Συνήθως η διάταξη μέτρησης είναι ένα μανόμετρο στήλης ή ένα μανόμετρο τύπου U. Βέβαια τα τελευταία χρόνια και καθώς η απαίτηση για ακρίβεια και επεξεργασία των μετρήσεων αυξάνεται χρησιμοποιούνται και άλλες ψηφιακές μετρητικές διατάξεις.

Αναλόγως της τοποθέτησης του σωλήνα pitot στον αγωγό λαμβάνεις και την αντίστοιχη πίεση. Όταν ο σωλήνας τοποθετηθεί παράλληλα με την ροή του αέρα τότε η πίεση που λαμβάνει είναι η ολική (στατική + δυναμική). Όταν ο σωλήνας τοποθετηθεί στο τοίχωμα κάθετα στη ροή και χωρίς να προεξέχει μέσα στον αγωγό (όπως φαίνεται και στην εικόνα) τότε η μέτρηση που λαμβάνει είναι αυτή της στατικής πίεσης.



Εικόνα 82: L pitot tube



Εικόνα 83: U pitot tube

Το ένα άκρο του μανομέτρου είναι συνδεδεμένο με τον σωλήνα Pitot. Το άλλο άκρο του μανομέτρου μπορεί να είναι είτε ανοικτό (δηλαδή να επικοινωνεί με την ατμόσφαιρα), είτε να συνδέεται με έναν άλλον εύκαμπτο αγωγό ο οποίος είναι συνδεδεμένος με ένα δεύτερο σωλήνα pitot ο οποίος μετράει την στατική πίεση.

Η πρώτη σύνδεση είναι αυτή η οποία μας δίνει απ' ευθείας την ολική πίεση του αέρα, εφόσον η πίεση που προκύπτει από τη μέτρηση δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$P_{ολ} = \rho_{\text{μανομέτρου}} g \Delta h + P_{atm}$$

όπου ρ η πυκνότητα του υγρού του μανομέτρου και h το ύψος στήλης του υγρού.

Εδώ το μετρούμενο μέγεθος είναι το Δh συνεπώς η μέτρηση αφορά τη σχετική ολική πίεση ($P_{ολ} - P_{atm}$).

Η δεύτερη σύνδεση δίνει την δυναμική πίεση και έμμεσα την ταχύτητα του αέρα στο σημείο μέτρησης.

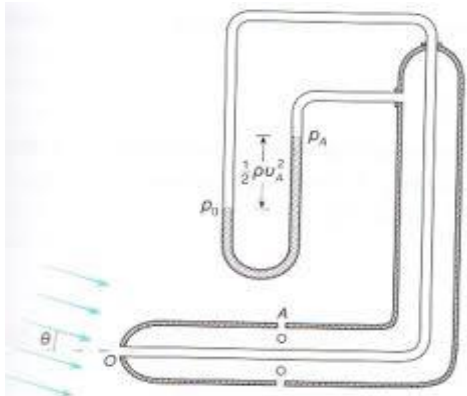
$P_{ολ} = P_{st} + P_{dyn}$. Το μέγεθος το οποίο μετράται με την διάταξη αυτή είναι το $P_{ολ} - P_{st}$, συνεπώς η δυναμική πίεση.

Τελικά λύνοντας ως προς την ταχύτητα προκύπτει

$$u = \sqrt{\frac{2(P_{ολ} - P_{st})}{\rho_{αερα}}} = \sqrt{\frac{\rho_{\text{μανομέτρου}} g \Delta h}{\rho_{αερα}}}$$

Η πυκνότητα του υγρού που χρησιμοποιείται, είτε είναι αέρα είτε είναι το ρευστό του μανομέτρου καθορίζει τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα.

Σωλήνας Prandtl



Εικόνα 84: Σωλήνας Prandtl

Ο σωλήνας Prandtl αποτελεί μια διάταξη η οποία συνδυάζει δυο σωλήνες pitot σε μια κατασκευή όπως φαίνεται το σχήμα. Έχει την δυνατότητα μέτρησης της ολικής και της στατικής πίεσης, καθώς διαθέτει δύο εισόδους και δύο εξόδους κατάλληλους για τις μετρήσεις αυτές. Στη συνέχεια, συνδέεται μανόμετρο στην έξοδο του αγωγού του σωλήνα Prandtl για να ληφθεί η ανάλογη μέτρηση (στατικής η ολικής πίεσης) ή αντίστοιχα συνδέεται διαφορικό μανόμετρο και στις δύο εξόδους για τη μέτρηση της δυναμικής πίεσης.

Πλεονεκτήματα

Τα πλεονεκτήματα των σωλήνων Pitot έναντι των άλλων διατάξεων μέτρησης

ταχύτητας είναι τα εξής:

- Χαμηλό κόστος και απλότητα κατασκευής η οποία αυξάνει την αξιοπιστία και την απροβλημάτιστη λειτουργία.
- Όταν ο σωλήνας Pitot χρησιμοποιείται από έμπειρο τεχνικό, είναι δυνατόν να δώσει ιδιαίτερα ακριβή αποτελέσματα μετρήσεων, με ελάχιστο σφάλμα.
- Επιπλέον, λόγω της απλότητας λειτουργίας του, ακόμα και ένας αρχάριος μπορεί να λάβει πολύ καλές μετρήσεις χωρίς μεγάλα σφάλματα.
- Είναι εύκολη η ψηφιοποίηση των τιμών του από μια απλή ηλεκτρονική διάταξη. Έτσι, καθίσταται δυνατό να χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε αυτοματοποιημένες διαδικασίες.
- Με τον σωλήνα Pitot παρέχεται η δυνατότητα μέτρησης της παροχής ρευστού, παρά το γεγονός ότι η βασική του λειτουργία του είναι η μέτρηση της ταχύτητας.

Μειονεκτήματα

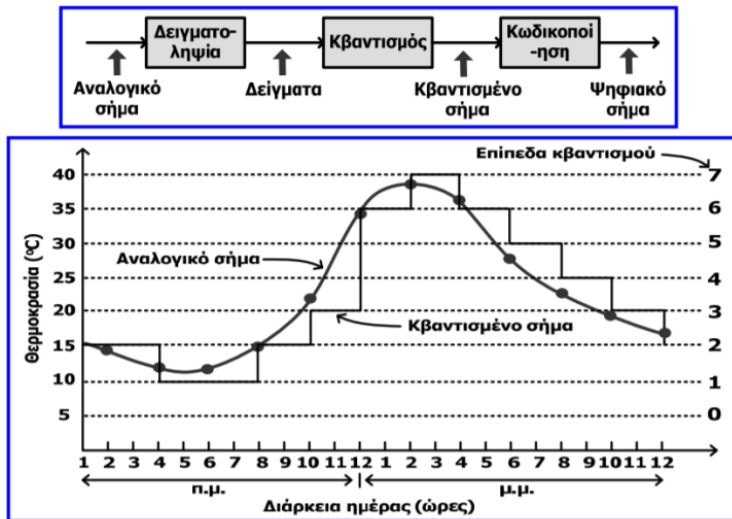
Παρά ταύτα, ο σωλήνας Pitot παρουσιάζει τα παρακάτω σημαντικά μειονεκτήματα:

- Μικρή ευαισθησία σε μικρές μεταβολές της ταχύτητας όταν η ταχύτητα του ρευστού είναι μικρή. Δηλαδή, όσο μεγαλώνει η ταχύτητα του ρευστού, τόσο μεγαλώνει και η ακρίβεια του οργάνου στις μικρές μεταβολές της ταχύτητας.
- Επηρεάζεται έντονα η ακρίβεια του οργάνου από την ύπαρξη στροβιλισμών στο υγρό, ειδικά όταν ο σωλήνας Pitot είναι τοποθετημένος κοντά στα τοιχώματα του αγωγού, όπου εμφανίζεται αποκόλληση της ροής.
- Όταν η ροή δεν είναι συνεχής και παρουσιάζονται κενά ή φυσαλίδες, είναι αναγκαίο να λαμβάνονται ιδιαίτερα μέτρα για την εξασφάλιση της ακρίβειας των μετρήσεων.
- Ο σωλήνας Pitot επηρεάζεται αρκετά από την ταχύτητα και την ποιότητα του ρευστού. Κατά αυτόν τον τρόπο, εμφανίζεται σημαντικό σφάλμα όταν μετρώνται ταχύτητες κοντά ή και πάνω από την ταχύτητα του ήχου. Αυτά τα σφάλματα οφείλονται στη δημιουργία ωστικού κύματος μπροστά από το άκρο του σωλήνα. Επίσης, στην περίπτωση πολύ μικρών ταχυτήτων, ο σωλήνας Pitot επηρεάζεται και από την πυκνότητα του ρευστού.

Ψηφιοποίηση των μετρήσεων

Την σημερινή εποχή είναι απαραίτητη η αυτοματοποιημένη λήψη και καταγραφή των μετρήσεων. Η διαδικασία της ψηφιοποίησης των μετρήσεων είναι πολύ σημαντική και οφείλει να γίνεται με μεγάλη προσοχή ώστε να μην προκύπτουν προβλήματα ακρίβειας και αξιοπιστίας. Παρακάτω, παρατίθενται τη βασική αρχή λειτουργίας μιας διάταξης ψηφιοποίησης μηχανικών μετρήσεων (Θεοδώρου, 2000).

Μέρος της μετρητικής διάταξης αποτελεί ένα μικρότερο σύνολο, του οποίου σκοπός είναι να μετατρέπει το φυσικό μέγεθος σε τάση. Το σύνολο αυτό αποτελείται από υλικά των οποίων οι ιδιότητες συνδέουν τα φυσικά μεγέθη με τα ηλεκτρικά. Τα σύνολα αυτά ονομάζονται μετατροπείς.



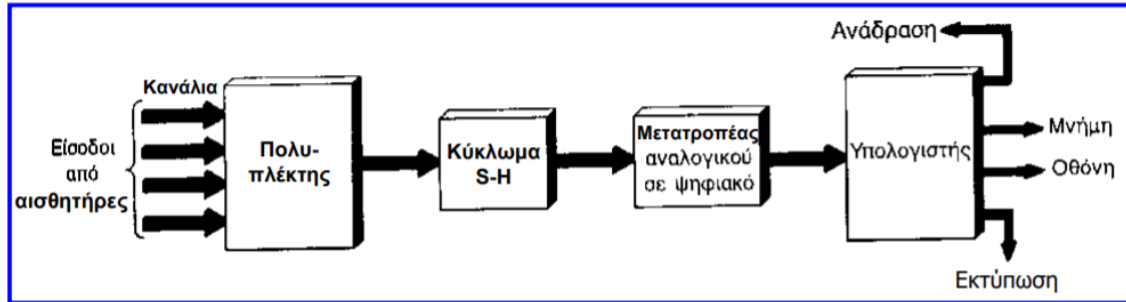
Εικόνα 85: Μετατροπή αναλογικού σε ψηφιακό σήμα

Η καταγραφή των δεδομένων εκτελείται από τα συστήματα συλλογής δεδομένων (data acquisition systems) τα οποία μετατρέπουν την πληροφορία (τάση) σε μορφή την οποία μπορεί να αναγνωρίσει ένας υπολογιστής.

Η τάση που λαμβάνει το σύστημα καταγραφής προέρχεται από τη μετατροπή της φυσικής ποσότητας σε τάση με τη χρήση αισθητήρων. Η τάση αυτή είναι αναλογικό μέγεθος καθώς είναι συνάρτηση του χρόνου. Η μετατροπή αυτής σε ψηφιακή τιμή γίνεται από μια σειρά εργαλείων. Αρχικά ο πολυπλέκτης, ο οποίος είναι ένας διακόπτης, μεταφέρει την πληροφορία από διάφορες πηγές σε ένα συλλογικό προορισμό. Δέχεται περιοδικά και εναλλασσόμενα δείγματα από κάθε κανάλι και τροφοδοτεί με αυτά τον ADC (analog to digital converter).

Το κύκλωμα δειγματοληψίας και συγκράτησης (sample-and-hold, S-H), διατηρεί σταθερή την τιμή του αναλογικού σήματος για το μικρό χρονικό διάστημα που απαιτείται για τη μετατροπή από τον ADC. Με τον τρόπο αυτό κατασκευάζει κβαντισμένες τιμές της στιγμιαίας τιμής του αναλογικού σήματος.

Ως αποτέλεσμα προκύπτει μια δειγματοληπτική διαδικασία μιας καμπύλης και αποθήκευση των τιμών αυτής στον υπολογιστή. Επόμενο είναι η συχνότητα δειγματοληψίας να είναι καθοριστική για την ορθή ανάγνωση του σήματος. Η σημερινή τεχνολογία διαθέτει κάρτες ADC με συχνότητα δειγματοληψίας 1KHz σε προσιτές τιμές. Η συχνότητα αυτή είναι αρκετά μεγάλη για μια μέτρηση στατικής ροής.

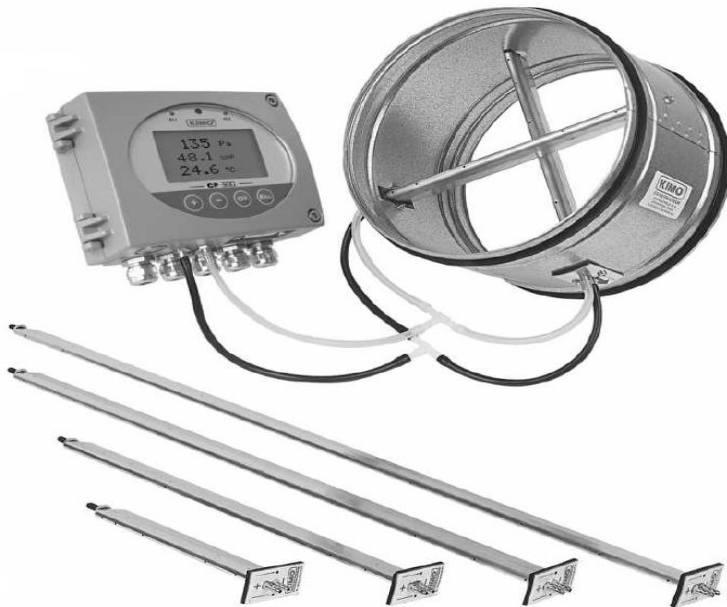


Εικόνα 86: Διαδικασία ψηφιοποίησης μετρήσεων

3.3 Επιλογή μετρητικών οργάνων

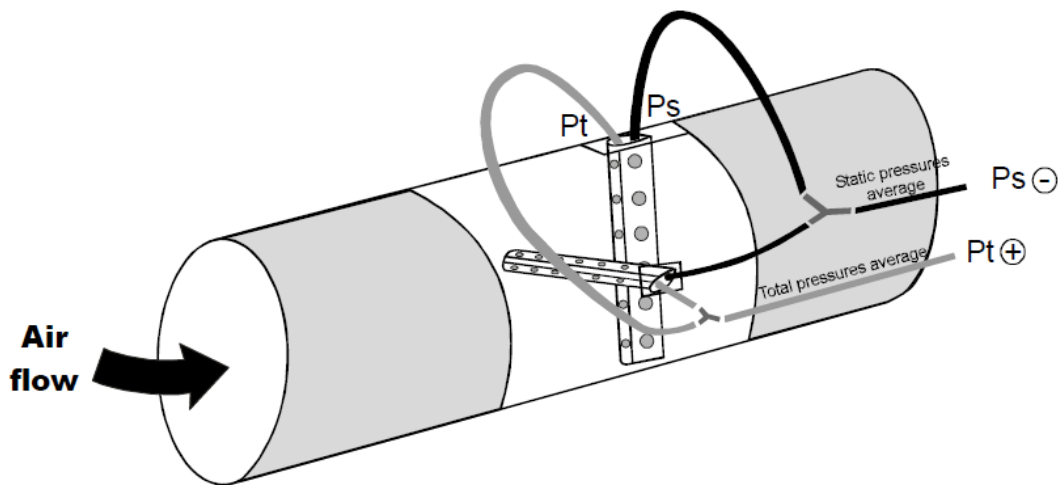
Debimo blades

Μία παραλλαγή των σωλήνων Prandtl είναι και η μετρητική διάταξη πίεσης Debimo. Η συγκεκριμένη μετρητική διάταξη έχει την ικανότητα μέτρησης στατικής και ολικής πίεσης. Ο αισθητήρας Debimo θα τοποθετηθεί στο πρώτο σημείο μέτρησης, δηλαδή μέσα στο αγωγό προσαγωγής αέρα. Είναι μια εξιδανικευμένη λύση για την μέτρηση της ολικής, στατικής και δυναμικής πίεσης μέσα σε αγωγούς. Αποτελείται από δύο αγωγούς σαν λεπίδες - pitot οι οποίες συνδέονται σαν σταυρός και τις τοποθετούνται μέσα σε αγωγό, όπως φαίνεται και στην εικόνα.



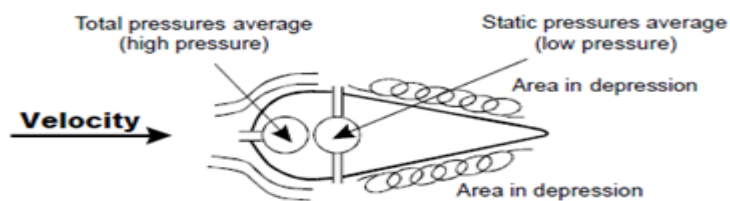
Εικόνα 87: Debimo blades pitot tube

Ο αγωγός θα τοποθετηθεί στη συνέχεια μέσα στον αγωγό της αεροσήραγγας. Τα pitot της μετρητικής διάταξης debimo διαθέτουν αεροδυναμική γεωμετρία, ώστε να επιφέρουν όσο το δυνατόν λιγότερη τύρβη και κραδασμούς στο σύστημα. Αναλόγως του μεγέθους του αγωγού και της επιθυμητής ακρίβειας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα ή περισσότερα pitot. Για να επιτευχθεί ακρίβεια στη μέτρηση της πίεσης του αέρα σε έναν αγωγό πρέπει να μετρηθεί η πίεση σε διάφορες της επιθυμητής κάθετης επιφάνειας, λόγω της αλλαγής της ταχύτητας του αέρα ανάλογα με την απόσταση από το κέντρο του αγωγού. Στην παρακάτω εικόνα παρατίθεται η αποδεκτή, σύμφωνα με τα ευρωπαϊκά πρότυπα, τεχνική της μέτρησης. Η χρήση των pitot debimo απλοποιεί τη διάταξη μέτρησης πίεσης στον αγωγό. Σε περίπτωση χρήσης απλού σωλήνα pitot, θα έπρεπε να δημιουργηθεί μηχανισμό κίνησής του, ώστε να μπορεί να λάβει μετρήσεις σε όλο το μήκος το πλάτος της επιφάνειας μέτρησης.



Εικόνα 88: Εγκατάσταση Debimo blades σε αγωγό

Οι λεπίδες – pitot διαθέτουν σπές κατά μήκος τους. Οι σπές χωρίζονται σε δύο ομάδες. Σε αυτές τις οποίες ο αέρας τις διαρρέει εγκάρσια, και χρησιμεύουν στη μέτρηση της στατικής πίεσης και αυτές που βρίσκονται στη διεύθυνση της κίνησης του αέρα και χρησιμεύουν στη μέτρηση της δυναμικής πίεσης. Η επιλογή της ακρίβειας των οργάνων αυτών είναι καθοριστικής σημασίας, διότι από τις μετρήσεις της πίεσης θα εξάχθει η ταχύτητα του αέρα και η ογκομετρική παροχή.



• Mounting examples



Εικόνα 89: Λειτουργία Debimo blades

Σχέσεις ταχύτητας και παροχής για τη μετρητική διάταξη:

$$V = K_L \sqrt{P_t - P_s}$$

$$Q = K_L \sqrt{P_d} 3600S$$

Όπου K_L διορθωτικός παράγοντας μετρητικού

P_t : Ολική πίεση

P_s : Στατική πίεση

S : εγκάρσια επιφάνεια αγωγού

P_d : Δυναμική πίεση

Στην εγκατάσταση επιλέχθηκε το μοντέλο debimo blade 200mm.

Τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα δίνονται παρακάτω:

Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας: 100°C (maximum 210°C on request)

Επαναληψιμότητα: Μεγαλύτερη από 0.3%

Εύρος μέτρησης: 0 - 2 bar στατική πίεση

Η συγκεκριμένη μετρητική συσκευή έχει τεράστιο εύρος μετρήσεων

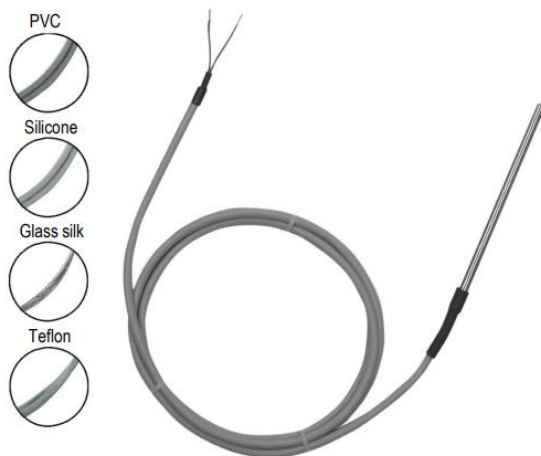
Ακρίβεια: 3-5%

Η ακρίβεια των μετρήσεων εξαρτάται κυρίως από την επιλογή του μετρητικού διαφορικής πίεσης αλλά και από την σωστή εγκατάσταση των αισθητηρίων. Ο κατασκευαστής ορίζει μία σταθερά K_L η οποία λειτουργεί ως αντιστάθμιση για την ύπαρξη του μετρητικού μέσα στη ροή. Καθώς η μετρητική διάταξη επηρεάζει το μέτρο της ταχύτητας και της πτώσης πίεσης, η χρήση του παράγοντα K_L ισοσταθμίζει την ύπαρξη του μετρητικού με αποτέλεσμα οι μετρήσεις να δίνονται διορθωμένες.

SF50 PT100 probe

Επιλέχθηκε ο μετρητής θερμοκρασίας SF50 με αξονάκι (probe) και αισθητήριο PT100. Θα τοποθετηθεί είτε σε εξωτερικό χώρο, είτε στην έξοδο του στομίου για τη μέτρηση της θερμοκρασία του προσαγόμενου αέρα.

Ο αισθητήρας PT100 διαθέτει αντίσταση από πλατίνα 100Ohms.



Temp °C	Tolerances					
	Class B		Class A		1/3 DIN	
	± °C	± Ohms	± °C	± Ohms	± °C	± Ohms
-100	0,8	0,32	0,35	0,14	0,27	0,11
-50	0,55	0,22	0,25	0,1	0,19	0,08
0	0,3	0,12	0,15	0,06	0,1	0,04
100	0,8	0,3	0,35	0,13	0,27	0,1
200	1,3	0,48	0,55	0,2	0,44	0,16
300	1,8	0,64	0,75	0,27	0,6	0,21
400	2,3	0,79	0,95	0,33	0,77	0,26

Resistance values for PT1000 (Ω) must be multiplied by 10 for the same corresponding temperature value (°C). I.e : at 0°C for Class B PT1000 ± 0.3°C → ± 1.2 Ω

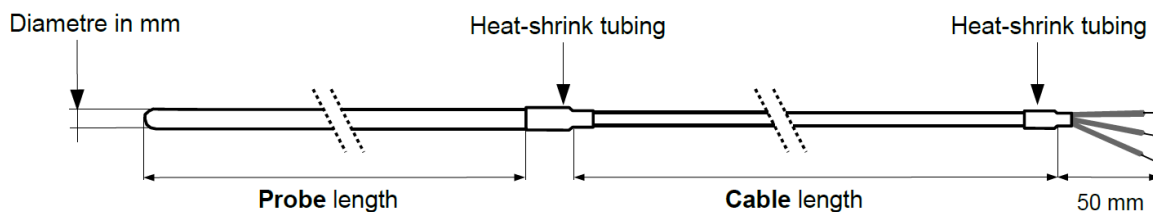
Εικόνα 90: αισθητήριο PT 100

Εικόνα 91: Αντιστάθμιση μετρήσεων

Εύρος μετρήσεων: -50°C έως 400°C

Τρία καλώδια εξόδου

Ανοχή : Class B (όπως δίνεται στην παραπάνω εικόνα)



Εικόνα 92: Αισθητήριο SF50

CP 212

Επιλέχθηκε μετρητής διαφορικής πίεσης CP212 ο οποίος θα συνδεθεί με τη μετρητική διάταξη debimo blades η οποία είναι εγκατεστημένη στον αγωγό και το μετρητικό SF-50. Η επιλογή του μετρητή διαφορικής πίεσης επηρεάζει το εύρος μέτρησης και την ακρίβεια των μετρήσεων. Η διάταξη debimo blades λειτουργεί σαν παθητικό στοιχείο το οποίο διοχετεύει τον αέρα μέσω κατάλληλων οπών (οπές για στατική πίεση και οπές για ολική πίεση) στο διαφορικό μετρητή. Εκείνος με τη σειρά του και τα χαρακτηριστικά του θα δώσει τις δυνατότητες μέτρησης του συστήματος debimo blades – CP 212.



Εικόνα 93: Μεταδότης CP212

Τα χαρακτηριστικά του διαφορικού μετρητή CP212-BOR δίνονται παρακάτω:

Εύρος μέτρησης: -1000 έως 1000 Pa

Παροχή ρεύματος: 24 Vac

Αναλογικές εξοδοι: 4 0-5/10V ή 0/4-20mA

Ακρίβεια: ± 0.5 % της μετρούμενης τιμής, ± 2 Pa

Μέγιστη πίεση: 21000 Pa

Ανάλυση: 1Pa

Εύρος μετρήσεων ταχύτητας: 3 έως 30m/sec

Χρόνος απόκρισης: 0.3 sec

Δυνατότητα σύνδεσης με αισθητήριο θερμοκρασίας

Σχέσεις ταχύτητας για τη μετρητική διάταξη:

$$V = C_M \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

$$\rho = \frac{P_0}{287.1(\theta + 273,15)}$$

C_M : διορθωτικό παράγοντας συσκευής

Pitot tube L: $C_M = 1.0015$

Pitot tube S: $C_M = 0.84$

Debimo blade: $C_M = 0.8165$

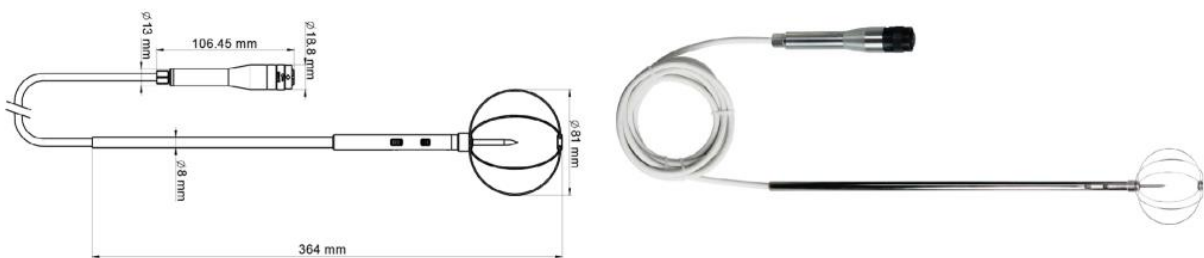
θ : θερμοκρασία περιβάλλοντος

P_0 : ατμοσφαιρική πίεση

Ο μετρητής διαφορικής πίεσης υπολογίζει την ταχύτητα του αέρα μέσω της εξίσωσης V που δίνεται παραπάνω. Στην εξίσωση εισάγεται η διόρθωση της πυκνότητας του αέρα συναρτήσει της θερμοκρασίας του και ο παράγοντας C_M για την σύνδεση με την κατάλληλη διάταξη (εδώ, debimo blades).

SVO omnidirectional

Το αισθητήριο SVO είναι ένας μετρητής ταχύτητας και θερμοκρασίας. Μέσω της διάταξής του στο εμπρός μέρος έχει την ικανότητα να προσδιορίζει και την κατεύθυνση της ροής. Ασκώντας μια τάση στο κυκλικό μεταλλικό πλέγμα, αυτό θερμαίνεται και φτάνει σε σταθερή θερμοκρασία. Κατά την διέλευση του αέρα τα πλέγμα ψύχεται. Η ανομοιομορφία της ψύξης είναι η βασική αρχή για τον προσδιορισμό της κατεύθυνσης του αέρα. Δηλαδή μετρώντας την πτώση της θερμοκρασίας σε κάθε μεταλλικό σύρμα προσδιορίζεται και η κατεύθυνση του αέρα. Είναι κατάλληλο για εφαρμογές μόνιμης ροής. Το αισθητήριο αυτό θα τοποθετηθεί σε ειδική κατασκευή η οποία θα λειτουργεί με τη χρήση σερβομοτέρ και θα μεταφέρει το μετρητικό σε επιλεγμένες θέσεις μπροστά από το στόμιο, σκανάροντας έτσι την έξοδο του στομίου με σκοπό τη λήψη μετρήσεων σε όλο το επίπεδο.



Εικόνα 94: Αισθητήριο SVO omnidirectional

Τα χαρακτηριστικά του είναι τα εξής :

Εύρος μέτρησης: 0 – 5 m/sec

Ακρίβεια: $\pm 3\%$ της μετρούμενης τιμής, ± 0.05 m/sec

Ανάλυση: 0.1 m/sec / 0.1 °C

SVS hot wire probe

Μετρητής ταχύτητας αέρα και θερμοκρασίας ο οποίος θα τοποθετηθεί μπροστά από το στόμιο για τη μέτρηση της ταχύτητας του αέρα, με αντίστοιχο τρόπο στήριξης του SVO μετρητή. Ο συγκεκριμένος μετρητής δεν έχει την ικανότητα μέτρησης της κατεύθυνσης του αέρα.



Εικόνα 95: Αισθητήριο SVS 31

Τα χαρακτηριστικά του είναι τα εξής:

Εύρος μέτρησης: 0 – 30 m/sec

Ακρίβεια μέτρησης ταχύτητας αέρα: $\pm 3\%$ της μετρούμενης τιμής

Ακρίβεια μέτρησης θερμοκρασίας: Όπως δίνεται από τον πίνακα Pt100

Ανάλυση: 0 – 3 m/sec \rightarrow 0.01 m/sec

3 – 30 m/sec \rightarrow 0.1 m/sec

Θερμοκρασίας: 0.1 °C

Transmitter C310-BO

Επιλέχθηκε μετρητής διαφορικής πίεσης C310 (SP-I2-1000) ο οποίος θα συνδεθεί με τα μετρητικά SVS και SVO και θα τοποθετηθεί κοντά στο προς μέτρηση στόμιο.



Εικόνα 96: Μεταδότης C310-BO

Τα χαρακτηριστικά του διαφορικού μετρητή CP310-BO δίνονται παρακάτω:

Εύρος μέτρησης: -1000 έως 1000 Pa

Παροχή ρεύματος: 24 Vac

Αναλογικές έξοδοι: 4 0-5/10V ή 0/4-20mA

Ακρίβεια: $\pm 0.2\%$ της μετρούμενης τιμής, ± 2 Pa

Θερμοκρασίας: $\pm 1.1^\circ\text{C}$

Ανάλυση: 1Pa , 0.1 $^\circ\text{C}$

Αυτοματισμοί μετρητικής διάταξης

Η πρώτη μέτρηση πραγματοποιείται από τη μετρητική διάταξη debimo blades στον αγωγό παροχής αέρα στην αεροσήραγγα όπου μετράται η στατική πίεση και η δυναμική πίεση και εξάγεται το προφίλ της ταχύτητας του αέρα.

Η δεύτερη μέτρηση που θα πραγματοποιηθεί είναι μέτρηση στατικής πίεσης ακριβώς πριν το στόμιο. Πιο συγκεκριμένα θα τοποθετηθεί pitot tube στον δοκιμαστικό αγωγό (test duct), ώστε να ληφθεί η μέτρηση στατικής πίεσης ακριβώς πριν το στόμιο.

Στη συνέχεια θα τοποθετηθούν τα μετρητικά ταχύτητας SVS και SVO, σε μηχανική διάταξη η οποία θα κινείται στο χώρο βάσει προγραμματισμού από τον χρήστη.

Τέλος θα γίνεται μέτρηση της θερμοκρασίας με το μετρητικό SF50 για την διόρθωση της πυκνότητας του αέρα και την αναγωγή αυτής, βάσει προτύπου, σε αέρα που αντιστοιχεί σε θερμοκρασία 20 °C.

Ο τεχνολογικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την περάτωση του έργου, όπως φαίνεται και στις φωτογραφίες, αποτελείται από:

1. **Διάταξη** η οποία κινείται στο χώρο και φέρει τα μετρητικά SVS και SVO

Η συγκριμένη διάταξη θα αποτελείται από μια μηχανολογική κατασκευή που θα φέρει πάνω της άξονες και servo motors με ενσωματωμένο encoder για ακρίβεια στην κίνηση και μετρητικά ταχύτητας.



Εικόνα 9732: Μετρητική διάταξη αεροσύραγγας

2. **PLC** ο οποίος είναι υπεύθυνος για τη λήψη μετρήσεων και την ψηφιοποίησή τους.

Θα χρησιμοποιηθεί PLC τύπου SIMATIC S7-1200 το οποίο διαθέτει 8 αναλογικές εισόδους και 4 αναλογικές εξόδους καθώς και 10 ψηφιακές εισόδους και 6 ψηφιακές εξόδους.

3. **Βιομηχανικός υπολογιστής** με σκοπό την επεξεργασία των δεδομένων και την εξαγωγή των διαγραμμάτων του εκάστοτε στομίου.

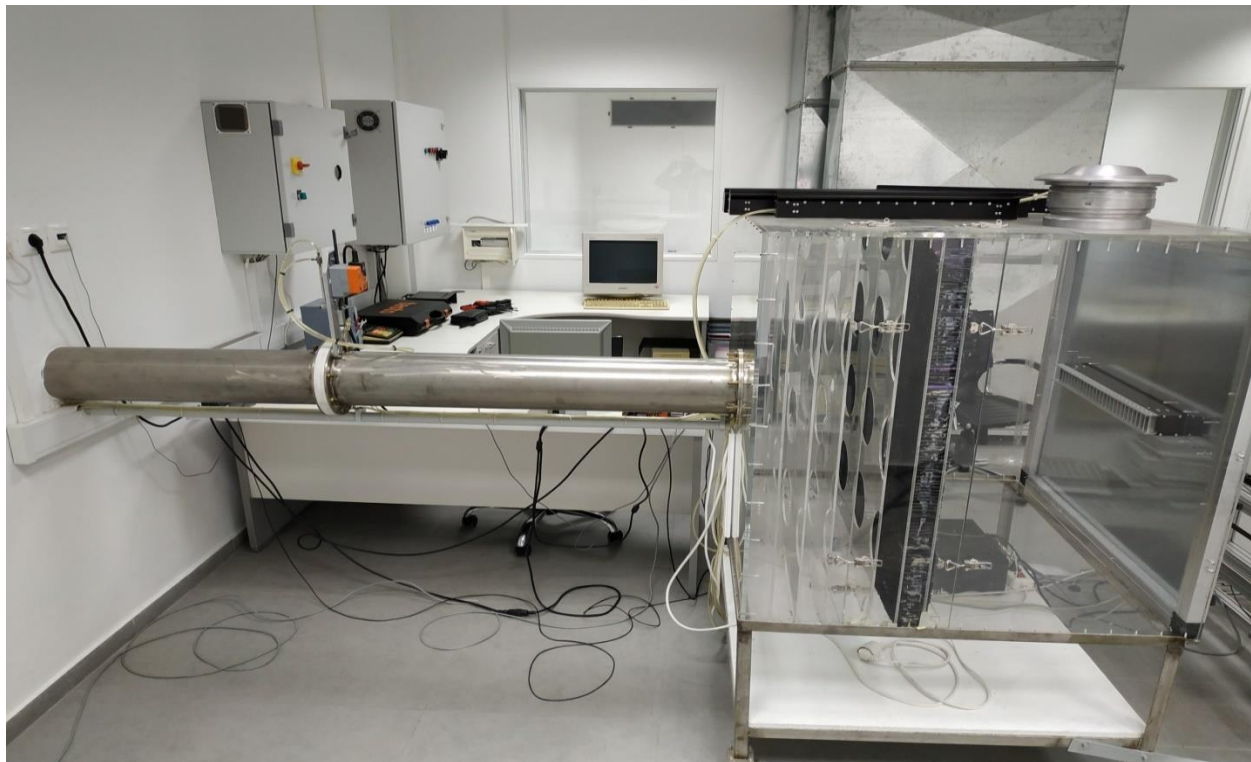
Ο βιομηχανικός υπολογιστής θα φέρει software τύπου WinCC TIA Ver.16 Unified. Μέσα από το software θα υπάρχει δυνατότητα παραμετροποίησης, ώστε να λαμβάνονται μετρήσεις στα σημεία στα οποία ορίζει ο χρήστης, δεδομένου ότι κάθε στόμιο είναι μοναδικό ως προς τον τύπο και τις διαστάσεις του. Οι παράμετροι του συστήματος καταγραφής αφορούν:

- Τα όρια του ορθογώνιου παραλληλόγραμμου χώρου καταγραφών ως υποσυνόλου του δωματίου
- Τις συντεταγμένες XY του γεωμετρικού μέσου του δοκιμίου, προκειμένου να δημιουργηθεί το σημείο αναφοράς στο νέο χώρο
- Την πυκνότητα των σημείων καταγραφής κατά άξονα X, Y, Z, του ορισθέντα χώρου
- Τον αριθμό των μετρήσεων ανά σημείο
- Η ρύθμιση των στροφών του ανεμιστήρα προσαγωγής.
- Οι οριακές τιμές ενδιαφέροντος (μέγιστες και ελάχιστες τιμές)

Οι καταγραφές όλων των σημείων της σάρωσης του χώρου θα αποθηκεύονται σε αρχείο CSV με πέντε στήλες (X,Y,Z, μέτρηση αισθητηρίου παροχής ανεμιστήρα, μέτρηση αισθητηρίου ροής σημείων), με μέγιστη ανάλυση 500.000 σημεία.

Στο αρχείο οι συντεταγμένες θα καταγράφονται ως προς το σχετικό σύστημα συντεταγμένων (δοκίμιο), όπως αυτό ορίστηκε από τις πρώτες δύο παραμέτρους .

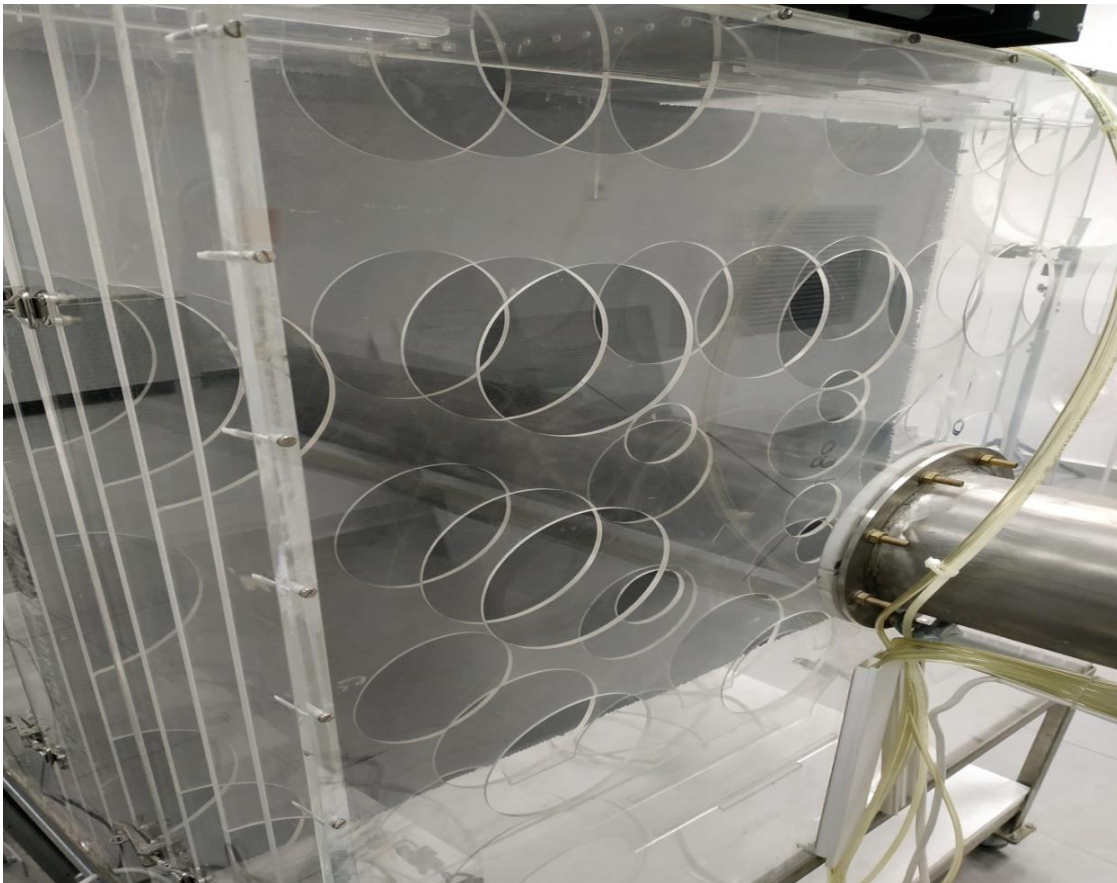
Η ελάχιστη πυκνότητα απόστασης για κάθε επόμενο σημείο ανά άξονα θα είναι τα 10mm.



Εικόνα 9833: Μετρητική διάταξη αεροσύραγγας (πλάγια όψη)



Εικόνα 9934: Πλάκες ισοκατανομής στο plenum box



Εικόνα 10035: Πλάκες ισοκατανομής στο plenum box

Κεφάλαιο 4^ο

Στο τελευταίο κεφάλαιο θα παρουσιασθούν κάποιες προτάσεις για την βελτίωση της συνολικής διαδικασίας όπως αυτή διαχωρίζεται στο μέρος της προσομοίωσης, στην υλικοτεχνική υποδομή που απαρτίζει την αεροσήραγγα, καθώς και στον προγραμματισμό λήψης μετρήσεων.

4.1 Βελτιώσεις στην προσομοίωση

Η διαδικασία της προσομοίωσης αποτέλεσε το δυσκολότερο πρόβλημα ολόκληρου του εγχειρήματος. Για την ολοκλήρωση της διαδικασίας έγιναν διάφορες υποθέσεις. Το κυριότερο μεινέκτημα στην έως τώρα παρουσίαση της διπλωματικής είναι η έλλειψη πραγματικών μετρήσεων ούτως ώστε να γίνει σύγκριση των θεωρητικών αποτελεσμάτων με τις πειραματικές μετρήσεις και πάνω στο ζήτημα αυτό θα μπορούσε να προκύψει μια νέα μελέτη.

Η χρήση ενός υπολογιστή με μεγαλύτερη επεξεργαστική ισχύ θα έδινε τη δυνατότητα να πραγματοποιηθεί διακριτοποίηση πλέγματος μεγαλύτερης ανάλυσης, ώστε να εξαχθούν αποτελέσματα με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Με τη χρήση περισσότερης επεξεργαστικής ισχύος θα είχαμε τη δυνατότητα επίλησης ολόκληρης της γεωμετρίας απ'ευθείας ή έστω ολόκληρης της πλάκας ισοκατανομής, αποφεύγοντας έτσι υποθέσεις τις οποίες κάναμε οι οποίες απαιτούν έλεγχο με πειραματικά δεδομένα.

Για την επαλήθευση των μετρήσεων κατάντι του στομίου προβλέπεται διάταξη με τα μετρητικά SVO και SVS. Η χρήση ενός ανεμόμετρου ακριβείας για την μέτρηση του μέτρου της ταχύτητας μετά την πλάκα ισοκατανομής με τα καλαμάκια κρίνεται ως ωφέλιμη για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

Η πειραματικές μετρήσεις κρίνονται απαραίτητες όχι μόνο για τους λόγους που προαναφέραμε, αλλά και για τον προσδιορισμό των μοντέλων τύρβης, και συγκεκριμένα των μέτρων που τα περιγράφουν (turbulence kinetic energy, specific dissipation rate). Η κατάλληλη επιλογή των δεικτών θα επιφέρει αυξημένη ακρίβεια στα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Γενικότερα η σχέση μεταξύ των προσομοιώσεων και των πειραματικών μετρήσεων είναι σχέση διαλεκτική.

Το τμήμα της προσομοίωσης της ροής στους λεπτούς επάλληλους σωλήνες θα μπορούσε να επιλυθεί τμηματικά ολόκληρο. Μπορεί αυτή η διαδικασία να θεωρηθεί χρονοβόρα αλλά σίγουρα θα φέρει πιο ακριβή αποτελέσματα.

4.2 Προτάσεις για την εγκατάσταση

Αρχικά πρέπει να αναφερθεί πως η συγκεκριμένη διάταξη με την οποία θα εξαχθούν αποτελέσματα και πίνακες οι οποίοι συσχετίζουν την ογκομετρική παροχή με την πτώση πίεσης στο στόμιο (διαγράμματα $Q - \Delta P$) δεν μπορεί να είναι πιστή εφαρμογή μια εγκατάστασης. Η ορισμένη διάσταση του αγωγού ($\Phi 168$) από τον οποίο εισάγεται ο αέρας σε συνδιασμό με την μετρητική διάταξη της πίεσης δημιουργούν όπως είδαμε και παραπάνω διαφορετικά προφίλ ταχυτήτων σε σχέση με την ύπαρξη μόνο του αγωγού. Επιπροσθέτως, βάσει και των σχεδιαστικών κανόνων οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές κλιματισμού με καναλάτο σύστημα διάχυσης αέρα, η ταχύτητα του αέρα που επικρατεί σε έναν αγωγό κυμαίνεται μεταξύ 5 έως 10 m/sec. Η αρχή αυτή θα παραβιασθεί στον αγωγό της αεροσύρραγγας με την αύξηση της παροχής του ανεμιστήρα. Κατά συνέπεια η διάταξη αυτή έχει περιορισμούς, καθώς δίνει τη δυνατότητα για έλεγχο συγκεκριμένων διαστάσεων στόμια.

Το δεύτερο κομμάτι το οποίο θα μπορούσε να αναβαθμιστεί στην εγκατάσταση είναι οι διατάξεις ισοκατανομής. Παρατηρώντας και τα αποτελέσματα στο κεφάλαιο 3 παρατηρούμε πως ενώ επιβάλλεται στον αέρα μέσω των οπών μια διαδρομή τέτοια ώστε να ισοκατανεμηθεί στο χώρο, ακόμα παρατηρούνται φαινόμενα jet, δηλαδή τοπικά πυκνής ροής με αυξημένη ταχύτητα. Η θέση των οπών στις πλάκες ισοκατανομής καθώς και η διάμετρός τους αφορά ένα πεδίο το οποίο επιδέχεται βελτιώσεις.

Τέλος, η τελική διάταξη ισοκατανομής μπορεί να αντικατασταθεί με υλικά τα οποία θα είναι πιο εύκολα επεξεργάσιμα κατά την προσομοίωση. Μία πιθανή αντικατάσταση τους θα μπορούσε να αποτελεί ένα πορώδες υλικό με χαμηλό βαθμό απορροφητικότητας ώστε να επιτρέπει χωρίς μεγάλη πτώση πίεσης την διέλευση του αέρα μέσα από αυτό. Η επιλογή του υλικού και των ιδιοτήτων του επαφύεται σε μελλοντική διερεύνηση.

4.3 Αναβάθμιση της διαδικασίας μετρήσεων

Πριν την έναρξη της διαδικασίας των μετρήσεων ο χειριστής πρέπει να προγραμματίσει την κίνηση των σερβομοτέρ μέσω του PLC με σκοπό να ορίσει τα σημεία στα οποία θα γίνουν οι μετρήσεις. Ο προσδιορισμός των σημείων θα γίνει μέσω της προσομοίωσης όπου στο προφίλ ταχύτητας εξόδου θα έχουν δοθεί τα σημεία όπου το μέτρο της ταχύτητας είναι μέγιστο, καθώς και η κλίση της ροϊκής γραμμής στο χώρο.

Τέλος θα ήταν σκόπιμο να προγραμματιστεί μια μικρή ανίχνευση ως προς τις γωνίες $\hat{\varphi}$ και $\hat{\theta}$. Δηλαδή κατά στην προγραμματισμένη θέση του pitot tube SVS, μέσω κάποιων επιπλέον εγκατεστημένων σερβομοτέρ, να περιστρέφεται ο προσανατολισμός του pitot tube. Στη συνέχεια με σύγκριση των τιμών του μέτρου της ταχύτητας που λαμβάνεται για την κάθε γωνία να αποθηκεύεται η μέγιστη τιμή. Με τη διαδικασία αυτή θα επιβεβαιώνονται και τα αποτελέσματα του μετρητικού SVO, το οποίο έχει την ικανότητα μέτρησης της κλίσης της ροϊκής γραμμής.

Appendix

Κώδικας SQL

```
drop table if exists testtesttest
create table testtesttest ( x decimal (15,6) , y decimal ( 15,6) )
declare @x decimal ( 15,6) ;
set @x =0
declare @minx decimal ( 15,6) ;
set @minx = 0
declare @maxx decimal ( 15,6) ;
set @maxx = 247.5
declare @y decimal ( 15,6) ;
set @y =0
declare @miny decimal ( 15,6) ;
set @miny =0
declare @maxy decimal ( 15,6) ;
set @maxy =212.5
while @x <= @maxx
begin
    while @y <= @maxy
    begin
        --select @y
        --select @x
        --
insert into testtesttest
select @x ,@y
set @y = @y+5
end
set @x = @x + 5
---select @x
set @y = @miny
end

select * from testtesttest
```

Βιβλιογραφία

- Chapra, S. C., & Canale, R. P. (2010). *Numerical Methods for Engineers*. Singapore: McGraw-Hill.
- Menter, F. R. (1994). Two Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA Journal*.
- Streeter, V. L., Wylie, E. B., & Bedford. (1993). *Μηχανική Ρευστών*. (Γ. Χ. Φούντας, & Μ. Γ. Φούντα, Μεταφρ.) Αθήνα: Fountas.
- Δούκας, Ι. (2005). *Ιστορική Εξέλιξη της Επιστήμης της Μετρολογίας*.
- ΕΛΟΤ. (2002). *ΕΛΟΤ EN 12238 Αερισμός κτιρίων - Στόμια αέρα - Αεροδυναμικές δοκιμές και χαρακτηρισμός για εφαρμογή μεικτής ροής*. Αθήνα: Ελληνικός οργανισμός τυποποίησης.
- Θεοδώρου, Ν. (2000). *Ηλεκτρικές Μετρήσεις*.
- Καλοβρετάκης, Ι. Κ., & Κατεβάκης, Ν. (2019). *Αισθητήρες μέτρησης και ελέγχου*. ΤΖΙΟΛΑΣ.
- Κοκκώνης, Κ. Δ. (2010). *Μετρολογία - Διακρίβωση του SAXS System's [Cd-rom] Ανάλυση δεδομένων μετρήσεων*.
- Παπαϊωάννου, Α. Θ. (2002). *Μηχανική των Ρευστών*. Αθήνα: ΚΟΡΑΛΙ.
- Παπανίκας, Δ. Γ. (2010). *Εφαρμοσμένη Ρευστομηχανική*. Πάτρα - Αθήνα: Media Guru.