

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ
ΕΣΩΤΕΡΙΚΩΝ ΧΩΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΩΝ**

ΕΥΘΥΜΙΟΠΟΥΛΟΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

ΛΕΚΤΟΡΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΠΑΝΑΡΑΣ

ΚΟΖΑΝΗ

ΙΟΥΛΙΟΣ 2018

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διεξήχθη έρευνα με σκοπό την παρατήρηση πιθανής συσχέτισης μεταξύ της συγκέντρωσης μιας αέριας ένωσης και της θερμοκρασιακής κατανομής των κατακόρυφων δομικών στοιχείων σε εσωτερικό χώρο. Η συσχέτιση αυτή μπορεί να αξιοποιηθεί στα πλαίσια διατύπωσης μεθοδολογίας για τον έλεγχο της ποιότητας αέρα σε εσωτερικούς χώρους ή ακόμα και την εξακρίβωση διαρροής κάποιου ρυπαντή μέσω θερμοκρασιακών μετρήσεων

Στο πλαίσιο αυτό δημιουργήθηκε ένα κυτίο από υλικό plexiglass προκειμένου να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση ενός κλειστού χώρου υπό κλίμακα και συλλέχθηκαν δεδομένα για την θερμοκρασιακή κατανομή της μιας εκ των τεσσάρων κατακόρυφων επιφανειών του χρησιμοποιώντας μια θερμογραφική κάμερα τύπου IRI 4030 της εταιρείας IRISTEM. Το αέριο που χρησιμοποιήθηκε είναι το CO₂.

Με βάση τα δεδομένα από τις μετρήσεις που συλλέχθηκαν, αναλύθηκαν βασικές μεταβλητές όπως η διαφορά των ακραίων τιμών θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια φόρτισης με συγκεκριμένη ποσότητα CO₂, καθώς και οι μέγιστες, ελάχιστες και μέσες τιμές θερμοκρασίας, και διερευνήθηκε η συσχέτιση τους με το λόγο ανάμιξης.

Για την επεξεργασία αναπτύχθηκαν κατάλληλες υπορουτίνες σε περιβάλλον octave, ενώ αξιοποιήθηκε πλήρως η δυνατότητα του υποστηριζόμενου λογισμικού της επιλεγόμενης θερμοκάμερας να παρέχει πινακοποιημένες τιμές θερμοκρασίας στο πλήρες επίπεδο της επιλεγόμενης κατακόρυφης επιφάνειας, σε χρονικά διαστήματα κατάλληλα κλίμακας σε σχέση με το υπό παρακολούθηση φαινόμενο.

Αρχικά γίνεται μια σύντομη εισαγωγή και περιγραφή του προβλήματος προς μελέτη (Κεφ.1). Έπειτα πραγματοποιείται μια σύντομη αναφορά στο πρόβλημα του αερισμού και της ποιότητας εσωτερικών χώρων. (Κεφ. 2) Στη συνέχεια παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη (Κεφ.3), καθώς και η προετοιμασία και διασφάλιση της σταθερότητας των συνθηκών διεξαγωγής της πειραματικής διαδικασίας (Κεφ.4). Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, τόσο όσον αφορά τις θερμοκρασιακές κατανομές, όσο και την συσχέτιση τους με το λόγο ανάμιξης της αέριας μάζας του CO₂ εντός του κυτίου (Κεφ.5). Η εργασία ολοκληρώνεται με τα συμπεράσματα (Κεφ.6).

Abstract

In this research, an experiment was performed in order to determine any relation between the effect of the concentration of a gas pollutant along with the effects of molecular weight and specific heat capacity on the temperature change of a vertical surface. The investigation was aimed at generating an innovative methodology to measure efficiently and with low cost, the concentration of gas pollutants in order to introduce restrictions for indoor air quality and contribute to the effort towards increasing comfort, health and wellbeing in the built environment.

At first, a box from plexiglass was constructed, in order to have complete control over the internal conditions in which the experiment was to be performed. The top and bottom side of the box was insulated, so that transient conduction and convection in these sides would minimize. As a consequence, heat transfer was to take part only on the vertical sides of the box.

A gas mixture with specific CO₂ concentration was introduced into the box and the temperature distribution was monitored by a thermographic camera, targeting a vertical surface, for a specific time period. The experiment was repeated several times for 10 different cases of the CO₂ concentration in order to ensure the validity of the data collected. At the end, every case's temperature measurements was compared to one another and useful conclusions were extracted relating to the correlation of temperature distribution of a vertical surface and concentration of the pollutant inside the box.

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για όλη αυτή την στήριξη που μου παρείχαν αυτά τα χρόνια, και να αφιερώσω την παρούσα διπλωματική εργασία σε αυτή ως δείγμα της ευγνωμοσύνης μου. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους καθηγητές του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας για την εκπαίδευση και τις γνώσεις που μου προσέφεραν και κυρίως τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας κύριο Γεώργιο Πανάρα για τις συμβουλές, την καθοδήγηση και την ενεργή υποστήριξη του στην εκπόνηση αυτής. Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές και φίλους που έκανα στα πέντε χρόνια των σπουδών μου στην Κοζάνη και ιδιαίτερα τον Μανώλη Κυριαζή, τον Διονύση Δασόπουλο, τον Χρήστο Κανδεράκη και τον Ιάσονα Τσέλο για την βοήθεια που μου παρείχαν στην κατασκευή της πειραματικής διάταξης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Τέλος δεν θα ήθελα να παραλείψω όλους τους ανθρώπους που έχω δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια και ήταν πάντα πρόθυμοι να με βοηθήσουν, ο καθένας με τον τρόπο του.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	2
Abstract.....	3
Ευχαριστίες.....	4
1.0 Εισαγωγή.....	7
2.0 Αερισμός σε εσωτερικούς χώρους	8
2.1 Εξεταζόμενες ενώσεις σε προβλήματα αερισμού.....	8
2.2 Η σημασία του αερισμού στην υγεία.....	9
2.3 Το διοξείδιο του άνθρακα ως ένδειξη ποιότητας αέρα εσωτερικού χώρου.....	10
3.0 Περιγραφή Πειραματικής Διάταξης.....	11
3.1 Φιάλη CO ₂	12
3.2 Κυτίο Plexiglass	13
3.3 Θερμόμετρο TM 200	14
3.4 Θερμογραφικές κάμερες.....	15
3.5 Αισθητήρας συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα.....	17
3.6 Δοχεία διαστολής.....	17
3.7 Αντλία κενού.....	19
3.8 Θερμόμετρο-ανεμόμετρο τύπου HD 2103.2.....	20
3.9 Ρυθμιστικές βάνες.....	21
4.0 Βασικές ενέργειες διασφάλισης συνθηκών πειραματικής διαδικασίας.....	22

4.1 Διαδικασία ελέγχου αεροστεγανότητας.....	22
4.2 Θερμομόνωση άνω και κάτω πλάκας κυτίου.....	23
5.0 Διαδικασία εκτέλεσης πειραμάτων.....	25
6.0 Επεξεργασία δεδομένων και αποτελέσματα.....	26
6.1 Προσδιορισμός συγκέντρωσης CO ₂ διάταξης.....	26
6.2 Αποτελέσματα θερμογραφικών δεδομένων.....	32
7.0 Συμπεράσματα.....	36
Βιβλιογραφία.....	37
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	38

1.0 Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε διερεύνηση με στόχο τον εντοπισμό και την ποσοτικοποίηση συσχέτισης μεταξύ της συγκέντρωσης CO₂ σε ελεγχόμενο χώρο και της θερμοκρασιακής κατανομής σε κατακόρυφο επίπεδο εντός του χώρου. Η συσχέτιση αυτή μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερα χρήσιμη σε προβλήματα ποιότητας αέρα εσωτερικού χώρου, για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης πιθανού ρυπαντή μέσω θερμοκρασιακών μετρήσεων, και ειδικότερα μέσω θερμογράφησης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι παρά τις συστηματικές προσπάθειες, δεν εντοπίστηκαν στη βιβλιογραφία διερευνήσεις προσδιορισμού ανάλογων συσχετίσεων.

Η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε στη βάση πρωτότυπης πειραματικής διάταξης, η οποία αναπτύχθηκε για το σκοπό αυτό. Η διάταξη αποτελείται από κυτίο υλικού plexiglass (πολυ (μεθακρυλικός μεθυλεστέρας)), κατάλληλα στεγανοποιημένου, σε διασύνδεση με σύστημα προσαγωγής και απομάκρυνσης της επιλεγόμενης αέριας ένωσης, ήτοι CO₂. Τη διάταξη συμπληρώνει θερμοκάμερα για την αποτύπωση στιγμιοτύπων θερμοκρασιών στην υπό εξέταση κατακόρυφη επιφάνεια, καθώς μετρητικός εξοπλισμός προσδιορισμού των θερμοδυναμικών παραμέτρων και της ποσότητας του CO₂.

Οι μετρήσεις έγιναν σε περιβάλλον κατά το δυνατόν ελεγχόμενων συνθηκών, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στην επίτευξη έγκυρων και ακριβών μετρήσεων. Ως φυσικό επακόλουθο τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των δεδομένων που συλλέχθηκαν μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστα.

2.0 Αερισμός σε εσωτερικούς χώρους

Ένα μείζονος σημασίας ζήτημα που εξετάζεται στην σύγχρονη εποχή λόγω του γεγονότος ότι ένα μεγάλο τμήμα του πληθυσμού ζει και εργάζεται σε εσωτερικούς χώρους, είναι το πρόβλημα του κακού αερισμού. Δεδομένης της μεγάλης παραμονής των ανθρώπων σε εσωτερικούς χώρους η μελέτη για την πρόβλεψη της ποιότητας αέρα σε τέτοιους χώρους κρίνεται πλέον απαραίτητη. Στο πλαίσιο αυτό κτίρια όπου η ποιότητα αέρα κρίνεται χαμηλή πάσχουν, όπως πολλές φορές αναφέρεται στην σύγχρονη κοινωνία, από το σύνδρομο του άρρωστου κτιρίου. [1]

Στις περιπτώσεις όπου παρατηρείται έλλειψη ή απουσία αερισμού παρατηρούνται φαινόμενα ρύπανσης αλλά και αυξημένης υγρασίας, με αποτέλεσμα να απειλείται η ανθρώπινη υγεία. Ειδικότερα συνήθεις ρύποι που εμφανίζονται λόγω ανεπαρκούς αερισμού και διατήρησης καλής ποιότητας εσωτερικού αέρα, είναι σωματίδια PM-2.5, όζον, NO₂, SO₂, CO αλλά και πτητικές οργανικές ενώσεις (VOC). Ωστόσο σημαντικό είναι να υπογραμμιστεί ότι συχνά παρατηρείται και αύξηση συγκέντρωσης οσμών και επιβλαβών για την υγεία μικροοργανισμών (βακτηριδίων, ιών και μυκήτων) με αποτέλεσμα να δημιουργούνται μη βιώσιμες συνθήκες ζωής και εργασίας.

Υπό το παραπάνω πρίσμα σύμφωνα με τον Κανονισμό Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (KENAK) τα νεόδμητα κτίρια μετά το 2010 υποχρεώθηκαν σε συμμόρφωση με τις απαιτήσεις για νωπό αέρα του πίνακα 2.3 της εν λόγω οδηγίας. [2] Η ανταλλαγή αέρα με το περιβάλλον μπορεί να πραγματοποιηθεί με τρεις τρόπους οι οποίοι συνοψίζονται ακολούθως.

- Φυσικός αερισμός: Επιτρέπεται η φυσική ανταλλαγή αέρα με το περιβάλλον μέσω των ανοιγμάτων ενός κτιρίου όταν αυτά δεν είναι κλειστά.
- Εξαναγκασμένος αερισμός: Με χρήση ανεμιστήρων φυσητήρων και τεχνικών μέσων πραγματοποιείται επιβολή δυναμικής ανταλλαγής αέρα με το περιβάλλον.
- Φιλτράρισμα: Ανανέωση του εσωτερικού αέρα ενός κτηρίου λόγω διείσδυσης αέρα περιβάλλοντος από χαραμάδες.

Συχνά ο προσδιορισμός της επάρκειας αερισμού σε έναν εσωτερικό χώρο συνδέεται με το επίπεδο συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα. Στο πλαίσιο αυτό χρησιμοποιούνται αισθητήρες μέτρησης της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα ως μέσο ένδειξης της ικανότητας ανανέωσης του εσωτερικού αέρα. Ωστόσο συχνά η αδυναμία προσδιορισμού της ακριβούς συγκέντρωσης της προαναφερθείσας συγκέντρωσης μπορεί να οδηγήσει σε δυσκολία εκτίμησης της ικανότητας αερισμού σε ένα κτίριο.

2.1 Εξεταζόμενες ενώσεις σε προβλήματα αερισμού

Στο πλαίσιο ανάδειξης των προβλημάτων που δημιουργούνται από την έλλειψη επαρκούς αερισμού κατέστη απαραίτητος ο καθορισμός των βασικότερων ενώσεων που εξετάζονται κατά κύριο λόγο σε παρόμοιες μελέτες. Οι προαναφερθείσες ενώσεις αναφέρονται ακόλουθα:

- CO₂: Υποπροϊόν εξαγόμενο από τις διεργασίες του ανθρώπινου μεταβολισμού. Δεν συνδέεται άμεσα με κινδύνους υγείας αλλά αποτελεί μετρήσιμο δείκτη της αποτελεσματικότητας του εξαερισμού.
- CO: Προϊόν ατελούς καύσης υδρογονάνθρακα και καπνίσματος. Πρόκειται για τοξικό αέριο το οποίο απειλεί ακόμα και με θάνατο σε περίπτωση μεγάλων συγκεντρώσεων στον αέρα εσωτερικών χώρων
- Οξειδία του θείου: Προϊόντα καύσης αερίων που περιέχουν θείο και μπορούν να εισχωρήσουν σε ένα κτίριο. Η υδρόλυση τους μπορεί να οδηγήσει σε σχηματισμό θειϊκού οξέος, το οποίο μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα στα περισσότερα βλεννογόνα όργανα
- Νιτρικά οξειδία: Προϊόντα από την καύση βενζίνης με αέρα σε υψηλές θερμοκρασίες. Τα δεδομένα που σχετίζονται με τις επιπτώσεις των εν λόγω ενώσεων είναι περιορισμένα. Μπορεί να δράσει όπως το CO καθώς επηρεάζει την δέσμευση οξυγόνου από το οξυγόνο. [1]
- Ραδόνια: Φυσικό ραδιενεργό αέριο που προκύπτει από την αποσύνθεση του ραδίου. Μπορεί να εισχωρήσει από το χώμα μέσα από τους αρμούς των πλακιδίων στο δάπεδο, τοίχους υπογείων, κλπ. Αν και δεν είναι χημικά ενεργό παρουσιάζονται προβλήματα υγείας στους ανθρώπους λόγω των προϊόντων αποσάθρωσης του (πολώνιο, μόλυβδος και βισμούθιο). Πρόκειται για ένα αέριο το οποίο συνδέεται με προβλήματα καρκίνου των πνευμόνων [1]
- Πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs): Προϊόν που προκύπτει από πηγές καύσης, εντομοκτόνα, οικοδομικά υλικά, προϊόντα καθαρισμού και διαλυτικά, φυτά και ζώα.
- Φορμαλδεϋδικά αέρια (VOCs): Προέρχονται συχνά από μη ολοκληρωμένη καύση ανθρακούχου καυσίμου. Εμφανίζονται επίσης συχνά από οικοδομικά υλικά, συνδέονται με ασθματικές και ανοσοανευρολογικές αντιδράσεις

2.2 Η σημασία του αερισμού στην υγεία

Όπως αναφέρθηκε, η υγεία των ανθρώπων απειλείται από την ανεπάρκεια αερισμού. Οι άνθρωποι της σύγχρονης εποχής περνούν το μεγαλύτερο μέρος της ζωής τους στο εσωτερικό ενός κτιρίου, είτε αυτό είναι η κατοικία τους είτε είναι ο χώρος εργασίας τους. Αποτέλεσμα αυτού, τίθεται ως μείζον θέμα η εξασφάλιση συνεχώς καλής ποιότητας αέρα στα κτίρια ώστε να μην τίθεται κίνδυνος για την υγεία τους, αλλά ούτε και δυσφορία.

Λόγω της ανθρώπινης δραστηριότητας, των εκπομπών των δομικών υλικών του κτιρίου και των συσκευών που υπάρχουν μέσα σε αυτόν η εμφάνιση επιβλαβών αερίων ουσιών, όπως προαναφέρθηκε τείνει να επηρεάζει καθοριστικά την ανθρώπινη υγεία. Μερικά από τα συμπτώματα που παρατηρήθηκαν σε ανθρώπους που καταναλώνουν μεγάλο μέρος χρόνου τους κτίρια όπου εμφανίζεται το ζήτημα του ανεπαρκούς αερισμού μπορούν να χωριστούν στις εξής κατηγορίες:

- Αναπνευστικά συμπτώματα όπως δύσπνοια, βήχας, πονόλαιμος και βράχνιασμα
- Οφθαλμικά συμπτώματα όπως εμφάνιση ερεθισμών στα μάτια και πονοκεφάλων
- Ψυχολογικά συμπτώματα όπως πνευματική κόπωση, δυσκολία στην συγκέντρωση
- Δερματικά συμπτώματα που συνδέονται με ερεθισμό όπως εξανθήματα
- Συμπτώματα όπως ζαλάδες και ναυτία

2.3 Το διοξείδιο του άνθρακα ως ένδειξη ποιότητας αέρα εσωτερικού χώρου

Το διοξείδιο του άνθρακα σε θερμοκρασία δωματίου είναι άχρωμο, άοσμο και μη εύφλεκτο. Αποτελεί εξαγόμενο υποπροϊόν του ανθρώπινου μεταβολισμού, δεν συνδέεται με άμεσο κίνδυνο υγείας αλλά αποτελεί εύκολα μετρήσιμο δείκτη της αποτελεσματικότητας του εξαερισμού. Ειδικότερα για εσωτερικούς χώρους αναμένεται να εμφανίζονται τα ακόλουθα αποτελέσματα βάση της βιβλιογραφίας [3]:

- Για συγκέντρωση αερίου CO₂ έως 800 ppm σε εσωτερικούς χώρους κατοικιών αναμένεται αίσθημα δυσφορίας στο 15% του πληθυσμού που βρίσκεται μέσα σε αυτούς. Για την περίπτωση αυτή ο ρυθμός αερισμού του χώρου ανά άτομο αντιστοιχεί σε 10l/s
- Για συγκέντρωση του CO₂ έως 1000 ppm σε εσωτερικούς χώρους κατοικιών αναμένεται να δημιουργηθεί δυσφορία στο 20% του πληθυσμού που βρίσκεται μέσα σε αυτούς. Αντίστοιχα για την περίπτωση αυτή ο ρυθμός ανανέωσης του αέρα ανά άτομο αναμένεται να είναι 7l/s
- Για συγκέντρωση του εξεταζόμενου αερίου έως 1530 ppm σε αντίστοιχες συνθήκες με αυτές των δύο προηγούμενων περιπτώσεων αναμένεται να εμφανιστεί το αίσθημα δυσφορίας στο 30% του πληθυσμού που βρίσκεται μέσα σε αυτούς. Στην περίπτωση αυτή ο αερισμός στους χώρους του κτιρίου αντιστοιχεί σε 4 l/s ανά άτομο.
- Για περιπτώσεις συγκέντρωσης μεγαλύτερες των 1530 ppm σε εσωτερικούς χώρους κατοικιών αίσθημα δυσφορίας αναμένεται για τουλάχιστον 30% του πληθυσμού που βρίσκεται μέσα σε αυτούς ενώ ο ρυθμός ανανέωσης του αέρα ανά άτομο αντιστοιχεί σε λιγότερο από 4l/s

Ωστόσο λόγω του γεγονότος ότι παρόμοια αποτελέσματα μετρήσεων έχουν προκύψει από τη βασική υιοθέτηση των συνθηκών σταθερής κατάστασης η μέτρηση της συγκέντρωσης του CO₂ δεν είναι σε όλες τις περιπτώσεις ιδανική για την εκτίμηση της της ικανότητας επαρκούς αερισμού.

Όταν οι υποθέσεις και οι υπολογισμοί για την εύρεση της συγκέντρωσης του CO₂ θεωρούνται έγκυρες βάσει των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας που εφαρμόζονται, η εκτίμηση του ρυθμού εναλλαγής αέρα με το περιβάλλον μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστη. Μάλιστα σε αυτές τις περιπτώσεις μπορούν να προκύψουν και επιπρόσθετα συμπεράσματα τα οποία σχετίζονται με τον αερισμό του χώρου. Π.χ.

εφαρμόζοντας ένα ισοζύγιο μάζας σε ένα σύστημα μηχανικής ανανέωσης αέρα μπορεί να υπολογιστή η ποσόστωση του εξωτερικού αέρα στο ρεύμα τροφοδοσίας του χάρις τον υπολογισμό της συγκέντρωσης του CO₂ στην είσοδο, την έξοδο και στον αέρα του περιβάλλοντος. [4]

Στο πλαίσιο αυτό για τον υπολογισμό της ποσότητας αέρα που εναλλάσσεται με το περιβάλλον πραγματοποιούνται πειράματα παρατήρησης της μείωσης της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα όταν ο ανθρώπινος πληθυσμός που βρισκόταν μέσα στον εξεταζόμενο χώρο απομακρύνεται από αυτόν. Για τον προσδιορισμό του ρυθμού εναλλαγής αέρα με το περιβάλλον επιπλέον εφαρμόζεται συχνά και η συνεχής μέτρηση της συγκέντρωσης του CO₂ μια μέθοδος η οποία σε μερικές περιπτώσεις εξυπηρετεί και την ανάλυση της ποιότητας του εξωτερικού αέρα και της αποδοτικότητας μηχανικών συστημάτων αερισμού.

Παρόλα αυτά συχνά ο προσδιορισμός της ακριβούς ποσότητας CO₂ σε εσωτερικούς χώρους δεν μπορεί να επιτευχθεί. Υπό αυτό το πρίσμα στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε μια προσπάθεια εύρεσης πιθανούς συσχέτισης μεταξύ της θερμοκρασιακής κατανομής μιας κατακόρυφης επίπεδης επιφάνειας και της συγκέντρωσης του CO₂ σε έναν εσωτερικό χώρο προκειμένου να υπάρξει μια πρώτη προσέγγιση σε περίπτωση πραγματοποίησης περαιτέρω μελέτης.

3.0 Περιγραφή Πειραματικής Διάταξης

Για την εκπόνηση της μελέτης που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία κατασκευάστηκε μια πειραματική διάταξη η οποία απαρτίζεται από εξειδικευμένο εξοπλισμό και ένα σύνολο μετρητικών οργάνων που συνοψίζονται ακολούθως.

- μια θερμογραφική κάμερα τύπου IRI4030 της εταιρείας IRISTEM
- μια θερμογραφική κάμερα τύπου TG 165 της εταιρείας flir
- ένα θερμόμετρο τύπου TM 200 της εταιρείας KIMO
- ένα θερμόμετρο-ανεμόμετρο τύπου HD 2103.2 της εταιρείας Delta OHM
- ένα μανόμετρο μέτρησης σχετικής πίεσης της εταιρείας Wika
- έναν αισθητήρα συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα τύπου Telaire T7000 της εταιρείας Amphenol
- ένα κουτί από plexiglass
- δύο δοχεία διαστολής
- ρυθμιστικές βάνες
- μια διαφραγματική διβάθμια αντλία κενού της εταιρείας KNF

- μια φιάλη CO₂ όγκου 6lt

Αναλυτικότερα τα χαρακτηριστικά των προαναφερθέντων οργάνων και του εξοπλισμού καθώς και οι σκοπός που διέτελεσαν για την διεκπεραίωση της εν λόγω μελέτης παρατίθενται στα ακόλουθα υποκεφάλαια.

3.1 Φιάλη CO₂

Για την ρύθμιση της συγκέντρωσης αερίου CO₂ στην πειραματική διάταξη που κατασκευάστηκε κατέστη απαραίτητη η χρήση μιας φιάλης CO₂. Η φιάλη που χρησιμοποιήθηκε διέθετε ρυθμιστική διάταξη για την ασφαλή παροχή αερίου καθαρότητας 99.9% η οποία κατά παραδοχή για την εκτέλεση των πειραμάτων θεωρήθηκε ίση με 100%. Είναι σημαντικό στο σημείο αυτό να τονιστεί ότι προκειμένου να μπορεί να προσδιοριστεί η ποσότητα του αερίου που περιέχεται μέσα στην φιάλη που χρησιμοποιήθηκε η ρυθμιστική διάταξη που ήταν συνδεδεμένη στην έξοδο της φιάλης έφερε δύο μανόμετρα για την μέτρηση της πίεσης προ και μετά της βαλβίδας στραγγαλισμού της.



Σχήμα 1 : Φιάλη διοξειδίου του άνθρακα και ρυθμιστική διάταξη με μανόμετρα μέτρησης πίεσης προ και μετά της βαλβίδας στραγγαλισμού της

3.2 Κυτίο Plexiglass

Για την διερεύνηση της πιθανούς συσχέτισης που επιχειρήθηκε να μελετηθεί, κατασκευάστηκε ένα κουτί από plexiglass το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση ενός κλειστού χώρου 29.4m² και ύψους 3m υπό κλίμακα 1/200. Η επιλογή του υλικού plexiglass από το οποίο κατασκευάστηκε το εν λόγω κυτίο πραγματοποιήθηκε με γνώμονα το κόστος του υλικού, τον συντελεστή εκπεμψιμότητας ο οποίος βάσει της βιβλιογραφίας είναι υψηλός ($\epsilon \sim 0.86$) και την αντοχή του σε μικρές μεταβολές της πίεσης [1].

Το κυτίο που κατασκευάστηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας σχεδιάστηκε με διαστάσεις 70x70x90cm προκειμένου να εξυπηρετείται η παρακολούθηση ολόκληρης της κατακόρυφης επιφάνειας από το πλείστο των θερμογραφικών καμερών που διατίθενται για ερευνητικό σκοπό, βάσει του οπτικού τους πεδίου όπως αυτό υπολογίζεται από τα αναγραφόμενα χαρακτηριστικά των κατασκευαστριών εταιρειών. Ταυτόχρονα για την παροχή της δυνατότητας εισαγωγής πιθανών μετρητικών οργάνων μεγάλου μεγέθους και μεταβολής των χαρακτηριστικών του κυτίου εσωτερικά, προβλέφθηκε η ύπαρξη αποσπώμενης άνω πλάκας.

Για την παροχή της αέριας μάζας στο κυτίο από plexiglass δημιουργήθηκαν 16 όμοιες διαμπερείς κυκλικές οπές στην κάτω οριζόντια πλάκα, τα κέντρα των οποίων ισαπέχουν μεταξύ τους και η διάμετρος τους επιλέχθηκε ίση με 10mm. Η επιλογή του αριθμού των οπών επιλέχθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να ευνοείται ο σχεδιασμός μιας συμμετρικής κατασκευής χάρις την οποία θα επιτυγχάνεται μια ομοιόμορφη παροχή της αέριας μάζας μειώνοντας κατά το δυνατόν την εμφάνιση μικρών στροβιλισμών ειδικά στην περίπτωση όπου θα υπήρχε μια διαμπερή κυκλική οπή ως είσοδος και έξοδος της αέριας μάζας. Επιπλέον η επιλογή της διαμέτρου των οπών επιλέχθηκε με γνώμονα την εξυπηρέτηση της τοποθέτησης κυλινδρικών σωλήνων εσωτερικής διαμέτρου 5mm και πάχους 2mm έτσι ώστε να είναι εφικτή η δημιουργία απόλυτης αεροστεγανότητας.



Σχήμα 2 : Κυτίο από plexiglass

3.3 Θερμόμετρο TM 200

Προκειμένου να είναι δυνατή η ρύθμιση των βασικών συντελεστών της θερμογραφικής κάμερας που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας μελέτης κατέστη επιτακτική ανάγκη η χρήση ενός ζεύγους θερμοστοιχείων τα οποία συνδέονταν σε θερμόμετρο τύπου TM 200 της εταιρείας KIMO. Ωστόσο για την παροχή της δυνατότητας ακριβούς ρύθμισης των αναζητούμενων συντελεστών, κρίθηκε απαραίτητος ο έλεγχος της ακρίβειας των παρεχόμενων θερμοκρασιακών ενδείξεων από κάθε θερμοστοιχείο.

Για την επίτευξη του προαναφερθέντος ελέγχου χρησιμοποιήθηκε ως θεωρητική βάση ότι το σημείο ισορροπίας μεταξύ στερεάς και υγρής φάσης του νερού για πίεση 1atm προσεγγίζει θερμοκρασιακά τους 0°C. Ειδικότερα σε ένα επαρκώς μονωμένο θερμοδοχείο τοποθετήθηκε θρυμματισμένος πάγος ο οποίος έπειτα από μικρό χρονικό διάστημα οδήγησε στην εμφάνιση του φαινομένου συνύπαρξης στερεής και υγρής φάσης του νερού. Κατά το διάστημα αυτό τα υπό διακρίβωση θερμοστοιχεία τοποθετήθηκαν στο θερμοδοχείο και οι ενδυνκείμενες τιμές της θερμοκρασίας που μετρήθηκαν ελέγχθηκαν και μάλιστα επαλήθευσαν την θεωρητική θερμοκρασία των 0°C. Στο πλαίσιο αυτό τα θερμοστοιχεία χαρακτηρίστηκαν ως ακριβή και κατέστη εφικτή η χρήση τους για τον υπολογισμό των βασικών συντελεστών της θερμογραφικής κάμερας της πειραματικής διαδικασίας.

Ωστόσο το θερμόμετρο τύπου TM 200 χρησιμοποιήθηκε και για την μέτρηση της θερμοκρασίας του παρεχόμενου αερίου στον χώρο του κυτίου με χρήση ασύρματης σύνδεσης του αισθητήρα Pt 100 της εταιρείας KIMO ο οποίος τοποθετήθηκε εσωτερικά, στο δοχείο διαστολής χωρητικότητας 12 lt.



Σχήμα 3: Θερμόμετρο TM 200 της εταιρείας KIMO μαζί με δύο θερμοστοιχεία και τον αισθητήρα ασύρματης σύνδεσης Pt 100

3.4 Θερμογραφικές κάμερες

Για την καταγραφή της θερμοκρασιακής κατανομής της κατακόρυφης πλάκας του κυτίου κατά την διάρκεια εκτέλεσης των πειραματικών διαδικασιών χρησιμοποιήθηκε μια θερμογραφική κάμερα τύπου IRI4030 της εταιρείας IRISTEM. Η εν λόγω θερμογραφική κάμερα κρίθηκε κατάλληλη για την λήψη έγκυρων πειραματικών δεδομένων λόγω της ιδιαίτερα υψηλής θερμικής ευαισθησίας της χάρις την οποία σύμφωνα με την κατασκευάστρια εταιρεία μπορεί να εντοπίσει μεταβολές μικρότερες από 80 mK. Ταυτόχρονα η δυνατότητα προσαρμογής του συντελεστή εκπομπής που αντιστοιχεί στο υλικό της επιφάνειας της οποίας η θερμοκρασιακή κατανομή καταγράφεται καθώς και του συντελεστή ανακλασιμότητας ο οποίος λαμβάνει υπόψη τις συνθήκες υπό τις οποίες εκπονείται το πείραμα συμβάλλουν στην ανάδειξη της καταλληλότητας της εν λόγω θερμογραφικής κάμερας για την λήψη ακριβών μετρήσεων. Επιπρόσθετα, δεδομένου ότι η κάμερα διαθέτει οπτικά τα οποία δίνονται να ρυθμιστούν προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη εστίαση στο αντικείμενο που παρατηρείται, η χρήση του μοντέλου IRI4030 ενδείκνυται για την εκπόνηση παρόμοιων πειραματικών διαδικασιών.

Με γνώμονα τις γωνίες για το οπτικό πεδίο της κάμερας όπως αυτές αναγράφονται από τον κατασκευαστή (20x15°) και τις διαστάσεις της κατακόρυφης επιφάνειας (70x90cm) που μελετήθηκε στην παρούσα μελέτη η τοποθέτηση του εν λόγω μετρητικού οργάνου έγινε σε απόσταση 3.45 m και ύψος του αισθητήρα από το έδαφος 0.95m. Η στήριξη της κάμερας πραγματοποιήθηκε με χρήση τρίποδου το οποίο παρέμεινε ακίνητο καθ' όλη την διάρκεια των μετρήσεων.

Για τον ακριβή προσδιορισμό των ορίων της κατακόρυφης επιφάνειας της οποίας η θερμοκρασιακή κατανομή εξετάστηκε κατά την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας, πραγματοποιήθηκε προ της λήψης μετρήσεων, μικρή αύξηση της θερμοκρασίας των ακμών της. Με τον τρόπο αυτό κατέστη εφικτή χάρις την διαφορά θερμοκρασίας που παρατηρήθηκε, η εύρεση των ορίων της επιφάνειας.

Δεδομένου ότι ο συντελεστής εκπομπής για το υλικό plexiglass που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του κυτίου της εν προκειμένω πειραματικής διάταξης, δεν ήταν γνωστός, πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραματικών διαδικασιών με στόχο τον ακριβή προσδιορισμό του. Οι ενέργειες που έλαβαν χώρα για τον προσδιορισμό του προαναφερθέντος συντελεστή στηρίχθηκαν στην σύγκριση των ενδεικνύμενων θερμοκρασιών ενός ζεύγους θερμοστοιχείων με την θερμοκρασία μιας δεύτερης θερμογραφικής κάμερας τύπου TG 165 της εταιρείας flir για την οποία δεν απαιτούνταν προσδιορισμός της θερμοκρασίας που αντικατοπτρίζει την ανάκλαση της ακτινοβολίας από το περιβάλλον. Ειδικότερα με γνωστές τις θερμοκρασίες των δύο σημείων της κατακόρυφης επιφάνειας plexiglass όπου είχαν τοποθετηθεί τα θερμοστοιχεία, πραγματοποιήθηκε αναζήτηση του κατάλληλου συντελεστή εκπεμψιμότητας για την επαληθεύση των ενδुकνείμενων τιμών με αυτές από την θερμογραφική κάμερα που προαναφέρθηκε. Είναι ωστόσο σημαντικό να τονιστεί ότι για τον ακριβή προσδιορισμό του υπό αναζήτηση συντελεστή κατέστη απαραίτητη η εκτέλεση των ενεργειών που πραγματοποιήθηκαν σε συνθήκες απόλυτου σκότους και με απουσία ενεργών ηλεκτρικών πηγών ενέργειας οι οποίες μπορούσαν να οδηγήσουν σε σφάλματα λόγω πιθανής αδυναμίας αυτόματου προσδιορισμού του συντελεστή εκπεμψιμότητας από την θερμογραφική κάμερα. Υπό το παραπάνω πρίσμα ο συντελεστής εκπεμψιμότητας ϵ για το υλικό plexiglass του κυτίου υπολογίστηκε ίσως με 0.88

Με γνώση πλέον του συντελεστή εκπεμπιμότητας ϵ και επαναλαμβάνοντας την μεθοδολογία που περιγράφηκε ανωτέρω, κατέστη εφικτή η αναζήτηση της θερμοκρασίας που υποδηλώνει την ανάκλαση ακτινοβολίας από το περιβάλλον έπειτα από επαλήθευση της ενδुकνεύμενης θερμοκρασίας της θερμογραφικής κάμερας τύπου IRI4030 της εταιρείας IRISTEM με την αντίστοιχη θερμοκρασία των θερμοστοιχείων που τοποθετήθηκαν σε επαφή με την κατακόρυφη επιφάνεια του κυτίου. Καθίσταται σημαντικό να επανατοπιστεί ότι λόγω της ευαισθησίας της χρησιμοποιούμενης θερμογραφικής κάμερας σε μεταβολές της ανακλούμενης ακτινοβολίας που οφείλεται σε ύπαρξη ηλεκτρικών καταναλώσεων και πηγών ενέργειας στον χώρο εκτέλεσης των πειραμάτων, όλες οι μετρήσεις στην παρούσα μελέτη πραγματοποιήθηκαν υπό συνθήκες σκότους και με απουσία ενεργών ηλεκτρικών συσκευών. Συνεπώς οι μετρήσεις που συλλέχθηκαν μπορούν να χαρακτηριστούν αξιόπιστες όσον αφορά τον τρόπο χρήσης της θερμογραφικής κάμερας.



Σχήμα 4: Τοποθέτηση θερμογραφικής κάμερας TG 165 για την εύρεση του συντελεστή εκπομπής για το υλικό του κυτίου



Σχήμα 5: Θερμογραφικές κάμερες τύπου IRI 4030 (αριστερά) και TG 165 (δεξιά)

3.5 Αισθητήρας συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα

Για τον υπολογισμό της μέσης τιμής της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα στον χώρο όπου πραγματοποιήθηκαν οι πειραματικές μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε ένας αισθητήρας τύπου Telaire T7000 της εταιρείας Amphenol. Ο εν λόγω αισθητήρας χρησιμοποιήθηκε σε συνδυασμό με έναν καταγραφέα δεδομένων τύπου HOBO της εταιρείας onset προκειμένου να ληφθεί σειρά δεδομένων για την συγκέντρωση του αερίου CO₂ σε διάρκεια ενός ικανού χρονικού διαστήματος και υπό ίδιες συνθήκες υπό τις οποίες πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα της εν λόγω μελέτης. Στο πλαίσιο αυτό λαμβάνοντας υπόψιν την παραδοχή ότι η συγκέντρωση του CO₂ στον αέρα του χώρου είναι σταθερή κατά την διάρκεια των πειραματικών διαδικασιών που πραγματοποιήθηκαν και ίση με την μέση τιμή των μετρήσεων του Telaire, καθίσταται εφικτός ο προσδιορισμός της μάζας και του αριθμού mol του CO₂ μέσα στην πειραματική διάταξη πριν και μετά την έγχυση. Αναλυτικοί υπολογισμοί παρέχονται σε επόμενη ενότητα.



Σχήμα 6: Αισθητήρας Telaire T7000 μαζί με τον καταγραφέα δεδομένων τύπου HOBO

3.6 Δοχεία διαστολής

Για την ρύθμιση της παροχής και την καταγραφή της θερμοκρασίας και της πίεσης εντός της πειραματικής διάταξης χρησιμοποιήθηκε ένας συνδυασμός από δύο δοχεία διαστολής. Ειδικότερα χρησιμοποιήθηκε ένα δοχείο διαστολής 12 lt και ένα δοχείο διαστολής 24 lt τα οποία έπειτα από μια σειρά βασικών κατεργασιών έλαβαν την τελική τους μορφή.

Στο δοχείο διαστολής χωρητικότητας 12 lt δημιουργήθηκαν δύο διαμπερείς οπές στο πάνω μέρος του κελύφους του με σκοπό την εισαγωγή ενός μανόμετρου μέτρησης σχετικής πίεσης της εταιρείας Wika και ενός αισθητήρα θερμοκρασίας τύπου Pt 100 της εταιρείας KIMO όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Επιπλέον για την εισαγωγή και εξαγωγή αερίου στο δοχείο διαστολής χρησιμοποιήθηκαν οι ήδη φέρουσες υποδοχές του δοχείου με μόνη διαφορά την χρήση μαστών στην έξοδο προκειμένου να επιτευχθεί μείωση της διαμέτρου από 19.05 mm σε 7mm.



Σχήμα 7: Δοχείο διαστολής χωρητικότητας 12 lt μετά την τοποθέτηση μανόμετρου μέτρησης σχετικής πίεσης και του αισθητήρα Pt 100.

Στο δοχείο διαστολής χωρητικότητας 24 lt δημιουργήθηκαν 16 διαμπερείς οπές στο πάνω μέρος του κελύφους του, προκειμένου να προσαρμοστούν οι έξοδοι που οδηγούν στους 16 σωλήνες από όπου εισάγεται αέριο στο κουτί από plexiglass. Πιο συγκεκριμένα στις οπές που δημιουργήθηκαν τοποθετήθηκαν από την εσωτερική πλευρά του δοχείου διαστολής 16 μαστοί και σταγανοποιητικές φλάτζες ενώ εξωτερικά του κελύφους τοποθετήθηκαν επιπλέον στεγανοποιητικές φλάντζες και έξοδοι που διέθεταν εσωτερικά σπείρωμα για την σύνδεσή τους με τους μαστούς. Επίσης για την εισαγωγή αερίου στο δοχείο κατέστη απαραίτητη η χρήση μαστών προκειμένου να πραγματοποιηθεί μείωση της διαμέτρου της εισόδου από 19.05 mm σε 7mm.

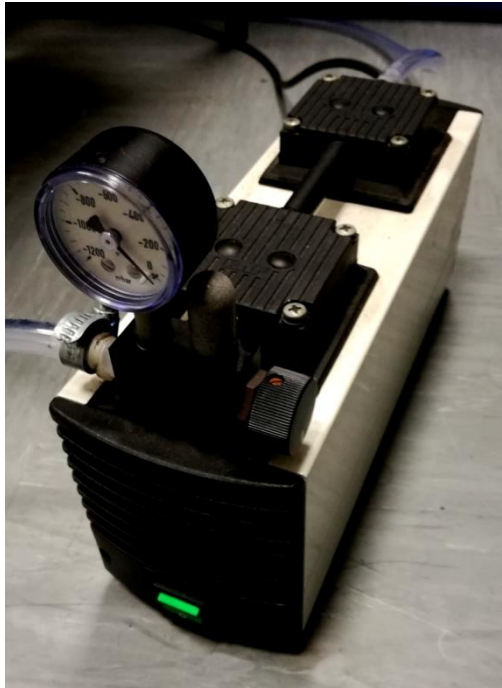
Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η αναγκαιότητα ύπαρξης δύο δοχείων διαστολής για την εκπόνηση της συγκεκριμένης πειραματικής μεθόδου έγκειται στην αδυναμία της ταυτόχρονης διακοπής της ροής αερίου από τους 16 σωλήνες που συνδέονται με το δεύτερο δοχείο και την ανάγκη μέτρησης της πίεσης και της θερμοκρασίας για τον προσδιορισμό των θερμοδυναμικών μεγεθών του αερίου και την πρόληψη πιθανών σφαλμάτων που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε ανακρίβειες στα πειραματικά δεδομένα.



Σχήμα 8: Δοχείο διαστολής χωρητικότητας 24 lt προ του κυτίου από plexiglass

3.7 Αντλία κενού

Για την εξαγωγή της απαιτούμενης ποσότητας αερίου από την πειραματική διάταξη και την εισαγωγή φρέσκου αέρα από το περιβάλλον προκειμένου να εξασφαλιστούν οι ίδιες συνθήκες εκτέλεσης του πειράματος της παρούσας εργασίας κατέστη αναγκαία η χρήση μιας αντλίας κενού. Η διαφραγματική διβάθμια αντλία κενού της εταιρείας KNF που χρησιμοποιήθηκε, ρυθμίστηκε για αφαίρεση ποσότητας 0.061 lt/s προκειμένου να είναι δυνατή η καλύτερη προσέγγιση της αφαιρούμενης ποσότητας από το σύστημα. Είναι σημαντικό να υπογραμμιστεί ότι σε περίπτωση που επιλεγόταν μεγάλη τιμή του ρυθμού αφαίρεσης αερίου μπορούσε να προκληθεί αδυναμία ενός επαρκούς προσεγγιστικού προσδιορισμού της συνολικής αφαιρούμενης ποσότητας αερίου από το σύστημα καθώς πολύ μικροί χρόνοι οδηγούν σε εμφάνιση μεγάλης αβεβαιότητας στους υπολογισμούς των θερμοδυναμικών μεγεθών του παραμένοντος αέρα στην διάταξη.



Σχήμα 9: Διαφραγματική διβάθμια αντλία κενού της εταιρείας KNF

3.8 Θερμόμετρο-ανεμόμετρο τύπου HD 2103.2

Για την μέτρηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος χώρου στον οποίο πραγματοποιήθηκαν οι πειραματικές μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε ένας αισθητήρας Θερμόμετρο-ανεμόμετρο τύπου HD 2103.2 της εταιρείας Delta OHM. Οι ενδεικνύμενες τιμές της θερμοκρασίας από το συγκεκριμένο όργανο χρησιμοποιήθηκαν για την παρακολούθηση τυχόν μεταβολής στην θερμοκρασία του χώρου γεγονός το οποίο θα μπορούσε να συνδεθεί με μεταβολή στον συντελεστή συναγωγής του αέρα που περιέβαλλε το κουτί από plexiglass και επομένως να υποδεικνυόταν ανικανότητα τήρησης των ίδιων εξωτερικών συνθηκών κατά την εκτέλεση των πειραματικών μετρήσεων. Πρέπει να τονιστεί ότι για την συγκεκριμένη μελέτη υποτέθηκε ότι ο περιβάλλον αέρας στον χώρο διεξαγωγής των πειραμάτων ήταν ομογενοποιημένος και ότι εφόσον η θερμοκρασία και η ταχύτητα του αέρα σε ένα σημείο του χώρου παρέμενε σταθερή, οι συνθήκες του περιβάλλοντος παρέμεναν και αυτές σταθερές.



Σχήμα 10: Θερμόμετρο-ανεμόμετρο τύπου HD 2103.2

3.9 Ρυθμιστικές βάνες

Για τον έλεγχο της ροής της αέριας μάζας στο εσωτερικό της πειραματικής διάταξης και την απομόνωση των επιμέρους τμημάτων της τοποθετήθηκαν 4 ρυθμιστικές βάνες σε τοποθεσίες "κλειδιά". Ειδικότερα για την ρύθμιση της παροχής αέριου CO₂ τοποθετήθηκε μια ρυθμιστική βάνα μεταξύ της φιάλης του διοξειδίου του άνθρακα και του δοχείου διαστολής χωρητικότητας 12 lt ενώ για την παιρετέρω ρύθμιση της ροής στα επιμέρους τμήματα της διάταξης τοποθετήθηκαν τρεις ρυθμιστικές βάνες σε εξάρτημα για πολλαπλές συνδέσεις σωλήνων όπως φαίνεται ακόλουθα.



Σχήμα 11: Εξάρτημα για πολλαπλές συνδέσεις σωλήνων με τρεις ρυθμιστικές βάνες

4.0 Βασικές ενέργειες διασφάλισης συνθηκών πειραματικής διαδικασίας

Για την παροχή της δυνατότητας συλλογής έγκυρων μετρήσεων κατά την διάρκεια της εκτέλεσης της πειραματικής διαδικασίας κατέστη επιτακτική ανάγκη η διασφάλιση των ίδιων συνθηκών εντός και εκτός της πειραματικής διάταξης. Υπό το πρίσμα αυτό πραγματοποιήθηκε μια διαδικασία ελέγχου αεροστεγανότητας της διάταξης και θερμομόνωσης των οριζόντιων επιφανειών του κυτίου από plexiglass.

4.1 Διαδικασία ελέγχου αεροστεγανότητας

Δεδομένου ότι το ρευστό που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα πειραματική διαδικασία ήταν ο αέρας τέθηκε η επίτευξη πλήρους αεροστεγανότητας ως μείζονος σημασίας προϋπόθεση για την συλλογή ακριβών και έγκυρων συμπερασμάτων. Στο πλαίσιο αυτό τοποθετήθηκαν μονοκίβια υλικά σε κάθε σημείο της διάταξης που μπορούσε να υπάρξει διαρροή ή διείσδυση αερίου και έπειτα πραγματοποιήθηκε έλεγχος της αεροστεγανότητας για τον εντοπισμό πιθανών προβλημάτων.

Αναλυτικά στα σημεία ενώσεων των διαφόρων σωλήνων με εξόδους από τα διαφορετικά τμήματα της διάταξης τοποθετήθηκαν σφικτήρες σωλήνων οι οποίοι ελέγχθηκαν ως προς την ικανότητα επαρκούς αεροστεγανότητας υπό συνθήκες υψηλής πίεσης 4 bar. Επιπροσθέτως στα σημεία της διάταξης όπου υπήρχαν κοχλιοσυνδέσεις τοποθετήθηκε επαρκής ποσότητα teflon προκειμένου να εξασφαλιστούν οι επιθυμητές συνθήκες για την εκτέλεση του πειράματος. Επιπλέον μετά την είσοδο των κυλινδρικών σωλήνων στις οπές της κάτω οριζόντιας πλάκας του κυτίου τοποθετήθηκε θερμική σιλικόνη περιμετρικά των οπών από την εξωτερική πλευρά του κυτίου ώστε να αποφευχθεί πιθανή διείσδυση η διαρροή αερίου και τελικά να τίθεται θέμα ισχυρούς πιθανότητας ανακρίβειας των μετρήσεων. Ταυτόχρονα δεδομένου ότι η άνω οριζόντια πλάκα είχε την δυνατότητα να αποσπάται χρησιμοποιήθηκε εποξική κόλλα προκειμένου να επιτευχθεί πλήρης αεροστεγανότητα και στο άνω τμήμα από το κουτί plexiglass. Τέλος για την αποφυγή του εξεταζόμενου προβλήματος στα σημεία όπου τοποθετήθηκαν το μανόμετρο και ο αισθητήρας θερμοκρασίας στο δοχείο διαστολής χωρητικότητας 12 lt χρησιμοποιήθηκε κόλλα πολυουρεθάνης η οποία τοποθετήθηκε περιμετρικά των οπών και στην διεπιφάνεια μεταξύ των μετρητικών οργάνων και του κελύφους του δοχείου.

Για την πραγματοποίηση του ελέγχου τήρησης των προδιαγραφών για τις συνθήκες εκτέλεσης των πειραμάτων που έλαβαν χώρα, και σχετίζονται με την απουσία διαρροών η διεισδύσεων στην διάταξη χρησιμοποιήθηκε ένα μείγμα νερού-υγρού καθαριστικού προκειμένου να είναι δυνατός ο σχηματισμός φυσαλίδων έπειτα από ανακίνηση του δοχείου που το περιείχε. Ειδικότερα η τοποθέτηση φυσαλίδων στα σημεία ενώσεων δύο στοιχείων ή σε άλλα πιθανά σημεία διαρροής αερίου κατέστη επαρκής για τον προσδιορισμό του ποσοστού τήρησης αεροστεγανότητας, καθώς λόγω της φύσης τους, αύξηση του μεγέθους τους σε ένα συγκεκριμένο σημείο παραπέμπει σε διαρροή αερίου. Υπό το πρίσμα αυτό έπειτα από από πολλαπλούς ελέγχους οι οποίοι οδήγησαν σε επανατοποθέτηση μονωτικών στοιχείων επιτεύχθηκε

πλήρης αεροστεγανότητα ακόμα και υπό συνθήκες μεγαλύτερης πίεσης από τις πιέσεις οι οποίες θα εμφανιζόντουσαν κατά την διάρκεια των πειραματικών διαδικασιών.



Σχήμα 12 :Αριστερά: Έλεγχος αεροστεγανότητας βάνας εξαρτήματος πολλαπλών συνδέσεων σωλήνων. Δεξιά: Έλεγχος αεροστεγανότητας εξόδου ρυθμιστικής διάταξης φιάλης CO₂

4.2 Θερμομόνωση άνω και κάτω πλάκας κυτίου

Από την εξωτερική πλευρά στην πάνω και κάτω επιφάνεια του κυτίου τοποθετήθηκε και πραγματοποιήθηκε κόλληση υλικού με συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας $0,05(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$ πάχους 5mm προκειμένου να επιτευχθεί μείωση της μετάδοσης θερμότητας στις οριζόντιες πλάκες οι οποίες δεν ήταν δυνατό να παρακολουθούνται από θερμογραφική κάμερα. Υπό το πρίσμα αυτό τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από την ανάλυση της θερμοκρασιακής κατανομής της υπό παρακολούθηση κατακόρυφης επιφάνειας του κυτίου από plexiglass μπορούν να θεωρηθούν όμοια και για τις υπόλοιπες 3 κατακόρυφες επιφάνειες του κυτίου. Ειδικότερα λόγω του γεγονότος ότι σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση [1] ο συντελεστής θερμοπερατότητας για τις δυο επιφάνειες είναι $3,5 (\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$ ενώ για τις κατακόρυφες επιφάνειες ο συντελεστής θερμοπερατότητας υπολογίστηκε ίσος με $5,12 (\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$ πραγματοποιήθηκε η παραδοχή ότι η οριζόντιες επιφάνειες είναι επαρκώς μονωμένες με αποτέλεσμα να μην υπάρχει μετάδοση θερμότητας από και προς το περιβάλλον.

$$U = \frac{1}{R_i + \sum_{j=1}^n \frac{d_j}{\lambda_j} + R_\delta + R_a} \quad [1]$$

Όπου: U ο συντελεστής θερμοπερατότητας του δομικού στοιχείου

n το πλήθος των στρώσεων του δομικού στοιχείου

d το πάχος κάθε στρώσης του δομικού στοιχείου

λ ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού της κάθε στρώσης

R_δ η θερμική αντίσταση που οφείλεται σε στρώμα αέρος σε υφιστάμενο

διάκενο ανάμεσα σε στρώσεις ενός δομικού στοιχείου

R_i η θερμική αντίσταση από το επιφανειακό στρώμα αέρα στη θερμότητα που μεταδίδεται από τον εσωτερικό χώρο προς το δομικό στοιχείο

R_a η αντίσταση που προβάλλεται από επιφανειακό το επιφανειακό στρώμα αέρα στη θερμότητα από το δομικό στοιχείο προς το περιβάλλον



Σχήμα 13: Θερμομόνωση άνω και κάτω οριζόντιας επιφάνειας καμπίνας

5.0 Διαδικασία εκτέλεσης πειραμάτων

Για την εκτέλεση μιας πειραματικής διαδικασίας όπως αυτής που εξετάζεται στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία κατέστη αναγκαία η πραγματοποίηση μιας σειράς ενεργειών προκειμένου να εξασφαλιστεί η λήψη έγκυρων αποτελεσμάτων. Για την διευκόλυνση της περιγραφής της διαδικασίας που πραγματοποιήθηκε η πειραματική διάταξη χωρίστηκε σε τρία τμήματα τα οποία αναφέρονται ακολούθως.

- 1^ο τμήμα: Το τμήμα αυτό απαρτίζεται από το δοχείο διαστολής χωρητικότητας 12 lt και τους σωλήνες που βρίσκονται μεταξύ της φιάλης CO₂ και της ρυθμιστικής βάνας που αποκόπτει την ροή μεταξύ του προαναφερθέντος δοχείου διαστολής και των υπόλοιπων υποσυστημάτων της διάταξης.
- 2^ο τμήμα: Ως 2^ο τμήμα της διάταξης λαμβάνεται το υποσύστημα που περιέχει το κυτίο plexiglass το δοχείο διαστολής και όλους τους σωλήνες που είναι τοποθετημένοι μεταξύ του κυτίου και της ρυθμιστικής βάνας που αποκόπτει την ροή μεταξύ του κυτίου και του δοχείου διαστολής και των υπόλοιπων υποσυστημάτων της διάταξης.
- 3^ο τμήμα: Το εν λόγω τμήμα εμπεριέχει το υποσύστημα της αντλίας κενού και όλων των σωλήνων που συνδέονται μαζί της και βρίσκονται μέχρι την ρυθμιστική βάνα που αποκόπτει την ροή μεταξύ της εν λόγω αντλίας και της υπόλοιπης πειραματικής διάταξης.

Υπό το πλαίσιο αυτό η σειρά των διαδικασιών που ακολουθήθηκαν για την εκτέλεση κάθε πειράματος αναλυτικά συνοψίζεται ακολούθως.

1. Για τον ακριβή υπολογισμό της ποσότητας αερίου CO₂ που θα διοχετευόταν σε κάθε πείραμα στην διάταξη που δημιουργήθηκε, κατέστη απαραίτητη η ρύθμιση της πίεσης της αέριας μάζας μεταξύ της φιάλης και της πρώτης ρυθμιστικής βαλβίδας της διάταξης η οποία αρχικά παρέμενε κλειστή.

2. Γνωρίζοντας την ποσότητα του αερίου στο πρώτο τμήμα της διάταξης η πρώτη ρυθμιστική βαλβίδα άνοιξε προκειμένου το αέριο να διοχετευτεί στο δοχείο διαστολής χωρητικότητας 12 lt όπου η πίεση και η θερμοκρασία του μείγματος μετρούνταν από τα αντίστοιχα όργανα. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι προκειμένου να είναι εφικτοί οι υπολογισμοί των παραπάνω μεγεθών η ροή έπρεπε να αποκοπεί με την βοήθεια της ρυθμιστικής βάνας η οποία απέκοπτε την ροή μεταξύ του 1^{ου} τμήματος και της υπόλοιπης διάταξης.

3. Προκειμένου να επιτραπεί η είσοδος του αερίου από το πρώτο τμήμα της διάταξης χωρίς ωστόσο η πίεση του κυτίου και του δοχείου διαστολής χωρητικότητας 24 lt να μεταβληθεί από 1atm, πραγματοποιήθηκε σε κάθε περίπτωση απομάκρυνση της ίδιας ποσότητας αέρα από το παραπάνω σύστημα με αυτή που επρόκειτο να εισαχθεί από το δοχείο διαστολής χωρητικότητας 12 lt. Η προαναφερθείσα

απομάκρυνση αερίου πραγματοποιήθηκε επιτυχώς διατηρώντας ανοιχτές τις δύο ρυθμιστικές βάνες που συνέδεαν το κυτίο με την αντλία κενού η οποία τέθηκε σε λειτουργία για συγκεκριμένο χρόνο ανάλογα με την ποσότητα του παροχετευόμενου αερίου σε κάθε πείραμα.

4. Αμέσως μετά την επιτυχή εξαγωγή της επιθυμητής ποσότητας αέρα η βάνα του τμήματος 3 της διάταξης ρυθμιζόταν ώστε να διακόψει την ροή από και προς το περιβάλλον ενώ η ρυθμιστική βάνα του 1^{ου} τμήματος άνοιγε με σκοπό την εισαγωγή του αερίου στο 2^ο τμήμα της διάταξης.

5. Προκειμένου να διακοπεί η ροή από και προς το δεύτερο τμήμα της διάταξης η ρυθμιστική βάνα του 2^{ου} τμήματος της διάταξης κατέστη απαραίτητο να κλείνει μόλις η ένδειξη του μανομέτρου του δοχείου διαστολής χωρητικότητας 12 lt υποδείκνυε πίεση στο σύστημα ίση με την ατμοσφαιρική.

6. Έπειτα από την απομόνωση της ροής στο 2^ο τμήμα της διάταξης, προκειμένου να απαλειφθεί η επίδραση του χρόνου στις μετρήσεις που συλλέχθηκαν το σύστημα παρέμενε ικανό χρονικό διάστημα σε ηρεμία και έπειτα πραγματοποιούνταν οι λήψεις των μετρήσεων από την θερμογραφική κάμερα.

7. Για την επανάληψη του πειράματος υπό τις ίδιες συνθήκες μετά το πέρας κάθε σειράς μετρήσεων όλες οι ρυθμιστικές βάνες του συστήματος κατέστη απαραίτητο να ανοιχθούν προκειμένου να ενεργοποιηθεί η αντλία κενού χάρις την οποία έπειτα από δημιουργία διαφοράς πίεσης μεταξύ των επιμέρους συστημάτων και του περιβάλλοντος ήταν εφικτή η επανατροφοδότηση της διάταξης με αέρα περιβάλλοντος.

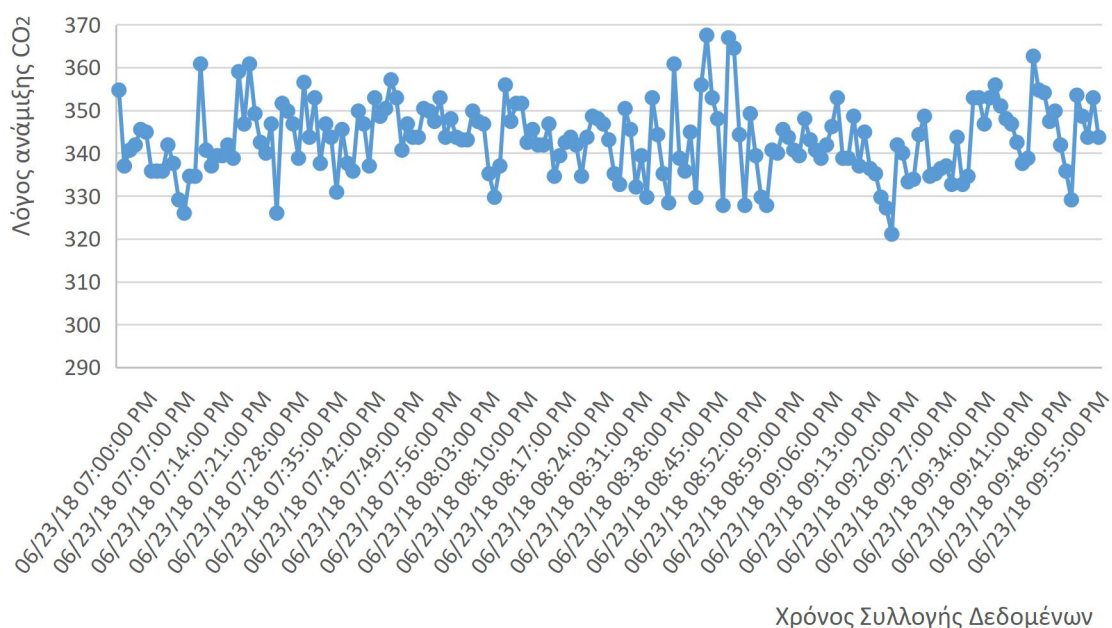
8. Τελικά μετά την επανατροφοδότηση της διάταξης με αέρα περιβάλλοντος η βάνα του τμήματος 3 έκλεινε προκειμένου η διαδικασία που περιγράφηκε στα προηγούμενα στάδια να επαναληφθεί.

6.0 Επεξεργασία δεδομένων και αποτελέσματα

6.1 Προσδιορισμός συγκέντρωσης CO₂ διάταξης

Με βάση τα αποτελέσματα που συλλέχθηκαν για την συγκέντρωση του CO₂ του περιβάλλοντα χώρου από τον αισθητήρα Telaire η μέση συγκέντρωση της εν λόγω ένωσης στον χώρο υπολογίστηκε ίση με 343.22 ppm.

Στο παρόν σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι για τους υπολογισμούς που θα ακολουθηθούν στη συνέχεια υιοθετήθηκε η παραδοχή ότι ο προαναφερθέν μέσος όρος της συγκέντρωσης του CO₂ για τον περιβάλλοντα χώρο αντιπροσωπεύει την συγκέντρωση του αερίου για όλη την διάρκεια εκτέλεσης των πειραμάτων. Επιπλέον θεωρήθηκε ότι η σύσταση του αέρα περιβάλλοντος παρέμεινε σταθερή χωρίς να μεταβάλλεται δηλαδή η ποσόστωση των περιεχόμενων ενώσεων του καθ' όλη την διάρκεια των πειραμάτων.



Σχήμα 14 : Λόγος ανάμιξης CO₂ κατά την διάρκεια τριών ωρών

Για τον προσδιορισμό της ποσότητας του CO₂ σε κάθε χρονική στιγμή πραγματοποιήθηκε χρήση της καταστατικής εξίσωσης των αερίων η οποία παρατίθεται ακολούθως με την βασική υπόθεση ότι αυτή ισχύει επαρκώς για πίεση 1 atm και για μικρές τιμές όγκων.

$$P \cdot V = n \cdot R^* \cdot T \quad [2]$$

Όπου: P η πίεση του αερίου (1,013•10⁵ Pa)

V ο όγκος του αερίου (m³)

n ο αριθμός των mol του αερίου (mol)

R* η παγκόσμια σταθερά των αερίων (8,314 J •mol⁻¹• K⁻¹)

T η θερμοκρασία (K)

Επίσης δεδομένου ότι ο μετρητικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την εργασία δεν μπορεί να συμβάλλει στην εύρεση της ακριβούς ποσότητας του παρεχόμενου CO₂ στην διάταξη, η καταστατική εξίσωση χρησιμοποιήθηκε και για τον υπολογισμό της μάζας του αερίου στο 1^ο στάδιο της διαδικασίας που πραγματοποιήθηκε. Συνεπώς στα διαγράμματα όπου εμφανίζεται η συγκέντρωση του CO₂ σε σχέση με τα μεγέθη που υπολογίστηκαν για την θερμοκρασιακή κατανομή της εξεταζόμενης κατακόρυφης επιφάνειας η, τιμή της ενδεικνύμενης συγκέντρωσης δεν είναι ακριβής. Ωστόσο τα αποτελέσματα από την παρούσα διαδικασία μπορούν να αποτυπώσουν τουλάχιστον ποιοτικά την σχέση μεταξύ της διοχετευόμενης ποσότητας αερίου με τα θερμοδυναμικά μεγέθη που προκύπτουν σε ακόλουθα στάδια.

Με βάση το γεγονός ότι η θερμοκρασία του θερμομέτρου που ήταν τοποθετημένο μέσα στο δοχείο διαστολής του 1^{ου} τμήματος της διάταξης, παρέμενε σταθερή και ίση με 25°C σε όλη την διάρκεια των πειραμάτων, καθώς ήταν και ένας από τους βασικούς συντελεστές για τον έλεγχο τήρησης των ίδιων συνθηκών για την πειραματική διαδικασία, η θερμοκρασία που χρησιμοποιήθηκε για όλους τους υπολογισμούς που βασίζονται στην καταστατική εξίσωση ήταν 25°C.

Επίσης για τον υπολογισμό των ζητούμενων ποσοτήτων από την χρήση της καταστατικής εξίσωσης η διάταξη χωρίστηκε σε 11 επιμέρους όγκους οι οποίοι συνοψίζονται και υπολογίζονται ακολούθως.

- V₁ : Ο όγκος του σωλήνα μεταξύ της φιάλης και της πρώτης ρυθμιστικής βάνας ο οποίος υπολογίζεται βάσει της σχέσης για την εύρεση του όγκου ενός κυλίνδρου για ακτίνα 3,5mm. Ο όγκος υπολογίστηκε ίσος με $63,499 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$.
- V₂ : Ο όγκος του δοχείου διαστολής του 1^{ου} τμήματος της διάταξης ο οποίος από τον κατασκευαστή είναι ίσος με $0,012 \text{ m}^3$
- V₃ : Ο όγκος του σωλήνα μεταξύ του δοχείου διαστολής και της ρυθμιστικής βάνας στο τέλος του 1^{ου} τμήματος της διάταξης. Ο εν λόγω όγκος υπολογίστηκε ίσος με $10,053 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$
- V₄ : Ο όγκος του εξαρτήματος πολλαπλών συνδέσεων σωλήνων ο οποίος υπολογίστηκε ίσος με $7,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$
- V₅ : Ο όγκος του σωλήνα μεταξύ της ρυθμιστικής βάνας του 2^{ου} τμήματος της διάταξης και του δοχείου διαστολής χωρητικότητας 24lt.
- V₆ : Ο όγκος του δοχείου διαστολής του 2^{ου} τμήματος της διάταξης ο οποίος από τον κατασκευαστή είναι ίσος με $0,024 \text{ m}^3$
- V₇ : Ο όγκος των 16 σωλήνων εσωτερικής διατομής 5mm που συνδέουν το δοχείο διαστολής του 2^{ου} τμήματος της διάταξης με το κυτίο από plexiglass. Ο συνολικός όγκος υπολογίστηκε ίσος με $78,54 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$
- V₈ : Ο όγκος του κυτίου από plexiglass ο οποίος υπολογίστηκε ίσος με $0,441 \text{ m}^3$
- V₉ : Ο όγκος του σωλήνα μεταξύ της ρυθμιστικής βάνας του 3^{ου} τμήματος της διάταξης και της αντλίας κενού. Ο όγκος του συγκεκριμένου σωλήνα υπολογίστηκε ίσος με $84,67 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$

Προκειμένου να μπορεί σε μετέπειτα στάδιο, να προσδιοριστεί η ποσότητα του CO₂ που εισήχθει κάθε φορά στην διάταξη κατέστη απαραίτητη η χρήση της παρακάτω παρατιθέμενης σχέσης.

$$\text{Συγκέντρωση CO}_2 \left(\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right) = \frac{P \cdot \text{MB}_{\text{CO}_2}}{R^* \cdot T} \cdot \text{Λόγος ανάμιξης CO}_2 \text{ (ppm)} \quad [3]$$

Όπου: MB_{CO_2} το μοριακό βάρος του CO_2 ($44.01 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$)

Με βάση την σχέση [3] η συγκέντρωση του CO_2 σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$ στα τμήματα 1 και 2 της διάταξης πριν την έγχυση επιπρόσθετου αερίου υπολογίζεται ως ($617,745 \text{ mg}/\text{m}^3$)

Η εισαχθείσα μάζα CO_2 στο σύστημα με βάση την πίεση P_1 που ρυθμίζεται στο κομμάτι από την φιάλη CO_2 μέχρι την 1^η ρυθμιστική βάννα δίνεται με βάση τον μετασχηματισμό της καταστατικής εξίσωσης ως εξής:

$$m_{\text{CO}_2,1} = \left(\frac{P_1 \cdot V_1}{R^* \cdot T_S} - \frac{P_{\text{atm}} \cdot V_1}{R^* \cdot T_S} \right) \cdot \text{MB}_{\text{CO}_2} \quad [4]$$

Όπου: P_1 η πίεση του αερίου στον σωλήνα μετά την εισαγωγή του CO_2 (Pa)

P_{atm} η ατμοσφαιρική πίεση ($1,013 \times 10^5 \text{ Pa}$)

V_1 ο όγκος του αερίου στον σωλήνα ο οποίος συμπίπτει με τον όγκο του σωλήνα (m^3)

$m_{\text{CO}_2,1}$ η μάζα του εισαχθέντος CO_2 στην διάταξη (gr)

R^* η παγκόσμια σταθερά των αερίων ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

T_S η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα η οποία τέθηκε ίση με 298K

Έπειτα από το άνοιγμα της 1^{ης} ρυθμιστικής βάννα δεδομένου ότι η δεύτερη βάννα του 1^{ου} τμήματος της διάταξης παραμένει κλειστή η συγκέντρωση του CO_2 υπολογίζεται βάσει της σχέσης [5] η οποία προκύπτει από μετασχηματισμούς που συνδέονται με τον συνδυασμό της σχέσης [3] με την καταστατική εξίσωση όπως φαίνεται ακολούθως:

$$\text{Λόγος ανάμιξης CO}_2 \text{ (ppm)} = \frac{1}{\frac{n_{\text{ολ}} \cdot \text{MB}_{\text{CO}_2}}{V_1 + V_2 + V_3}} \cdot \frac{m_{\text{CO}_2,2}}{V_1 + V_2 + V_3} \cdot 10^6 \Rightarrow$$

$$\text{Λόγος ανάμιξης CO}_2 \text{ (ppm)} = \frac{m_{CO_2,1} + MB_{CO_2} \cdot \frac{P_{atm} \cdot (V_1 + V_2 + V_3)}{R \cdot T_S} \cdot (343,22 \cdot 10^{-6})}{MB_{CO_2} \cdot \left(\frac{P_1 \cdot V_1}{R \cdot T_S} + \frac{P_{atm} \cdot (V_2 + V_3)}{R \cdot T_S} \right)} \quad [5]$$

Όπου: $m_{CO_2,2}$ η συνολική μάζα του αέριου CO_2 στο 1^ο τμήμα της διάταξης μετά την έγχυση του από την φιάλη και πριν την εισαγωγή του στο 2^ο τμήμα της διάταξης

Λόγος ανάμιξης CO_2 ο λόγος ανάμιξης του αέριου CO_2 στο 1^ο τμήμα της διάταξης μετά την έγχυση του από την φιάλη και πριν την εισαγωγή του στο 2^ο τμήμα της διάταξης

Δεδομένου ότι σε κάθε πείραμα από το 2^ο τμήμα της διάταξης απομακρυνόταν ίδια μάζα αέρα με την μάζα του CO_2 που διοχετευόταν στην διάταξη από την φιάλη και λαμβάνοντας υπόψιν τις παραδοχές ότι σε κάθε περίπτωση το μοριακό βάρος του αέρα είναι ίσο με $MB_{air}=28.97 \text{ gr/mol}$ και ότι η ελάχιστη ελάττωση της μάζας δεν οδηγεί σε μεταβολή της πίεσης, τα mol του αέρα και αντίστοιχα του CO_2 στο τμήμα πριν ακριβώς την παροχέτευση επιπρόσθετου CO_2 δίνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$n_{air} = \frac{P_{atm} \cdot (V_5 + V_6 + V_7 + V_8)}{R^* \cdot T_S} - \frac{m_{CO_2,1}}{MB_{air}} \quad [6]$$

$$n_{CO_2} = n_{air} \cdot 343,22 \cdot 10^{-6} \quad [7]$$

Όπου: n_{air} ο αριθμός των mol του αέρα μετά την απομάκρυνση της επιθυμητής ποσότητας στο 2^ο τμήμα της διάταξης και πριν την παροχέτευση επιπρόσθετου CO_2 στο ίδιο τμήμα

n_{CO_2} ο αριθμός των mol του CO_2 μετά την απομάκρυνση της επιθυμητής ποσότητας στο 2^ο τμήμα της διάταξης και πριν την παροχέτευση επιπρόσθετου CO_2 στο ίδιο τμήμα

Συνεπώς μετά την εισαγωγή του μίγματος αέριου από το 1^ο τμήμα στο 2^ο τμήμα της διάταξης ο αριθμός mol του CO_2 μπορεί να υπολογιστεί βάσει της εν συνεχεία επισυναπτόμενης σχέσης [8]:

$$n_{CO_2,ολ2} = \frac{m_{CO_2,1}}{MB_{air}} \cdot \text{Λόγος ανάμιξης CO}_2 \text{ (ppm)} + n_{CO_2}$$

[8]

Όπου: Λόγος ανάμιξης CO₂ ο λόγος που υπολογίστηκε για το 1^ο τμήμα της διάταξης μετά την έγχυση του από την φιάλη και πριν την εισαγωγή του στο 2^ο τμήμα τη διάταξης

Επομένως με βάση την σχέση [5] η συγκέντρωση του αέριου CO₂ στο 2^ο τμήμα της διάταξης υπολογίζεται χάρις την ακόλουθης σχέση.

$$\text{Λόγος ανάμιξης CO}_2 \text{ (ppm)} = \frac{n_{\text{CO}_2, \text{ολ}2}}{n_{\text{air}, \text{ολ}}} \cdot 10^6 \quad [9]$$

Όπου: Λόγος ανάμιξης CO₂ ο λόγος ανάμιξης του CO₂ στο 2^ο τμήμα της διάταξης μετά την έγχυση του επιπρόσθετου αερίου από το 1^ο τμήμα

$n_{\text{air}, \text{ολ}}$ τα συνολικά mol του αέρα στο 2^ο τμήμα της διάταξης μετά την έγχυση του επιπρόσθετου αερίου από το 1^ο τμήμα

Συνεπώς προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας αποτελεσμάτων στον οποίο συνοψίζονται τα προαναφερθέντα μεγέθη.

Πίνακας 1: Πίνακας υπολογισθέντων τιμών ποσότητας mol, μαζικής παροχής και λόγου ανάμιξης αερίου CO₂ στα επιμέρους τμήματα 1 και 2 της πειραματικής διάταξης

P(MPa)	$m_{\text{CO}_2,1}$ (g/s)	Λόγος ανάμιξης στο τμήμα 1 (ppm)	n_{air} (mol)	n_{CO_2} (mol)	$n_{\text{CO}_2, \text{ολ}2}$ (mol)	Λόγος ανάμιξης στο τμήμα 2 (ppm)
0.1013	0	343.22	0.98702	0.00033877	0.00033877	343.22
0.45	0.39329	17984	0.97345	0.00033411	0.00057825	585.85
0.56667	0.52488	23748	0.96891	0.00033255	0.00076282	772.85
0.68333	0.65648	29445	0.96436	0.00033099	0.00099824	1011.4
0.8	0.78807	35076	0.95982	0.00032943	0.0012836	1300.5
0.91667	0.91967	40642	0.95528	0.00032787	0.0016181	1639.4
1.0333	1.0513	46145	0.95074	0.00032631	0.0020008	2027.1
1.15	1.1829	51584	0.94619	0.00032475	0.0024309	2462.9
1.2667	1.3144	56962	0.94165	0.00032319	0.0029077	2945.9
1.3833	1.446	62279	0.93711	0.00032163	0.0034303	3475.4
1.5	1.5776	67536	0.93257	0.00032008	0.0039979	4050.5

6.2 Αποτελέσματα θερμογραφικών δεδομένων

Στην δοθείσα εργασία η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε για 10 διαφορετικές τιμές της συγκέντρωσης του CO₂ και για κάθε μια από αυτές τις τιμές τα πειράματα επαναλήφθηκαν 5 φορές προκειμένου να εξασφαλιστεί η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων που προέκυψαν.

Δεδομένου ότι οι φωτογραφίες από την θερμογραφική κάμερα λαμβάνονταν με συχνότητα 0.1 sec⁻¹ και το γεγονός ότι για κάθε πείραμα θεωρήθηκε ικανός ο χρόνος των 2 min για την συλλογή δεδομένων, καθώς όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα η έναρξη λήψης μετρήσεων πραγματοποιούνταν όταν επιτυγχάνονταν μόνιμες συνθήκες στο κυτίο, για κάθε διαφορετική συγκέντρωση CO₂, συλλέχθηκαν 60 φωτογραφίες.

Ύπο το παραπάνω πρίσμα στην παρούσα εργασία εξετάστηκε η πιθανή συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης του CO₂ και των ακόλουθων μεγεθών

- της μέσης τιμής της ανώτερης θερμοκρασίας
- της μέσης τιμής της κατώτερης θερμοκρασίας
- της μέσης θερμοκρασίας της πλάκας
- της μέσης διαφοράς μεταξύ της ανώτερης και της κατώτερης θερμοκρασίας

Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου πρέπει να τονιστεί η αναγκαιότητα χρήσης υπολογιστικών προγραμμάτων επεξεργασίας πινάκων η οποία οδήγησε και στην παρούσα διπλωματική εργασία στην δημιουργία υπορουτίνων οι οποίες παρατίθενται στο παράρτημα Α, σε περιβάλλον Octave.

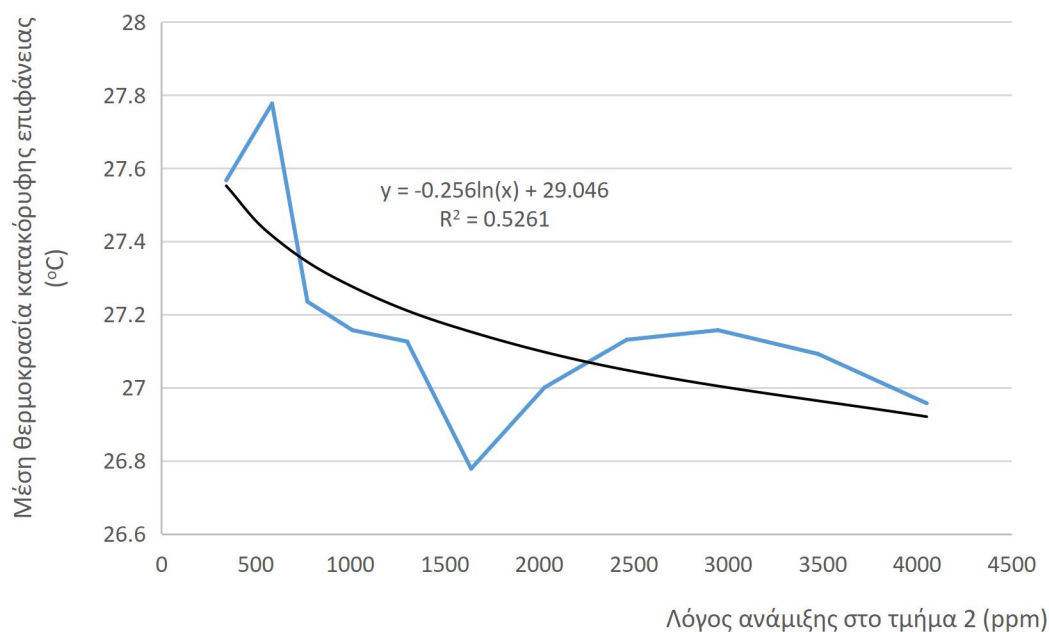
Επιπροσθέτως δημιουργήθηκαν τρισδιάστατα διαγράμματα απεικόνισης τα οποία επισυνάπτονται σε οπτικό δίσκο μαζί με την έντυπη μορφή της παρούσας διπλωματικής, της μέσης θερμοκρασιακής κατανομής καθώς και των τιμών της μέγιστης και της ελάχιστης θερμοκρασίας και της διαφοράς τους για κάθε σημείο της υπό παρακολούθηση κατακόρυφης επιφάνειας του κυτίου.

Συνεπώς δημιουργήθηκε ο ακόλουθος πίνακας αποτελεσμάτων στον οποίο επισυνάπτονται οι τιμές των προαναφερθέντων μεγεθών συναρτήσει της συγκέντρωσης που υπολογίστηκε στην προηγούμενη ενότητα

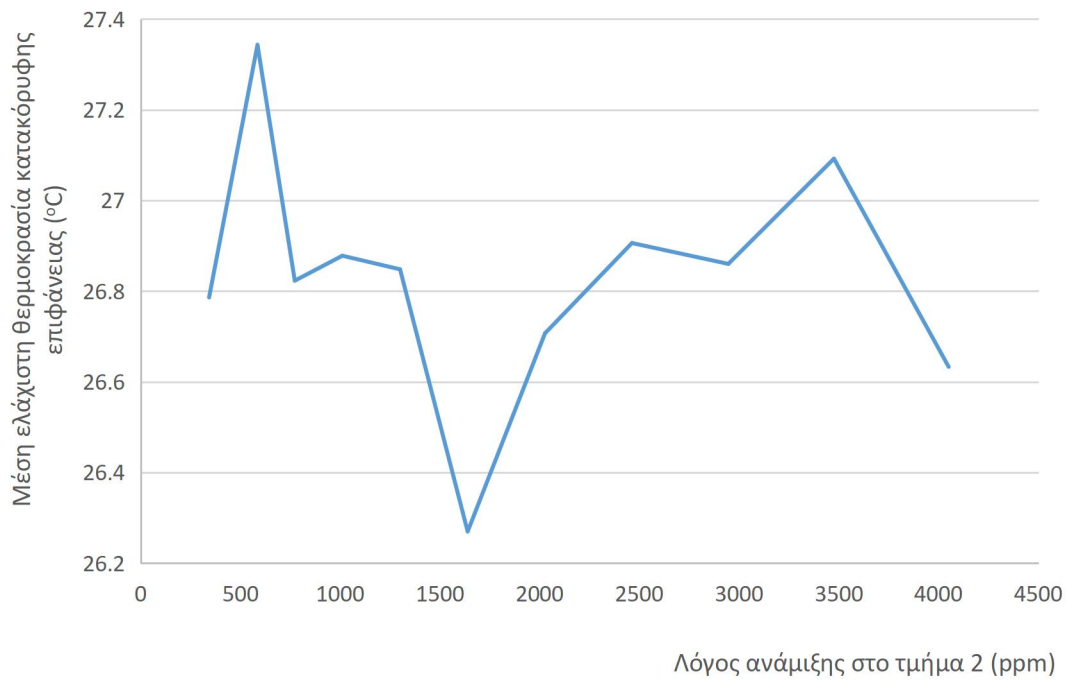
Πίνακας 2: Πίνακας αποτελεσμάτων μέσου όρου της μέσης θερμοκρασίας, της ανώτερης, της κατώτερης θερμοκρασίας και της διαφοράς τους για την κατακόρυφη επιφάνεια του κυτίου

Λόγος ανάμιξης στο τμήμα 2 (ppm)	Μέση θερμοκρασία κατακόρυφης επιφάνειας (°C)	Μέση ελάχιστη θερμοκρασία κατακόρυφης επιφάνειας (°C)	Μέση ανώτερη θερμοκρασία κατακόρυφης επιφάνειας (°C)	Μέση τιμή της διαφοράς της μέγιστης από την ελάχιστη θερμοκρασία της κατακόρυφης επιφάνειας
343.22	27.567	26.786	28.774	1.9367
585.85	27.777	27.343	28.355	1.0116
772.85	27.235	26.823	27.683	0.8597
1011.4	27.157	26.878	27.455	0.57647
1300.5	27.126	26.848	27.41	0.56243
1639.4	26.778	26.27	27.271	1.0008
2027.1	27	26.707	27.325	0.61717
2462.9	27.131	26.906	27.352	0.44582
2945.9	27.157	26.86	27.445	0.58587
3475.4	27.092	27.092	27.414	0.64151
4050.5	26.957	26.633	27.255	0.62267

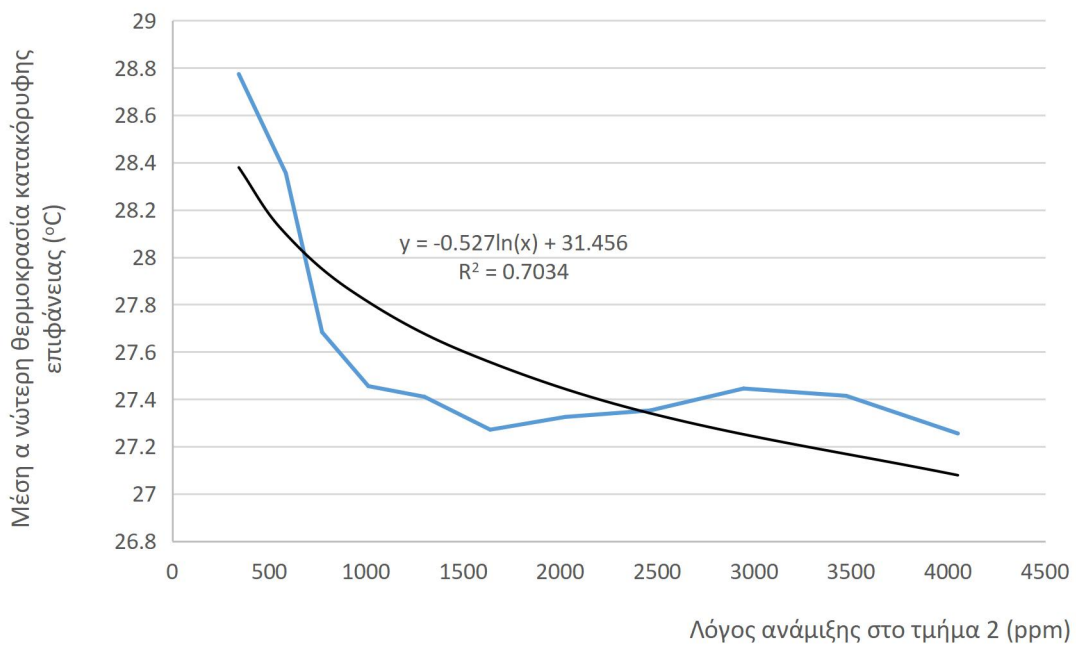
Με βάση τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα δημιουργήθηκαν τα ακόλουθα διαγράμματα στα οποία αποτυπώνεται και η βέλτιστη καμπύλη που υπολογίζεται με χρήση της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων.



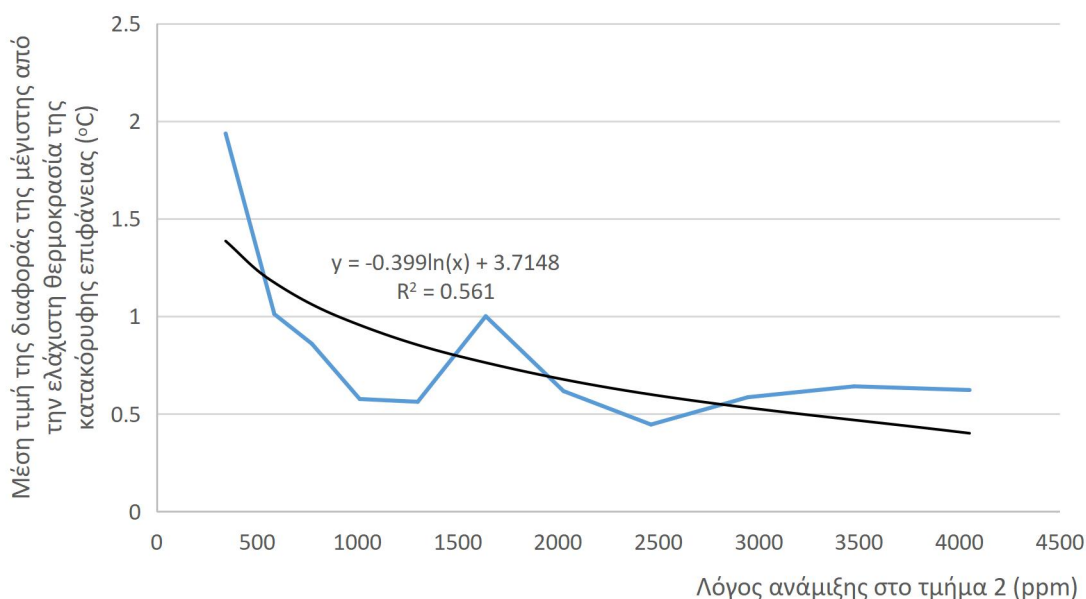
Σχήμα 15: Μέση θερμοκρασία κατακόρυφης επιφάνειας (°C) συναρτήσεως του λόγου ανάμιξης CO₂ στο 2^ο τμήμα της διάταξης μετά την έγχυση του αερίου από το 1^ο τμήμα



Σχήμα 16: Μέση ελάχιστη θερμοκρασία κατακόρυφης επιφάνειας (°C) συναρτήσσει του λόγου ανάμιξης CO₂ στο 2^ο τμήμα της διάταξης μετά την έγχυση του αερίου από το 1^ο τμήμα



Σχήμα 17: Μέση ανώτερη θερμοκρασία κατακόρυφης επιφάνειας (°C) συναρτήσσει του λόγου ανάμιξης CO₂ στο 2^ο τμήμα της διάταξης μετά την έγχυση του αερίου από το 1^ο τμήμα



Σχήμα 18: Μέση τιμή της διαφοράς της μέγιστης από την ελάχιστη θερμοκρασία της κατακόρυφης επιφάνειας (°C) συναρτήσεως του λόγου ανάμιξης CO₂ στο 2^ο τμήμα της διάταξης μετά την έγχυση του αερίου από το 1^ο τμήμα

Με βάση το διάγραμμα του σχήματος 15 παρατηρείται μια πτωτική τάση της μέσης θερμοκρασίας της κατακόρυφης επιφάνειας του κυτίου που εξετάζεται καθώς η συγκέντρωση του CO₂. Ωστόσο από την εξίσωση της βέλτιστης καμπύλης που απεικονίζεται στο σχήμα, και τον συντελεστή γραμμικής παλινδρόμησης όπως αυτός αποτυπώνεται από την μεταβλητή R², δεν μπορεί εξαχθεί κάποιο ακριβές συμπέρασμα για την σχέση που μπορεί να διέπει της δύο εξεταζόμενες μεταβλητές

Παράλληλα παρατηρώντας το διάγραμμα του σχήματος 16 μπορεί να γίνει αντιληπτό ότι και η μέση τιμή της ελάχιστης θερμοκρασίας που παρατηρείται στην υπό παρακολούθηση κατακόρυφη επιφάνεια του κυτίου δεν είναι δυνατό να συσχετιστεί με την παράμετρο της συγκέντρωσης του CO₂ στον εσωτερικό χώρο.

Ιδιαίτερα αποτελέσματα ωστόσο φαίνεται να απαντώνται στα διαγράμματα των σχημάτων 17 και 18 όπου οι βέλτιστες καμπύλες φαίνεται να ακολουθούν εξισώσεις λαγαριθμικών συναρτήσεων οι οποίες αποτελούν μια ικανοποιητική πρώτη προσέγγιση της πραγματικότητας. Δίνοντας έμφαση μάλιστα στους συντελεστές R² που προέκυψαν για τις υπό εξέταση περιπτώσεις η καμπύλη συσχέτισης της μέσης ανώτερης θερμοκρασίας με τον λόγο ανάμιξης του CO₂ τείνει να προσεγγίζει την πραγματικότητα στον βέλτιστο βαθμό. Ωστόσο και στις περιπτώσεις αυτές τα αποτελέσματα της διερεύνησης που πραγματοποιήθηκε δεν μπορούν αποτελέσουν βάση υιοθέτησης μιας επαρκούς προσέγγισης της πραγματικότητας.

7.0 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνήθηκε η πιθανή συσχέτιση μεταξύ της ποσότητας ενός αέριου στοιχείου όπως του CO₂ και της θερμοκρασιακής κατανομής ενός κατακόρυφου δομικού στοιχείου. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη διεξαγωγή αξιόπιστων μετρήσεων με σκοπό την εξαγωγή ακριβών και έγκυρων αποτελεσμάτων όσον αφορά τα θερμοδυναμικά μεγέθη που υπολογίστηκαν. Στο πλαίσιο αυτό πραγματοποιήθηκε στεγανοποίηση (αέρος) της συνολικής διάταξης, ώστε να είναι δυνατή η εξασφάλιση ίδιων συνθηκών κατά την εκτέλεση των πειραμάτων. Επιπλέον πραγματοποιήθηκε θερμομόνωση της οριζόντιας και κατακόρυφης πλάκας προκειμένου τα αποτελέσματα που εξήχθησαν για τη μία επιφάνεια να είναι αντιπροσωπευτικά και των υπολοίπων του κυτίου.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα διαπιστώθηκε μια συσχέτιση μεταξύ της μέσης τιμής της ανώτερης θερμοκρασίας και του λόγου ανάμιξης του αέριου CO₂ καθώς και της διαφοράς μεταξύ της ανώτερης και της κατώτερης θερμοκρασίας. Η παρατηρούμενη συσχέτιση θα μπορούσε να αξιοποιηθεί σε προβλήματα ποιότητας αέρα εσωτερικού χώρου, όπου και η μέτρηση της θερμοκρασίας σε συγκεκριμένες επιφάνειες (π.χ τοιχοποιία) θα μπορούσε να οδηγήσει σε εξαγωγή συμπερασμάτων για τη συγκέντρωση αέριων ενώσεων, όπως π.χ. CO₂

Σε κάθε περίπτωση τα παρουσιαζόμενα αποτελέσματα χαρακτηρίζονται από τους περιορισμούς που συνοδεύουν την παρούσα διάταξη, συμπεριλαμβάνοντας την επίδραση των εξωτερικών συνθηκών στις συνθήκες του πειράματος και την έλλειψη ικανού εξοπλισμού για την μέτρηση της ακριβούς ποσότητας CO₂ που διοχετεύτηκε σε κάθε περίπτωση στην διάταξη. Οι περιορισμοί αυτοί εντείνονται λόγω της απουσίας σχετικής εμπειρίας στη βιβλιογραφία.

Μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να διερευνήσει τη χρήση και άλλων αερίων ή διαφορετικών γεωμετριών του κυτίου. Καθοριστικές φαίνεται να είναι οι ρευστομηχανικές διεργασίες, αναφέροντας την επίδραση των θερμοκλινών και διαφορών της συγκέντρωσης στα φαινόμενα μεταφοράς, ο δανεισμός στοιχείων και εύρεση αναλογιών σε προβλήματα συγκέντρωσης ή διάχυσης ρυπαντών. Υπό το πρίσμα αυτό αναδεικνύεται ως σημαντικός παράγοντα για την εντατικοποίηση παρόμοιων ερευνών η εφαρμοσιμότητα της παραπάνω έρευνας, σε προβλήματα διάχυσης ρυπαντών, ποιότητας αέρα ή ακόμα και μη καταστροφικών ελέγχων.

Βιβλιογραφία

[1] Cooper, C. David, Alley, F. C. (2004). ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΕΡΙΑΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ (3η έκδ.). Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ

[2] Ανδρουτσόπουλος, Α., Αραβαντινός, Δ., Γαγλία, Α., Γιαννακίδης, Γ., Δημούδη, Α., Δρούτσα, Κ., Ευθυμιάδης, Α., και συν. (2010). *ΤΕΧΝΙΚΗ ΟΔΗΓΙΑ ΤΕΧΝΙΚΟΥ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟΥ ΕΛΛΑΔΑΣ Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2010*. Αθήνα.

[3] Olesen, W. B., 2007. The philosophy behind EN15251: Indoor environmental criteria for design and calculation of energy performance of buildings. Denmark: Energy and Buildings 39, 740–749

[4] Standard Guide for Using Indoor Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor Air Quality and Ventilation. November 2007. ASTM.

[5] GoodFellow Group of companies, Επίσημη Ιστοσελίδα <http://www.goodfellow.com>

[6] Ανδρουτσόπουλος, Α., Αραβαντινός, Δ., Θεωδοσίου, Θ., Λαμπροπούλου, Ε., Λάσκος, Κ., Τσικαλουδάκη, Α., και συν. (2010). *ΤΕΧΝΙΚΗ ΟΔΗΓΙΑ ΤΕΧΝΙΚΟΥ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟΥ ΕΛΛΑΔΑΣ Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2/2010*. Αθήνα.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Υπορουτίνα σε υπολογιστικό περιβάλλον Octave για την εύρεση της μέσης θερμοκρασίας, της ανώτερης και κατώτερης θερμοκρασίας και της διαφοράς της μέγιστης από την ελάχιστη θερμοκρασία για κάθε σημείο της κατακόρυφης επιφάνειας του κυτίου υπό εξέταση

%% A: πίνακας με τα θερμοκρασιακά στοιχεία από όλες τις φωτογραφίες
%% της θερμοκάμερας για κάθε σειρά μετρήσεων που αφορούν μια
%% συγκεκριμένη τιμή συγκέντρωσης CO₂

B=A; } %% B και sum πίνακες που χρησιμοποιούνται για την
sum=A; } %% επεξεργασία των δεδομένων του A

t=length(A)/160; %% Δεδομένου ότι ο πίνακας A έχει δεδομένα από μια σειρά με
%% πίνακες θερμοκρασιών, με βάση των αριθμό των στηλών
%% που αντιπροσωπεύονται από το length (A) βρίσκεται ο
%% αριθμός των πινάκων που ενσωματώνονται στον A
%% (στην συγκεκριμένη περίπτωση το t είναι πάντα 60)

ld=((t-1)*160)+30; } %% ld και lu αντιπροσωπεύουν την θέση των
lu=(t*160)-40; } %% θερμοκρασιών στα όρια του κυτίου για τον
%% τελευταίο πίνακα θερμοκρασιών που αποτελεί τις
%% 160 τελευταίες στήλες του πίνακα A.

for p=190:160:lu %% p αντιπροσωπεύει τις θερμοκρασίες του ορίου της
%% αριστερής πλευράς του κυτίου για τον δεύτερο
%% πίνακα θερμοκρασιών που ενσωματώνεται στον
%% πίνακα A

%% i και j αντιπροσωπεύουν τις θερμοκρασίες στα όρια του κυτίου

for i= 2:1:117 }
for j=p:1:(p+90) } %% Επαναληπτική διαδικασία για τον
sum(i,j)=A(i,j)+sum(i,j-160); } %% υπολογισμό της αθροιστικής θερμοκρασίας
endfor } %% για κάθε σημείο της εξεταζόμενης
endfor } %% κατακόρυφης επιφάνειας του κυτίου
endfor

for p=190:160:lu }
for i=2:1:117 }
for j=p:1:(p+90) }
if A(i,j)>A(i,j-160); } %% Επαναληπτική διαδικασία για τον
A(i,j)=A(i,j); } %% υπολογισμό της μέγιστης και ελάχιστης
else A(i,j)=A(i,j-160); } %% θερμοκρασίας για κάθε σημείο της
endif } %% εξεταζόμενης κατακόρυφης επιφάνειας
if B(i,j)<B(i,j-160); } %% του κυτίου (πίνακες A και B αντίστοιχα)
B(i,j)=B(i,j); }
else B(i,j)=B(i,j-160); }
endif }
endfor }
endfor }
endfor

C1=A(2:117,ld:lu); %%Πίνακας αποτελεσμάτων ανώτερης θερμοκρασίας για
%%κάθε σημείο της εξεταζόμενης κατακόρυφης επιφάνειας
%%του κυτίου

C2=B(2:117,ld:lu); %%Πίνακας αποτελεσμάτων κατώτερης θερμοκρασίας για
%%κάθε σημείο της εξεταζόμενης κατακόρυφης επιφάνειας
%%του κυτίου

C3=sum(2:117,ld:lu);
C3=C3./t; %%Πίνακας αποτελεσμάτων μέσης θερμοκρασίας για κάθε
%%σημείο της εξεταζόμενης κατακόρυφης επιφάνειας του
%%κυτίου

C4=C1-C2 ; %%Πίνακας αποτελεσμάτων της διαφοράς της ανώτερης από την
%%κατώτερη θερμοκρασία για κάθε σημείο της εξεταζόμενης
%%κατακόρυφης επιφάνειας του κυτίου