

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΑΕΡΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΩΝ ΧΩΡΩΝ ΜΕ ΡΟΪΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΕ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΑ ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Ευθυμιόπουλος Σ., Πανάρας Γ., Τόλης Ε.

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας,
Κοζάνη, 50100

spyros.efthymiopoulos@gmail.com, gpanaras@uowm.gr, etolis@uowm.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα μελέτη εξετάζεται το ενδεχόμενο προσδιορισμού πιθανής συσχέτισης μεταξύ της συγκέντρωσης μιας αέριας ένωσης, όπως το διοξείδιο του άνθρακα, και της ροής που αναπτύσσεται σε μια κατακόρυφη επιφάνεια σε έναν εσωτερικό χώρο. Χάρης στην καταγραφή της θερμοκρασιακής κατανομής ενός κατακόρυφου δομικού στοιχείου σε έναν εσωτερικό χώρο, επιχειρείται η διατύπωση κάποιων υποθέσεων για τα ροϊκά φαινόμενα που επικρατούν όπως αυτά εκφράζονται από τον αδιάστατο αριθμό Rayleigh. Για τις ανάγκες της έρευνας αναπτύχθηκε κατάλληλη πειραματική διάταξη. Η υπό διερεύνηση συσχέτιση, μπορεί να αξιοποιηθεί στα πλαίσια ευρύτερης έρευνας για την μελέτη θεμάτων που άπτονται φαινομένων ελεύθερης συναγωγής και μπορούν να συσχετιστούν με την ποιότητα αέρα σε εσωτερικούς χώρους.

Λέξεις Κλειδιά: Ποιότητα αέρα, Εσώκλιμα, Συγκέντρωση αέριων ουσιών, Θερμογραφία, CO₂

1. Εισαγωγή

Ένα μείζονος σημασίας θέμα που απασχολεί την επιστημονική κοινότητα είναι οι συνθήκες υγιεινής και άνεσης σε εσωτερικούς χώρους. Δεδομένης της μεγάλης παραμονής των ανθρώπων σε εσωτερικούς χώρους, η μελέτη για την πρόβλεψη της ποιότητας αέρα σε τέτοιους χώρους κρίνεται πλέον απαραίτητη (Schieweck et al., 2018; Vasile et al., 2016; Wolkoff P., 2018). Στο πλαίσιο αυτό, κτίρια όπου η ποιότητα αέρα κρίνεται χαμηλή πάσχουν, όπως πολλές φορές αναφέρεται, από το σύνδρομο του “άρρωστου κτιρίου” (Cooper και Alley, 2004). Για την αντιμετώπιση του εν λόγω προβλήματος, σύμφωνα με τον Κανονισμό Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (Κ.Εν.Α.Κ) και ειδικότερα την σχετική Τεχνική Οδηγία του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας (Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2010, ΤΕΕ, 2010a), τα νεόδμητα κτίρια μετά το 2010 υποχρεώθηκαν να τηρούν συγκεκριμένες προδιαγραφές που αφορούν τόσο τα ποιοτικά όσο και τα ποσοτικά χαρακτηριστικά του νωπού αέρα, ήτοι τη δυνατότητα αερισμού ενός εσωτερικού χώρου.

Στην παρούσα μελέτη πραγματοποιήθηκε διερεύνηση με στόχο τον εντοπισμό και την ποσοτικοποίηση συσχέτισης μεταξύ της συγκέντρωσης CO₂ σε ελεγχόμενο χώρο και ρευστομηχανικών φαινομένων. 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 στιγμιότυπων θερμοκρασιών στην υπό εξέταση κατακόρυφη επιφάνεια, καθώς και 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.

2. 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 όσον αφορά το αίσθημα δυσφορίας των χρηστών (Olesen, 2007):

- 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 υπόθεση συνθηκών σταθερής κατάστασης, η μέτρηση της συγκέντρωσης του CO₂ δεν είναι σε όλες τις περιπτώσεις ιδανική για την εκτίμηση 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 ισοζύγιο μάζας σε σύστημα μηχανικής ανανέωσης αέρα, μπορεί να υπολογιστεί η ποσότητα του εξωτερικού αέρα στο ρεύμα τροφοδοσίας του χάρις στον υπολογισμό της συγκέντρωσης του CO₂ στην είσοδο, την έξοδο και στον αέρα του περιβάλλοντος. (ASTM, 2007)

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 βρίσκεται 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 μελέτη πραγματοποιήθηκε μια προσπάθεια εύρεσης πιθανούς συσχέτισης μεταξύ φαινομένων ροής θερμοκρασιακά εξαρτωμένων, και ενδεχόμενα ευκολότερα προσδιοριζόμενων, και της συγκέντρωσης του CO₂ σε έναν εσωτερικό χώρο.

3. Πειραματική Διάταξη

Στα πλαίσια της διερεύνησης, κατασκευάστηκε μια πρότυπη πειραματική διάταξη η οποία απαρτίζεται από εξειδικευμένο εξοπλισμό και ένα σύνολο μετρητικών οργάνων που συνοψίζονται ως 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 6l



(α)

(β)

(γ)

(δ)

Σχήμα 1: Εξοπλισμός πειραματικής διάταξης: (α) κουτί plexiglass, (β) φιάλη CO₂, (γ) δοχείο διαστολής 24 l, (δ) δοχείο διαστολής 12 l

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.

Για την διερεύνηση της 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 κουτί

πραγματοποιήθηκε με γνώμονα το κόστος του υλικού, τον συντελεστή εκπεμπιμότητας, ο οποίος βάσει της βιβλιογραφίας είναι υψηλός ($\varepsilon \sim 0.86$), και την αντοχή του σε μικρές μεταβολές της πίεσης (Cooper και Alley, 2004) .

Το κυτίο που κατασκευάστηκε 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 κουτί από plexiglass, δημιουργήθηκαν 16 όμοιες διαμερείς 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 στην οποία θα επιτυγχάνεται ομοιόμορφη παροχή της αέριας μάζας, μειώνοντας κατά το δυνατόν την εμφάνιση μικρών στροβιλισμών, ειδικά στην περίπτωση όπου θα υπήρχε μια διαμετρής 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.

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. 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 l.

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 στην 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 (σημειώνεται ότι ο συντελεστής εκπεμπιμότητας ε για το υλικό plexiglass του κυτίου υπολογίστηκε ίσος με 0.88), καθώς και του συντελεστή ανακλασιμότητας ο οποίος λαμβάνει υπόψιν 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 χαρακτηριστικά τα οποία δύνανται να ρυθμιστούν προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη εστίαση στο αντικείμενο που παρατηρείται, η χρήση του μοντέλου IRI4030 ενδείκνυται για την εκπόνηση παρόμοιων πειραματικών διαδικασιών.

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.

Για την ρύθμιση της παροχής και την καταγραφή της θερμοκρασίας και της πίεσης εντός της πειραματικής διάταξης χρησιμοποιήθηκε ένας συνδυασμός από δύο δοχεία διαστολής, 12 l και 24 l

αντίστοιχα. 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.

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 l/s προκειμένου να είναι δυνατή η καλύτερη προσέγγιση της αφαιρούμενης ποσότητας από το σύστημα.

Για την μέτρηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος χώρου στον οποίο πραγματοποιήθηκαν οι πειραματικές μετρήσεις, χρησιμοποιήθηκε ένας αισθητήρας θερμομέτρου-ανεμομέτρου τύπου HD 2103.2 της εταιρείας Delta OHM. Οι παρεχόμενες 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.

Από την εξωτερική πλευρά, στην πάνω και κάτω επιφάνεια του κυτίου τοποθετήθηκε και πραγματοποιήθηκε κόλληση υλικού με συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας 0.05 ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) (T.O.T.E.E. 20701-2/2010, TEE, 2010b) 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.

4. Επεξεργασία δεδομένων και αποτελέσματα

4.1 Προσδιορισμός συγκέντρωσης CO_2 διάταξης

Με βάση τα αποτελέσματα που συλλέχθηκαν για την συγκέντρωση του CO_2 του περιβάλλοντα χώρου από τον αισθητήρα Telaire (Σχήμα 2), η συγκέντρωση της εν λόγω ένωσης στον χώρο υπολογίστηκε ίση με 343.2 ± 8.49 ppm.

Στο παρόν σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι για τους υπολογισμούς που θα ακολουθήσουν στη συνέχεια, υιοθετήθηκε η παραδοχή ότι ο προαναφερθέν μέσος όρος της συγκέντρωσης του CO_2 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 ποσοστία των περιεχόμενων ενώσεων του καθ' όλη την διάρκεια των πειραμάτων.

Για τον προσδιορισμό της ποσότητας του CO_2 που εισήχθη σε κάθε χρονική στιγμή στο σύστημα, πραγματοποιήθηκε χρήση της καταστατικής εξίσωσης των αερίων και εξισώσεων που προέρχονται από κατάλληλο μετασχηματισμό της, με την βασική υπόθεση ότι αυτές ισχύουν επαρκώς για πίεση 1 atm και για μικρές τιμές όγκων (σχέσεις (1), (2)).

$$P \cdot V = n \cdot R^* \cdot T \quad (1)$$

Όπου: P η πίεση του αερίου (Pa)

V ο όγκος του αερίου (m^3)

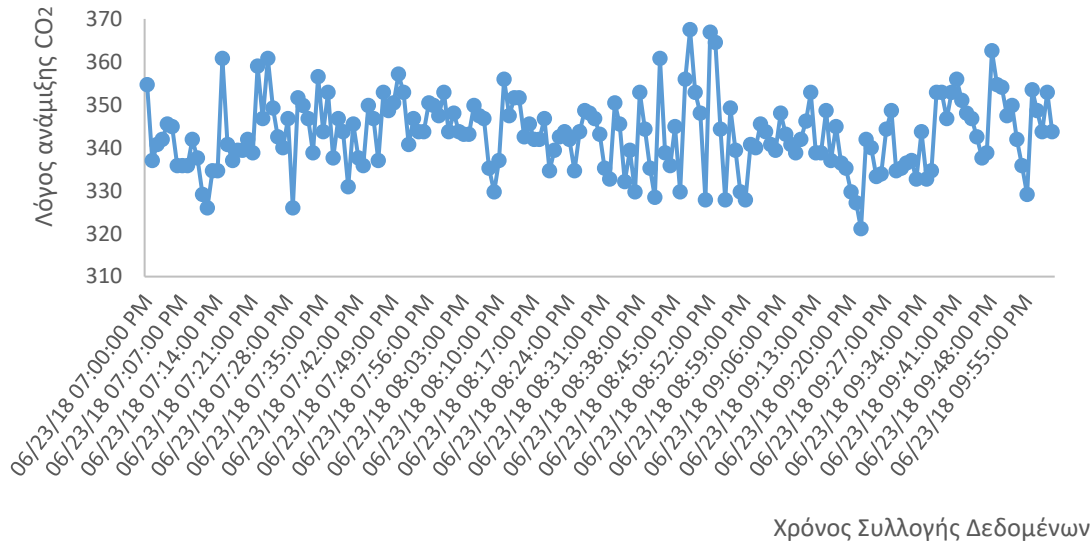
n ο αριθμός των mol του αερίου (mol)

R^* η παγκόσμια σταθερά των αερίων ($8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

T η θερμοκρασία (K)

$$\text{Συγκέντρωση CO}_2 \left(\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right) = \frac{P \cdot MB_{\text{CO}_2}}{R^* \cdot T} \cdot \text{Λόγος ανάμιξης CO}_2 \text{ (ppm)} \quad (2)$$

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



Σχήμα 2: Λόγος ανάμιξης CO_2 κατά την διάρκεια τριών ωρών

4.2 Αποτελέσματα θερμογραφικών δεδομένων

Στην δοθείσα εργασία η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε για 10 διαφορετικές τιμές της συγκέντρωσης του CO_2 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 CO_2 συλλέχθηκαν 60 φωτογραφίες. Υπό το παραπάνω πρίσμα, εξετάστηκε η πιθανή συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης του CO_2 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 εργασία στην δημιουργία υπορουτίνων σε περιβάλλον Octave. Συνεπώς δημιουργήθηκε ο ακόλουθος πίνακας (Πίνακας 1) αποτελεσμάτων στον οποίο επισυνάπτονται οι τιμές των προαναφερθέντων μεγεθών συναρτήσει της συγκέντρωσης που υπολογίστηκε στην προηγούμενη ενότητα

Πίνακας 1: Πίνακας αποτελεσμάτων μέσου όρου της μέσης θερμοκρασίας, της ανώτερης, της κατώτερης θερμοκρασίας και της διαφοράς τους για την κατακόρυφη επιφάνεια του κυτίου

Λόγος ανάμιξης (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

Σύμφωνα με τα παραπάνω, δημιουργήθηκαν τα ακόλουθα διαγράμματα (Σχήματα 3, 4), στα οποία αποτυπώνεται η σχέση μεταξύ των τιμών των μεγεθών που σχετίζονται με τα θερμοκρασιακά δεδομένα που συλλέχθηκαν για την κατακόρυφη πλάκα του κυτίου και την προσεγγιστική συγκέντρωση που υπολογίστηκε από τις προαναφερθείσες σχέσεις.

Υιοθετώντας την παραδοχή ότι στην επιφάνεια της κατακόρυφης πλάκας του κυτίου η ροή θερμότητας είναι ομοιόμορφη, ο αδιάστατος αριθμός Rayleigh μπορεί να εκφραστεί σε όρους της θερμοκρασιακής διαφοράς στο μέσο σημείο της πλάκας $\Delta T_{L/2} = T_s(L/2) - T_\infty$ (Bergman et al. 2011) όπως φαίνεται στη εν συνεχεία παρατιθέμενη σχέση (3):

$$Ra_L = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T_{L/2} \cdot L^3}{\nu \cdot a} \quad (3)$$

Όπου: g η επιτάχυνση της βαρύτητας (m^2/s)

β ο συντελεστής ογκομετρικής διαστολής του ρευστού (K^{-1})

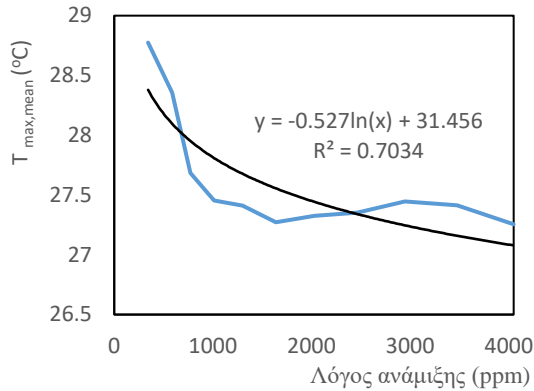
L το ύψος της πλάκας (m)

ν το κινηματικό ιξώδες του ρευστού (m^2/s)

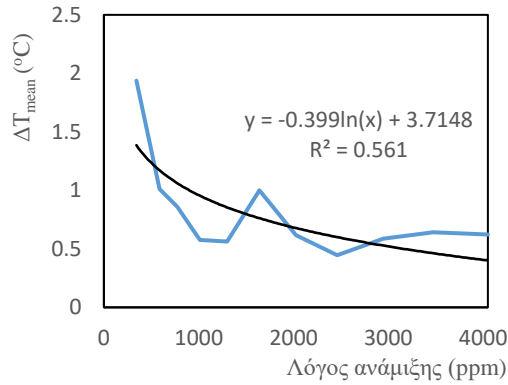
a η διαχυτότητα θερμότητας (m^2/s)

T_s η θερμοκρασία στην επιφάνεια του κατακόρυφου δομικού στοιχείου

T_∞ η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα

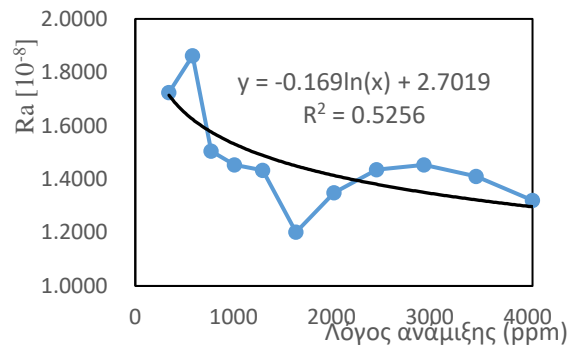


Σχήμα 3: Μέση ανώτερη θερμοκρασία κατακόρυφης επιφάνειας (°C) συναρτήσει του λόγου ανάμιξης CO₂ στο κυτίο



Σχήμα 4: Μέση τιμή της διαφοράς της μέγιστης από την ελάχιστη θερμοκρασία της κατακόρυφης επιφάνειας (°C) συναρτήσει του λόγου ανάμιξης CO₂ στο στο κυτίο

Θεωρώντας επιπλέον ότι στον περιβάλλοντα χώρο του δωματίου, στο οποίο πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα, ο αέρας βρίσκεται σε ηρεμία ενώ ταυτόχρονα συμπεριφέρεται ως ιδανικό αέριο με σταθερές ιδιότητες, προκύπτει το ακόλουθο διάγραμμα (Σχήμα 5), στο οποίο παρουσιάζονται οι τιμές του αριθμού Ra που αφορούν την ροή στην εξωτερική πλευρά της υπό εξέταση κατακόρυφης επιφάνειας συναρτήσει της προσεγγιστικής συγκέντρωσης του αερίου CO₂ στο εσωτερικό του κυτίου. Παράλληλα παρουσιάζεται και η σχετική συσχέτιση.



Σχήμα 5: Αδιάστατος αριθμός Ra συναρτήσει του λόγου ανάμιξης CO₂ στο εσωτερικό του κυτίου

Συνεπώς, χάρις στα πειραματικά δεδομένα και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία τους, μπορεί να διατυπωθεί η υπόθεση ότι καθώς η συγκέντρωση του αερίου CO₂ αυξάνεται εντός του εσωτερικού χώρου η συμπεριφορά του αριθμού Rayleigh μπορεί να περιγραφεί επαρκώς από μια φθίνουσα λογαριθμική σχέση.

5. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε η πιθανή συσχέτιση μεταξύ της ποσότητας ενός αέριου στοιχείου όπως του CO₂ και της θερμοκρασιακής κατανομής ενός κατακόρυφου δομικού στοιχείου, καθώς και του σχετικού αριθμού Rayleigh. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη διεξαγωγή αξιόπιστων μετρήσεων, με σκοπό την εξαγωγή ακριβών και έγκυρων αποτελεσμάτων όσον αφορά τα θερμοδυναμικά και ρευστομηχανικά 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 συσχέτιση μεταξύ του λόγου ανάμιξης του αέριου CO₂ και της μέσης τιμής της ανώτερης θερμοκρασίας, καθώς και της διαφοράς μεταξύ της ανώτερης και της κατώτερης θερμοκρασίας, και του αριθμού Rayleigh. 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.

Ωστόσο τα αποτελέσματα που προέκυψαν 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 είναι πιο έντονοι λόγω της απουσίας σχετικής εμπειρίας στη βιβλιογραφία.

Μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να διερευνήσει τη χρήση και άλλων αερίων ή διαφορετικών γεωμετριών του κυτίου, ενώ ενδιαφέρον, σε σχέση με την ποσοτικοποίηση της επίδρασης θερμοκλιμών ή διαφορών συγκέντρωσης στα φαινόμενα μεταφοράς εντοπίζεται στο δανεισμό στοιχείων και εύρεσης αναλογιών σε προβλήματα συγκέντρωσης ή διάχυσης ρυπαντών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ASTM, 2007. Standard Guide for Using Indoor Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor Air Quality and Ventilation.

Bergman, L. T., Lavine S. A., Incropera P. F., Dewitt P. D. (2014). ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΜΑΖΑΣ. (7η έκδ.) Αθήνα: Εκδόσεις FountasBooks.

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

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

Schieweck A., Uhde E., Salthammer T., Salthammer L.C., Morawska L., Mazaheri M., Kumar P., 2018. Smart homes and the control of indoor air quality. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 94, 705–718

TEE, 2010a. ΤΕΧΝΙΚΗ ΟΔΗΓΙΑ ΤΕΧΝΙΚΟΥ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟΥ ΕΛΛΑΔΑΣ Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2010. Αναλυτικές εθνικές προδιαγραφές παραμέτρων για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων και την έκδοση του πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης. Αθήνα.

TEE, 2010b. ΤΕΧΝΙΚΗ ΟΔΗΓΙΑ ΤΕΧΝΙΚΟΥ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟΥ ΕΛΛΑΔΑΣ Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2/2010. Θερμοφυσικές ιδιότητες δομικών υλικών και έλεγχος της θερμομονωτικής επάρκειας των κτηρίων. Αθήνα.

Vasile V., Petran H., Dima A., Petcu C., 2016. Indoor air quality – a key element of the energy performance of the buildings. *Energy Procedia* 96, 277–284

Wolkoff P., 2018. Indoor air humidity, air quality, and health – An overview. *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 221, 376–390

INVESTIGATION FOR POTENTIAL CORRELATIONS BETWEEN INDOOR AIR QUALITY AND FLUID FLOW PHENOMENA ON VERTICAL BUILDING ENVELOPE ELEMENTS

Efthymiopoulos S., Panaras G., Tolis E.

Mechanical Engineering Dpt., University of Western Macedonia

Kozani, 50100, Greece

spyros.efthymiopoulos@gmail.com, gpanaras@uowm.gr, etolis@uowm.gr

Keywords: Indoor Air Quality, air substances concentration, thermography, CO₂

ABSTRACT

As we proceed into the twenty-first century, the study of health, comfort and wellbeing gains more and more attention. Especially taking into account, that people stay indoors for a long period of time, the determination of air quality inside a building or an enclosure has become now more than ever necessary. As a matter of fact, in modern society, the “sick building syndrome” term has been developed to describe all buildings where air quality is poor.

Lack or absence of ventilation is inextricably linked with high concentration of unsafe pollutants and increased humidity that may jeopardise the occupants health. In particular, most common pollutants due to insufficient ventilation and poor indoor air quality are PM-2.5, ozone, NO₂, SO₂, CO and volatile organic compounds (VOC) particles. Moreover, it is important to underline that poor ventilation conditions often are followed by an increase in the concentration of odors and harmful bacteria, viruses and fungi that may result in unsustainable living and working conditions. The determination of ventilation adequacy in an indoor space can be associated with carbon dioxide concentration. Sensors for measuring CO₂ levels are used as a means for indicating the air renewal capability indoors. However, often the inability to determine the exact concentration of the gas may lead to difficulties regarding the assessment of the ventilation capacity of a building.

This research was conducted in order to determine any potential correlation between the effect of the concentration of CO₂ in indoor spaces or enclosures and the Rayleigh number which is highly dependent to temperature. The proposed investigation may be valuable for indoor air quality problems. For the purpose of the proposed investigation a unique innovative experimental setup was developed. The experiment was based on the construction of a plexiglass (polymethyl methacrylate) box, tightly sealed and interconnected with a system for supplying and removing a selected gaseous compound, in which case was CO₂. A thermal camera was also necessary to record the temperature changes on a vertical surface of the plexiglass box along with measuring equipment for the determination of the thermodynamic parameters and the amount of CO₂. Data regarding the properties of CO₂ and the temperature of the vertical surface, were collected in a controllable environment, in order to be considered valid and accurate. As a consequence, the conclusive results derived from the processing data can be considered reliable.

The demonstrated correlation could have various applications in indoor air quality problems. For example temperature distribution of vertical surfaces such as walls may lead to the extraction of useful conclusions regarding the concentration of gaseous compounds (i.e. CO₂) within spaces. Future research could examine possible interrelationships between different air pollutants or geometrical characteristics and temperature distribution of vertical surfaces.