

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

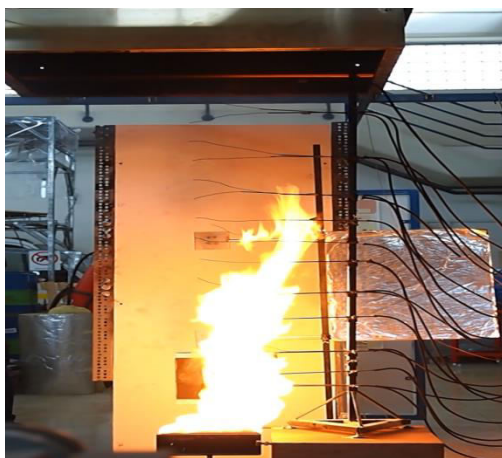
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΤΕΡΟΓΕΝΩΝ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΚΑΥΣΗΣ**

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: Κα. Μ. ΦΟΥΝΤΗ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ
ΡΥΘΜΟΥ ΕΚΛΥΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΦΩΤΙΕΣ
ΕΞΕΡΧΟΜΕΝΕΣ ΑΠΟ ΚΤΙΡΙΟ**

ΤΣΙΛΙΜΙΓΚΑΚΗΣ ΠΕΤΡΟΣ



ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΗΣ 2014

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1.1 Σχηματική παράσταση τυπικής φωτιάς κηλίδας καυσίμου και των ενεργειακών συναλλαγών της.....	18
Σχήμα 1.2 Όγκος ελέγχου γενικής περίπτωσης καύσης.....	21
Σχήμα 1.3 Παρουσίαση των διαφορετικών μεθόδων για τον υπολογισμό του ΡΕΘ σε φωτιές (Pretrel 2013).....	22
Σχήμα 1.4 Σχηματική αναπαράσταση ΦΕΚ σε διάταξη δωματίου.....	26
Σχήμα 2.1 Σκαρίφημα της πειραματικής εγκατάστασης του Parkes (Parkes 2009).....	30
Σχήμα 2.2 Πειραματική διάταξη του Parkes (Parkes 2009).....	30
Σχήμα 2.3 Θέσεις δειγματοληψίας στη βάση των δοχείων καυσίμου (Parkes 2009).....	31
Σχήμα 2.4 Σχηματική αναπαράσταση θερμοδομητηρή επίπλων (Janssens 2012).....	31
Σχήμα 2.5 Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης ενός δωματίου του Pretrel (Pretrel 2013).....	33
Σχήμα 2.6 Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης τριών δωματίων του Pretrel (Pretrel 2013).....	33
Σχήμα 3.1 Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης των πειραμάτων A1-B9.....	35
Σχήμα 3.2 Γεωμετρία ανοίγματος στα πειράματα.....	36
Σχήμα 3.3 Το δοχείο που χρησιμοποιήθηκε.....	37
Σχήμα 3.4 Θερμοστοιχείο τύπου K.....	38
Σχήμα 3.5 Αρχή λειτουργίας θερμοστοιχείου.....	38
Σχήμα 3.6 Μετρητής ροής θερμότητας (Hukseflux Thermal Sensors B.V. 2011).....	39
Σχήμα 3.7 Ο υδρόψυκτος μετρητής ροής θερμότητας.....	40
Σχήμα 3.8 Χαρακτηριστικά ενός μετρητή ροής θερμότητας.....	40
Σχήμα 3.9 Η δυναμοκυψέλη τοποθετημένη σε φλάντζα.....	41
Σχήμα 3.10 Σχηματική αναπαράσταση του αναλυτή αερίων.....	43
Σχήμα 3.11 Καμπύλες μάζας καυσίμου-δοχείου στα πειράματα A1 και A2.....	45
Σχήμα 3.12 Γραφική αναπαράσταση των συγκεντρώσεων O ₂ , CO, CO ₂ στο πείραμα A1.....	46
Σχήμα 3.13 Γραφική αναπαράσταση των συγκεντρώσεων O ₂ , CO, CO ₂ στο πείραμα A2.....	47
Σχήμα 3.14 Ρυθμός απώλειας μάζας καυσίμου για το πείραμα A1.....	48
Σχήμα 3.15 Σύγκριση του ΡΕΘ μεταξύ των μεθόδων C1,C2,C3,M,E για το πείραμα A1.....	49
Σχήμα 3.16 Σύγκριση του ΡΕΘ μεταξύ των μεθόδων I1,I2,I3,M,E για το πείραμα A1.....	50
Σχήμα 3.17 Ρυθμός απώλειας μάζας καυσίμου για το πείραμα A2.....	51
Σχήμα 3.18 Σύγκριση του ΡΕΘ μεταξύ των μεθόδων C1,C2,C3,M,E για το πείραμα A2.....	52
Σχήμα 3.19 Σύγκριση του ΡΕΘ μεταξύ των μεθόδων I1,I2,I3,M,E για το πείραμα A2.....	53
Σχήμα 3.20 Καμπύλες απώλειας μάζας καυσίμου-δοχείου στα πειράματα A3, A4 και A5.....	55
Σχήμα 3.21 Γραφική αναπαράσταση των συγκεντρώσεων αερίων του πειράματος A5.....	56
Σχήμα 3.22 Ρυθμός απώλειας μάζας καυσίμου για το πείραμα A3.....	57
Σχήμα 3.23 Ρυθμός απώλειας μάζας καυσίμου για το πείραμα A4.....	58
Σχήμα 3.24 Ρυθμός απώλειας μάζας καυσίμου για το πείραμα A5.....	59
Σχήμα 3.25 Σύγκριση του ΡΕΘ μεταξύ των μεθόδων C1,C2,C3,M,E για το πείραμα A5.....	60
Σχήμα 3.26 Σύγκριση του ΡΕΘ μεταξύ των μεθόδων I1,I2,I3,M,E για το πείραμα A5.....	61
Σχήμα 3.27 Καμπύλες μάζας καυσίμου-δοχείου στα πειράματα A6 και B7.....	63
Σχήμα 3.28 Γραφική αναπαράσταση των συγκεντρώσεων αερίων του πειράματος A6.....	64
Σχήμα 3.29 Γραφική αναπαράσταση των συγκεντρώσεων αερίων του πειράματος B7.....	64

Σχήμα 3.30 Ρυθμός απώλειας μάζας καυσίμου για το πείραμα Α6.....	65
Σχήμα 3.31 Σύγκριση του ΡΕΘ μεταξύ των μεθόδων C1,C2,C3,M,E για το πείραμα Α6.	66
Σχήμα 3.32 Σύγκριση του ΡΕΘ μεταξύ των μεθόδων I1,I2,I3,M,E για το πείραμα Α6.....	67
Σχήμα 3.33 Ρυθμός απώλειας μάζας καυσίμου για το πείραμα Β7.....	68
Σχήμα 3.34 Σύγκριση του ΡΕΘ μεταξύ των μεθόδων C1,C2,C3,M,E για το πείραμα Β7.	69
Σχήμα 3.35 Σύγκριση του ΡΕΘ μεταξύ των μεθόδων I1,I2,I3,M,E για το πείραμα Β7.....	70
Σχήμα 3.36 Καμπύλες μάζας καυσίμου-δοχείου στα πειράματα Α8 και Β9.	72
Σχήμα 3.37 Γραφική αναπαράσταση των συγκεντρώσεων αερίων του πειράματος Α8.	73
Σχήμα 3.38 Γραφική αναπαράσταση των συγκεντρώσεων αερίων του πειράματος Β9.	73
Σχήμα 3.39 Ρυθμός απώλειας μάζας καυσίμου για το πείραμα Α8.....	74
Σχήμα 3.40 Σύγκριση του ΡΕΘ μεταξύ των μεθόδων C1,C2,C3,M,E για το πείραμα Α8.	75
Σχήμα 3.41 Σύγκριση του ΡΕΘ μεταξύ των μεθόδων I1,I2,I3,M,E για το πείραμα Α8.....	76
Σχήμα 3.42 Ρυθμός απώλειας μάζας καυσίμου για το πείραμα Β9.....	77
Σχήμα 3.43 Σύγκριση του ΡΕΘ μεταξύ των μεθόδων C1,C2,C3,M,E για το πείραμα Β9.	78
Σχήμα 3.44 Σύγκριση του ΡΕΘ μεταξύ των μεθόδων I1,I2,I3,M,E για το πείραμα Β9.....	79
Σχήμα 4.1 Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης των πειραμάτων D1 και D2.....	82
Σχήμα 4.2 Επίπεδο θερμοστοιχείο.....	83
Σχήμα 4.3 Μόνωση επίπεδου θερμοστοιχείου.	83
Σχήμα 4.4 Επίπεδο θερμοστοιχείο κατά τη διάρκεια συναρμολόγησης του.	83
Σχήμα 4.5 Σχηματική αναπαράσταση εύρεσης ύψους φλόγας.	84
Σχήμα 4.6 Καμπύλες μάζας καυσίμου-δοχείου στα πειράματα D1 και D2.....	86
Σχήμα 4.7 Σχεδίαση του χώρου που έγινε το πείραμα D1 και της διάταξη των μετρητικών συσκευών.	87
Σχήμα 4.8 Σκαριφήμα του χώρου που έγινε το πείραμα D1 και της διάταξη των μετρητικών συσκευών.	87
Σχήμα 4.9 Πλάγια όψη σκαριφήματος του χώρου που έγινε το πείραμα D1 και της διάταξη των μετρητικών συσκευών.	87
Σχήμα 4.10 Κάτοψη σκαριφήματος του χώρου που έγινε το πείραμα D1 και της διάταξη των μετρητικών συσκευών.	88
Σχήμα 4.11 Θερμοκρασιακό προφίλ του δέντρου των θερμοστοιχείων του πειράματος D1.	89
Σχήμα 4.12 Σύγκριση της μέτρησης των επίπεδων θερμοστοιχείων με τα θερμοστοιχεία τύπου Κ στις αντίστοιχες θέσεις στο πείραμα D1.....	90
Σχήμα 4.13 Σχεδίαση σε πρόγραμμα SolidWorks 2011 του χώρου που έγινε το πείραμα D2 και της διάταξη των μετρητικών συσκευών.....	91
Σχήμα 4.14 Πρόοψη σκαριφήματος του χώρου που έγινε το πείραμα D1 και της διάταξη των μετρητικών συσκευών.	91
Σχήμα 4.15 Πλάγια όψη σκαριφήματος του χώρου που έγινε το πείραμα D1 και της διάταξη των μετρητικών συσκευών.	91
Σχήμα 4.16 Κάτοψη σκαριφήματος του χώρου που έγινε το πείραμα D1 και της διάταξη των μετρητικών συσκευών.	91
Σχήμα 4.17 Θερμοκρασιακό προφίλ του δέντρου των θερμοστοιχείων του πειράματος D2.	92
Σχήμα 4.18 Σύγκριση της μέτρησης των επίπεδων θερμοστοιχείων με τα θερμοστοιχεία τύπου Κ στις αντίστοιχες θέσεις στο πείραμα D2.....	93
Σχήμα 4.19 Αξονικό προφίλ θερμοκρασιών για τα πειράματα D1 και D2.	94

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1.1 Ενθαλπίες σχηματισμού μορίων που υπάρχουν στα αντιδρώντα και στα προϊόντα.	19
Πίνακας 1.2 Αντιστοιχία των μεθόδων υπολογισμού ΡΕΘ με σύμβολα.	24
Πίνακας 1.3 Περιπτώσεις υπολογισμού του λόγου ισοδυναμίας αέρα καυσίμου με τη μέθοδο κατανάλωσης οξυγόνου.	27
Πίνακας 1.4 Περιπτώσεις υπολογισμού του ΡΕΘ με τη μέθοδο κατανάλωσης οξυγόνου.	27
Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά των πειραμάτων που διεξήχθησαν.	34
Πίνακας 3.2 Διαστάσεις κατασκευής.	36
Πίνακας 3.3 Διαστάσεις ανοίγματος.	36
Πίνακας 3.4 Θερμοχημικές ιδιότητες εξανίου.	37
Πίνακας 3.7 Γραμμική προσέγγιση για τις καμπύλες μάζας καυσίμου-δοχείου πειραμάτων Α1, Α2.	45
Πίνακας 3.8 Μέγιστες-ελάχιστες τιμές των μετρήσεων O ₂ , CO ₂ , CO στα πειράματα Α1 και Α2.	46
Πίνακας 3.9 Γραμμική προσαρμογή για τις καμπύλες μάζας καυσίμου-δοχείου, πειραμάτων Α3, Α4.	55
Πίνακας 3.10 Μέγιστες-ελάχιστες τιμές των συγκεντρώσεων αερίων στο πείραμα Α5.	56
Πίνακας 3.11 Γραμμική προσαρμογή για τις καμπύλες μάζας καυσίμου-δοχείου πειραμάτων Α6, Β7.	63
Πίνακας 3.12 Μέγιστες-ελάχιστες τιμές των μετρήσεων O ₂ , CO ₂ , CO στα πειράματα Α6 και Β7.	63
Πίνακας 3.13 Γραμμική προσαρμογή των καμπυλών μάζας καυσίμου-δοχείου πειραμάτων Α8, Β9.	72
Πίνακας 3.14 Μέγιστες-ελάχιστες τιμές των μετρήσεων O ₂ , CO ₂ , CO στα πειράματα Α6 και Β7.	72
Πίνακας 3.15 Θερμότητα που εκλύεται κατά την καύση υπολογισμένη με όλες τις μεθόδους.	79
Πίνακας 3.16 Μέσος ΡΕΘ κατά την καύση υπολογισμένος με όλες τις μεθόδους.	80
Πίνακας 3.17 Ποσοστιαίες αποκλίσεις των μεθόδων υπολογισμού του ΡΕΘ.	80
Πίνακας 4.1 Σύγκριση θεωρητικού με πραγματικού χρόνου καύσης και ύψος φλόγας για τα πειράματα D1, D2.	86
Πίνακας 4.2 Γραμμική προσαρμογή των καμπυλών μάζας καυσίμου-δοχείου πειραμάτων D1, D2.	86
Πίνακας 4.3 Τιμές των σταθερών της λογαριθμικής προσέγγισης των περιοχών της φλόγας του πειράματος D1.	93
Πίνακας 4.4 Τιμές των σταθερών της λογαριθμικής προσέγγισης των περιοχών της φλόγας του πειράματος D2.	94

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την καθηγήτρια μου, κ. Μαρία Φούντη που χωρίς την εμπιστοσύνη που μου έδειξε για τη διεξαγωγή της συγκεκριμένης μελέτης θα ήταν αδύνατη η ολοκλήρωσή της. Στη συνέχεια θέλω να ευχαριστήσω την υποψήφια διδακτορικό Ελένη-Μαρίνα Ασιμακοπούλου που δεν σταμάτησε ποτέ να με ενθαρρύνει και να με διορθώνει όποτε αυτό ήταν απαραίτητο με τις υπομονετικές υποδείξεις της και για όλο το χρόνο που αφιέρωσε για μένα. Σημαντική συνεισφορά είχε ο μετα-διδακτορικός συνεργάτης κ. Διονύσης Κολαΐτης που με τις πολύπειρες καθοδηγήσεις του με βοήθησε σε δύσκολες πτυχές της μελέτης. Τον τεχνικό του εργαστηρίου Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης, κ. Χαράλαμπο Μαυράκη για τη βοήθεια του στην κατασκευή της πειραματικής διάταξης και τις γόνιμες ιδέες του σε όλη τη διάρκεια των πειραμάτων και φυσικά, όλους τους συναδέλφους στο εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης για τις χρήσιμες συμβουλές τους. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου που με στήριξαν ψυχολογικά στις δύσκολες στιγμές και τους φίλους μου που ήταν δίπλα μου όλον αυτό τον καιρό. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ένα πολύ κοντινό μου πρόσωπο που έδειξε αμέτρητη υπομονή απέναντι μου και με υποστήριζε ακόμα και σε στιγμές που ήταν σχεδόν ανέφικτο.

Περίληψη

Οι πυρκαγιές μπορούν να χωριστούν σε δύο ομάδες, ανοιχτού και κλειστού τύπου, ανάλογα. Οι φωτιές χωρίζονται σε δύο μεγάλες ομάδες, ανοιχτού και κλειστού τύπου, ανάλογα με τη γεωμετρία του χώρου στον οποίο λαμβάνουν χώρα (W. D. Thomas 2002). Φωτιές κλειστού τύπου θεωρούνται οι φωτιές σε κλειστούς χώρους, και ειδική κατηγορία αυτών αποτελούν οι Φλόγες Εξερχόμενες από Κτίριο (ΦΕΚ) οι οποίες προκύπτουν όταν η φωτιά στο εσωτερικό ενός δωματίου λόγω συνθηκών μη επαρκούς αερισμού εξέρχεται μέσω ανοιγμάτων προς την πρόσοψη του κτιρίου. Προκειμένου να μπορεί να εξασφαλισθεί η αποτελεσματικότερη πρόληψη τους είναι σημαντικό να διερευνηθούν τα θεμελιώδη φυσικά φαινόμενα που διέπουν τις ΦΕΚ καθώς και οι παράγοντες που επηρεάζουν την εξέλιξή τους. Για τη μελέτη αυτών των περιπτώσεων είναι απαραίτητη η γνώση ορισμένων βασικών μεγεθών όπως οι θερμοκρασίες σε διάφορα σημεία, ο Ρυθμός Έκλυσης Θερμότητας (ΡΕΘ), οι συγκεντρώσεις τοξικών αερίων και οξυγόνου καθώς και ο ρυθμός απώλειας μάζας του καυσίμου. Στη λογική αυτή διεξήχθησαν δύο σειρές πειραμάτων στο Εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Δόθηκε έμφαση στην διερεύνηση της επίδρασης των συνθηκών αερισμού και για αυτό το λόγο διενεργήθηκε μια σειρά πειραμάτων σε διάταξη δωματίου πρόσοψης μεσαίας κλίμακας και παράλληλα τα ίδια πειράματα επαναλήφθηκαν σε ανοιχτό χώρο. Διενεργήθηκε μια σειρά ρεαλιστικών σεναρίων πυρκαγιάς και παραμετρική μελέτη μεταβάλλοντας έναν αριθμό παραμέτρων, όπως το φορτίο φωτιάς, η γεωμετρία του ανοίγματος και το ύψος του δοχείου καυσίμου σε σχέση με το άνοιγμα. Αξιολογήθηκαν οι διάφορες μεθοδολογίες για την εκτίμηση του ΡΕΘ και παρουσιάζεται μια συστηματική ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Abstract

Fires can be divided in two groups, enclosed and open air, depending on whether the fire is confined in an enclosed space, commonly thought of as rooms in buildings (W. D. Thomas 2002). In a fully developed, under-ventilated compartment fire, Externally Venting Flames (EVF) may spill out of external openings should the glazing fail. EVF may significantly increase the risk of fire spreading to adjacent floors or buildings. The main scope of the current study is to investigate the fundamental physical phenomena associated with EVF and the factors influencing its development. Two series of fire experiments are conducted in the vicinity of Laboratory of Heterogeneous Mixtures and Combustion Systems at the National Technical University of Athens, aiming to describe EVF characteristics; the first one conducted in a medium-scale compartment façade configuration and the second one conducted in open air conditions. Investigation of the dynamic behaviour of EVF is carried out using an extensive sensor networking allowing monitoring of important physical parameters, such as Heat Release Rate (HRR), fuel mass loss rate and species concentrations. A range of realistic fire scenarios are tested and a parametric study was performed varying a number of parameters such as fire load, opening and fuel height in relation to the opening. Various methodologies for the estimation of HRR are assessed and a systematic analysis of the results is presented.

Πρόλογος

Οι φωτιές χωρίζονται σε δύο μεγάλες ομάδες (ανοιχτού και κλειστού τύπου) ανάλογα με τη γεωμετρία του χώρου στον οποίο λαμβάνουν χώρα (W. D. Thomas 2002). Φωτιές κλειστού τύπου θεωρούνται οι φωτιές σε κλειστούς χώρους, συνήθως δωμάτια σε κτήρια. Αντίθετα, φωτιές ανοιχτού τύπου θεωρούνται οι φωτιές σε επαρκώς αεριζόμενους χώρους που ο παράγοντας εγκλεισμού δεν είναι σημαντικός. Συνήθης ομάδα αυτής της κατηγορίας είναι οι κηλίδες καυσίμου. Για τη μελέτη αυτών των περιπτώσεων είναι απαραίτητη η γνώση ορισμένων βασικών μεγεθών της φωτιάς όπως οι θερμοκρασίες σε διάφορα σημεία, ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας (PEΘ) ή όπως είναι διεθνώς γνωστός με τον όρο Heat Release Rate (HRR), η κατανάλωση οξυγόνου και παραγωγή τοξικών αναθυμιάσεων. Για τη μέτρηση αυτών των μεγεθών έχουν προταθεί πειράματα υπό κλίμακα που προσεγγίζουν επαρκώς μια πραγματική φλόγα και η χρήση κατάλληλων μετρητικών οργάνων. Στη λογική αυτή διεξήχθησαν δύο σειρές πειραμάτων στο εργαστήριο καύσης και ετερογενών μιγμάτων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η πρώτη σειρά πειραμάτων προσομοίωσε φωτιές κλειστού τύπου ενώ η δεύτερη σειρά ανοιχτού.

Στο πρώτο κεφάλαιο αναπτύσσεται ο στόχος της μελέτης αυτής. Στη συνέχεια διασαφηνίζεται η διαφοροποίηση του φαινομένου της καύσης σε ατελή και τέλεια. Έπειτα αναλύονται οι μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό του PEΘ και ορίζεται ο ρυθμός απώλειας μάζας καυσίμου. Στο τέλος του κεφαλαίου αναπτύσσεται ο τρόπος υπολογισμού του PEΘ με χρήση της μεθόδου κατανάλωσης οξυγόνου.

Στο δεύτερο κεφάλαιο πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση των ήδη υπαρχόντων πειραματικών μελετών με έμφαση στην παρουσίαση αυτών που επικεντρώνονται στον τρόπο τοποθέτησης των αναλυτών αερίων όπως επίσης και σε όσους χρησιμοποίησαν στις μελέτες τους τη μέθοδο κατανάλωσης οξυγόνου για τον υπολογισμό του PEΘ.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η πρώτη σειρά πειραμάτων κλειστού τύπου ως προς την πειραματική διάταξη, τον τρόπο τοποθέτησης των μετρητικών διατάξεων και γίνεται η χημική ανάλυση του καυσίμου των συγκεκριμένων πειραμάτων. Επακόλουθα γίνεται η ομαδοποίηση των πειραμάτων σε κατηγορίες ανάλογα με τον παράγοντα που μελετήθηκε στο κάθε πείραμα και γίνεται η γραφική παρουσίαση του PEΘ, του ρυθμού απώλειας μάζας καυσίμου και των συγκεντρώσεων των καυσαερίων για κάθε πείραμα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναπτύσσεται η δεύτερη σειρά πειραμάτων ανοιχτού τύπου ως προς την πειραματική διάταξη, τον τρόπο τοποθέτησης των μετρητικών διατάξεων και γίνεται ο υπολογισμός του θεωρητικού ύψους φλόγας, του θεωρητικού χρόνου καύσης και του ρυθμού απώλειας μάζας του καυσίμου. Στη συνέχεια γίνεται η γραφική παρουσίαση του θερμοκρασιακού προφίλ για τα θερμοστοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα αυτά.

Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο παραθέτονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τα αποτελέσματα των δύο σειρών πειραμάτων και προτείνονται τρόποι βελτίωσης των πειραμάτων αυτών σε μελλοντικές μελέτες.

Abstract

Fires divide into two big groups (open and closed type) depending on the geometry of the place that the fire takes place (W. D. Thomas 2002). Closed type fires are considered fires in closed places, usually rooms in buildings. Unlike closed, open type fires are considered fires in well-ventilated places where enclosing factor is insignificant. Pool fires are the most usual group of this category. For the research of those cases the knowledge of certain basic variables of fire is necessary such as temperature in several points, heat release rate (HRR), oxygen consumption and after gas production. For the measurement of those variables scale experiments have been proposed that approximate sufficiently a real flame and the use of suitable gauges. In this logic two experimental series in the laboratory of combustion and heterogeneous mixtures of National Technical Institute of Athens were conducted. The first experimental series were closed type where the second were open.

In the first chapter, the aim and methodology of this research which were used for the definition of HRR were developed. Subsequently the separation of the combustion phenomenon to incomplete and complete is clarified. Afterwards the methodologies used in order to define HRR are analyzed and the mass loss rate is defined. In the end of the chapter the HRR calculation method with the oxygen consumption method is developed.

In the second chapter a literature review of existing experimental studies is performed given emphasis in the presentation of those who focus on the way gas analyzers are placed as well as on those who used the oxygen consumption method in order to calculate HRR in their studies.

In the third chapter the first experimental series closed type is described in terms of experimental setup, measuring setup and chemical analysis of the fuel used in the experiments is described. Afterwards there is a separation of the experiments in categories depending on the factor which was studied in each experiment and also a schematic of HRR, of mass loss rate and the concentration of gases for each of the experiments.

In the fourth chapter the second experimental series closed type is described in terms of experimental setup, measuring setup and there is a calculation of the theoretical flame height, the theoretical combustion time and the mass loss rate of the fuel. Subsequently there is a presentation of the temperature profile of the thermocouples that were used in these experiments.

Finally, in the fifth chapter a conclusion extracted from the results of the two series of experiments is presented and ways to improve these experiments in future studies were suggested.

Περιεχόμενα

Κατάλογος σχημάτων.....	3
Κατάλογος πινάκων.....	5
Ευχαριστίες	6
Πρόλογος.....	8
Abstract	9
Περιεχόμενα.....	10
1 Θεωρητικό μέρος	14
1.1 Σκοπός της μελέτης	14
1.2 Μεθοδολογία υπολογισμού ΡΕΘ	14
1.2.1 Φωτιά κηλίδας καυσίμου.....	15
1.2.2 Τέλεια καύση.....	16
1.2.3 Ατελής καύση	16
1.2.4 Ρυθμός απώλειας μάζας και ΡΕΘ.....	17
1.3 Εφαρμογή της μεθόδου κατανάλωσης οξυγόνου για τον υπολογισμό του ΡΕΘ	19
2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	23
2.1 Thornton και Huggett – Θεμελιωτές της μεθόδου	23
2.2 Parkes – Μετρητές αερίων δίπλα από δοχείο καυσίμου	23
2.3 Janssens – Μετρητής αερίων στον αγωγό εξόδου καυσαερίων	25
2.4 Kloronic – μετρητές αερίων στη οροφή και δίπλα στο άνοιγμα δωματίου	26
2.5 Pretrel – ταξινόμηση μεθόδων υπολογισμού ΡΕΘ	26
3 Πειράματα κλειστού τύπου A1-B9.....	28
3.1 Περιγραφή πειραμάτων.....	29
3.1.1 Πειραματική διάταξη	29
3.1.2 Δοχείο καυσίμου	31
3.1.3 Μετρητικές διατάξεις.....	33
3.2 Επαναληψιμότητα.....	40
3.2.1 Περιγραφή.....	40
3.2.2 Απώλεια μάζας καυσίμου	40
3.2.3 Συγκεντρώσεις O_2 , CO_2 , CO	41
3.2.4 Πείραμα A1.....	43
3.2.5 Πείραμα A2.....	46
3.3 Ισχύς φωτιάς	50

3.3.1 Περιγραφή.....	50
3.3.2 Απώλεια μάζας καυσίμου	50
3.3.3 Συγκεντρώσεις O ₂ ,CO ₂ ,CO	51
3.3.4 Πείραμα A3.....	52
3.3.5 Πείραμα A4.....	53
3.3.6 Πείραμα A5.....	54
3.4 Αερισμός μέσω ανοίγματος	58
3.4.1 Περιγραφή.....	58
3.4.2 Απώλεια μάζας καυσίμου	58
3.4.3 Συγκεντρώσεις O ₂ ,CO ₂ ,CO	59
3.4.4 Πείραμα A6.....	61
3.4.5 Πείραμα B7.....	63
3.5 Κεντρικός Άξονας Εξωτερικού Πλουμίου Φωτιάς.....	67
3.5.1 Περιγραφή.....	67
3.5.2 Απώλεια μάζας καυσίμου	67
3.5.3 Συγκεντρώσεις O ₂ ,CO ₂ ,CO	68
3.5.4 Πείραμα A8.....	70
3.5.5 Πείραμα B9.....	72
3.6 Αναλυτική παρουσίαση αποτελεσμάτων	75
4 Πειράματα ανοιχτού τύπου D1-D2	77
4.1 Περιγραφή.....	77
4.1.1 Πειραματική διάταξη	77
4.1.2 Δοχείο καυσίμου	78
4.1.3 Μετρητικές διατάξεις.....	78
4.2 Θεωρητικό ύψος φλόγας	80
4.3 Θεωρητικός χρόνος καύσης	81
4.4 Απώλεια μάζας καυσίμου	82
4.5 Πείραμα D1	83
4.5.1 Θερμοκρασίες	84
4.5.2 θερμοκρασίες επίπεδων θερμοστοιχείων	85
4.6 Πείραμα D2	86
4.6.1 Θερμοκρασίες	88
4.6.2 θερμοκρασίες επίπεδων θερμοστοιχείων	88
4.7 Αξονικό προφίλ θερμοκρασιών	89

5 Γενικά Συμπεράσματα.....	91
Βιβλιογραφία	93

Κεφάλαιο 1^ο

1 Θεωρητικό μέρος

‘Το ανθρώπινο γένος, που το αποτελούσαν ατελέστατα όντα, πολεμούσε μαζί με τον Προμηθέα εναντίον του Δία. Μετά τη νίκη των θεών, ο Προμηθέας έκλεψε τη φωτιά και τη δώρισε στους ανθρώπους. Για την πράξη του αυτή, οι θεοί τον τιμώρησαν ως εξής: ο Ήφαιστος τον έδεσε με αλυσίδες σε μια κορυφή του Καύκασου, ενώ με διαταγή του Δία ένας αετός κατάτρωγε όλη τη μέρα το συκώτι του, το οποίο όμως ανανεωνόταν τη νύχτα. Η τιμωρία που είχε καθοριστεί να είναι αιώνια, έληξε με το φόνο του αετού από τον Ηρακλή. Σύμφωνα με το μύθο, έπρεπε κάποιος να κληρονομήσει το βασανισμό από τον ελευθερωμένο Προμηθέα. Αυτός ήταν ο Κένταυρος Χείρων, στον οποίο ο Ηρακλής άνοιξε αιώνια πληγή άθελά του με ένα δηλητηριασμένο βέλος. Ο Προμηθέας ωστόσο φορούσε από τότε πάντα στο κεφάλι στεφάνι και στο δάχτυλο σιδερένιο δαχτυλίδι, σύμβολα πλήρους υποταγής στο Δία. Ο Προμηθέας λατρευόταν στην Αθήνα ως θεός της φωτιάς.’ (Προμηθέας n.d.)

1.1 Σκοπός της μελέτης

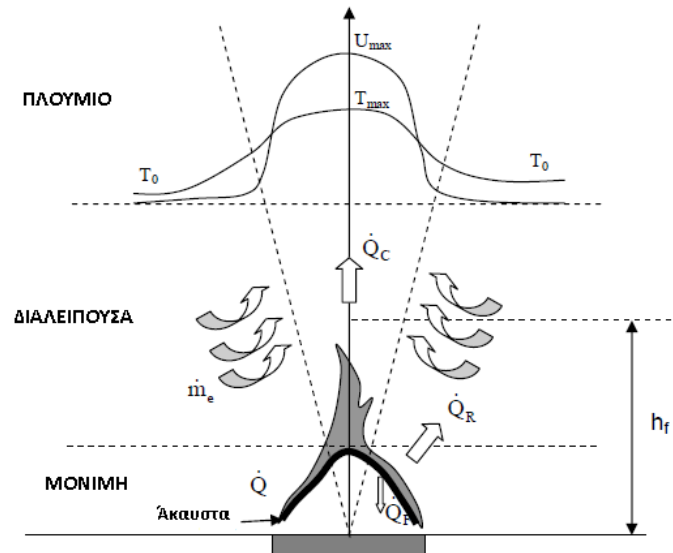
Σκοπός της συγκεκριμένης μελέτης η μελέτη των Φωτιών Εξερχομένων από Κτίρια (ΦΕΚ) οι οποίες προκύπτουν όταν η φωτιά στο εσωτερικό ενός δωματίου λόγω συνθηκών μη επαρκούς αερισμού εξέρχεται μέσω ανοιγμάτων προς την πρόσοψη του κτιρίου. Προκειμένου να μπορεί να εξασφαλισθεί η αποτελεσματικότερη πρόληψη τους είναι σημαντικό να διερευνηθούν τα θεμελιώδη φυσικά φαινόμενα που διέπουν τις ΦΕΚ καθώς και οι παράγοντες που επηρεάζουν την εξέλιξή τους. Για τη μελέτη αυτών των περιπτώσεων είναι απαραίτητη η γνώση ορισμένων βασικών μεγεθών όπως οι θερμοκρασίες σε διάφορα σημεία, ο Ρυθμός Έκλυσης Θερμότητας (ΡΕΘ), οι συγκεντρώσεις τοξικών αερίων και οξυγόνου καθώς και ο ρυθμός απώλειας μάζας του καυσίμου.

Στη λογική αυτή διεξήχθησαν δύο σειρές πειραμάτων στο Εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Δόθηκε έμφαση στην διερεύνηση της επίδρασης των συνθηκών αερισμού και για αυτό το λόγο διενεργήθηκε μια σειρά πειραμάτων σε διάταξη δωματίου πρόσοψης μεσαίας κλίμακας από τον Κωνσταντίνο Χοτζόγλου (Χοτζόγλου 2013) και παράλληλα τα ίδια πειράματα επαναλήφθηκαν σε ανοιχτό χώρο. Διενεργήθηκε μια σειρά ρεαλιστικών σεναρίων πυρκαγιάς και παραμετρική μελέτη μεταβάλλοντας έναν αριθμό παραμέτρων, όπως το φορτίο φωτιάς, η γεωμετρία του ανοίγματος και το ύψος του δοχείου καυσίμου σε σχέση με το άνοιγμα. Αξιολογήθηκαν οι διάφορες μεθοδολογίες για την εκτίμηση του ΡΕΘ και παρουσιάζεται μια συστηματική ανάλυση των αποτελεσμάτων.

1.2 Φωτιά κηλίδας καυσίμου

Πολλές περιπτώσεις καύσης μπορεί να χαρακτηριστούν ως φωτιές κηλίδας καυσίμου. Αυτές συμπεριλαμβάνουν εύρη σε μέγεθος από αναπτήρα, όπου η διάμετρος (D) είναι προσεγγιστικά 10^{-3} m, μέχρι φωτιά σε δάσος όπου η διάμετρος μπορεί να είναι μεγαλύτερη από 10^5 m. Η φωτιά κηλίδας καυσίμου χαρακτηρίζεται ως φωτιά έντονης διάχυσης στην

οποία το καύσιμο κατανέμεται οριζόντια. Αν και η ονομασία παραπέμπει σε υγρό καύσιμο, παρόλα αυτά θα μπορούσε να είναι και αέριο ή στερεό. Το καύσιμο μπορεί να είναι κατανεμημένο σε ακανόνιστη γεωμετρία, αλλά για απλότητα, στις περισσότερες μελέτες γίνεται η θεώρηση κυκλικής κατανομής η οποία χαρακτηρίζεται από μία γεωμετρική παράμετρο, τη διάμετρο (D). Στο Σχήμα 1.2 φαίνεται μια τυπική περίπτωση φωτιάς κηλίδας καυσίμου όπως επίσης και οι συναλλαγές μάζας και ενέργειας με το περιβάλλον.

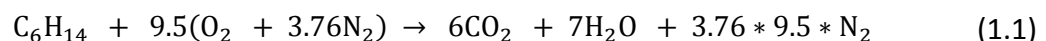


Σχήμα 1.1 Σχηματική παράσταση τυπικής φωτιάς κηλίδας καυσίμου και των ενεργειακών συναλλαγών της.

1.2.1 Τέλεια καύση εξανίου

Η παραδοχή της τέλει καύσης είναι στις περισσότερες περιπτώσεις καύσης μία ιδεατή περίπτωση και δεν αποδίδει σε καμία περίπτωση το φαινόμενο με ακρίβεια. Παρόλα αυτά σε μερικές περιπτώσεις οι συνθήκες καύσης πλησιάζουν σε υψηλό βαθμό αυτής της τέλει καύσης με αποτέλεσμα να είναι μία εύκολη και γρήγορη μέθοδος για μια καλή προσέγγιση του προβλήματος.

Στην παρούσα πειραματική μελέτη δεν ήταν εξαρχής ξεκάθαρο αν οι συνθήκες που δημιουργήθηκαν κατά την εκτέλεση των πειραμάτων ήταν ικανές για να απορριφθεί η προσέγγιση τέλει καύσης και για το λόγο αυτό μελετήθηκαν και οι δύο τρόποι ώστε να γίνει εφικτή η αριθμητική σύγκριση των δύο περιπτώσεων ώστε να εξαχθούν τα ανάλογα συμπεράσματα. Η εξίσωση καύσης του εξανίου για την τέλεια καύση φαίνεται στην εξίσωση (1.1):



Με τη βοήθεια της εξίσωσης καύσης είναι εύκολο να υπολογιστεί η ενθαλπία σχηματισμού του εξανίου, στη συγκεκριμένη περίπτωση ισούται με τον ΡΕΘ κατά την καύση εξίσωση (1.2).

$$\Delta H = (6\Delta H_{f,CO_2} + 7\Delta H_{f,H_2O} + 3.76 * 9.5 * \Delta H_{f,N_2}) - (\Delta H_{f,hex} + 9.5\Delta H_{f,O_2} + 9.5 * 3.76 * \Delta H_{f,N_2}) \quad (1.2)$$

Οι τιμές των ενθαλπιών σχηματισμού σε θερμοκρασία 25°C (V. Babrauskas 1991) δίνονται στον Πίνακα 1.1.

$\Delta H_{f,CO_2}$ (kJ/mol)	$\Delta H_{f,CO}$ (kJ/mol)	$\Delta H_{f,O_2}$ (kJ/mol)	$\Delta H_{f,hex}$ (kJ/mol)	$\Delta H_{f,N_2}$ (kJ/mol)	$\Delta H_{f,H_2O}$ (kJ/mol)
-393.509	-110.525	0	-167.400	0	-241.818

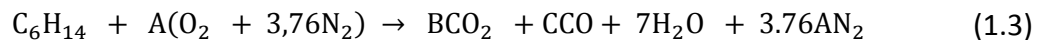
Πίνακας 1.1 Ενθαλπίες σχηματισμού μορίων που υπάρχουν στα αντιδρώντα και στα προϊόντα.

Άρα η ενέργεια που απελευθερώνεται κατά την τέλεια καύση εξανίου είναι ίση με:

$$\Delta H = 45.19 \text{ KJ/g}$$

1.2.2 Ατελής καύση εξανίου

Η εξίσωση καύσης του εξανίου για την τέλεια καύση φαίνεται παρακάτω:



Από την αρχή διατήρησης των συστατικών:

$$6 = B + C \quad (1.4)$$

$$2A = 2B + C + 7 \quad (1.5)$$

Χρειαζόμαστε μία εξίσωση ακόμα για να λυθεί το σύστημα που θα την υπολογίσουμε από τις μετρημένες ογκομετρικές συστάσεις των καυσαερίων, μέσω του αναλυτή αερίων για κάθε χρονική στιγμή.

Με χρήση της καταστατικής εξίσωσης για CO και CO₂:

$$PV_{CO} = n_{CO}RT \quad (1.6)$$

και

$$PV_{CO_2} = n_{CO_2}RT \quad (1.7)$$

Διαιρώντας κατά μέλη:

$$\frac{V_{CO}}{V_{CO_2}} 10^{-4} = \frac{n_{CO}}{n_{CO_2}} = \frac{C}{B} \quad (1.8)$$

Όπου:

V_{CO} : σε (ppm)

V_{CO_2} : σε (L/L%)

Ο λόγος των όγκων μπορεί να υπολογιστεί καθώς έχουν μετρηθεί από τον αναλυτή αερίων οι ογκομετρικές συστάσεις του διοξειδίου και του μονοξειδίου του άνθρακα. Κι έτσι από τη λύση του συστήματος 3x3 των εξισώσεων (1.6), (1.7), (1.8) υπολογίζονται οι συντελεστές της εξίσωσης καύσης για κάθε χρονική στιγμή.

Με τη βοήθεια της εξίσωσης καύσης είναι εύκολο να υπολογίσουμε την ενθαλπία σχηματισμού του εξανίου, που όπως και στην προηγούμενη περίπτωση ισούται με τον PEΘ κατά την καύση.

$$\Delta H = (B\Delta H_{f,CO_2} + C\Delta H_{f,CO} + 7\Delta H_{f,H_2O} + 3,76A\Delta H_{f,N_2}) - (\Delta H_{f,hex} + A\Delta H_{f,O_2} + 3,76A\Delta H_{f,N_2}) \quad (1.9)$$

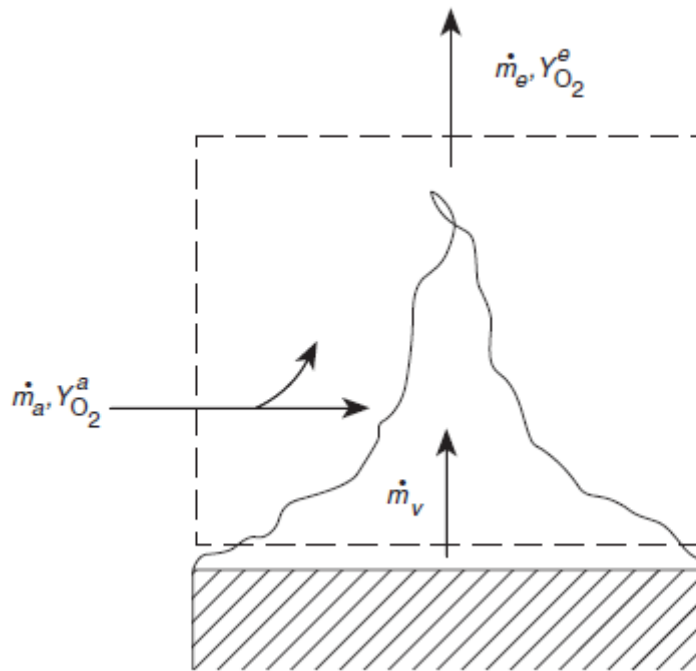
Οι τιμές των ενθαλπιών σχηματισμού σε θερμοκρασία 25°C (V. Babrauskas 1991) και δίνονται στον Πίνακα 1.1.

Άρα η ενέργεια που απελευθερώνεται κατά την ατελή καύση εξανίου είναι ίση με:

$$\Delta H = B(-393.509) + C(-110.525) + 7(-241.818) - (-167.400) \quad (1.10)$$

1.3 Μεθοδολογία υπολογισμού PEΘ

Η μελέτη της συμπεριφοράς της φωτιάς σε διαμερίσματα δεν θα ήταν εφικτή αν δεν ήταν δυνατός ο υπολογισμός του PEΘ. Το κύριο χαρακτηριστικό που δείχνει πόσο μεγάλη είναι μία φωτιά σε ένα κτήριο είναι ο PEΘ. Στη γενική περίπτωση φωτιάς γίνεται αντίδραση καύσιμης ύλης παροχής \dot{m}_v με ατμοσφαιρικό αέρα παροχής \dot{m}_e και περιεκτικότητας αέρα $Y_{O_2}^a$ σε οξυγόνο που εισχωρεί από το περιβάλλον στην περιοχή της φωτιάς με μια αναλογία μάζας που καθορίζεται από το είδος της καύσιμης ύλης και από την επάρκεια του οξυγόνου στον περιβάλλοντα χώρο. Από την αντίδραση αυτή παράγονται καυσαέρια και άκαυστη ύλη με παροχή \dot{m}_e και περιεκτικότητας $Y_{O_2}^e$ σε οξυγόνο. Για τη μελέτη αυτής της αντίδρασης απαιτείται ο εγκλεισμός του παραπάνω φαινομένου σε έναν νοητό όγκο ελέγχου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2 που θα περιέχει την καύσιμη ύλη, την περιοχή της φλόγας και τον γειτονικό χώρο γύρω από τη φλόγα όπου γίνεται και η διακίνηση του αέρα που καταναλώνεται για την αντίδραση της καύσης.



Σχήμα 1.2 Όγκος ελέγχου γενικής περίπτωσης καύσης.

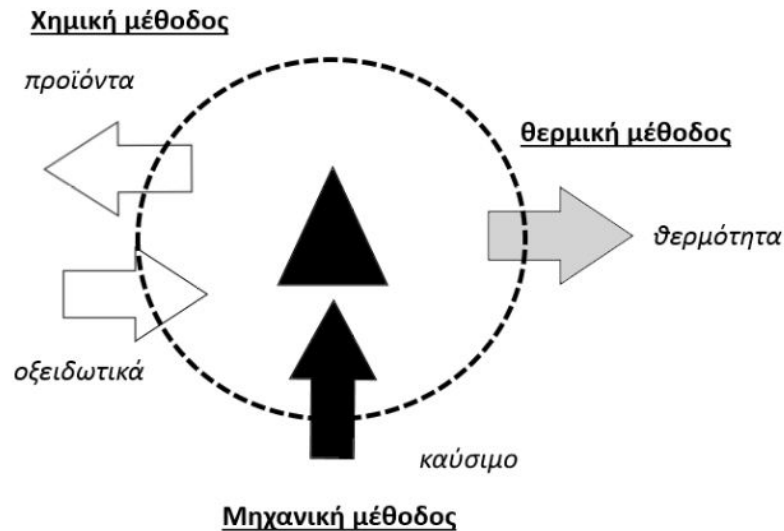
Από το Σχήμα 1.2 παρατηρείται ότι η μάζα που μετατρέπεται σε αέριο από τη διαδικασία της καύσης σε συνδυασμό με τη μάζα του αέρα που εισχωρεί στον όγκο ελέγχου, συνθέτουν την αποβαλλόμενη ποσότητα μάζας σε μορφή καυσαερίων. Η παραπάνω διαδικασία εκφράζεται αλγεβρικά με την παρακάτω εξίσωση:

$$\dot{m}_e = \dot{m}_v + \dot{m}_a \quad (1.11)$$

1.3.1 Ρυθμός απώλειας μάζας και ΡΕΘ

Ο ΡΕΘ ενός καιγόμενου αντικειμένου μετριέται σε kW. Είναι ο ρυθμός που η αντίδραση καύσης παράγει θερμότητα (V. Babrauskas 2012). Για τη μέτρηση του ΡΕΘ σε πειράματα φωτιάς χρησιμοποιούνται ευρέως τρεις μέθοδοι οι οποίες φαίνονται στο Σχήμα 1.3 (Pretrel 2013):

- Χημική
Μέτρηση των συστάσεων μέσω του αναλυτή αερίων και της παροχής των καυσαερίων αφού πρώτα έχει γίνει η συλλογή τους μέσω ενός αγωγού απαγωγής αερίων της καύσης..
- Μηχανική
Μέτρηση του ρυθμού απώλειας μάζας του καυσίμου με χρήση δυναμοκυψέλη.
- Θερμική
Μέτρηση της ροής θερμότητας με χρήση μετρητή ροής θερμότητας.



Σχήμα 1.3 Παρουσίαση των διαφορετικών μεθόδων για τον υπολογισμό του PEΘ σε φωτιές (Pretrel 2013).

1.3.1.1 Ανάλυση χημικής μεθόδου

Είναι μια ευρέως διαδεδομένη και αναγνωρισμένη μέθοδος παγκοσμίως για πρακτική και εύκολη μέτρηση του PEΘ στην καύση που χρησιμοποιείται από το 1970 με αξιόπιστα αποτελέσματα. Βασίζεται σε απλά θερμοχημικά θεωρήματα ώστε να είναι κατανοητή και εύκολη στην υλοποίηση για ευρύ φάσμα μελετητών της καύσης. Η τεχνική της μεθόδου (M. Janssens 2002) βασίζεται στον ενεργειακό ισολογισμό κατά την καύση εξίσωση (1.12).

$$\dot{q} = -\dot{m}_v H_u = (\dot{m}_a - \dot{m}_e) H_u = E(\dot{m}_a Y^a_{O_2} - \dot{m}_e Y^e_{O_2}) \quad (1.12)$$

επειδή ισχύει ότι:

$$H_u = E Y_{O_2} \quad (1.13)$$

$$\dot{q} = E(\dot{m}_a Y^a_{O_2} - \dot{m}_e Y^e_{O_2}) \quad (1.14)$$

Η έκφραση αυτή είναι χρήσιμη γιατί ο PEΘ ανά μονάδα μάζας είναι σχεδόν σταθερός για μεγάλο εύρος καυσίμων (M. Janssens 2002).

- Παρατηρήθηκε ότι για κάθε μονάδα μάζας οξυγόνου παράγεται σταθερή ποσότητα ενέργειας ίση με $E=13.1\text{KJ/g}$ οξυγόνου (Huggett 1980).
- Ογκομετρικός παράγοντας επέκτασης (α) κυμαίνεται από 1.00-1.21 και για αυτό θεωρείται μια μέση τιμή 1.105 (M. Janssens 2002).
- Βασική προϋπόθεση αυτής της μεθόδου είναι η συλλογή όλων των καυσαερίων και η μέτρηση της ροής τους σε κάποια απόσταση που έχει γίνει πλήρης ανάμειξη (M. Janssens 2002).

Μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος με μέτρηση μόνο του οξυγόνου είτε οξυγόνου, μονοξειδίου και διοξειδίου.

1.3.1.2 Ανάλυση μηχανικής μεθόδου

Η μηχανική μέθοδος βασίζεται στη σχέση μεταξύ του ΡΕΘ και της μάζας του καυσίμου. Η μέθοδος αυτή προϋποθέτει μετρήσεις για το ρυθμό απώλειας μάζας του καυσίμου και της θερμογόνου ικανότητας του καυσίμου. Η εφαρμογή της είναι εφικτή με τη μέτρηση της απώλειας μάζας καυσίμου με μια συσκευή ζύγισης με γνωστές ιδιότητες του καυσίμου (Pretrel 2013).

Η τεχνική της μεθόδου βασίζεται στον ενεργειακό ισολογισμό κατά την καύση.

$$\dot{q} = -\dot{m}_v H_u \quad (1.15)$$

Η μόνη απαίτηση μέτρησης αυτής της μεθόδου είναι η μάζα του καυσίμου για κάθε χρονικό βήμα μέσω της οποίας υπολογίζεται εύκολα ο ρυθμός απώλειας μάζας του καυσίμου. Αυτό την καθιστά μια πολύ εύκολη μέθοδο για τη μέτρηση του ΡΕΘ. Επίσης απαιτείται ο υπολογισμός της θερμότητας καύσης, η οποία ισούται με τη θερμογόνο ικανότητα στην περίπτωση της τέλει καύσης και διαφέρει λίγο στο σενάριο της ατελούς.

1.3.1.3 Ανάλυση θερμικής μεθόδου

Η μέθοδος αυτή δεν εξαρτάται από τη χημική φύση της αντιδράσεως καύσεως, αλλά βασίζεται στην ενεργειακή ισορροπία ενός συστήματος φωτιάς. Ωστόσο, αυτή η μέθοδος απαιτεί ένα συγκεκριμένο αριθμό μετρήσεων, όπως οι θερμικές ροές σε όλα τα όρια του όγκου ελέγχου της φωτιάς, ή τη θερμοκρασία του αερίου, τα οποία μπορεί να είναι δύσκολο να μετρηθούν αξιόπιστα. Για τους λόγους αυτούς, ο αριθμός των εφαρμογών δεν είναι μεγάλος.

1.3.1.4 Εμπειρική σχέση υπολογισμού ΡΕΘ

Όταν μια πυρκαγιά εμφανίζεται σε ένα ψηλό κτήριο, υπάρχει η απειλή ότι η φωτιά μπορεί να εξαπλωθεί στους επάνω ορόφους από τα ανοίγματα. Τυπικά, η εξάπλωση της φλόγας στους επάνω ορόφους οφείλεται κυρίως στην ακτινοβολία και συναγωγή από τις φλόγες στην πρόσοψη που καθορίζεται από δύο σημαντικές παραμέτρους, δηλαδή το ύψος της φλόγας και την κατανομή της θερμοκρασίας του ΦΕΚ. Οι πυρκαγιές σε κλειστούς χώρους μπορούν να χωριστούν σε δύο υποκατηγορίες, την ελεγχόμενη λόγω συνθηκών αερισμού και την ελεγχόμενη μέσω διαθεσιμότητας του καυσίμου. Ο ρυθμός παροχής αέρα (εξίωση (1.16) εξαρτάται από τον παράγοντα αερισμού $A\sqrt{H}$, ενός ανοίγματος, όπου το A (m^2) και H (m) αντιπροσωπεύουν το εμβαδόν και το ύψος του ανοίγματος αντιστοίχως. Για υπό-αεριζόμενες συνθήκες ο ρυθμός παροχής αέρα είναι:

$$\dot{m}_a = 0.133\rho_\infty A\sqrt{gH} = 0.5A\sqrt{H} \text{ σε kg/s} \quad (1.16)$$

Επιπλέον, ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας στο εσωτερικό του δωματίου για υπό-αεριζόμενες συνθήκες καθορίζεται από τη σχέση:

$$\dot{m}_a \Delta H_{ox} = 0.133 \frac{\Delta H_{ox}}{C_p T_\infty} C_p T_\infty \rho_\infty A \sqrt{gH} = 3000 * 0.5 A \sqrt{H} = 1500 A \sqrt{H} \text{ σε kW} \quad (1.17)$$

Όπου:

ΔH_{ox} : η θερμότητα που εκλύεται ανά μονάδα μάζα του αέρα που καταναλώνεται στο δωμάτιο.

\dot{m}_a : παροχή του αέρα καύσης

C_p : ειδική θερμοχωρητικότητα αέρα σε συνθήκες περιβάλλοντος

T_∞ : θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος

$A\sqrt{H}$: παράγοντας αερισμού

ρ_∞ : πυκνότητα του αέρα σε συνθήκες περιβάλλοντος

1.4 Λόγος ισοδυναμίας καυσίμου

Για να εξακριβωθεί κατά πόσο ένα μίγμα διαφέρει από τη στοιχειομετρία, χρησιμοποιείται ένα αδιάστατη ποσότητα η οποία είναι ο λόγος ισοδυναμίας ϕ (equivalence ratio). Ορίζεται ως ο λόγος του καυσίμου προς το οξειδωτικό μέσο προς την αντίστοιχη στοιχειομετρική ποσότητα και δίνεται από την (εξίσωση 1.18).

$$\phi = \frac{m_{καυσ}/m_{αερα}}{(m_{καυσ}/m_{αερα})_{στοιχ.}} = \frac{n_{καυσ}/n_{αερα}}{(n_{καυσ}/n_{αερα})_{στοιχ.}} \quad (1.18)$$

Ο λόγος του καυσίμου προς τον αέρα εκφράζεται είτε με τον λόγο των μαζών (m) είτε με το λόγο των moles (n). Με βάση αυτόν τον ορισμό, μίγματα με $\phi < 1$ θεωρούνται φτωχά σε καύσιμο, με $\phi > 1$ πλούσια σε καύσιμο και για $\phi = 1$ θεωρούνται ότι βρίσκονται στην στοιχειομετρία.

1.5 Εφαρμογή της μεθόδου κατανάλωσης οξυγόνου για τον υπολογισμό του ΡΕΘ

Από εδώ και στο εξής για λόγους συντομίας θα χρησιμοποιούνται οι συμβολισμοί που φαίνονται στον Πίνακα 1.2 όταν χρειαστεί να αναφερθούν αντίστοιχες μέθοδοι για τον υπολογισμό του ΡΕΘ.

Μέθοδος	Περιπτώσεις	Συμβολισμός
Χημική	Τέλεια [O ₂]	C1

	Τέλεια [O ₂ ,CO ₂]	C2
	Τέλεια [O ₂ ,CO ₂ ,CO]	C3
	Ατελής [O ₂]	I1
	Ατελής [O ₂ ,CO ₂]	I2
	Ατελής [O ₂ ,CO ₂ ,CO]	I3
Μηχανική	Ρυθμός απώλειας μάζας καυσίμου	M
Θερμική	Μετρητής ροής θερμότητας	HF
Εμπειρική σχέση	Εμπειρικός	E
Εκτός δωματίου	Εξωτερική = M - E	EX

Πίνακας 1.2 Αντιστοιχία των μεθόδων υπολογισμού ΡΕΘ με σύμβολα.

Για την εφαρμογή της μεθόδου κατανάλωσης οξυγόνου (χημική) για τον υπολογισμό του ΡΕΘ σε πειράματα ΦΕΚ, εφαρμόζεται μία συγκεκριμένη διαδικασία που αποτελείται από απλά βήματα, τόσο πειραματικά όσο και υπολογιστικά. Στη μέθοδο αυτή, εφαρμοσμένη σε έναν επιλεγμένο όγκο ελέγχου, ακολουθούνται συνήθως τα παρακάτω βήματα, για τον υπολογισμό του ΡΕΘ, για ένα συγκεκριμένο χρόνο δειγματοληψίας Δt:

- Γίνεται η καταγραφή της περιεκτικότητας των O₂, CO₂, CO από τον αναλυτή αερίων.
- Γίνονται οι εξής παραδοχές (Janssens 2012) σχετικά με τις περιεκτικότητες του περιβάλλοντος σε O₂, CO₂ και H₂O σε εργαστηριακές συνθήκες:

$$\chi_{O_2} = 0.21, \chi_{CO_2} = 0.0033 \text{ και } \chi_{H_2O} = 0.07$$

- Υπολογισμός του ύψους φλόγας με χρήση θερμοκάμερας. Στα πειράματα κλειστού τύπου της συγκεκριμένης μελέτης, οι τιμές του ύψους φλόγας υπολογίστηκαν με την αφαίρεση της τιμής του ύψους φλόγας, για πλάγια όψη, από τη διπλωματική εργασία της Σοφίας Κορδούλη (Κορδούλη 2014), από την απόσταση του πατώματος από το κάτω μέρος του ανοίγματος και στη συνέχεια προστέθηκε το z₀, δηλαδή το μισό του ύψους του ανοίγματος (Thomas 2002).
- Η παροχή καυσαερίων (\dot{m}_e) υπολογίζεται (Harrison 2009) σύμφωνα με την εξίσωση (1.19) από τους Lee και Emmons (Emmons 1961):

$$\dot{m}_e = C_m \left(\frac{\rho_{amb}^2 g}{C_{p,air} T_{amb}} \right)^{1/3} \dot{Q}_c^{1/3} W^{2/3} (z + z_0) \quad (1.19)$$

Όπου:

C_m: σταθερά αερισμού (0,44 για πόρτα και 0,32 για παράθυρο)

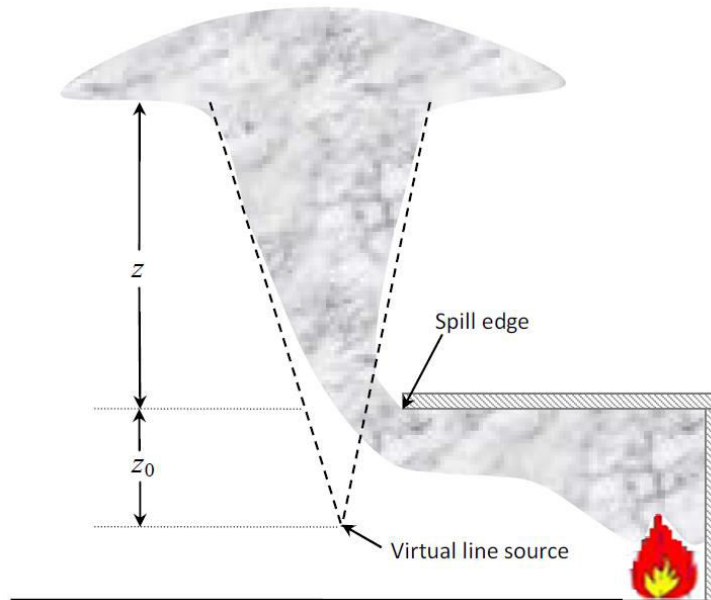
ρ_{amb}: πυκνότητα του αέρα σε συνθήκες περιβάλλοντος

C_{p,air}: ειδική θερμοχωρητικότητα αέρα σε συνθήκες περιβάλλοντος

Q_c : θερμότητα λόγο συναγωγής (50% της ολικής)

T_{amb}: θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος

Ο συγκεκριμένος τύπος υπολογίζει, σε μια διάταξη δωματίου όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.4, την παροχή καυσαερίων συμπεριλαμβανομένου του παρασυρόμενου αέρα λόγω του ανοδικά κινούμενου πλούμιου εξαιτίας της φωτιάς που εξέρχεται από το δωμάτιο. Για τον υπολογισμό του ΡΕΘ σε πειράματα κλειστού τύπου με άνοιγμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί προσεγγιστικά η εξίσωση (1.18).



Σχήμα 1.4 Σχηματική αναπαράσταση ΦΕΚ σε διάταξη δωματίου.

- Υπολογισμός της κατώτερης θερμογόνου ικανότητας (H_u) σύμφωνα με τη μέθοδο που αναλύθηκε ανά περίπτωση καύσης (τέλεια η ατελής).
- Υπολογισμός της θερμότητας ανά μονάδα μάζας καταναλισκόμενου οξυγόνου (E). Με απλή αναγωγή της ισχύος (M , Janssens 2002) από τη συνολική μάζα στη μάζα οξυγόνου έχουμε:

$$E = H_u \frac{M_v}{M_{O_2} * A} \quad (1.20)$$

- Υπολογισμός του ογκομετρικού παράγοντα επεκτάσεως α όπως αναφέρει ο Biteau (Biteau 2008):

$$\alpha = 1 + \chi_{H_2O}^{Ae} (1 - \chi_{H_2O}^a)(\beta - 1) \quad (1.21)$$

Όπου β είναι μια σταθερά που ισούται με (Biteau 2008):

$$\beta = \frac{(7 + B)}{A} \quad (1.22)$$

Όπου A και B είναι οι συντελεστές καύσης (εξίσωση 1.3) του αέρα και του διοξειδίου του άνθρακα για την καύση εξανίου.

- Υπολογισμός του λόγου ισοδυναμίας αέρα καυσίμου (φ) με τη μέθοδο που αναφέρει ο Janssens (M. Janssens 2002) ανάλογα με το ποιες περιεκτικότητες χημικών ειδών είναι πειραματικά διαθέσιμες, Πίνακας 1.3

Περιπτώσεις	φ
C1,I1	$\varphi = \frac{\chi_{O_2}^{Aa} - \chi_{O_2}^{Ae}}{(1 - \chi_{O_2}^{Ae})\chi_{O_2}^{Aa}}$
C2,I2	$\varphi = \frac{\chi_{O_2}^{Aa}(1 - \chi_{CO_2}^{Ae}) - (1 - \chi_{CO_2}^{Ae})\chi_{O_2}^{Ae}}{(1 - \chi_{O_2}^{Ae} - \chi_{CO_2}^{Aa})\chi_{O_2}^{Aa}}$
C3,I3	$\varphi = \frac{\chi_{O_2}^{Aa}(1 - \chi_{CO_2}^{Ae} - \chi_{CO}^{Ae}) - (1 - \chi_{CO_2}^{Ae})\chi_{O_2}^{Ae}}{(1 - \chi_{O_2}^{Ae} - \chi_{CO_2}^{Aa} - \chi_{CO}^{Ae})\chi_{O_2}^{Aa}}$

Πίνακας 1.3 Περιπτώσεις υπολογισμού του λόγου ισοδυναμίας αέρα καυσίμου με τη μέθοδο κατανάλωσης οξυγόνου.

- Υπολογισμός του ΡΕΘ (\dot{q}) με τη μέθοδο που αναφέρει ο Janssens (M. Janssens 2002) ανά περίπτωση..

Περιπτώσεις	\dot{q}
C1,I1	$\dot{q} = E \frac{\varphi}{1 - \varphi(\alpha - 1)} \dot{m}_e \frac{M_{O_2}}{M_a} (1 - \chi_{H_2O}^a - \chi_{CO_2}^a) \chi_{O_2}^{Aa}$
C2,I2	$\dot{q} = E \frac{\varphi}{1 - \varphi(\alpha - 1)} \dot{m}_e \frac{M_{O_2}}{M_a} (1 - \chi_{H_2O}^a - \chi_{CO_2}^a) \chi_{O_2}^{Aa}$
C3,I3	$\dot{q} = \left[E\varphi - (E_{CO} - E) \frac{\chi_{CO}^{Ae}}{\chi_{O_2}^{Aa}} \frac{1 - \varphi}{2} \right] \frac{\dot{m}_e}{1 - \varphi(\alpha - 1)} \frac{M_{O_2}}{M_a} (1 - \chi_{H_2O}^a) \chi_{O_2}^{Aa}$

Πίνακας 1.4 Περιπτώσεις υπολογισμού του ΡΕΘ με τη μέθοδο κατανάλωσης οξυγόνου.

Όπου:

$\chi_{O_2}^{Aa}$: γραμμομοριακό κλάσμα οξυγόνου μετρημένο στον αέρα

$\chi_{O_2}^{Ae}$: γραμμομοριακό κλάσμα οξυγόνου μετρημένο στα καυσαέρια

$\chi_{CO_2}^{Aa}$: γραμμομοριακό κλάσμα διοξειδίου του άνθρακα μετρημένο στον αέρα

$\chi_{CO_2}^{Ae}$: γραμμομοριακό κλάσμα διοξειδίου του άνθρακα μετρημένο στα καυσαέρια

χ_{CO}^{Ae} : γραμμομοριακό κλάσμα μονοξειδίου του άνθρακα μετρημένο στα καυσαέρια

$\chi_{CO_2}^a$: πραγματική τιμή γραμμομοριακού κλάσματος διοξειδίου του άνθρακα μετρημένο στον αέρα

$\chi_{\text{H}_2\text{O}}^a$: πραγματική τιμή γραμμομοριακού κλάσματος υγρασίας μετρημένη στον αέρα

M_{O_2} : μοριακή μάζα οξυγόνου

M_a : μοριακή μάζα αέρα

Σημειώνεται ότι για τις μεθόδους C1,C2,C3 η μεθοδολογία που ακολουθείται είναι αυτή που αναλύθηκε παραπάνω όπου ο τρόπος υπολογισμού της θερμογόνου ικανότητας αναλύεται στο κεφάλαιο της τέλει καύσης. Ο λόγος ισοδυναμίας αέρα καυσίμου και ο ΡΕΘ υπολογίζονται ανά περίπτωση σύμφωνα με τον Πίνακα 1.3 και τον Πίνακα 1.4. Επίσης, για τις μεθόδους I1,I2,I3 ακολουθείται η ίδια μεθοδολογία με τη διαφορά ότι η θερμογόνος ικανότητα υπολογίζεται σύμφωνα με τη διαδικασία που αναφέρεται στο κεφάλαιο της ατελούς καύσης.

Κεφάλαιο 2°

2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Η συμπεριφορά της φωτιάς σε κλειστούς αλλά και σε ανοιχτούς χώρους έχει απασχολήσει πολλούς ερευνητές και είναι ένα από τα θέματα που βρίσκεται υπό συνεχή μελέτη και διεξάγονται συνεχώς νέα πειράματα για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων και των φυσικών νόμων που τη διέπουν. Σε αυτά τα πλαίσια έχουν γίνει πειράματα σε μεγάλα ερευνητικά κέντρα και από τις παρατηρήσεις τους ορισμένοι ερευνητές έχουν καταλήξει σε ένα πλήθος συμπερασμάτων για τη φωτιά. Μερικοί από αυτούς είναι οι: Delichatsios (Michael Delichatsios 2013), Barbauskas (V. Babrauskas 2012), Thornton και Huggett (Huggett 1980), Pretrel (Pretrel 2013), Parkes (Parkes 2009), Hu (L.H. Hu 2012), Klopovic (Klopovic 1999), Himoto (Keisuke Himoto 2009), Bryant (Mulholland 2008), Janssens (Janssens 2012), αλλά και πολλοί ακόμα που έχουν συνεισφέρει σημαντικά με το έργο τους στη διεθνή βιβλιογραφία. Στην παρούσα μελέτη θα γίνει αναφορά σε όσους χρησιμοποίησαν στα πειράματά τους αναλυτές αερίων δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στον τρόπο και στις θέσεις στις οποίες τους τοποθέτησαν καθώς και σε εκείνους που χρησιμοποίησαν την ίδια μεθοδολογία για τον προσδιορισμό του PEΘ με αυτή που χρησιμοποιείται στο παρόν κείμενο και θα αναλυθεί εκτενώς παρακάτω.

2.1 Thornton και Huggett – Θεμελιωτές της μεθόδου

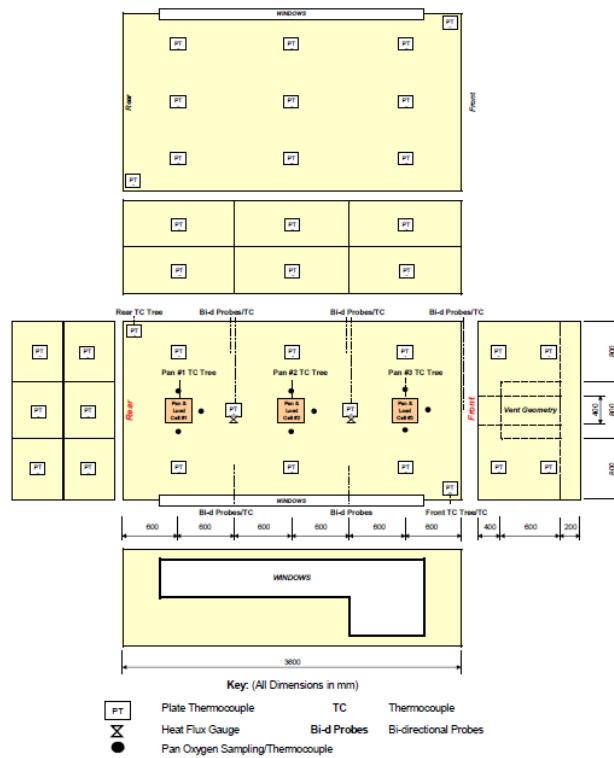
Το 1917 ο Thornton (Huggett 1980) συμπέρανε ότι για ένα μεγάλο αριθμό οργανικών υγρών και αερίων καυσίμων απελευθερώνεται μια σχεδόν σταθερή και συγκεκριμένη ποσότητα θερμότητας ανά μονάδα μάζας οξυγόνου που καταναλώνεται για την τέλεια καύση τους. Ο Huggett (Huggett 1980) επίσης επέκτεινε αυτή την κεντρική ιδέα και στα στερεά καύσιμα αποδεικνύοντας ότι συμπεριφέρονται ανάλογα και ποσοτικοποίησε αυτή την σταθερά στην τιμή $E = 13.1\text{kJ/g}$ οξυγόνου. Εφάρμοσε μια πρακτική μέθοδο που βασίζεται στην παραπάνω ιδιότητα για τον υπολογισμό του PEΘ. Η παραπάνω ιδιότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πρακτικές εφαρμογές και είναι έχει ακρίβεια της τάξεως του $\pm 5\%$.

Ο κανόνας του Thornton (Huggett 1980) υπαγορεύει ότι είναι επαρκές να γίνεται η μέτρηση του οξυγόνου που καταναλώθηκε σε ένα σύστημα καύσης ώστε να προσδιορισθεί η καθαρή θερμότητα που απελευθερώνεται. Αυτή είναι και η κεντρική ιδέα του υπολογισμού του PEΘ σε πειράματα φωτιάς. Συνεπώς γνωρίζοντας την περιεκτικότητα του οξυγόνου, καθώς και την παροχή στην είσοδο και στην έξοδο ενός όγκου ελέγχου, έμμεσα υπολογίζεται η κατανάλωση του οξυγόνου. Στη συνέχεια είναι απλό να υπολογιστεί ο PEΘ.

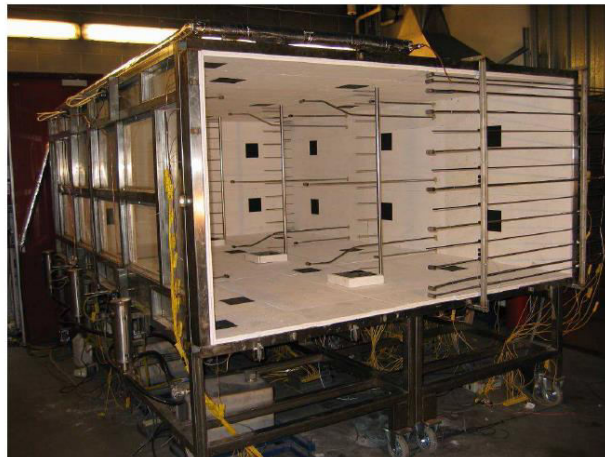
2.2 Parkes – Μετρητές αερίων δίπλα από δοχείο καυσίμου

Τριάντα τέσσερα πειράματα έγιναν από τον Parkes (Parkes 2009) σε δωμάτιο υπό κλίμακα ($1/2$) με διαστάσεις 3.6m μήκος x 2.4m πλάτος x 1.2m ύψος χρησιμοποιώντας πέντε τυπικές γεωμετρικές ανοιγμάτων αερισμού (πλήρως ανοιχτό, σοφίτα, πόρτα, παράθυρο, μικρό

παράθυρο). Για καύσιμο χρησιμοποιήθηκαν κηλίδες επτανίου, τοποθετημένες σε διατάξεις των τριών ομοιόμορφα κατανεμημένων τοποθεσιών εντός του δωματίου (πίσω, κεντρικά και μπροστά) όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1 και στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.1 Σκαρίφημα της πειραματικής εγκατάστασης του Parkes (Parkes 2009).



Σχήμα 2.2 Πειραματική διάταξη του Parkes (Parkes 2009).

Ο Parkes στα πειράματα του χρησιμοποίησε αναλυτές αερίων της εταιρίας SIEMENS μοντέλο Ultramat 6 Non Dispersive Infra Red (NDIR) για τη μέτρηση O_2 , CO_2 και CO με στόχο τον προσδιορισμό του PEΘ. Μετά από κάποια πειράματα βαθμονόμησης, εγκαταστάθηκαν εννέα δειγματολήπτες γύρω από τη βάση σε καθένα από τα δοχεία καυσίμων για τη μέτρηση της περιεκτικότητας των καυσαερίων στη βάση κάθε κηλίδας καυσίμου. Οι δειγματολήπτες τοποθετήθηκαν σε απόσταση 150mm μπροστά και στις δύο μεριές του κάθε δοχείου όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3. Όσο τα πειράματα προχωρούσαν οι

δειγματοληπτικές συσκευές γέμιζαν από πολλές στρώσεις στάχτης και άκαυστων υδρογονανθράκων με αποτέλεσμα να αλλοιωθούν οι μετρήσεις. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος πρότεινε να γίνεται περιοδικός καθαρισμός με χρήση πεπιεσμένου αέρα.



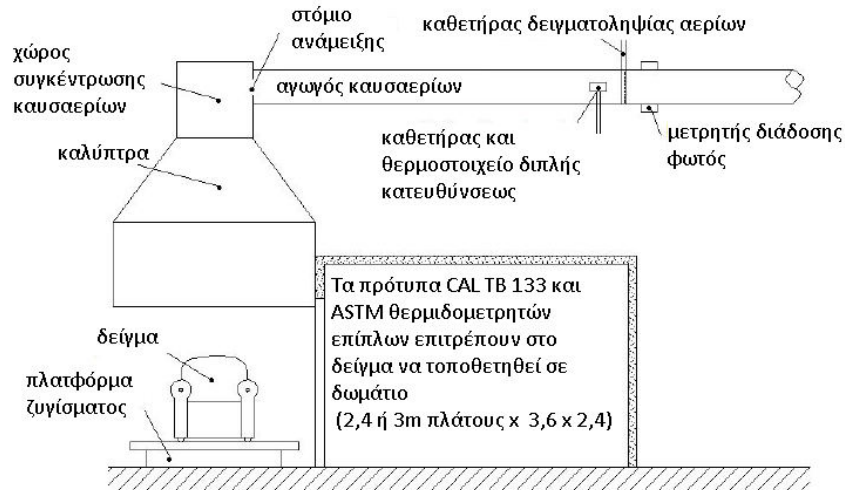
Σχήμα 2.3 Θέσεις δειγματοληψίας στη βάση των δοχείων καυσίμου (Parkes 2009).

Με τον τρόπο τοποθέτησης των δειγματοληπτών που επιλέχθηκαν, υπολογιζόταν ο ΡΕΘ χωρίς να έχει σημαντική αραίωση οι περιεκτικότητες των καυσαερίων από τον εισερχόμενο αέρα στον όγκο ελέγχου.

2.3 Janssens – Μετρητής αερίων στον αγωγό εξόδου καυσαερίων

Ο στόχος αυτής της μελέτης του Janssens (Janssens 2012) ήταν να αναπτυχθούν καθοδηγητικές μέθοδοι για κάθε μία από τις περιπτώσεις καύσης για το πώς μπορεί να εκτιμηθεί ο ρυθμός καύσης επίπλων και να ποσοτικοποιηθεί/βελτιστοποιηθεί η αβεβαιότητα των προβλέψεων. Με αυτό σαν γνώμονα διεξήχθησαν δύο σειρές πειραμάτων κλειστού τύπου όπου για τη μέτρηση του ΡΕΘ των δειγμάτων προς καύση χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος κατανάλωσης οξυγόνου.

Η πρώτη σειρά πειραμάτων μεγάλης κλίμακας αποτελούνταν από 79 πειράματα σε δωμάτιο όπου για καύσιμα χρησιμοποιήθηκαν 133 ομοιώματα επίπλων. Παρόλο που τα περισσότερα πειράματα έγιναν με χρήση ομοιώματος μονοθέσιου ή τριθέσιου καναπέ, χρησιμοποιήθηκαν επίσης ομοιώματα καρεκλών και διθέσιων πολυθρόνων. Επίσης έγιναν πειράματα μικρής κλίμακας για να προσδιοριστούν οι θερμικές ιδιότητες των γεμισμάτων και των υφασμάτων από τα οποία κατασκευάστηκαν τα ομοιώματα των επίπλων. Η δεύτερη σειρά πειραμάτων μεγάλης κλίμακας περιελάμβαναν 27 αντικείμενα από τα χρησιμοποιημένα έπιπλα.



Σχήμα 2.4 Σχηματική αναπαράσταση θερμοδομετρητή επίπλων (Janssens 2012).

Ο Janssens στα πειράματα του χρησιμοποίησε μια ειδική διάταξη μετρητή αερίων, το θερμοδομετρητή επίπλων Σχήμα 2.4 που αποτελείται από μια πλατφόρμα ζύγισης που ήταν τοποθετημένη στο δάπεδο του εργαστηρίου, από πάνω βρισκόταν καλύπτρα που καταλήγει σε αγωγό εξόδου. Γινόταν η τοποθέτηση του αντικειμένου προς καύση στην πλατφόρμα και έναυσμα με χρήση ειδικής πηγής εναύσματος. Η συλλογή των καυσαερίων γινόταν μέσω της καλύπτρας και αποβάλλονταν μέσω του αγωγού εξόδου. Στον αγωγό εξόδου χρησιμοποιήθηκαν μετρητικές συσκευές για τη μέτρηση των συγκεντρώσεων και της ροής των καυσαερίων για τον προσδιορισμό του ΡΕΘ και τον ρυθμό παραγωγής καπνού, ως συνάρτηση του χρόνου.

Ο συγκεκριμένος τρόπος τοποθέτησης των δειγματοληπτικών συσκευών είναι αποδεκτός εάν η καλύπτρα είναι αρκετά μεγάλων διατάσεων, ώστε να μην έχουμε σημαντικές απώλειες καυσαερίων έξω από αυτήν. Επίσης πρέπει ο αέρας που παρασέρνεται από το πλούμιο της φωτιάς, λόγω ανοδικής κίνησης, πρέπει να είναι ελάχιστος αν δεν συνυπολογίζεται.

2.4 Κλορονικ – μετρητές αερίων στη οροφή και δίπλα στο άνοιγμα δωματίου

Η Κλορονικ (Kloronic 1999) διεξήγαγε δύο σειρές πειραμάτων φωτιάς σε κλειστό χώρο με σκοπό τη μελέτη της επίδρασης του εξωτερικού αερισμού εξωτερικού αερισμού στις φωτιές και στις ΦΕΚ. Η πρώτη σειρά περιελάμβανε τέσσερα πειράματα σε τυποποιημένο δωμάτιο ελέγχοντας τους τρόπους που διαδίδεται η φωτιά στα γειτονικά δωμάτια. Έλεγε τον τρόπο που γίνεται ο αερισμός του τμήματος της φωτιάς που βγαίνει έξω από το δωμάτιο κατά τη διάρκεια της καθολικής ανάφλεξης από παράθυρο.

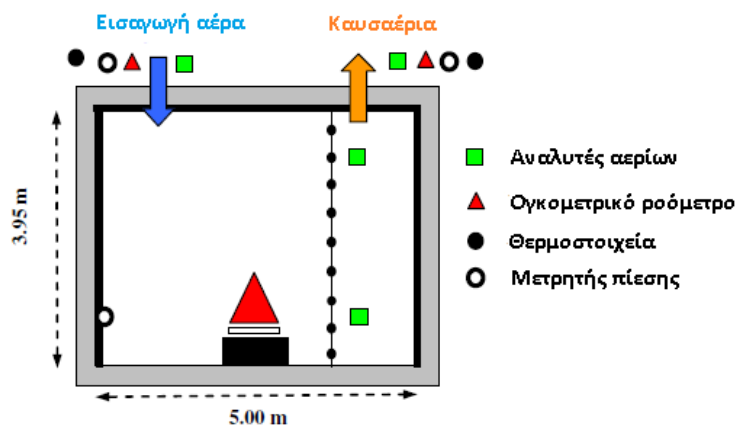
Στη δεύτερη σειρά πειραμάτων έγιναν οκτώ πειράματα σε κανονικό δωμάτιο έχοντας ως βάση την πρώτη σειρά που είχαν ως στόχο επίσης τη μελέτη του αερισμού των ΦΕΚ. Για την καλύτερη προσομοίωση χώρων όπως σαλόνι ή καθιστικό σε σπίτι χρησιμοποιήθηκε μεγαλύτερο δωμάτιο από την πρώτη σειρά με χρήση πραγματικών επίπλων στο χώρο ως καύσιμη ύλη. Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας επεκτάθηκαν ώστε να μπορεί να γίνει χαρτογράφηση τριών διαστάσεων του θερμοκρασιακού προφίλ στο εξωτερικό πλούμιο των ΦΕΚ.

Στην πρώτη σειρά τοποθετήθηκαν μετρητές αερίων στο κέντρο της οροφής του φλεγόμενου δωματίου και ακριβώς έξω από το παράθυρο του δωματίου που ήταν και το μοναδικό άνοιγμα, στα πρώτα τρία πειράματα, ενώ στο τέταρτο τοποθετήθηκε μετρητής αερίων μόνο στο κέντρο της οροφής, 2m πάνω από το έδαφος. Οι αναλυτές μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα ήταν υπέρυθροι οπτικοί που αναπτύχθηκαν από την Analytical Development Co. Ο αισθητήρας οξυγόνου, γαλβανικού κυττάρου, κατασκευάστηκε από την Japan Storage Battery. Πριν από την έναρξη των πειραμάτων έγινε βαθμονόμηση του συστήματος αναλυτών με χρήση τυποποιημένων αερίων γνωστής περιεκτικότητας.

2.5 Pretrel – ταξινόμηση μεθόδων υπολογισμού PEΘ

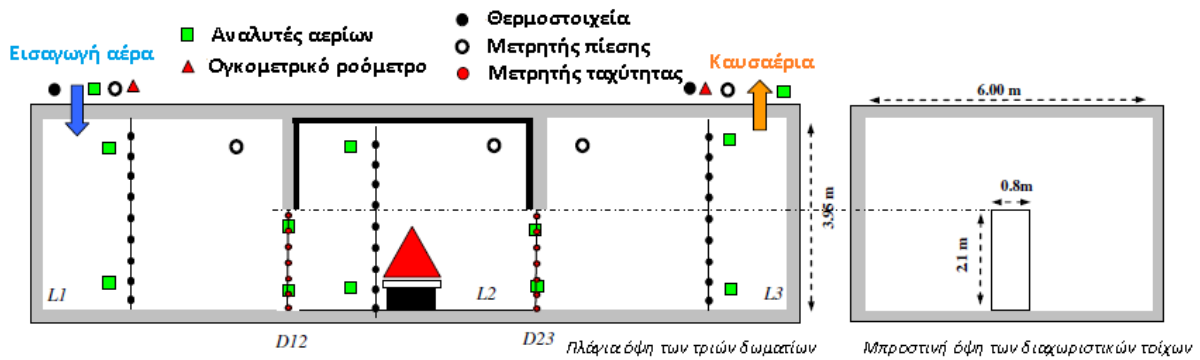
Η συνεισφορά του Pretrel (Pretrel 2013) στη μελέτη της φωτιάς ήταν πολύ σημαντική γιατί ήταν εκείνος που έδωσε έμφαση στη σημασία της γνώσης του PEΘ και στη μελέτη του έδωσε ιδιαίτερη βάση στο συγκεκριμένο εδάφιο με σαφή και περιεκτική παρουσίαση των μεθοδολογιών που ακολουθούνται για τον υπολογισμό του PEΘ σε ένα σύστημα καύσης. Διαχώρισε τη μέτρηση του PEΘ σε τρεις μεθοδολογίες: μηχανική, θερμική και χημική, δίνοντας για την κάθε μεθοδολογία σαφή βήματα για τον τρόπο που υλοποιούνται. Τη χημική μέθοδο τη χώρισε σε δύο υποκατηγορίες, η πρώτη είναι η μέθοδος κατανάλωσης οξυγόνου και η δεύτερη η παραγωγής διοξειδίου του άνθρακα. Και οι δύο υποκατηγορίες λειτουργούν με τις ίδιες θεμελιώδεις αρχές.

Για την εφαρμογή των μεθοδολογιών αυτών διεξήγαγε δύο σειρές πειραμάτων. Στην πρώτη σειρά, που εξετάστηκε το σενάριο φωτιάς σε ένα δωμάτιο, υπήρχαν τέσσερα σημεία δειγματοληψίας αερίων ένα στην είσοδο του αέρα, ένα στην έξοδο των καυσαερίων και δύο κατά ύψος του δέντρου των θερμοστοιχείων, όπως φαίνονται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5 Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης ενός δωματίου του Pretrel (Pretrel 2013).

Κατά τη δεύτερη σειρά πειραμάτων, που είχε ως στόχο την προσομοίωση πυρκαγιάς σε χώρο τριών δωματίων με τη φωτιά να ξεκινάει από το κεντρικό δωμάτιο, υπήρχαν δώδεκα σημεία δειγματοληψίας αερίων ένα στην είσοδο του αέρα, ένα στην έξοδο των καυσαερίων και τα υπόλοιπα κατά ύψος του δέντρου των πέντε δέντρων των θερμοστοιχείων, όπως φαίνονται στο Σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6 Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης τριών δωματίων του Pretrel (Pretrel 2013).

Με τις μετρήσεις από τους αναλυτές αερίων εφαρμόστηκαν οι μέθοδοι υπολογισμού του ΡΕΘ και παραστήθηκαν τα αποτελέσματα σε διαγράμματα τα οποία κατέστησαν δυνατή τη σύγκριση μεταξύ των μεθόδων. Ο Pretrel (Pretrel 2013) κατάφερε να κάνει μια καθολική προσέγγιση των πειραμάτων ΦΕΚ και με τα πλήθος των μετρητών στις κατάλληλες θέσεις δειγματοληψίας. Έτσι έγινε μια πλήρη απεικόνιση του προβλήματος και η μελέτη του αποτελεί πρότυπο για πολλούς μελετητές.

Κεφάλαιο 3^ο

3 Πειράματα κλειστού τύπου A1-B9

Και οι δύο σειρές πειραμάτων πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Ετερογενών Μιγμάτων και Συστημάτων Καύσης, της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η πρώτη σειρά πειραμάτων που πραγματοποιήθηκε στο χώρο του πολυτεχνείου τον Ιούλιο του 2012 (Χοτζόγλου 2013) και η δεύτερη το Δεκέμβρη του 2013, η παρούσα εργασία και η προηγούμενη (Χοτζόγλου 2013) εντάσσονται σε μια ευρύτερη κατηγορία πειραμάτων που έχουν ως κύριο στόχο την προσομοίωση πυρκαγιών σε κτίρια και προσόψεις. Όπως προαναφέρθηκε, η πρώτη σειρά πειραμάτων προσομοίωσαν φωτιές κλειστού τύπου ενώ η δεύτερη σειρά ανοιχτού. Η παρούσα μελέτη εστιάζει στη μεθοδολογική προσέγγιση του υπολογισμού του PEΘ της ΦΕΚ μέσω μέτρησης των συγκεντρώσεων των καυσαερίων του πλούμιου και μέσω του ρυθμού απώλειας μάζας του καυσίμου. Παράλληλα πραγματοποιήθηκε μελέτη κι καταγραφή και επιπλέον παραμέτρων όπως οι θερμοκρασίες που αναπτύχθηκαν στην πρόσοψη και στο εσωτερικό του δωματίου και η ροή θερμότητας στην πρόσοψη παρόλα αυτά παραθέτονται επιγραμματικά μόνο τα σχετικά με την παρούσα εργασία δεδομένα τα οποία έχουν αναλυθεί εκτενώς σε άλλες μελέτες. Τα χαρακτηριστικά των πειραμάτων A1-B9 φαίνονται στον Πίνακα 3.1.

Πείραμα	Όγκος καυσίμου (ml)	Είδος Ανοίγματος	Παράγοντας Αερισμού $A_0\sqrt{H_0}$	Διαστάσεις Ανοίγματος [ύψος x πλάτος] (cm)	Διάρκεια Φωτιάς (sec)
A1	2350	Πόρτα	0.0707	50x20	339
A2	2350	Πόρτα	0.0707	50x20	331
A3	1000	Πόρτα	0.0707	50x20	372
A4	2350	Πόρτα	0.0707	50x20	525
A5	4700	Πόρτα	0.0707	50x20	595
A6	2350	Πόρτα	0.0707	50x20	336
B7	2350	Παράθυρο	0.0329	30x20	659
A8	2350	Πόρτα	0.0707	50x20	356
B9	2350	Παράθυρο	0.0329	30x20	663

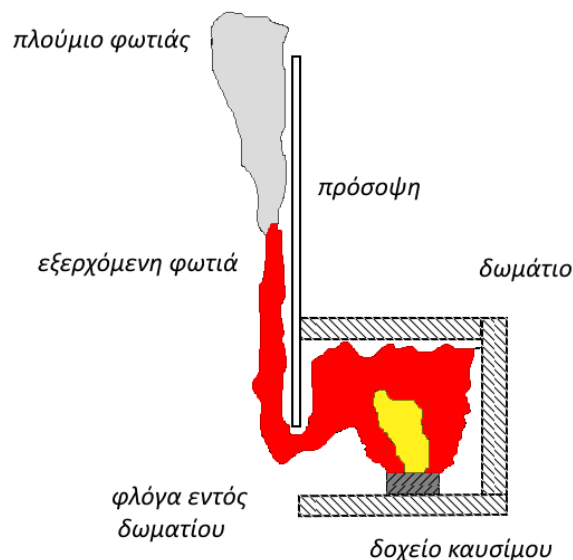
Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά των πειραμάτων που διεξήχθησαν.

Κυρίως, σκοπός των πειραμάτων ήταν η μελέτη φωτιάς σε περίπτωση κλειστού χώρου με ένα άνοιγμα και οι επιπτώσεις του εξωτερικού πλουμίου της φωτιάς στην πρόσοψη σε περιπτώσεις μη επαρκούς αερισμού. Οι συνθήκες φωτιάς προσέγγιζαν βάσει θεωρητικών υπολογισμών σε πυροθερμικό φορτίο που αντιστοιχεί σε επίπλωση χώρου γραφείου. Με αυτό το γνώμονα υπολογίστηκαν οι διαστάσεις του δοχείου καυσίμου και της ποσότητας καυσίμου, ενώ παράλληλα βρέθηκαν οι σχέσεις που προσδιορίζουν την ομοιότητα μεταξύ των χαρακτηριστικών (γεωμετρία, πυροθερμικό φορτίο) του μοντέλου πειράματος υπό κλίμακα και του πραγματικού δωματίου.

3.1 Περιγραφή πειραμάτων

Η πρώτη σειρά πειραμάτων A1-B9 έγιναν με σκοπό να ελεγχθεί ο τρόπος που επηρεάζουν ορισμένοι παράγοντες τον ΡΕΘ καθώς και την εξέλιξη του φαινομένου της φωτιάς σε κλειστό χώρο με άνοιγμα. Αυτοί οι παράγοντες είναι:

- Έλεγχος επαναληψιμότητας, πειράματα A1 και A2
- Η ποσότητα του καυσίμου, πειράματα A3, A4 και A5
- Παράγοντας αερισμού (πόρτα, παράθυρο) , πειράματα A6 και B7
- Καθορισμός του κεντρικού άξονα του εξωτερικού πλούμιου φωτιάς, πειράματα A8 και B9



Σχήμα 3.1 Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης των πειραμάτων A1-B9.

Στα πειράματα αυτά είχαμε καύση εξανίου σε κλειστό χώρο προτύπου δωματίου με πρόσοψη και επειδή η καύση γινόταν με ελλιπή παρουσία οξυγόνου, η φλόγα επεκτάθηκε και εκτός δωματίου στην πρόσοψη Σχήμα 3.1.

3.1.1 Πειραματική διάταξη

Η πρώτη σειρά πειραμάτων πραγματοποιήθηκε σε γεωμετρία δωματίου με διαστάσεις συμβατές με τις αντίστοιχες του ISO9705 για την όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτική απεικόνιση ενός τυπικού δωματίου. Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκε δωμάτιο κλίμακας 1/4 προς το πρότυπο δωμάτιο που ορίζεται στο ISO9705. Το δωμάτιο έχει εσωτερικές διαστάσεις 0.90 m μήκος επί 0.60 m πλάτος επί 0.60m ύψος, και άνοιγμα διαφόρων διαστάσεων. Στη συνέχεια προστέθηκε πρόσοψη (façade) στην εξωτερική πλευρά του νότιου τοίχου όπου βρίσκεται το άνοιγμα. Οι διαστάσεις της κατασκευής φαίνονται στον Πίνακα 3.2.

	Μήκος (mm)	Πλάτος (mm)	Ύψος (mm)
Δωμάτιο (εσωτερικές διαστάσεις)	900	600	600

Άνοιγμα	-	-	-
Α' περίπτωση- Πόρτα	-	200	500
Β' Περίπτωση- Παράθυρο	-	200	300 (απόσταση από δάπεδο=200mm)
Πρόσοψη	-	658	1800

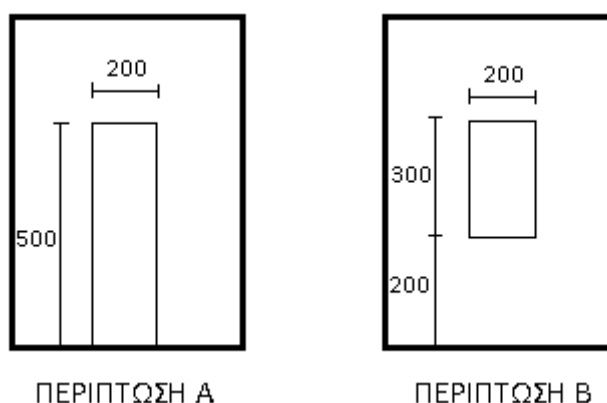
Πίνακας 3.2 Διαστάσεις κατασκευής.

3.1.1.1 Γεωμετρία ανοίγματος

Αντικείμενο μελέτης της εργασίας αυτής αποτέλεσε η μελέτη της επίδρασης του αερισμού στην εξέλιξη της φωτιάς σε δωμάτιο και της ΦΕΚ υπό συνθήκες μη επαρκούς αερισμού. Για το σκοπό αυτό οι διαστάσεις του ανοίγματος του δωματίου διαφοροποιήθηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Στα πειράματα το άνοιγμα ήταν πόρτα ή παράθυρο, με τις διαστάσεις σε κάθε περίπτωση να φαίνονται στον Πίνακα 3.3 και τη διάταξη του ανοίγματος στο Σχήμα 3.2.

Γυψοσανίδες	Δαπέδου(x2)	Ανατολικής- Δυτικής(x4)	Νότιας-Βόρειας (x4)	Οροφής(x2)
Διαστάσεις(mm)	950x650	950x625	650x625	900x600

Πίνακας 3.3 Διαστάσεις ανοίγματος.



Σχήμα 3.2 Γεωμετρία ανοίγματος στα πειράματα.

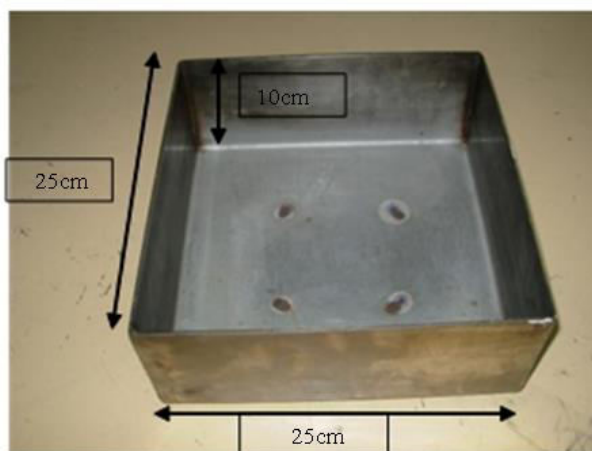
3.1.2 Δοχείο καυσίμου

Στην πρώτη σειρά πειραμάτων που διενεργήθηκαν, χρησιμοποιήθηκε ως καύσιμο το εξάνιο, το οποίο είναι αλκάνιο, δηλαδή άκυκλος κορεσμένος υδρογονάνθρακας. Η ονομασία του προέρχεται από την ονοματολογία κατά IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) ενώ συγκεκριμένα, το πρόθεμα ‘-εξ-’ δηλώνει την παρουσία έξι ατόμων άνθρακα ανά μόριο της ένωσης, το ενδιάμεσο ‘-αν-’ υποδηλώνει την παρουσία μόνο απλών δεσμών μεταξύ των ατόμων άνθρακα στο μόριο και η κατάληξη ‘-ιο-’ δείχνει πως δεν περιέχει χαρακτηριστικές ομάδες. Οι θερμοχημικές ιδιότητες του εξανίου φαίνονται στον Πίνακα 3.4 που ακολουθεί.

Χημικός τύπος	C_6H_{14}
Σημείο βρασμού	$69^{\circ}C$ ($342.2^{\circ}K$)
Πυκνότητα	654.8 kg/m^3
Θερμογόνος ικανότητα	44732 kJ/kg
Θερμότητα αεριοποίησης	433 kJ/kg
Παροχή μάζας ανά μονάδα επιφάνειας	$\dot{m}''_{\infty} = 0.074 \text{ kg/m}^2\text{s}$
	$\kappa\beta = 1.9 \text{ m}^{-1}$

Πίνακας 3.4 Θερμοχημικές ιδιότητες εξανίου.

Η τοποθέτηση του υγρού καυσίμου έγινε σε μεταλλικό δοχείο τετραγωνικού σχήματος Σχήμα 3.3, με διαστάσεις 25x25(cm) και βάθους 10cm. Το δοχείο κατασκευάστηκε από χάλυβα, ενώ τα τοιχώματά του ήταν πάχους 3mm.



Σχήμα 3.3 Το δοχείο που χρησιμοποιήθηκε.

3.1.3 Μετρητικές διατάξεις

Για την περιγραφή των χαρακτηριστικών της φωτιάς χρησιμοποιήθηκαν θερμοστοιχεία, μετρητής ροής θερμότητας και αναλυτής αερίων, ενώ για τη μέτρηση του ρυθμού απώλειας μάζας καυσίμου χρησιμοποιήθηκε δυναμοκυψέλη. Η περιγραφή, ο τρόπος σύνδεσής και τα χαρακτηριστικά των μετρητικών συστημάτων περιγράφονται ακολούθως.

3.1.3.1 Θερμοστοιχεία

Τα θερμοστοιχεία είναι μία συσκευή μέτρησης της θερμοκρασίας που αποτελείται από δύο ανόμοιους αγωγούς που επικοινωνούν μεταξύ τους σε ένα ή περισσότερα σημεία. Παράγει μία τάση όταν η θερμοκρασία του ενός από τα σημεία διαφέρει από τη θερμοκρασία αναφοράς σε άλλα σημεία του κυκλώματος. Τα σφάλματα δεν ξεπερνούν τον $1^{\circ}C$.

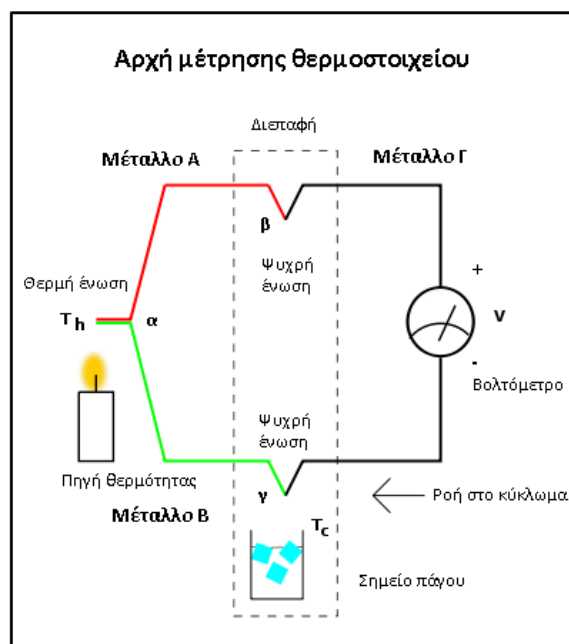
Κάθε ένωση ανόμοιων μετάλλων παράγει ένα ηλεκτρικό δυναμικό που σχετίζεται με τη θερμοκρασία. Θερμοστοιχεία για πρακτική μέτρηση της θερμοκρασίας είναι διασταυρώσεις από ειδικά κράματα τα οποία έχουν προβλέψιμη και επαναλήψιμη σχέση ανάμεσα στη θερμοκρασία και στην τάση.



Σχήμα 3.4 Θερμοστοιχείο τύπου K

Τα θερμοστοιχεία συνήθως τυποποιούνται στους 0°C ως θερμοκρασία αναφοράς. Πρακτικά μέσα χρησιμοποιούν ηλεκτρικές μεθόδους αντιστάθμισης ψυχρής σύνδεσης για προσαρμογή σε διάφορες θερμοκρασίες στους ακροδέκτες του οργάνου.

Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο δηλαδή ότι όταν σε οποιονδήποτε αγωγό υποβάλλεται σε μεταβολή της θερμοκρασίας του τότε δημιουργείται τάση. Για τη μέτρηση της διαφοράς θερμοκρασίας δημιουργούμε την θερμή ένωση τοποθετώντας ένα δεύτερο αγωγό από άλλο υλικό. Τα δύο υλικά παράγουν διαφορετικές τάσεις και κρατούνται σε μία τάση αναφοράς που ονομάζεται ηλεκτρονικό σημείο πάγου. Η τάση αναφοράς αντιπροσωπεύει την τάση που θα είχαν τα υλικά αν ήταν σε θερμοκρασία 0°C . Το κύκλωμα κλείνει με ένα τρίτο υλικό και ένα βολτόμετρο που μετρά τις διαφορές των τάσεων στα δύο υλικά. Οι διαφορές είναι τις τάξεις των $1\text{-}70\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ για συγκεκριμένους συνδυασμούς μετάλλων. Επειδή τα δύο ανόμοια υλικά υπόκεινται στην ίδια θερμοκρασιακή διαφορά, το τελικό αποτέλεσμα είναι μία μέτρηση μεταξύ της θερμής ένωσης και της ένωσης αναφοράς.



Σχήμα 3.5 Αρχή λειτουργίας θερμοστοιχείου.

Τα θερμοστοιχεία τύπου K που χρησιμοποιήθηκαν και στις δύο σειρές πειραμάτων, έχουν τα ακόλουθα τεχνικά χαρακτηριστικά:

- Είναι τύπου Chromel (90% νικέλιο, 10% χρώμιο) ή Alumel (95% νικέλιο, 2% μαγνήσιο, 2% αλουμίνιο, 1% πυρίτιο)
- Ευαισθησία περίπου $41\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
- Θερμοκρασιακή κλίμακα: $-200^\circ\text{C} \rightarrow 1350^\circ\text{C}$
- Είναι φθηνά σε σχέση με τα υπόλοιπα του εμπορίου (~ 50€)
- Το ελάττωμα του είναι ότι όταν φτάνουν στο σημείο Curie έχουν απόκλιση εξαιτίας της μαγνητικής συμπεριφοράς του νικελίου. Αυτό συμβαίνει περίπου στους 350°C . Επίσης δεν λειτουργούν καλά σε υποπίεσεις
- Χρωματικός κώδικας κατά IEC: Πράσινο (+), κόκκινο (-), αγωγός πράσινος
- Συστηματικά σφάλματα μέτρησης: $\pm 1,5^\circ\text{C}$ στους $-40^\circ\text{C} \rightarrow 375^\circ\text{C}$ και $\pm 0.004 \times T$ στους $375^\circ\text{C} \rightarrow 1000^\circ\text{C}$

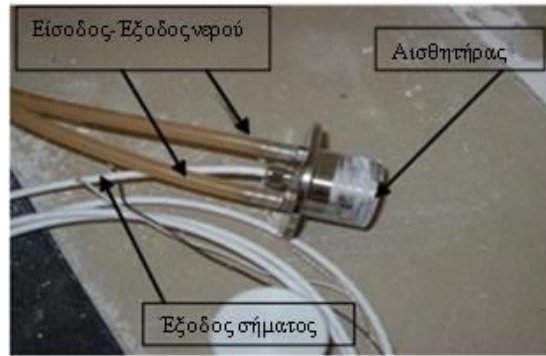
3.1.3.2 Μετρητής ροής θερμότητας

Ένας αισθητήρας ροής θερμότητας είναι ένας μετατροπέας που παράγει ηλεκτρικό σήμα ανάλογο προς το σύνολο της θερμότητας που εφαρμόζεται στην επιφάνεια του αισθητήρα.



Σχήμα 3.6 Μετρητής ροής θερμότητας (Hukseflux Thermal Sensors B.V. 2011).

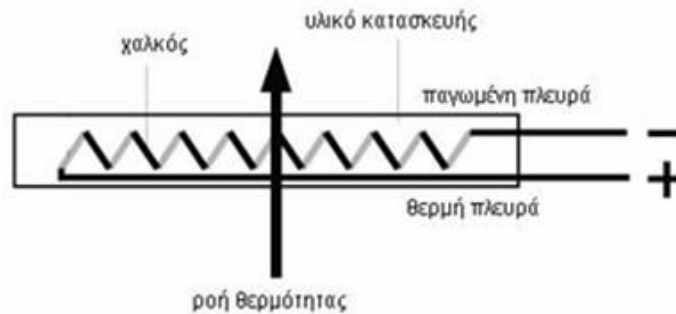
Ο μετρούμενος ρυθμός θερμότητας διαιρείται με το εμβαδόν της επιφάνειας του αισθητήρα για τον προσδιορισμό της ροής θερμότητας αποτελείται συνήθως από μερικές θερμοστίλες ή απλά ένα ζεύγος θερμοστοιχείων τα οποία χωρίζονται από ένα λεπτό στρώμα θερμικής αντίστασης. Υπό θερμοκρασιακή διαφορά οι συστάδες θερμοστοιχείων θα παράγουν τάση. Η ροή θερμότητας είναι ανάλογη της τάσης αυτής. Το στρώμα θερμικής αντίστασης πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο λεπτό για τη βελτίωση του χρόνου απόκρισης του αισθητήρα. Επίσης πρέπει να υπάρχουν υλικά με υψηλή θερμική αγωγιμότητα. Πηγές σφαλμάτων είναι οι δυναμικές επιδράσεις και πλευρικές ροές θερμότητας. Για την ψύξη του χρησιμοποιείται κύκλωμα νερού.



Σχήμα 3.7 Ο υδρόψυκτος μετρητής ροής θερμότητας.

Χαρακτηριστικά του μετρητή ροής θερμότητας είναι:

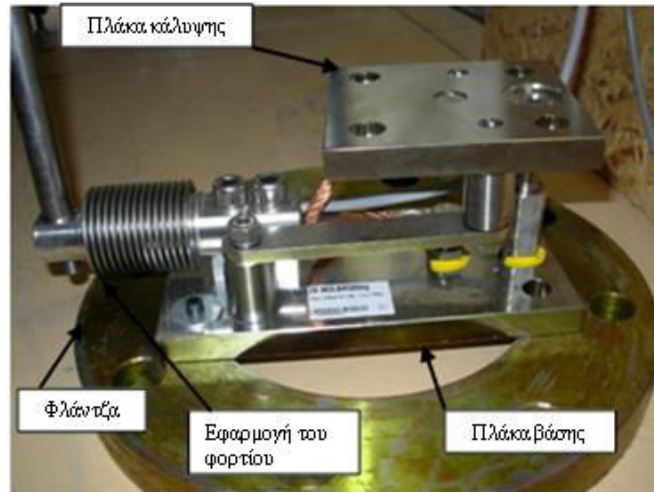
- Χρόνος απόκρισης: $200\text{kW} \rightarrow < 200\text{ms}$
- Εύρος γωνίας οπτικής: 180°
- Υδρόψυκτο: $10^\circ\text{C} \rightarrow 30^\circ\text{C}$, $10\text{ l/h} \rightarrow 30\text{ l/h}$



Σχήμα 3.8 Χαρακτηριστικά ενός μετρητή ροής θερμότητας.

3.1.3.3 Δυναμοκυψέλη

Για τα πειράματα που έγιναν, βασική μετρητική διάταξη αποτέλεσε η δυναμοκυψέλη, με την οποία μετρήθηκε η μάζα του καυσίμου κατά την καύση του. Με τον τρόπο αυτό υπολογίστηκε ο ρυθμός απώλειας μάζας καυσίμου. Μια δυναμοκυψέλη είναι ένας μετατροπέας της δύναμης σε ηλεκτρικό σήμα. Η μετατροπή αυτή είναι έμμεση και συμβαίνει σε δύο στάδια. Πρώτα η μετρούμενη δύναμη παραμορφώνει ένα μετρητή τάσεως ο οποίος στη συνέχεια μετρά την παραμόρφωση ως ηλεκτρικό σήμα, διότι λόγω εφελκυσμού αλλάζει η ηλεκτρική αντίσταση του σύρματος. Η έξοδος τάσεως mVolts μετά την ενίσχυσή της μετριέται και μπορεί έτσι να προσδιοριστεί η δύναμη που απαιτείται στον μετατροπέα. Μια δυναμοκυψέλη συνήθως αποτελείται από τέσσερα όργανα μέτρησης καταπόνησης σε μία διαμόρφωση γέφυρας Wheatstone.



Σχήμα 3.9 Η δυναμοκουψέλη τοποθετημένη σε φλάντζα.

Βασικό πλεονέκτημα είναι ότι εκμηδενίζει τα σφάλματα σε αξονικές και στροφικές μετατοπίσεις.

3.1.3.4 Αναλυτής αερίων

Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκε αναλυτής αερίων τύπου Optima AO2000 Series, με τον οποίο μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις οξυγόνου, μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα. Το ακροφύσιο του αναλυτή τοποθετήθηκε σε απόσταση 5cm από την πρόσοψη και σε ύψος 1.65m, ώστε να γίνεται συλλογή συγκεντρώσεων από το εξωτερικό πλούμιο της φωτιάς και κοντά στην πρόσοψη. Το σύστημα OptimaAO2000Series αποτελείται από τρεις επιμέρους μονάδες αναλυτών αερίων όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.10: υπέρυθρος αναλυτής Uras 26, φωτόμετρο Limas 11-IR (υπέρυθρης λειτουργίας) και παραμαγνητικός αναλυτής Magnos 206.

Το σύστημα Advance Optima αποτελείται από ένα κουβούκλιο, ένα σύστημα μονάδας χειριστή, μία διεπαφή και πολλαπλές μονάδες αναλυτών (ABB 2009). Όλες αυτές οι μονάδες αναλυτών έχουν τις ίδιες μηχανικές και ηλεκτρικές διεπαφές και συνδέονται κατευθείαν στο πρότυπο κουβούκλιο..

Κατά κύριο λόγο ένας αναλυτής αποτελείται από 1...n ανιχνευτές (θερμική αγωγιμότητα, υπέρυθρη κλπ), κάθε ανιχνευτής μετράει 1...n συστατικά (CO, CO_2, \dots) και κάθε συστατικό έχει 1...n μετρητικά εύρη.

Υπέρυθρος αναλυτής Uras 26: Η αρχή μέτρησης του Uras (Werner Rüdiger n.d.) βασίζεται στην αρχή της επιλεκτικής απορρόφησης της υπέρυθρης ακτινοβολίας αερίων, πλην των μονοατομικών και των συμμετρικών όπως το οξυγόνο, το άζωτο και το υδρογόνο. Σύμφωνα με την αρχή της επιλεκτικής απορρόφησης κάθε αέριο έχει ένα φάσμα απορρόφησης το οποίο συνίσταται από διάφορες ζώνες απορρόφησης, οι οποίες είναι χαρακτηριστικές για κάθε αέριο. Με αυτόν τον τρόπο, ένα αέριο θα απορροφήσει υπέρυθρη ενέργεια μόνο αν αυτή είναι τέτοιου μήκους κύματος ώστε να βρίσκεται εντός της ζώνης απορρόφησης του. Η

υπέρυθρη ακτινοβολία οποιουδήποτε μήκους κύματος έξω από τα όρια της απορροφητικής ζώνης θα διαπεράσει το συγκεκριμένο αέριο (Εμμ.Κακκαράς 2014).

Αυτό σημαίνει ότι η ενέργεια απάγεται από μία δέσμη φωτός μεταξύ ενός συγκεκριμένου εύρους συχνοτήτων που εξαρτάται από τη συγκέντρωση του αερίου. Στους περισσότερους υπέρυθρους αναλυτές χρησιμοποιείται ένας φωτο-ανιχνευτής για να εντοπίσει αυτή την επίδραση. Αυτό δε γίνεται όμως στο Uras, ο οποίος αποτελείται από οπτικο-πνευματικούς ανιχνευτές στους οποίους συλλέγεται το προς μέτρηση δείγμα.

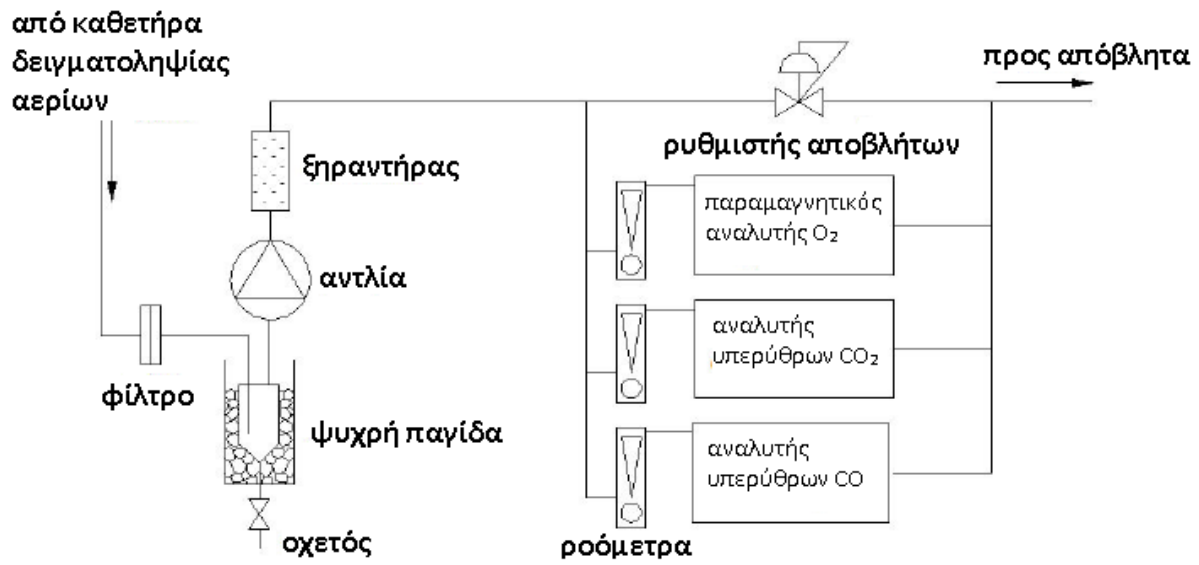
Φωτόμετρο Limas 11: Η μονάδα αναλυτή Limas 11 για υπέρυθρες και υπεριώδεις μετρήσεις (ABB 2009) παρέχει ένα φωτόμετρο διαδικασιών που διαμορφώνεται εύκολα ώστε να καλύπτει τις ατομικές προϋποθέσεις μέτρησης. Η υπερβολικά καλή σταθερότητα επιτυγχάνεται με χρήση σήματος τεσσάρων ακτινών αρχής διαδικασιών. Ο αναλυτής Limas 11-IR (υπέρυθρης λειτουργίας) επιτρέπει τη μέτρηση περιεκτικότητας υδρογονανθράκων, χλωριούχων υδρογονανθράκων, CO, CO₂, φωσγενίου και υδροχλωρίου.

Παραμαγνητικός αναλυτής Magnos 206: Ο αναλυτής οξυγόνου τύπου μαγνητικού πεδίου είναι ένα όργανο που αξιοποιεί τις μαγνητικές ιδιότητες του οξυγόνου (Fuji Electric Co. 2003). Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στην αρχή της περιστροφής ζυγού σε μαγνητικό πεδίο βασιζόμενος στο φαινόμενο του παραμαγνητισμού.

Σε ένα ανομοιογενές μαγνητικό πεδίο υπάρχει ο ζυγός, στις άκρες του οποίου οι μικρές γυάλινες σφαίρες είναι γεμάτες με O₂. Ο ζυγός έχει τη δυνατότητα περιστροφής και συγκρατείται από πλατίνα. Ο γεμάτος αέριο ζυγός είναι διαμαγνητικός και περιστρέφεται εξαιτίας του μαγνητικού πεδίου. Το παραμαγνητικό οξυγόνο τείνει να μεταφερθεί σε περιοχές του μαγνητικού πεδίου με μεγαλύτερη ένταση, στην περίπτωση -ας προς το κέντρο του μαγνητικού πεδίου όπου υπάρχουν τα δύο γυάλινα σώματα. Μια μαγνητική πίεση δημιουργείται εντός του μαγνητικού πεδίου και μετακινεί τα γυάλινα σώματα, οπότε προκαλείται περιστροφή της μπάρας. Η ένταση της περιστροφής εξαρτάται από το δείγμα του αερίου (περιεκτικότητά του σε O₂). Αυτή η περιστροφή μετράται από ένα κατάλληλο μηχανισμό (Εμμ.Κακκαράς 2014).

Εντοπίζοντας την απόκλιση από τον αλτήρα που παράγεται από τη διαφορά της μαγνήτισης του οξυγόνου στον αλτήρα και στο δείγμα αερίου είναι μεγαλύτερη από ότι σε άλλα αέρια, σχεδόν κανένα αέριο δε συγκρίνεται με το οξυγόνο. Σαν αναλυτές ξεχωριστοί από τους τύπου εντοπισμού, δε χρειάζεται τυποποιημένο αέριο.

Όλα τα αέρια έχουν θετική και αρνητική ευαισθησία. Μεταξύ αυτών των αερίων μόνο το O₂, NO, NO₂ έχουν υψηλή θετική μαγνητική ευαισθησία και ελκύνονται έντονα από το μαγνητικό πεδίο, όταν άλλες είναι διαμαγνητικές ευαισθησίες. Το NO και NO₂ μπορεί να περιέχονται σε αέρια καύσης σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις.



Σχήμα 3.10 Σχηματική αναπαράσταση του αναλυτή αερίων.

3.2 Επαναληψιμότητα

Η επαναληψιμότητα είναι μια έννοια που περιγράφει τον βαθμό συγκέντρωσης των μετρήσεων γύρω από μια κεντρική τιμή, με άλλα λόγια τον βαθμό συμφωνίας μεταξύ των αριθμητικών τιμών για δυο ή και περισσότερες επαναλαμβανόμενες μετρήσεις που έχουν όμως ληφθεί υπό τις ίδιες ακριβώς πειραματικές συνθήκες. Η επαναληψιμότητα είναι απαραίτητη σε πειράματα υπό κλίμακα, ώστε τα συμπεράσματα να μπορούν να γενικευθούν και να πιστοποιούνται από την ορθότητα των μετρήσεων. Για τον έλεγχο της επαναληψιμότητας έγιναν τα πειράματα A1-A2 με ακριβώς τις ίδιες συνθήκες.

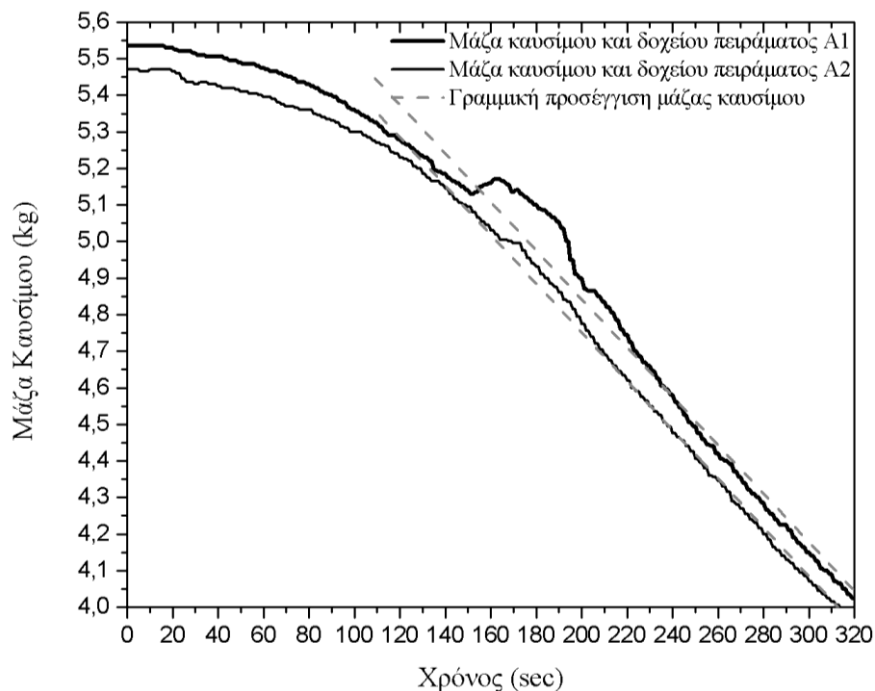
3.2.1 Περιγραφή

Το πείραμα A1, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.1, πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας 2350ml εξανίου ως καύσιμο. Το δοχείο του καυσίμου ήταν τοποθετημένο σε ύψος 2cm από το δάπεδο του δωματίου και η ανάφλεξη έγινε από απόσταση με μεταλλική ράβδο όπου στη μια άκρη είχε τοποθετημένο μαντήλι εμποτισμένο με καύσιμο. Από τη στιγμή της ανάφλεξης, η διάρκεια της φωτιάς ήταν 339sec.

Το πείραμα A2, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.1, έγινε επίσης χρησιμοποιώντας 2350ml εξανίου ως καύσιμο. Το δοχείο του καυσίμου ήταν τοποθετημένο σε ύψος 2cm από το δάπεδο του δωματίου και η ανάφλεξη έγινε από απόσταση με μεταλλική ράβδο όπου στη μια άκρη είχε τοποθετημένο μαντήλι εμποτισμένο με καύσιμο. Στο πείραμα A2, όπως και στο A1, ως άνοιγμα χρησιμοποιήθηκε πόρτα με παράγοντα αερισμού 0.0707. Από τη στιγμή της ανάφλεξης, η διάρκεια της φωτιάς ήταν 331sec.

3.2.2 Απώλεια μάζας καυσίμου

Με τη δυναμοκυψέλη η οποία ήταν τοποθετημένη στο κέντρο του δωματίου, κάτω από το δάπεδο, γινόταν μέτρηση του βάρους καυσίμου κάθε 2sec. Η αρχική μάζα καυσίμου μαζί με το δοχείο στα πειράματα A1-A2 ήταν 5.535 kg. ενώ το δοχείο είχε βάρος 4kg. Στο Σχήμα 3.11 φαίνονται οι καμπύλες της μάζας καυσίμου-δοχείου που μετρήθηκε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.



Σχήμα 3.11 Καμπύλες μάζας καυσίμου-δοχείου στα πειράματα A1 και A2.

Από τις καμπύλες της απώλειας μάζας στο Σχήμα 3.11, φαίνεται πως η κατανάλωση καυσίμου ακολουθεί παρόμοιο ρυθμό, παρά τη διαφορά των 8sec της χρονικής διάρκειας στα πειράματα A1-A2. Ιδιαίτερο σημείο είναι η αρχή του πειράματος, όπου στο πείραμα A2 παρατηρείται μείωση στην αρχική ποσότητα του καυσίμου. Αυτό ίσως οφείλεται σε καθυστέρηση της έναυσης, με αποτέλεσμα να εξατμιστεί ελάχιστη ποσότητα όπου όμως γίνεται εμφανής στην καμπύλη. Από το γράφημα παρατηρείται πως και στις δυο περιπτώσεις η κατανάλωση καυσίμου μπορεί να θεωρηθεί πως σχετίζεται γραμμικά με το χρόνο, οπότε ακολούθησε γραμμική προσέγγιση κάθε καμπύλης μέσω του λογισμικού MicrocalOrigin. Στο γράφημα οι γραμμικές προσεγγίσεις σε κάθε καμπύλη με διακεκομμένη γραμμή, ενώ τα αποτελέσματα της γραμμικής προσέγγισης φαίνονται στον Πίνακα 3.7.

Πείραμα	Γραμμική Προσέγγιση (linefit)	Κλίση a (slope)	Σφάλμα (%)
A1	$y = ax + 5.79458$	-0.00503	7.1949E-5
A2	$y = ax + 5.72213$	-0.0051	6.37816E-5

Πίνακας 3.7 Γραμμική προσέγγιση για τις καμπύλες μάζας καυσίμου-δοχείου πειραμάτων A1, A2.

Από την προσαρμογή και τις κλίσεις που υπολογίστηκαν στα πειράματα, επιβεβαιώνεται πως και στις δυο περιπτώσεις η επαναληψιμότητα έχει επιτευχθεί σε μεγάλο βαθμό.

3.2.3 Συγκεντρώσεις O_2 , CO_2 , CO

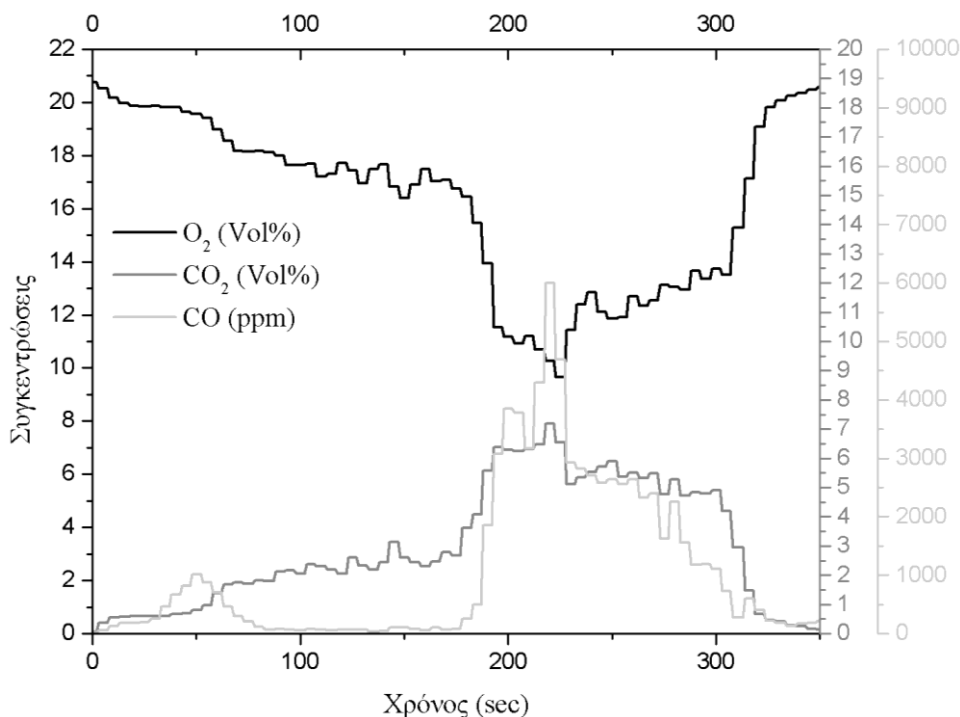
Με τον αναλυτή αερίων μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις αερίων σε ύψος 1.65m από το δάπεδο του δωματίου και σε απόσταση 0.05m από την πρόσοψη. Καταγράφηκαν καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος οι συγκεντρώσεις οξυγόνου (O_2), μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και διοξειδίου του άνθρακα (CO_2). Στον Πίνακα 3.8 φαίνονται οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές των συγκεντρώσεων στα πειράματα A1 και A2.

Πείραμα	O ₂ (Vol%)		CO ₂ (Vol%)		CO (ppm)	
	Μέγιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή
A1	20.77	9.66	7.2	0	6004.04	0.62
A2	20.75	10.7	6.73	0	2943.9	3.38

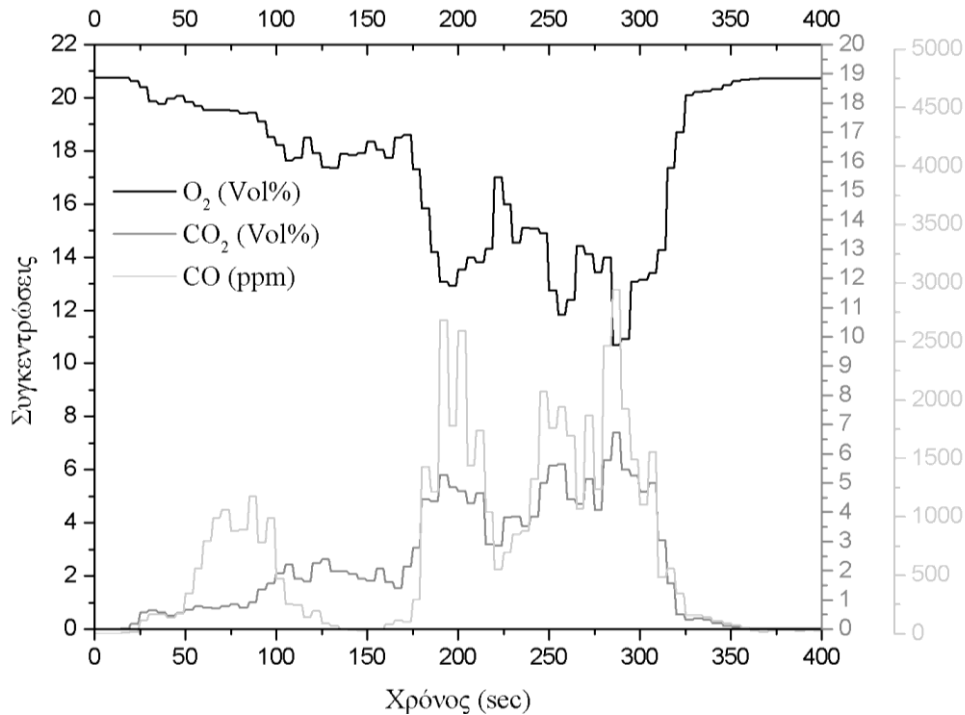
Πίνακας 3.8 Μέγιστες-ελάχιστες τιμές των μετρήσεων O₂, CO₂, CO στα πειράματα A1 και A2.

Από τον Πίνακα 3.8 παρατηρείται μεγάλη σύγκλιση των ακραίων τιμών στις συγκεντρώσεις οξυγόνου και διοξειδίου του άνθρακα. Αντίθετα, στην περίπτωση της συγκέντρωσης μονοξειδίου του άνθρακα η μέτρηση στο πείραμα A1 είναι σχεδόν διπλάσια από αυτή του A2 στις μέγιστες τιμές και περίπου πέντε φορές μικρότερη στις ελάχιστες τιμές. Στα Σχήμα 3.12 Σχήμα 3.13 φαίνονται τα γραφήματα των συγκεντρώσεων των αερίων στα πειράματα A1 και A2 αντίστοιχα.

Στο πείραμα A1, όπως και στο A2 η μέγιστη τιμή οξυγόνου, όπως είναι φυσικό, εμφανίζεται στην αρχή των περαμάτων και μετά το πέρας τους. Κατά τη διάρκεια της καύσης είναι λογικό η συγκέντρωση οξυγόνου να μειώνεται, με τις ελάχιστες τιμές να εμφανίζονται στο μεν πείραμα A1 περίπου 250sec μετά το έναυσμα, στο δε πείραμα A2 περίπου 275sec μετά το έναυσμα. Περίπου 10sec νωρίτερα στο πείραμα A1 εμφανίζονται οι μέγιστες τιμές του μονοξειδίου και του διοξειδίου του άνθρακα, ενώ στο πείραμα A2 οι μέγιστες τιμές μονοξειδίου-διοξειδίου εμφανίζονται την ίδια στιγμή με την ελάχιστη του οξυγόνου.



Σχήμα 3.12 Γραφική αναπαράσταση των συγκεντρώσεων O₂, CO, CO₂ στο πείραμα A1.



Σχήμα 3.13 Γραφική αναπαράσταση των συγκεντρώσεων O₂, CO, CO₂ στο πείραμα A2.

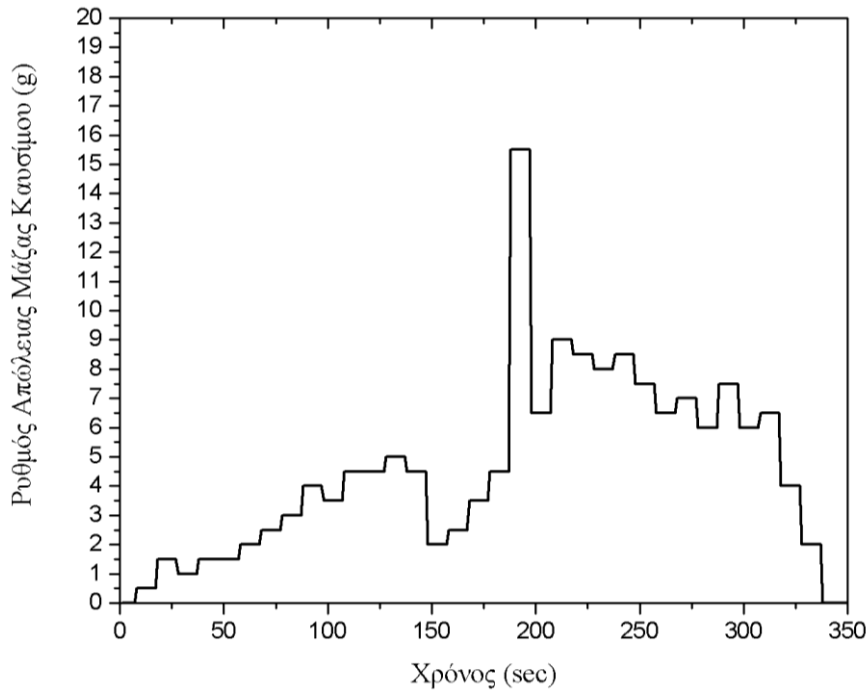
Από τα γραφήματα των δυο πειραμάτων για τις συγκεντρώσεις, παρατηρείται παρόμοια μορφή στις περιπτώσεις οξυγόνου και διοξειδίου του άνθρακα, ενώ οι μεγαλύτερες διαφορές παρατηρούνται στο μονοξείδιο του άνθρακα.

3.2.4 Πείραμα A1

Το πείραμα A1 είχε σκοπό τον έλεγχο της επαναληψιμότητας των πειραμάτων. Η ποσότητα του καυσίμου ήταν 2350mL. Το πείραμα είχε διάρκεια 372sec. Το πείραμα A1 είχε ως άνοιγμα πόρτα με παράγοντα αερισμού 0.0707. Η διάταξη των μετρητικών διατάξεων αναλύονται επαρκώς στη διπλωματική εργασία του Κ. Χοτζόγλου (Χοτζόγλου 2013). Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται η πειραματική διάταξη και ο τρόπος που αναπτύχθηκαν οι φλόγες κατά τη διάρκεια των πειραμάτων κλειστού τύπου.

3.2.4.1 Ρυθμός απώλειας μάζας

Στο Σχήμα 3.14 φαίνεται ο ρυθμός απώλειας μάζας του καυσίμου για το πείραμα A1. Η μορφή του διαγράμματος πρέπει να είναι πανομοιότυπη με το προφίλ της μεθόδου M επειδή εξαρτάται μόνο από τη διαφορά μάζας του καυσίμου, εφόσον η θερμογόνος δύναμη είναι σταθερή στις μεθόδους που χρησιμοποιούν την παραδοχή της τέλει καύσης και σχεδόν σταθερή στις μεθόδους της ατελούς καύσης.

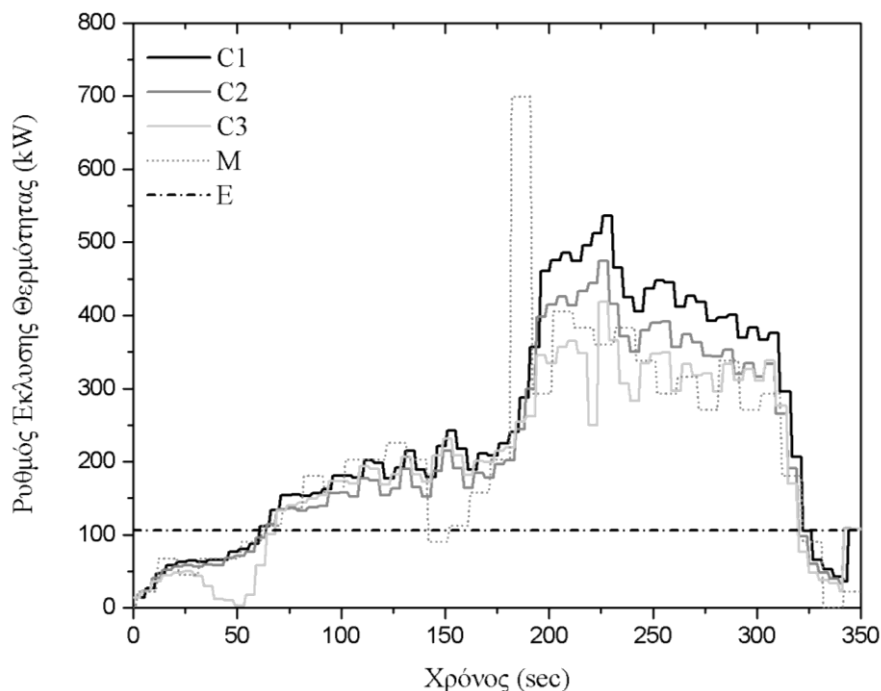


Σχήμα 3.14 Ρυθμός απώλειας μάζας καυσίμου για το πείραμα A1

3.2.4.2 Σύγκριση του PEΘ μεταξύ των μεθόδων C1,C2,C3,M,E

Στο Σχήμα 3.15 του πειράματος A1 φαίνονται οι φάσεις της πυρκαγιάς. Από την αρχή του πειράματος έως τη χρονική στιγμή $t = 200s$, βρίσκεται στη φάση της ανάπτυξης, όπου γίνεται και η καθολική ανάφλεξη, από τη χρονική στιγμή $t = 200s$ έως $t = 310s$ βρίσκεται στη φάση της πλήρους ανάπτυξης και από $t = 310s$ έως $t = 350s$ βρίσκεται στη φάση της σβέσης, κατά τη λήξη της οποίας παύει να υπάρχει και οπτική φλόγα.

Ο PEΘ για τις μεθόδους C1,C2,C3,M παρουσιάζει μέγιστη τιμή 536.78kW, 475.02kW, 418.17kW, 405.89kW, αντίστοιχα και μέση τιμή 245.36kW, 215.49kW, 197.34kW, 256.19kW. Επίσης για τις παραπάνω μεθόδους από το εμβαδόν των διαγραμμάτων του PEΘ σε συνάρτηση με το χρόνο υπολογίζονται οι συνολικές θερμότητες που εκλύονται κατά τη διάρκεια του πειράματος για κάθε μέθοδο 84.40MJ, 73.69MJ, 67.49MJ, 71.92MJ και σχετικά αποκλίσεις των μεθόδων κατανάλωσης οξυγόνου από τη μέθοδο (M) είναι -15.67%, -0.99%, 7.51% αντίστοιχα. Από τις τρεις μεθόδους μέτρησης του PEΘ μέσω κατανάλωσης οξυγόνου φαίνεται ότι η περίπτωση που λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς οι συγκεντρώσεις των O_2, CO_2, CO (C2) προσεγγίζει καλύτερα την αντίστοιχη περίπτωση μέσω του ρυθμού απώλειας μάζας καυσίμου (M).

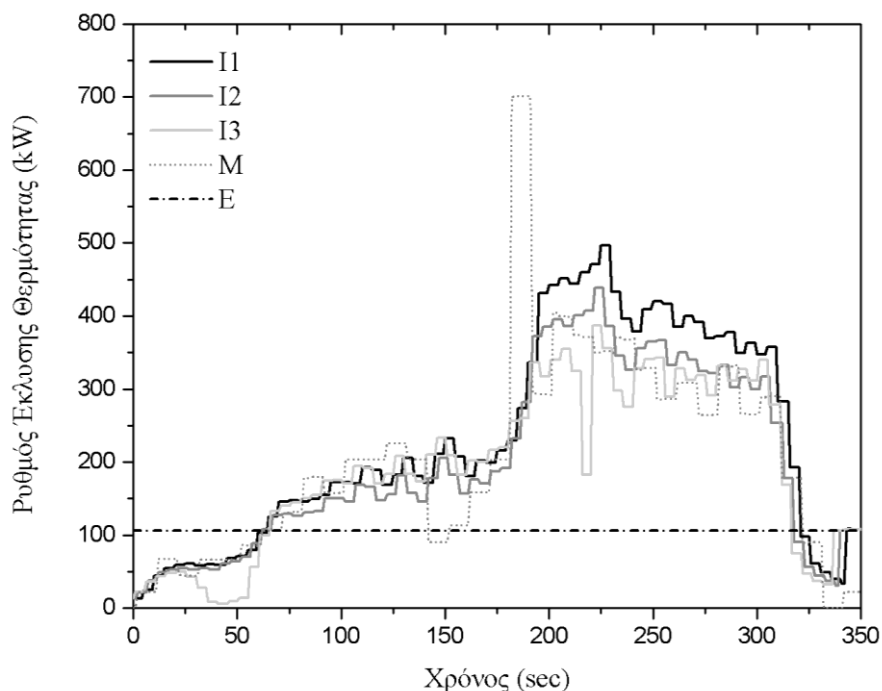


Σχήμα 3.15 Σύγκριση του PEΘ μεταξύ των μεθόδων C1,C2,C3,M,E για το πείραμα A1.

3.2.4.3 Σύγκριση του PEΘ μεταξύ των μεθόδων I1,I2,I3,M,E

Στο Σχήμα 3.16 του πειράματος A1 φαίνονται οι φάσεις της πυρκαγιάς. Από την αρχή του πειράματος έως τη χρονική στιγμή $t = 200s$, βρίσκεται στη φάση της ανάπτυξης, όπου γίνεται και η καθολική ανάφλεξη, από τη χρονική στιγμή $t = 200s$ έως $t = 310s$ βρίσκεται στη φάση της πλήρους ανάπτυξης και από $t = 310s$ έως $t = 350s$ βρίσκεται στη φάση της σβέσης, κατά τη λήξη της οποίας παύει να υπάρχει και οπτική φλόγα.

Ο PEΘ για τις μεθόδους I1,I2,I3,M παρουσιάζει μέγιστη τιμή 496.82kW, 438.94kW, 386.81kW, 404.9kW, αντίστοιχα και μέση τιμή 231.46kW, 203.53kW, 196.57kW, 202.05kW. Επίσης για τις παραπάνω μεθόδους από το εμβαδόν των διαγραμμάτων του PEΘ σε συνάρτηση με το χρόνο υπολογίζονται οι συνολικές θερμότητες που εκλύονται κατά τη διάρκεια του πειράματος για κάθε μέθοδο 79.39MJ, 69.19MJ, 66.24MJ, 71.92MJ και σχετικά αποκλίσεις των μεθόδων κατανάλωσης οξυγόνου από τη μέθοδο (M) είναι -10.34%, 3.82%, 7.90% αντίστοιχα. Από τις τρεις μεθόδους μέτρησης του PEΘ μέσω κατανάλωσης οξυγόνου φαίνεται ότι η περίπτωση που λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς οι συγκεντρώσεις των O_2, CO_2, CO (I2) προσεγγίζει καλύτερα την αντίστοιχη περίπτωση μέσω του ρυθμού απώλειας μάζας καυσίμου (M).



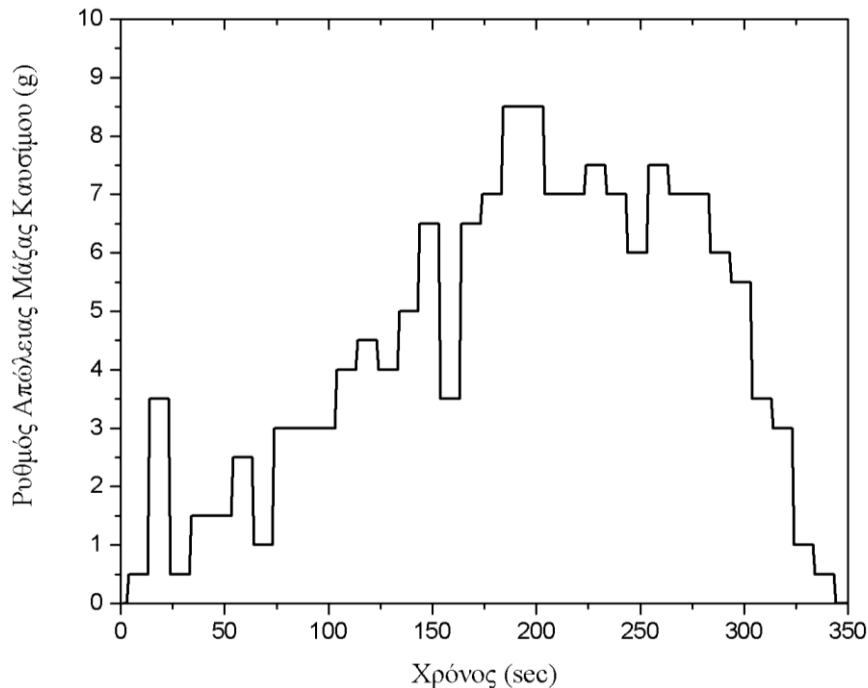
Σχήμα 3.16 Σύγκριση του ΡΕΘ μεταξύ των μεθόδων I1,I2,I3,M,E για το πείραμα A1.

3.2.5 Πείραμα A2

Το πείραμα A2 είχε σκοπό τον έλεγχο της επαναληψιμότητας των πειραμάτων. Η ποσότητα του καυσίμου ήταν 2350mL. Το πείραμα είχε διάρκεια 331sec. Το πείραμα A2 είχε ως άνοιγμα πόρτα με παράγοντα αερισμού 0.0707. Η διάταξη των μετρητικών διατάξεων αναλύονται επαρκώς στη διπλωματική εργασία του Κ. Χοτζόγλου (Χοτζόγλου 2013). Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται η πειραματική διάταξη και ο τρόπος που αναπτύχθηκαν οι φλόγες κατά τη διάρκεια των πειραμάτων κλειστού τύπου.

3.2.5.1 Ρυθμός απώλειας μάζας

Στο Σχήμα 3.17 φαίνεται ο ρυθμός απώλειας μάζας του καυσίμου για το πείραμα A2. Η μορφή του διαγράμματος πρέπει να είναι πανομοιότυπη με το προφίλ της μεθόδου M επειδή εξαρτάται μόνο από τη διαφορά μάζας του καυσίμου, εφόσον η θερμογόνος δύναμη είναι σταθερή στις μεθόδους που χρησιμοποιούν την παραδοχή της τέλει καύσης και σχεδόν σταθερή στις μεθόδους της ατελούς καύσης.

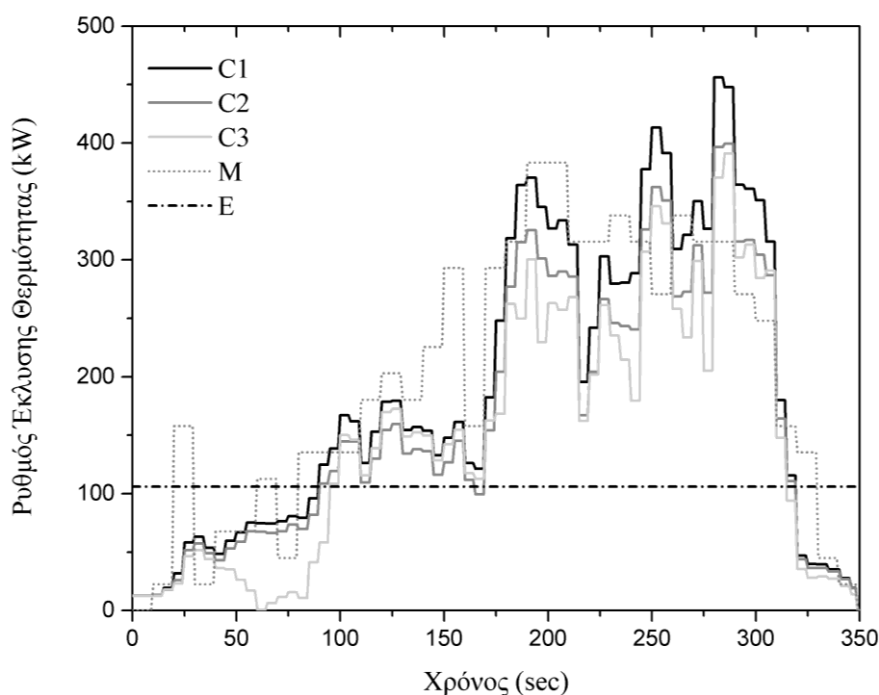


Σχήμα 3.17 Ρυθμός απώλειας μάζας καυσίμου για το πείραμα A2

3.2.5.2 Σύγκριση του PEΘ μεταξύ των μεθόδων C1,C2,C3,M,E

Στο Σχήμα 3.18 του πειράματος A2 φαίνονται οι φάσεις της πυρκαγιάς. Από την αρχή του πειράματος έως τη χρονική στιγμή $t = 200s$, βρίσκεται στη φάση της ανάπτυξης, όπου γίνεται και η καθολική ανάφλεξη, από τη χρονική στιγμή $t = 170s$ έως $t = 300s$ βρίσκεται στη φάση της πλήρους ανάπτυξης και από $t = 300s$ έως $t = 340s$ βρίσκεται στη φάση της σβέσης, κατά τη λήξη της οποίας παύει να υπάρχει και οπτική φλόγα.

Ο PEΘ για τις μεθόδους C1,C2,C3,M παρουσιάζει μέγιστη τιμή 456.09kW, 399.4kW, 391.14kW, 383.34kW αντίστοιχα και μέση τιμή 187.11kW, 163.75kW, 148kW, 198.29kW. Επίσης για τις παραπάνω μεθόδους από το εμβαδόν των διαγραμμάτων του PEΘ σε συνάρτηση με το χρόνο υπολογίζονται οι συνολικές θερμότητες που εκλύονται κατά τη διάρκεια του πειράματος για κάθε μέθοδο 65.30MJ, 57.14MJ, 51.65MJ, 69.20MJ και σχετικά αποκλίσεις των μεθόδων κατανάλωσης οξυγόνου από τη μέθοδο (M) είναι 5.63%, 17.42%, 25.36% αντίστοιχα. Από τις τρεις μεθόδους μέτρησης του PEΘ μέσω κατανάλωσης οξυγόνου φαίνεται ότι η περίπτωση που λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς οι συγκεντρώσεις των O_2, CO_2, CO (C3) προσεγγίζει καλύτερα την αντίστοιχη περίπτωση μέσω του ρυθμού απώλειας μάζας καυσίμου (M).

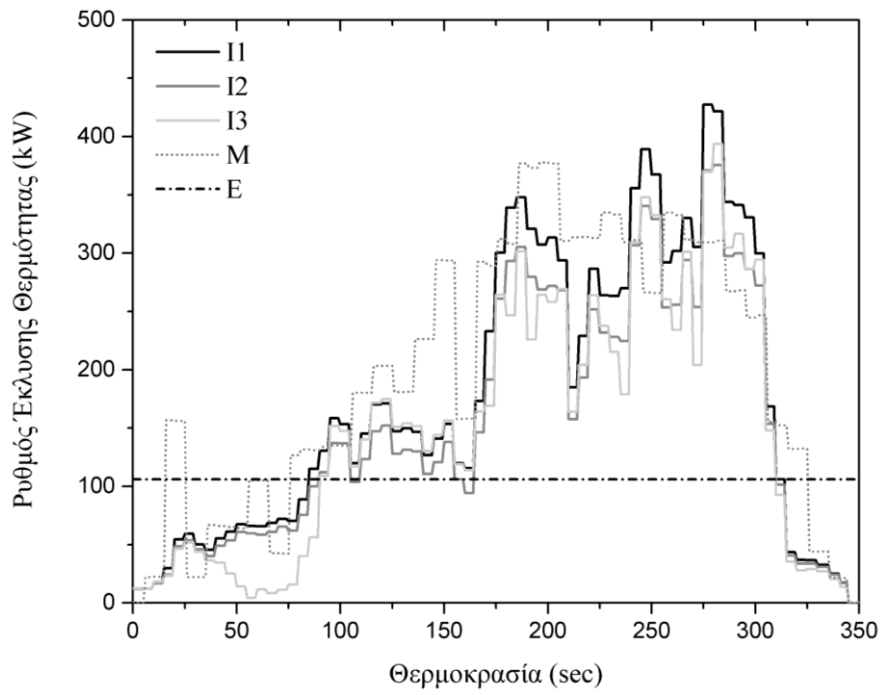


Σχήμα 3.18 Σύγκριση του PEΘ μεταξύ των μεθόδων C1,C2,C3,M,E για το πείραμα A2.

3.2.5.3 Σύγκριση του PEΘ μεταξύ των μεθόδων I1,I2,I3,M,E

Στο Σχήμα 3.19 του πειράματος A2 φαίνονται οι φάσεις της πυρκαγιάς. Από την αρχή του πειράματος έως τη χρονική στιγμή $t = 200s$, βρίσκεται στη φάση της ανάπτυξης, όπου γίνεται και η καθολική ανάφλεξη, από τη χρονική στιγμή $t = 170s$ έως $t = 300s$ βρίσκεται στη φάση της πλήρους ανάπτυξης και από $t = 300s$ έως $t = 340s$ βρίσκεται στη φάση της σβέσης, κατά τη λήξη της οποίας παύει να υπάρχει και οπτική φλόγα.

Ο PEΘ για τις μεθόδους I1,I2,I3,M παρουσιάζει μέγιστη τιμή 427.49kW, 375.62kW, 393.67kW, 379.68kW αντίστοιχα και μέση τιμή 175.8kW, 153.65kW, 148.45kW, 196.12kW. Επίσης για τις παραπάνω μεθόδους από το εμβαδόν των διαγραμμάτων του PEΘ σε συνάρτηση με το χρόνο υπολογίζονται οι συνολικές θερμότητες που εκλύονται κατά τη διάρκεια του πειράματος για κάθε μέθοδο 61.35MJ, 53.62MJ, 51.95MJ, 69.20MJ και σχετικά αποκλίσεις των μεθόδων κατανάλωσης οξυγόνου από τη μέθοδο (M) είναι 10.12%, 21.41%, 24.30% αντίστοιχα. Από τις τρεις μεθόδους μέτρησης του PEΘ μέσω κατανάλωσης οξυγόνου φαίνεται ότι η περίπτωση που λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς οι συγκεντρώσεις των O_2, CO_2, CO (C3) προσεγγίζει καλύτερα την αντίστοιχη περίπτωση μέσω του ρυθμού απώλειας μάζας καυσίμου (M).



Σχήμα 3.19 Σύγκριση του ΡΕΘ μεταξύ των μεθόδων I1,I2,I3,M,E για το πείραμα A2.

3.3 Ισχύς φωτιάς

Ένας από τους πιο βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν μια πυρκαγιά και την εξέλιξη του εξωτερικού πλουμίου της φωτιάς είναι το πυροθερμικό φορτίο. Προκειμένου να μελετηθεί η επίδρασή του πραγματοποιήθηκαν πειράματα χρησιμοποιώντας διαφορετικές ποσότητες καυσίμου. Στα πειράματα A3, A4 και A5 μελετήθηκε το θερμοκρασιακό προφίλ του εξωτερικού πλουμίου της φωτιάς και η επίδρασή του στην πρόσοψη του δωματίου.

3.3.1 Περιγραφή

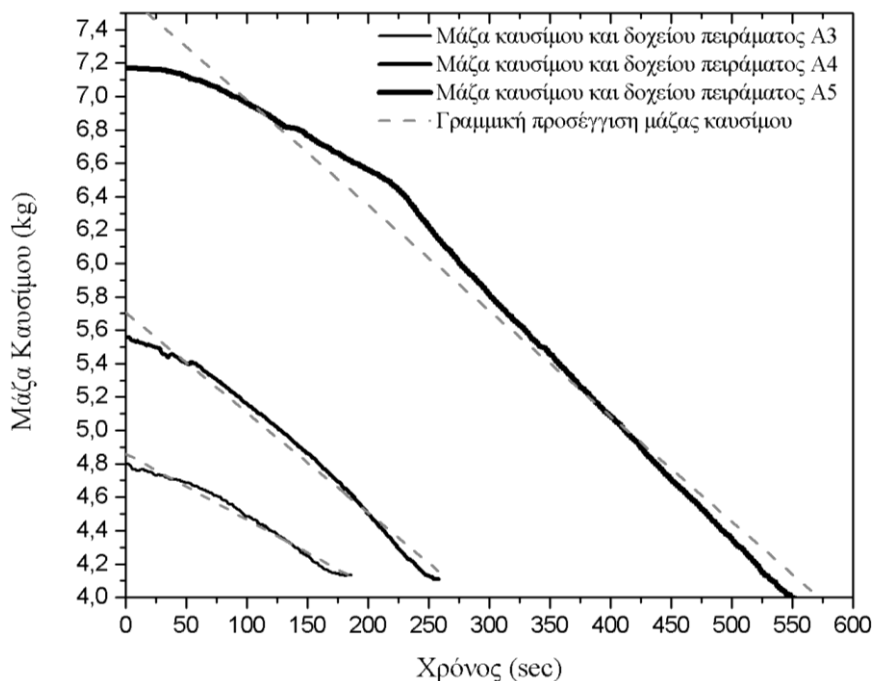
Στο πείραμα A3 χρησιμοποιήθηκε ως καύσιμο 1000ml εξανίου, με το δοχείο καυσίμου να βρίσκεται σε ύψος 7.5cm από το δάπεδο του δωματίου. Η ποσότητα αυτή του καυσίμου προσομοιώνει πυρκαγιά φορτίου 1.57MW σε δωμάτιο κανονικών διαστάσεων. Η ανάφλεξη έγινε με μεταλλικό ραβδί όπου στη μια άκρη του είχε στερεωθεί μαντήλι, το οποίο χρησίμευε ως προσάναμμα. Η διάρκεια της φωτιάς στο πείραμα A3 ήταν 372sec. Στο σημείο αυτό είναι απαραίτητο να σημειωθεί πως δεν τέθηκε σε λειτουργία ο μετρητής αερίων κατά τη διάρκεια του πειράματος A3.

Το πείραμα A4 διεξήχθη με 2350ml εξανίου, προσομοιώνοντας πυρκαγιά 3.68MW σε δωμάτιο πραγματικών διαστάσεων. Στο πείραμα η ισχύς της φωτιάς έφτασε τα 115kW, ενώ το δοχείο καυσίμου βρισκόταν σε ύψος 7.5cm από το δάπεδο του δωματίου. Το πείραμα A4 είχε διάρκεια 525sec.

Στο πείραμα A5, έχοντας ως σκοπό την προσομοίωση φωτιάς 7.35MW, χρησιμοποιήθηκαν 4700ml εξανίου, τα οποία στην περίπτωση του μοντέλου έδωσαν φωτιά δύναμης 230kW. Το δοχείο τοποθετήθηκε σε ύψος 2cm από το δάπεδο του δωματίου, ενώ αυτή ήταν και η μεγαλύτερη ποσότητα καυσίμου που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη σειρά πειραμάτων, αποτελώντας το ανώτατο όριο ποσότητας καυσίμου για το δοχείο που χρησιμοποιήθηκε. Το πείραμα A5 διήρκησε 595sec.

3.3.2 Απώλεια μάζας καυσίμου

Με τη δυναμοκυψέλη η οποία ήταν τοποθετημένη στο κέντρο του δωματίου, κάτω από το δάπεδο, γινόταν μέτρηση του βάρους καυσίμου κάθε 2sec. Η αρχική μάζα καυσίμου μαζί με το δοχείο στο πείραμα A3 ήταν 4.8 kg. ενώ το δοχείο είχε βάρος 4kg. Αντίστοιχα, στα πειράματα A4 και A5 η αρχική μάζα καυσίμου μαζί με το δοχείο ήταν 5.535 kg και 7.17 kg. Στο Σχήμα 3.20 φαίνονται οι καμπύλες της μάζας καυσίμου-δοχείου που μετρήθηκε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.



Σχήμα 3.20 Καμπύλες απώλειας μάζας καυσίμου-δοχείου στα πειράματα A3, A4 και A5.

Από τις καμπύλες του Σχήμα 3.20 παρατηρείται ποιοτική σύγκλιση στο ρυθμό κατανάλωσης καυσίμου για τα πειράματα A3 και A4. Μεγαλύτερη διαφοροποίηση παρουσιάζεται στην περίπτωση του πειράματος A5, όπου ο ρυθμός καύσης είναι εμφανώς μεγαλύτερος, από αυτόν στα πειράματα A3 και A4. Όπως παρατηρείται σε όλες τις περιπτώσεις, είναι δυνατή η γραμμική προσέγγιση στις καμπύλες, με τα αποτελέσματα να εμφανίζονται στον Πίνακα 1.1.

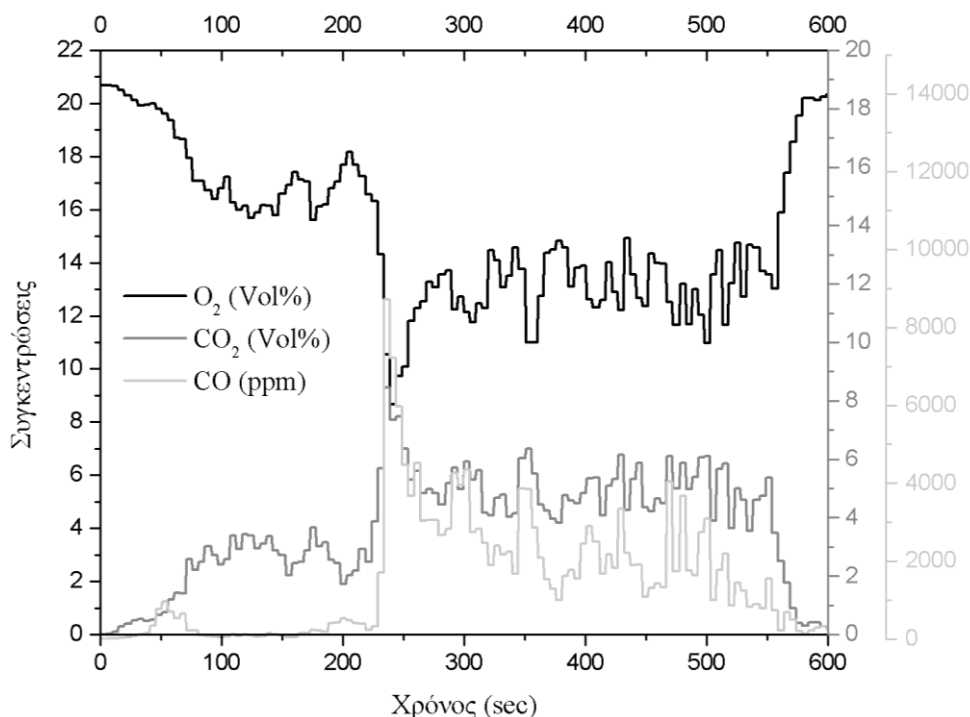
Πείραμα	Γραμμική Προσέγγιση (linefit)	Κλίση a (slope)	Σφάλμα (%)
A3	$y = ax + 4.68245$	-0.00203	5.04409E-5
A4	$y = ax + 5.54519$	-0.00457	6.76492E-5
A5	$y = ax + 7.61059$	-0.00632	3.5393E-5

Πίνακας 3.9 Γραμμική προσαρμογή για τις καμπύλες μάζας καυσίμου-δοχείου, πειραμάτων A3, A4.

Από το λογισμικό MicrocalOrigin, όπου έγινε η γραμμική προσέγγιση, αποδεικνύεται ότι η καμπύλη της απώλειας μάζας του πειράματος A5 έχει τριπλάσια κλίση από αυτό του A3. Αντίστοιχα, το σφάλμα στην περίπτωση αυτή είναι αρκετά μεγαλύτερο σε σχέση με τα πειράματα A3 και A4. Επιπροσθέτως, δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά στις κλίσεις μεταξύ των πειραμάτων A3 και A4, με το σφάλμα στην περίπτωση του A4 να είναι ελαφρώς αυξημένο σε σχέση με του πειράματος A3.

3.3.3 Συγκεντρώσεις O₂, CO₂, CO

Όπως αναφέρθηκε στην περιγραφή των μετρητικών συσκευών, στα πειράματα A3 και A4 δε χρησιμοποιήθηκε αναλυτής αερίων. Για το λόγο αυτό, στο Σχήμα 3.21 που ακολουθεί φαίνονται οι μετρήσεις των συγκεντρώσεων O₂, CO₂, CO του πειράματος A5.



Σχήμα 3.21 Γραφική αναπαράσταση των συγκεντρώσεων αερίων του πειράματος A5.

Στη συνέχεια ακολουθεί ο Πίνακας 3.10 όπου καταγράφηκαν οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές των μετρήσεων για κάθε αέριο.

Πείραμα	O ₂ (Vol%)		CO ₂ (Vol%)		CO (ppm)	
	Μέγιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή
A5	20.69	8.68	8.46	0.03	8716.32	6.94

Πίνακας 3.10 Μέγιστες-ελάχιστες τιμές των συγκεντρώσεων αερίων στο πείραμα A5.

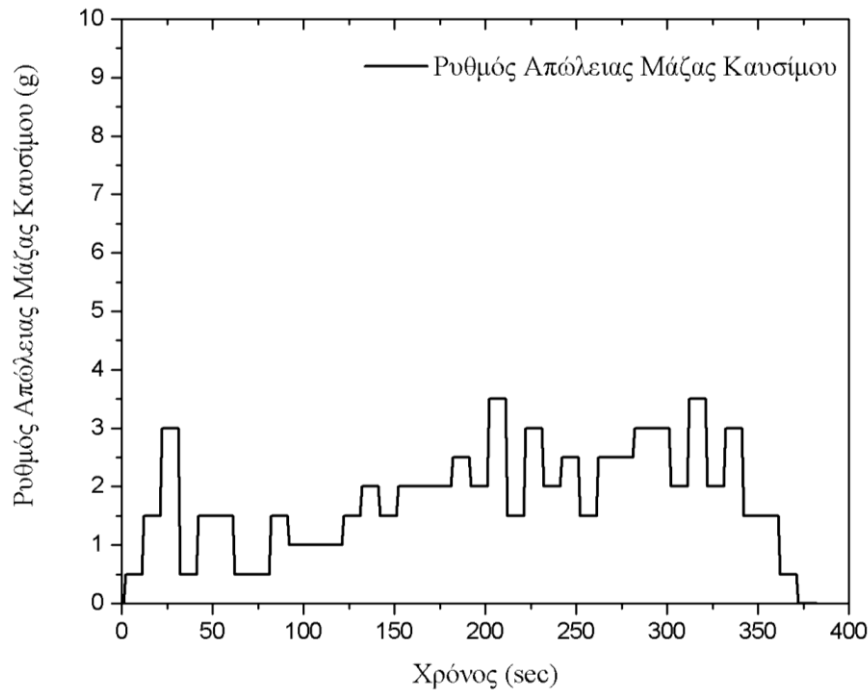
Η ελάχιστη τιμή στο οξυγόνο μετρήθηκε 225sec. μετά την έναρξη του πειράματος, ελάχιστα δευτερόλεπτα μετά την εμφάνιση της μέγιστης τιμής που μετρήθηκε για το μονοξείδιο και το διοξείδιο του άνθρακα.

3.3.4 Πείραμα A3

Το πείραμα A3 είχε σκοπό τον έλεγχο της ισχύος των πειραμάτων. Η ποσότητα του καυσίμου ήταν 1000mL. Το πείραμα είχε διάρκεια 372sec. Το πείραμα A3 είχε ως άνοιγμα πόρτα με παράγοντα αερισμού 0.0707. Η διάταξη των μετρητικών διατάξεων αναλύονται επαρκώς στη διπλωματική εργασία του Κ. Χοτζόγλου (Χοτζόγλου 2013). Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται η πειραματική διάταξη και ο τρόπος που αναπτύχθηκαν οι φλόγες κατά τη διάρκεια των πειραμάτων κλειστού τύπου.

3.3.4.1 Ρυθμός απώλειας μάζας

Στο Σχήμα 3.22 φαίνεται ο ρυθμός απώλειας μάζας του καυσίμου για το πείραμα A3. Η μορφή του διαγράμματος πρέπει να είναι πανομοιότυπη με το προφίλ της μεθόδου M επειδή εξαρτάται μόνο από τη διαφορά μάζας του καυσίμου, εφόσον η θερμογόνος δύναμη είναι σταθερή στις μεθόδους που χρησιμοποιούν την παραδοχή της τέλει καύσης και σχεδόν σταθερή στις μεθόδους της ατελούς καύσης.



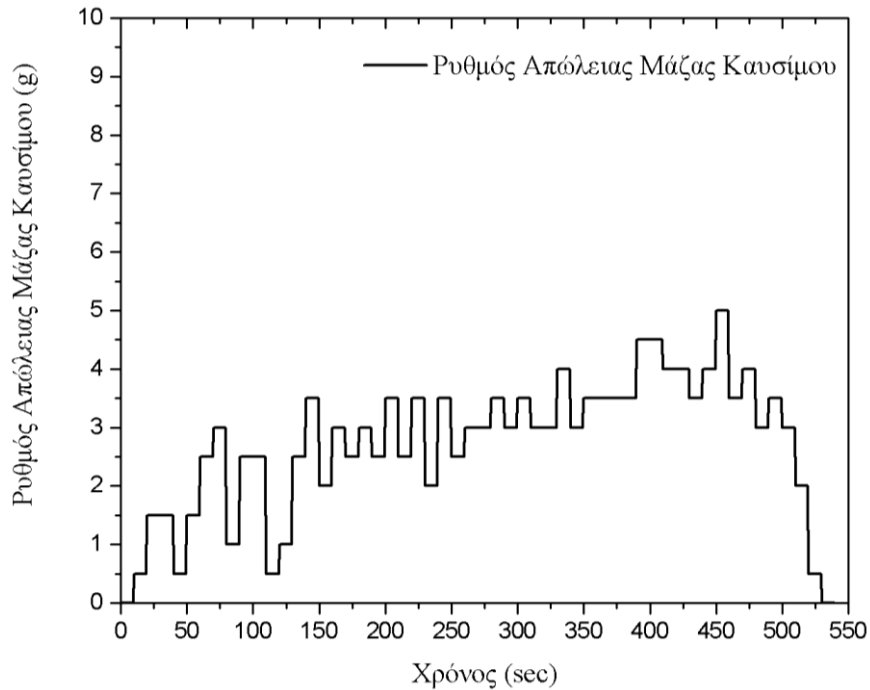
Σχήμα 3.22 Ρυθμός απώλειας μάζας καυσίμου για το πείραμα A3

3.3.5 Πείραμα A4

Το πείραμα A4 είχε σκοπό τον έλεγχο της ισχύος των πειραμάτων. Η ποσότητα του καυσίμου ήταν 2350mL. Το πείραμα είχε διάρκεια 525sec. Το πείραμα A4 είχε ως άνοιγμα πόρτα με παράγοντα αερισμού 0.0707. Η διάταξη των μετρητικών διατάξεων αναλύονται επαρκώς στη διπλωματική εργασία του Κ. Χοτζόγλου (Χοτζόγλου 2013). Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται η πειραματική διάταξη και ο τρόπος που αναπτύχθηκαν οι φλόγες κατά τη διάρκεια των πειραμάτων κλειστού τύπου.

3.3.5.1 Ρυθμός απώλειας μάζας

Στο Σχήμα 3.23 φαίνεται ο ρυθμός απώλειας μάζας του καυσίμου για το πείραμα A4. Η μορφή του διαγράμματος πρέπει να είναι πανομοιότυπη με το προφίλ της μεθόδου M επειδή εξαρτάται μόνο από τη διαφορά μάζας του καυσίμου, εφόσον η θερμογόνος δύναμη είναι σταθερή στις μεθόδους που χρησιμοποιούν την παραδοχή της τέλει καύσης και σχεδόν σταθερή στις μεθόδους της ατελούς καύσης.



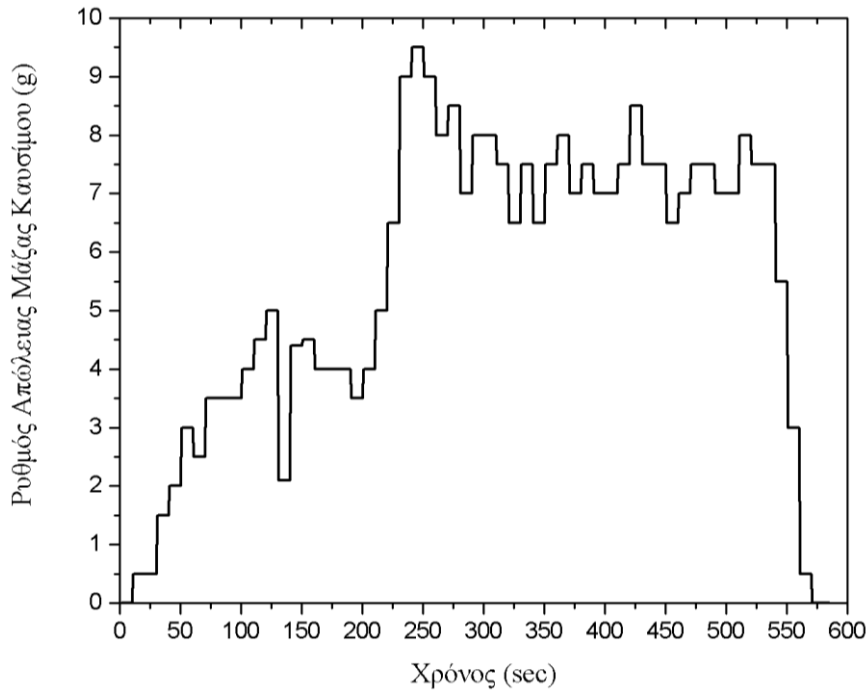
Σχήμα 3.23 Ρυθμός απώλειας μάζας καυσίμου για το πείραμα A4

3.3.6 Πείραμα A5

Το πείραμα A5 είχε σκοπό τον έλεγχο της ισχύος των πειραμάτων. Η ποσότητα του καυσίμου ήταν 4700mL. Το πείραμα είχε διάρκεια 595sec. Το πείραμα A5 είχε ως άνοιγμα πόρτα με παράγοντα αερισμού 0.0707. Η διάταξη των μετρητικών διατάξεων αναλύονται επαρκώς στη διπλωματική εργασία του Κ. Χοτζόγλου (Χοτζόγλου 2013). Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται η πειραματική διάταξη και ο τρόπος που αναπτύχθηκαν οι φλόγες κατά τη διάρκεια των πειραμάτων κλειστού τύπου.

3.3.6.1 Ρυθμός απώλειας μάζας

Στο Σχήμα 3.24 φαίνεται ο ρυθμός απώλειας μάζας του καυσίμου για το πείραμα A5. Η μορφή του διαγράμματος πρέπει να είναι πανομοιότυπη με το προφίλ της μεθόδου M επειδή εξαρτάται μόνο από τη διαφορά μάζας του καυσίμου, εφόσον η θερμογόνο δύναμη είναι σταθερή στις μεθόδους που χρησιμοποιούν την παραδοχή της τέλει καύσης και σχεδόν σταθερή στις μεθόδους της ατελούς καύσης.



Σχήμα 3.24 Ρυθμός απώλειας μάζας καυσίμου για το πείραμα A5

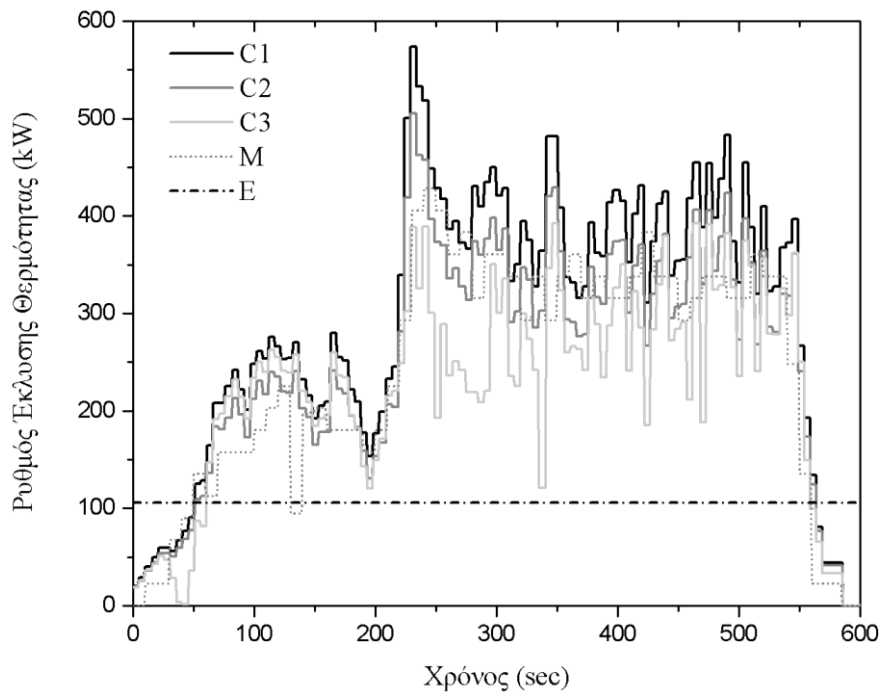
Στο πείραμα A5, έχοντας ως σκοπό την προσομοίωση φωτιάς 7.35MW, χρησιμοποιήθηκαν 4700ml εξανίου, τα οποία στην περίπτωση του μοντέλου έδωσαν φωτιά δύναμης 230kW (Σχέση 4.3). Το δοχείο τοποθετήθηκε σε ύψος 2cm από το δάπεδο του δωματίου, ενώ αυτή ήταν και η μεγαλύτερη ποσότητα καυσίμου που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη σειρά πειραμάτων, αποτελώντας το ανώτατο όριο ποσότητας καυσίμου για το δοχείο που χρησιμοποιήθηκε. Το πείραμα A5 διήρκησε 595sec. Η διάρκεια των 595sec του πειράματος συγκλίνουν στο θεωρητικό χρόνο υπολογισμού της φωτιάς (600sec) της Σχέσης 4.1. Αξιοσημείωτο, το γεγονός πως κατά την εξέλιξη του πειράματος A5 καταστράφηκαν δυο θερμοστοιχεία, ένα εντός δωματίου και ένα στην πρόσοψη της κατασκευής, με τις φλόγες να διαπερνούν ακόμα και τα προστατευτικά των καλωδίων των θερμοστοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν για το σκοπό αυτό, κάτι που δεν έγινε σε άλλα πειράματα.

3.3.6.2 Σύγκριση του PEΘ μεταξύ των μεθόδων C1,C2,C3,M,E

Στο Σχήμα 3.25 του πειράματος A5 φαίνονται οι φάσεις της πυρκαγιάς. Από την αρχή του πειράματος έως τη χρονική στιγμή $t = 200s$, βρίσκεται στη φάση της ανάπτυξης, όπου γίνεται και η καθολική ανάφλεξη, από τη χρονική στιγμή $t = 200s$ έως $t = 550s$ βρίσκεται στη φάση της πλήρους ανάπτυξης και από $t = 550s$ έως $t = 580s$ βρίσκεται στη φάση της σβέσης, κατά τη λήξη της οποίας παύει να υπάρχει και οπτική φλόγα.

Ο PEΘ για τις μεθόδους C1,C2,C3,M παρουσιάζει μέγιστη τιμή 573.33kW, 505.37kW, 392.70kW, 428.44kW αντίστοιχα και μέση τιμή 298.19kW, 260.27kW, 228.59kW, 246.82kW. Επίσης για τις παραπάνω μεθόδους από το εμβαδόν των διαγραμμάτων του PEΘ σε συνάρτηση με το χρόνο υπολογίζονται οι συνολικές θερμότητες που εκλύονται κατά τη διάρκεια του πειράματος για κάθε μέθοδο 175.03MJ, 152.77MJ, 134.18MJ, 144.88MJ και σχετικά αποκλίσεις των μεθόδων κατανάλωσης οξυγόνου από τη μέθοδο (M) είναι -20.81%, -5.45%, 7.38% αντίστοιχα. Από τις τρεις μεθόδους μέτρησης του PEΘ μέσω κατανάλωσης οξυγόνου φαίνεται ότι η περίπτωση που λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς οι

συγκεντρώσεις των O_2, CO_2, CO (C1) προσεγγίζει καλύτερα την αντίστοιχη περίπτωση μέσω του ρυθμού απώλειας μάζας καυσίμου (M).

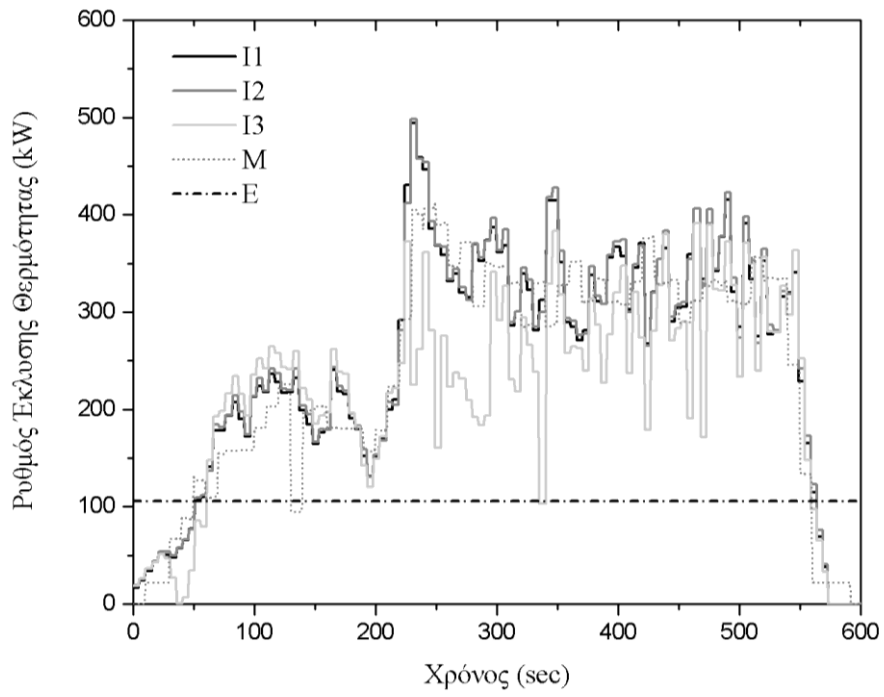


Σχήμα 3.25 Σύγκριση του PEΘ μεταξύ των μεθόδων C1,C2,C3,M,E για το πείραμα A5.

3.3.6.3 Σύγκριση του PEΘ μεταξύ των μεθόδων I1,I2,I3,M,E

Στο Σχήμα 3.26 του πειράματος A5 φαίνονται οι φάσεις της πυρκαγιάς. Από την αρχή του πειράματος έως τη χρονική στιγμή $t = 200s$, βρίσκεται στη φάση της ανάπτυξης, όπου γίνεται και η καθολική ανάφλεξη, από τη χρονική στιγμή $t = 200s$ έως $t = 550s$ βρίσκεται στη φάση της πλήρους ανάπτυξης και από $t = 550s$ έως $t = 580s$ βρίσκεται στη φάση της σβέσης, κατά τη λήξη της οποίας παύει να υπάρχει και οπτική φλόγα.

Ο PEΘ για τις μεθόδους I1,I2,I3,M παρουσιάζει μέγιστη τιμή 494.11kW, 498.44kW, 392.70kW, 391.13kW αντίστοιχα και μέση τιμή 255.74kW, 259.55kW, 228.59kW, 223.4kW. Επίσης για τις παραπάνω μεθόδους από το εμβαδόν των διαγραμμάτων του PEΘ σε συνάρτηση με το χρόνο υπολογίζονται οι συνολικές θερμότητες που εκλύονται κατά τη διάρκεια του πειράματος για κάθε μέθοδο 150.3MJ, 152.61MJ, 131.3MJ, 144.88MJ και σχετικά αποκλίσεις των μεθόδων κατανάλωσης οξυγόνου από τη μέθοδο (M) είναι -5.74%, -7.31%, 7.62% αντίστοιχα. Από τις τρεις μεθόδους μέτρησης του PEΘ μέσω κατανάλωσης οξυγόνου φαίνεται ότι η περίπτωση που λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς οι συγκεντρώσεις των O_2, CO_2, CO (I2) προσεγγίζει καλύτερα την αντίστοιχη περίπτωση μέσω του ρυθμού απώλειας μάζας καυσίμου (M).



Σχήμα 3.26 Σύγκριση του PEΘ μεταξύ των μεθόδων I1,I2,I3,M,E για το πείραμα A5.

3.4 Αερισμός μέσω ανοίγματος

Ο αερισμός του εσωτερικού χώρου παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη μιας φωτιάς κάτι το οποίο μελετήθηκε με δυο διαφορετικά ανοίγματα στα πειράματα Α6 και Β7. Μεταβάλλοντας τη γεωμετρία του ανοίγματος μελετήθηκε η επίδραση του παράγοντα αερισμού τόσο στις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται εσωτερικά του δωματίου, όσο και στην ανάπτυξη του εξωτερικού πλούμιου της φωτιάς.

3.4.1 Περιγραφή

Η ποσότητα εξανίου που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα Α6 και Β7 ήταν 2350ml, σε δοχείο το οποίο ήταν τοποθετημένο σε ύψος 2cm από το δάπεδο. Στο πείραμα Α6, ως άνοιγμα επιλέχθηκε πόρτα διαστάσεων 50cm(ύψος) x 20cm(πλάτος) με παράγοντα αερισμού 0.0707, ενώ στο πείραμα Β7 παράθυρο με διαστάσεις 30cm(ύψος) x 20cm(πλάτος) και παράγοντα αερισμού 0.329 (βλέπε Πίνακας 3.1). Και στις δυο περιπτώσεις η ανάφλεξη έγινε με μεταλλικό ραβδί που στη μια άκρη του υπήρχε τυλιγμένο μαντήλι ως προσάναμμα.

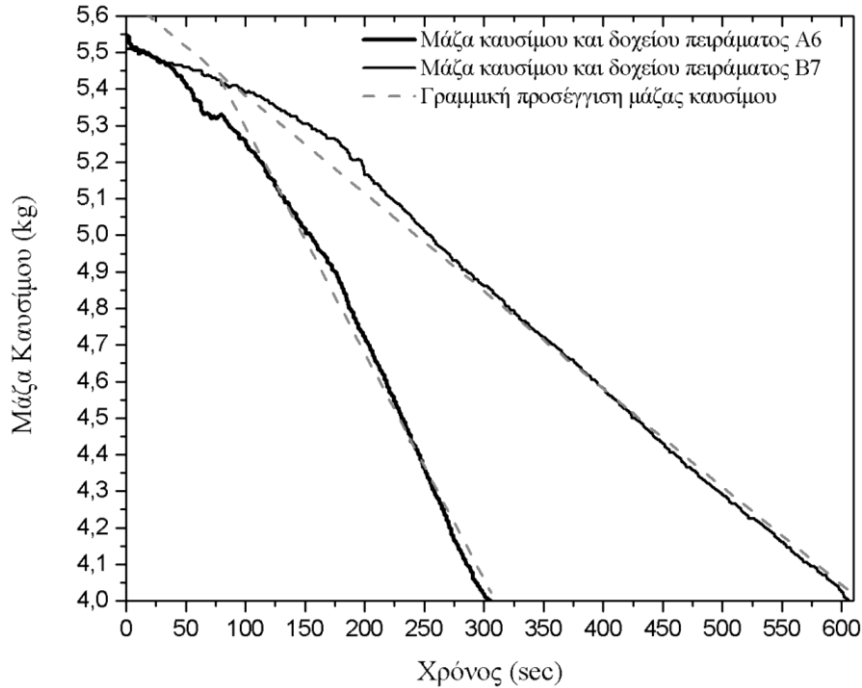
Το πείραμα Α6 διήρκησε 336sec, διάρκεια που διαφέρει ελάχιστα με τις αντίστοιχες πειραμάτων με ίδιες συνθήκες, δηλαδή τα Α1, Α2, Α4 που έχουν ήδη μελετηθεί.

Το πείραμα Β7 ήταν το πρώτο από τα δυο πειράματα που έγιναν με παράθυρο ως άνοιγμα και η διάρκειά του ήταν 659sec.

3.4.2 Απώλεια μάζας καυσίμου

Με τη δυναμοκυψέλη η οποία ήταν τοποθετημένη στο κέντρο του δωματίου, κάτω από το δάπεδο, γινόταν μέτρηση του βάρους καυσίμου κάθε 2sec. Η αρχική μάζα καυσίμου μαζί με το δοχείο στα πειράματα Α6 και Β7 ήταν 5.55kg ενώ το δοχείο είχε βάρος 4kg. Στο Σχήμα 3.27 φαίνονται οι καμπύλες της μάζας καυσίμου-δοχείου που μετρήθηκε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

Ο χρόνος διεξαγωγής του πειράματος Α6 ήταν σχεδόν ο μισός από αυτόν του πειράματος Β7 με το παράθυρο, με το καύσιμο στην περίπτωση όπου ο αερισμός ήταν πολύ μεγαλύτερος, να καίγεται ταχύτερα. Αντιθέτως, με το μειωμένο αερισμό στην περίπτωση παραθύρου, το οξυγόνο το οποίο εισερχόταν στο δωμάτιο ήταν αρκετά περιορισμένο και η καύση ιδιαίτερα αργή. Για το λόγο αυτό η κλίση στο πείραμα Α6 είναι πολύ πιο μεγάλη σε σχέση με την αντίστοιχη του πειράματος Β7 (σχεδόν διπλάσια). Και στις δυο περιπτώσεις έγινε γραμμική προσέγγιση, με τα αποτελέσματα να φαίνονται στον Πίνακα 3.11.



Σχήμα 3.27 Καμπύλες μάζας καυσίμου-δοχείου στα πειράματα A6 και B7.

Πείραμα	Γραμμική Προσέγγιση (linefit)	Κλίση a (slope)	Σφάλμα (%)
A6	$y = ax + 6.11759$	-0.0082	1.06293E-4
B7	$y = ax + 5.65072$	-0.00268	9.81137E-6

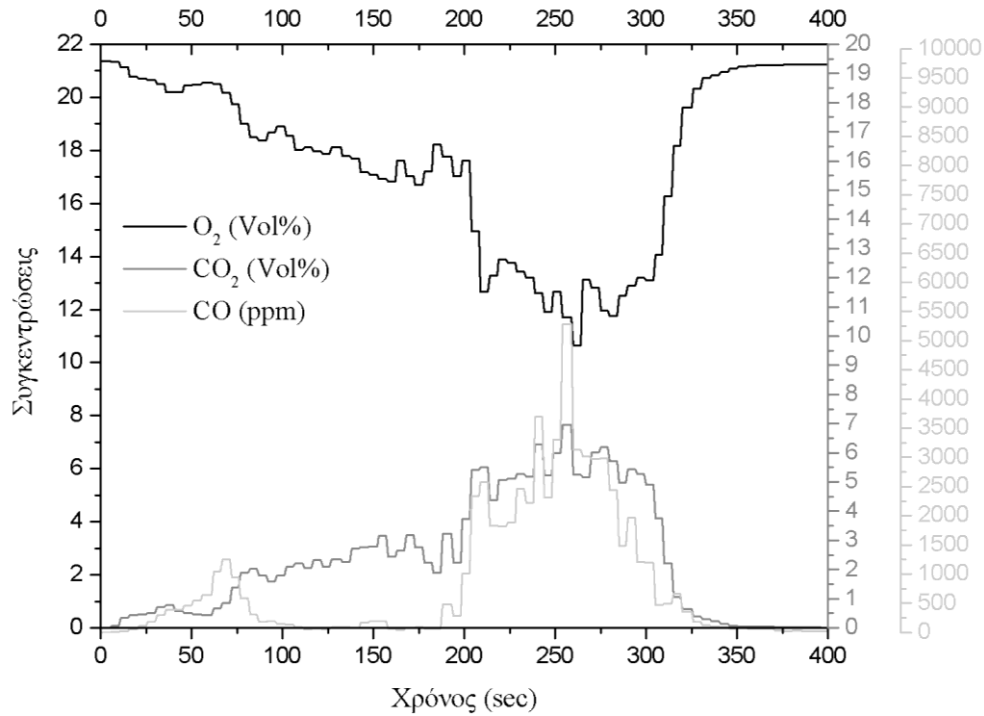
Πίνακας 3.11 Γραμμική προσαρμογή για τις καμπύλες μάζας καυσίμου-δοχείου πειραμάτων A6, B7.

3.4.3 Συγκεντρώσεις O₂, CO₂, CO

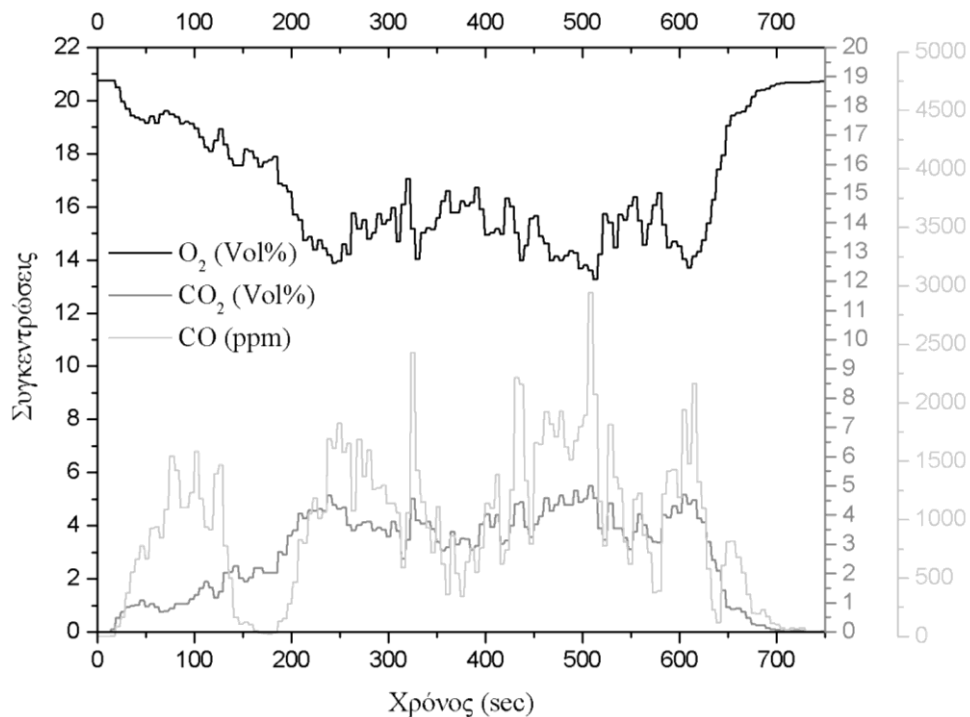
Με τον αναλυτή αερίων μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις αερίων σε ύψος 1.65m από το δάπεδο του δωματίου και σε απόσταση 0.05m από την πρόσοψη. Οι μετρήσεις περιλάμβαναν συγκέντρωση οξυγόνου (O₂), μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Τα γραφήματα των συγκεντρώσεων για κάθε πείραμα εμφανίζονται στα Σχήματα 4.117-4.118 που ακολουθούν, ενώ στον Πίνακα 3.12 φαίνονται οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές των συγκεντρώσεων στα πειράματα A6 και B7.

Πείραμα	O ₂ (Vol%)		CO ₂ (Vol%)		CO (ppm)	
	Μέγιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή
A6	21.36	10.64	6.97	0	5281.16	3.81
B7	20.75	13.29	5.01	0.09	2941.69	6.33

Πίνακας 3.12 Μέγιστες-ελάχιστες τιμές των μετρήσεων O₂, CO₂, CO στα πειράματα A6 και B7.



Σχήμα 3.28 Γραφική αναπαράσταση των συγκεντρώσεων αερίων του πειράματος Α6.



Σχήμα 3.29 Γραφική αναπαράσταση των συγκεντρώσεων αερίων του πειράματος Β7.

Από τις τιμές του Πίνακα 4.29 παρατηρείται πως σε όλες τις περιπτώσεις αερίων, οι ελάχιστες συγκεντρώσεις στο πείραμα Β7 με το παράθυρο είναι λίγο μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες στο πείραμα Α6 με την πόρτα. Επίσης, παρατηρείται μεγάλη απόκλιση στις μέγιστες τιμές του μονοξειδίου του άνθρακα, με αυτή στο πείραμα Α6 να είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την αυτή του πειράματος Β7. Οι μέγιστες τιμές του μονοξειδίου και του διοξειδίου του άνθρακα εμφανίστηκαν στο πείραμα Α6 περίπου 250sec από την έναρξη, τη

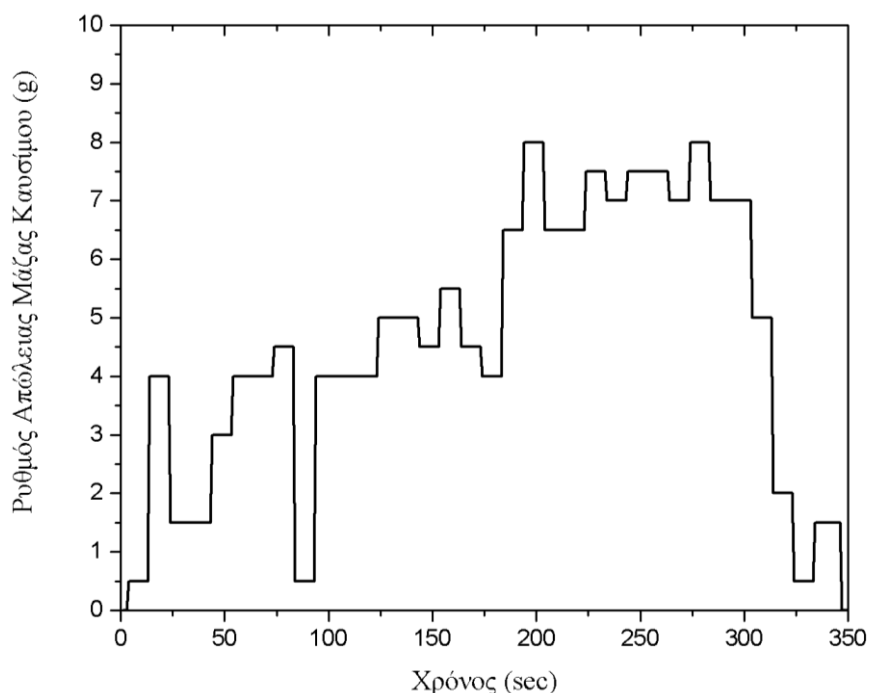
στιγμή όπου μετρήθηκαν οι χαμηλότερες τιμές οξυγόνου στο πείραμα. Αντίστοιχα, κατά τη στιγμή 480sec μετά την έναρξη του πειράματος Β7 εμφανίστηκαν οι μέγιστες τιμές μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα με ταυτόχρονη εμφάνιση ελάχιστης τιμής οξυγόνου.

3.4.4 Πείραμα Α6

Το πείραμα Α6 είχε σκοπό τον έλεγχο του παράγοντα αερισμού. Η ποσότητα του καυσίμου ήταν 2350mL. Το πείραμα είχε διάρκεια 336sec. Το πείραμα Α6 είχε ως άνοιγμα πόρτα με παράγοντα αερισμού 0.0707. Η διάταξη των μετρητικών διατάξεων αναλύονται επαρκώς στη διπλωματική εργασία του Κ. Χοτζόγλου (Χοτζόγλου 2013). Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται η πειραματική διάταξη και ο τρόπος που αναπτύχθηκαν οι φλόγες κατά τη διάρκεια των πειραμάτων κλειστού τύπου.

3.4.4.1 Ρυθμός απώλειας μάζας

Στο Σχήμα 3.30 φαίνεται ο ρυθμός απώλειας μάζας του καυσίμου για το πείραμα Α6. Η μορφή του διαγράμματος πρέπει να είναι πανομοιότυπη με το προφίλ της μεθόδου Μ επειδή εξαρτάται μόνο από τη διαφορά μάζας του καυσίμου, εφόσον η θερμογόνο δύναμη είναι σταθερή στις μεθόδους που χρησιμοποιούν την παραδοχή της τέλει καύσης και σχεδόν σταθερή στις μεθόδους της ατελούς καύσης.



Σχήμα 3.30 Ρυθμός απώλειας μάζας καυσίμου για το πείραμα Α6

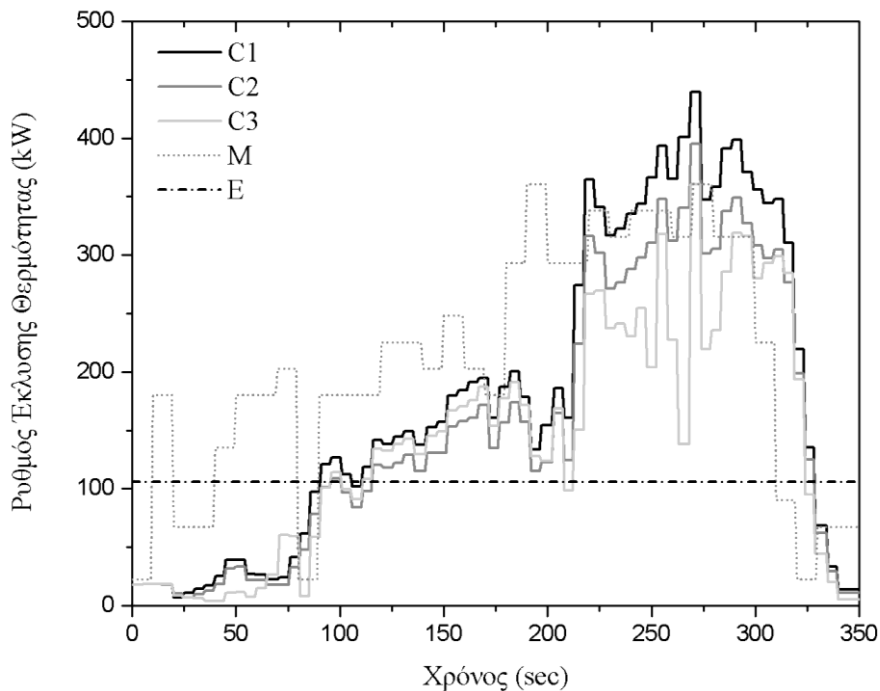
3.4.4.2 Σύγκριση του ΡΕΘ μεταξύ των μεθόδων C1,C2,C3,M,E

Στο Σχήμα 3.31 του πειράματος Α6 φαίνονται οι φάσεις της πυρκαγιάς. Από την αρχή του πειράματος έως τη χρονική στιγμή $t = 220s$,βρίσκεται στη φάση της ανάπτυξης, όπου γίνεται και η καθολική ανάφλεξη, από τη χρονική στιγμή $t = 220s$ έως $t = 320s$ βρίσκεται

στη φάση της πλήρους ανάπτυξης και από $t = 320s$ έως $t = 340s$ βρίσκεται στη φάση της σβέσης, κατά τη λήξη της οποίας παύει να υπάρχει και οπτική φλόγα.

Ο PEΘ για τις μεθόδους C1,C2,C3,M παρουσιάζει μέγιστη τιμή 439.38kW, 394.89kW, 360.37kW, 360.79kW αντίστοιχα και μέση τιμή 179.58kW, 154.51kW, 140.2kW, 209.24kW. Επίσης για τις παραπάνω μεθόδους από το εμβαδόν των διαγραμμάτων του PEΘ σε συνάρτηση με το χρόνο υπολογίζονται οι συνολικές θερμότητες που εκλύονται κατά τη διάρκεια του πειράματος για κάθε μέθοδο 61.77MJ, 53.15MJ, 48.23MJ, 71.97MJ και σχετικά αποκλίσεις των μεθόδων κατανάλωσης οξυγόνου από τη μέθοδο (M) είναι 14.17%, 26.15%, 32.99% αντίστοιχα. Από τις τρεις μεθόδους μέτρησης του PEΘ μέσω κατανάλωσης οξυγόνου φαίνεται ότι η περίπτωση που λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς οι συγκεντρώσεις των O_2, CO_2, CO (C1) προσεγγίζει καλύτερα την αντίστοιχη περίπτωση μέσω του ρυθμού απώλειας μάζας καυσίμου (M).

Το πείραμα A6 διήρκησε 336sec, διάρκεια που διαφέρει ελάχιστα με τις αντίστοιχες πειραμάτων με ίδιες συνθήκες, δηλαδή τα A1, A2, A4 που έχουν ήδη μελετηθεί.



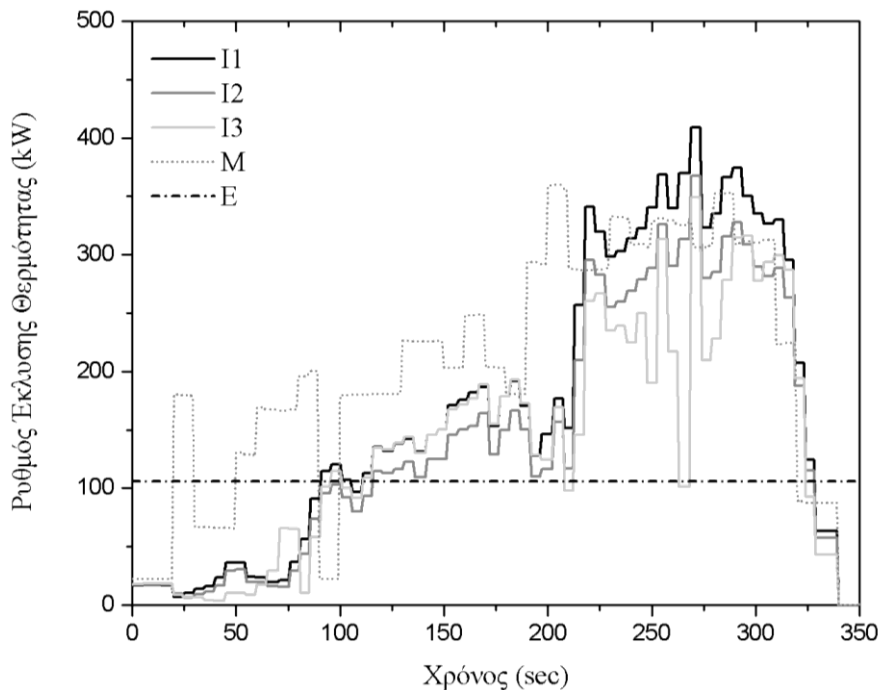
Σχήμα 3.31 Σύγκριση του PEΘ μεταξύ των μεθόδων C1,C2,C3,M,E για το πείραμα A6.

3.4.4.3 Σύγκριση του PEΘ μεταξύ των μεθόδων I1,I2,I3,M,E

Στο Σχήμα 3.32 του πειράματος A6 φαίνονται οι φάσεις της πυρκαγιάς. Από την αρχή του πειράματος έως τη χρονική στιγμή $t = 220s$, βρίσκεται στη φάση της ανάπτυξης, όπου γίνεται και η καθολική ανάφλεξη, από τη χρονική στιγμή $t = 220s$ έως $t = 320s$ βρίσκεται στη φάση της πλήρους ανάπτυξης και από $t = 320s$ έως $t = 340s$ βρίσκεται στη φάση της σβέσης, κατά τη λήξη της οποίας παύει να υπάρχει και οπτική φλόγα.

Ο PEΘ για τις μεθόδους I1,I2,I3,M παρουσιάζει μέγιστη τιμή 409.03kW, 367.37kW, 349.29kW, 361.83kW αντίστοιχα και μέση τιμή 156.79kW, 144.96kW, 138.23kW,

205.68kW. Επίσης για τις παραπάνω μεθόδους από το εμβαδόν των διαγραμμάτων του PEΘ σε συνάρτηση με το χρόνο υπολογίζονται οι συνολικές θερμότητες που εκλύονται κατά τη διάρκεια του πειράματος για κάθε μέθοδο 58.32MJ, 50.01MJ, 47.68MJ, 71.97MJ και σχετικά αποκλίσεις των μεθόδων κατανάλωσης οξυγόνου από τη μέθοδο (M) είναι 18.61%, 29.44%, 32.79% αντίστοιχα. Από τις τρεις μεθόδους μέτρησης του PEΘ μέσω κατανάλωσης οξυγόνου φαίνεται ότι η περίπτωση που λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς οι συγκεντρώσεις των O₂,CO₂,CO (Π) προσεγγίζει καλύτερα την αντίστοιχη περίπτωση μέσω του ρυθμού απώλειας μάζας καυσίμου (M).



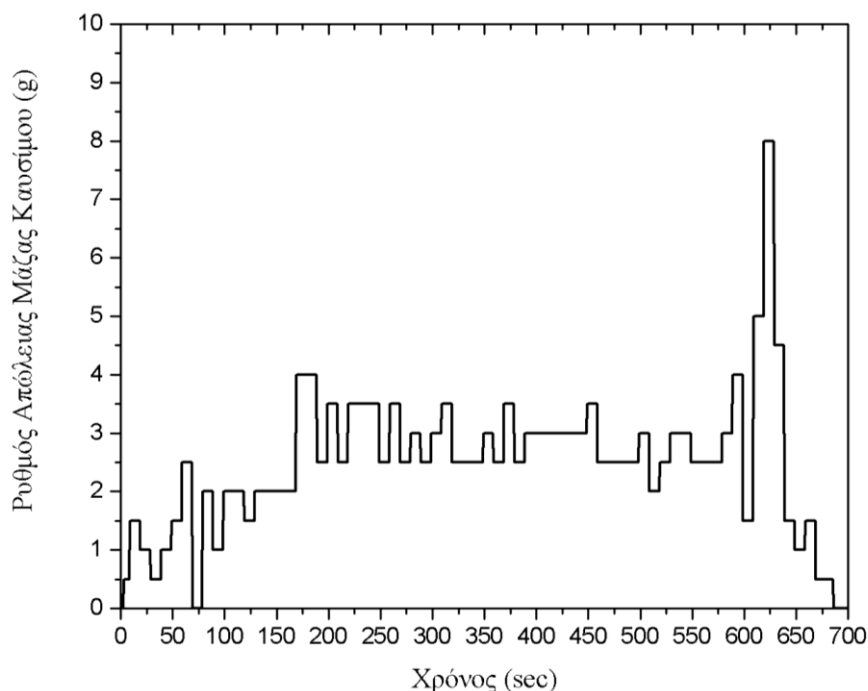
Σχήμα 3.32 Σύγκριση του PEΘ μεταξύ των μεθόδων Π1,Π2,Π3,Μ,Ε για το πείραμα Α6.

3.4.5 Πείραμα Β7

Το πείραμα Β7 είχε σκοπό τον έλεγχο του παράγοντα αερισμού. Η ποσότητα του καυσίμου ήταν 2350mL. Το πείραμα είχε διάρκεια 659sec. Το πείραμα Β7 είχε ως άνοιγμα παράθυρο με παράγοντα αερισμού 0.0329. Η διάταξη των μετρητικών διατάξεων αναλύονται επαρκώς στη διπλωματική εργασία του Κ. Χοτζόγλου (Χοτζόγλου 2013). Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται η πειραματική διάταξη και ο τρόπος που αναπτύχθηκαν οι φλόγες κατά τη διάρκεια των πειραμάτων κλειστού τύπου.

3.4.5.1 Ρυθμός απώλειας μάζας

Στο Σχήμα 3.33 φαίνεται ο ρυθμός απώλειας μάζας του καυσίμου για το πείραμα Β7. Η μορφή του διαγράμματος πρέπει να είναι πανομοιότυπη με το προφίλ της μεθόδου Μ επειδή εξαρτάται μόνο από τη διαφορά μάζας του καυσίμου, εφόσον η θερμογόνο δύναμη είναι σταθερή στις μεθόδους που χρησιμοποιούν την παραδοχή της τέλει καύσης και σχεδόν σταθερή στις μεθόδους της ατελούς καύσης.



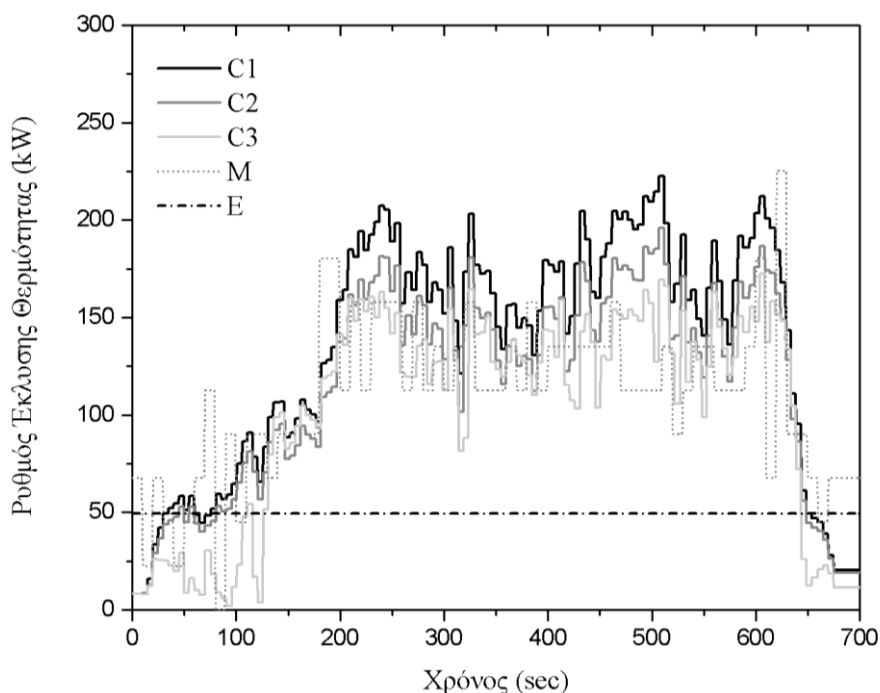
Σχήμα 3.33 Ρυθμός απώλειας μάζας καυσίμου για το πείραμα B7

3.4.5.2 Σύγκριση του ΡΕΘ μεταξύ των μεθόδων C1,C2,C3,M,E

Στο Σχήμα 3.34 του πειράματος B7 φαίνονται οι φάσεις της πυρκαγιάς. Από την αρχή του πειράματος έως τη χρονική στιγμή $t = 200s$, βρίσκεται στη φάση της ανάπτυξης, όπου γίνεται και η καθολική ανάφλεξη, από τη χρονική στιγμή $t = 200s$ έως $t = 600s$ βρίσκεται στη φάση της πλήρους ανάπτυξης και από $t = 600s$ έως $t = 660s$ βρίσκεται στη φάση της σβέσης, κατά τη λήξη της οποίας παύει να υπάρχει και οπτική φλόγα.

Ο ΡΕΘ για τις μεθόδους C1,C2,C3,M παρουσιάζει μέγιστη τιμή 222.55kW, 195.93kW, 172.39kW, 225.5kW αντίστοιχα και μέση τιμή 136.94kW, 119.52kW, 103.97kW, 110.66kW. Επίσης για τις παραπάνω μεθόδους από το εμβαδόν των διαγραμμάτων του ΡΕΘ σε συνάρτηση με το χρόνο υπολογίζονται οι συνολικές θερμότητες που εκλύονται κατά τη διάρκεια του πειράματος για κάθε μέθοδο 88.48MJ, 77.11MJ, 67.28MJ, 69.67MJ και σχετικά αποκλίσεις των μεθόδων κατανάλωσης οξυγόνου από τη μέθοδο (M) είναι -26.99%, -10.68%, -3.42 % αντίστοιχα. Από τις τρεις μεθόδους μέτρησης του ΡΕΘ μέσω κατανάλωσης οξυγόνου φαίνεται ότι η περίπτωση που λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς οι συγκεντρώσεις των O_2, CO_2, CO (C3) προσεγγίζει καλύτερα την αντίστοιχη περίπτωση μέσω του ρυθμού απώλειας μάζας καυσίμου (M).

Το πείραμα B7 ήταν το πρώτο από τα δυο πειράματα που έγιναν με παράθυρο ως άνοιγμα και η διάρκειά του ήταν 659sec.

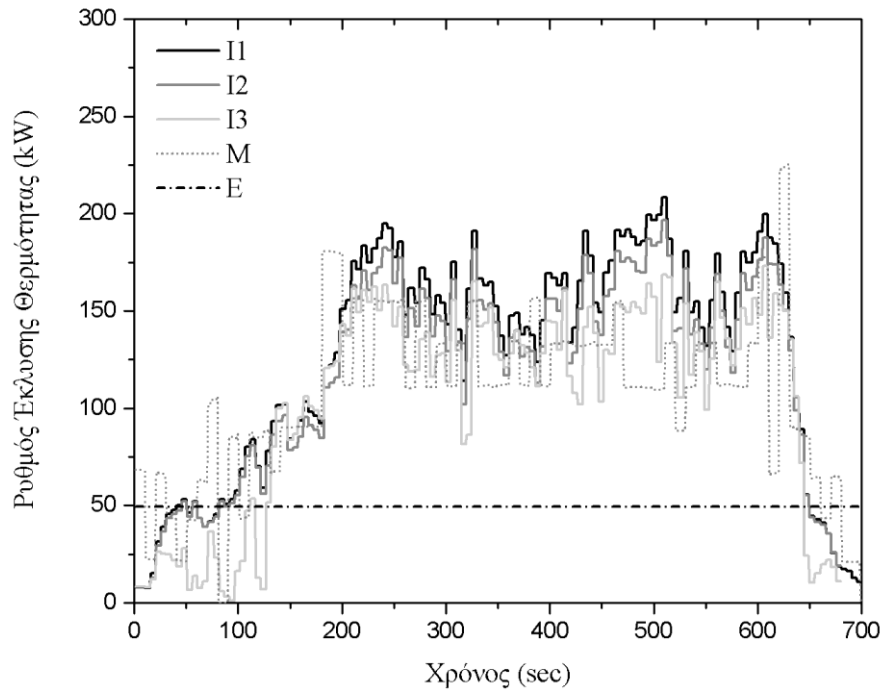


Σχήμα 3.34 Σύγκριση του PEΘ μεταξύ των μεθόδων C1,C2,C3,M,E για το πείραμα B7.

3.4.5.3 Σύγκριση του PEΘ μεταξύ των μεθόδων I1,I2,I3,M,E

Στο Σχήμα 3.15 του πειράματος B7 φαίνονται οι φάσεις της πυρκαγιάς. Από την αρχή του πειράματος έως τη χρονική στιγμή $t = 200s$, βρίσκεται στη φάση της ανάπτυξης, όπου γίνεται και η καθολική ανάφλεξη, από τη χρονική στιγμή $t = 200s$ έως $t = 550s$ βρίσκεται στη φάση της πλήρους ανάπτυξης και από $t = 550s$ έως $t = 580s$ βρίσκεται στη φάση της σβέσης, κατά τη λήξη της οποίας παύει να υπάρχει και οπτική φλόγα.

Ο PEΘ για τις μεθόδους I1,I2,I3,M παρουσιάζει μέγιστη τιμή 208.35kW, 196.49kW, 173.31kW, 226.48kW αντίστοιχα και μέση τιμή 125.4kW, 120.01kW, 104.42kW, 109.44kW. Επίσης για τις παραπάνω μεθόδους από το εμβαδόν των διαγραμμάτων του PEΘ σε συνάρτηση με το χρόνο υπολογίζονται οι συνολικές θερμότητες που εκλύονται κατά τη διάρκεια του πειράματος για κάθε μέθοδο 87.78MJ, 81.60MJ, 71.00MJ, 69.67MJ και σχετικά αποκλίσεις των μεθόδων κατανάλωσης οξυγόνου από τη μέθοδο (M) είναι -17.86%, -9.65%, -4.58% αντίστοιχα. Από τις τρεις μεθόδους μέτρησης του PEΘ μέσω κατανάλωσης οξυγόνου φαίνεται ότι η περίπτωση που λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς οι συγκεντρώσεις των O_2, CO_2, CO (I3) προσεγγίζει καλύτερα την αντίστοιχη περίπτωση μέσω του ρυθμού απώλειας μάζας καυσίμου (M).



Σχήμα 3.35 Σύγκριση του PEΘ μεταξύ των μεθόδων I1,I2,I3,M,E για το πείραμα B7.

3.5 Κεντρικός Άξονας Εξωτερικού Πλουμίου Φωτιάς

Στα πειράματα A8 και B9, έγινε προσπάθεια για τον καθορισμό του κεντρικού άξονα του εξωτερικού πλουμίου φωτιάς (centerline) που εξέρχεται από το δωμάτιο μέσω ενός ανοίγματος. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν μεταβάλλοντας τη γεωμετρία του ανοίγματος, αλλά διατηρώντας παράλληλα την ίδια ποσότητα καυσίμου και στα δυο πειράματα.

3.5.1 Περιγραφή

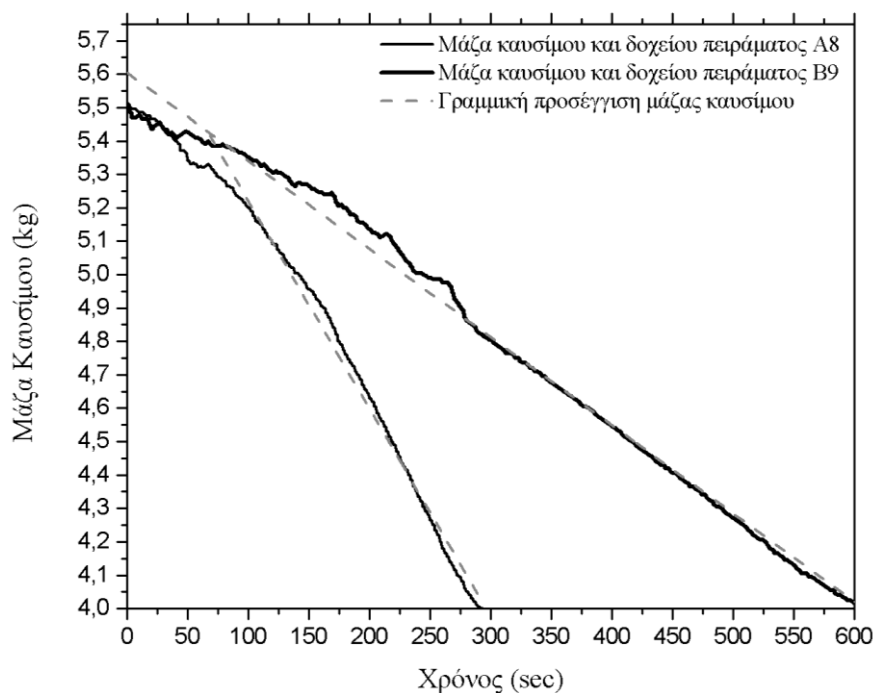
Τα πειράματα A8 και B9 πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας ως καύσιμο 2350ml εξανίου το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως καύσιμο, τοποθετημένο σε δοχείο 2cm από το δάπεδο του δωματίου. Στο πείραμα A8, ως άνοιγμα επιλέχθηκε πόρτα διαστάσεων 50cm(ύψος) x 20cm(πλάτος) με παράγοντα αερισμού 0.0707, ενώ στο πείραμα B9 παράθυρο με διαστάσεις 30cm(ύψος) x 20cm(πλάτος) και παράγοντα αερισμού 0.329 (βλέπε Πίνακας 3.1). Και στις δυο περιπτώσεις η ανάφλεξη έγινε με μεταλλικό ραβδί που στη μια άκρη του υπήρχε τυλιγμένο μαντήλι εμποτισμένο με καύσιμο λειτουργώντας ως προσάναμμα.

Το πείραμα A8 είχε διάρκεια 356sec.

Το πείραμα B9 ήταν το τελευταίο από τα πειράματα που έγιναν με παράθυρο ως άνοιγμα και η διάρκειά του ήταν 663sec.

3.5.2 Απώλεια μάζας καυσίμου

Με τη δυναμοκυψέλη η οποία ήταν τοποθετημένη στο κέντρο του δωματίου, κάτω από το δάπεδο, γινόταν μέτρηση του βάρους καυσίμου κάθε 2sec. Η αρχική μάζα καυσίμου μαζί με το δοχείο στα πειράματα A8 και B9 ήταν 5.55kg ενώ το δοχείο είχε βάρος 4kg (Σχήμα 3.36).



Σχήμα 3.36 Καμπύλες μάζας καυσίμου-δοχείου στα πειράματα A8 και B9.

Ο χρόνος διεξαγωγής του πειράματος A8 ήταν σχεδόν ο μισός από αυτόν του πειράματος B9, με το καύσιμο στην περίπτωση όπου ο αερισμός ήταν πολύ μεγαλύτερος, να καίγεται ταχύτερα. Αντιθέτως, με το μειωμένο αερισμό στην περίπτωση παραθύρου, το οξυγόνο το οποίο εισερχόταν στο δωμάτιο ήταν αρκετά περιορισμένο και η καύση ιδιαίτερα αργή. Για το λόγο αυτό η κλίση στο πείραμα A8 είναι πολύ πιο μεγάλη σε σχέση με την αντίστοιχη του πειράματος B9 (σχεδόν διπλάσια). Και στις δυο περιπτώσεις έγινε γραμμική προσέγγιση, με τα αποτελέσματα να φαίνονται στον Πίνακα 3.13.

Πείραμα	Γραμμική Προσέγγιση (linefit)	Κλίση a (slope)	Σφάλμα (%)
A8	$y = ax + 5.83546$	-0.00619	7.46293E-5
B9	$y = ax + 5.60406$	-0.00264	9.74564E-6

Πίνακας 3.13 Γραμμική προσαρμογή των καμπυλών μάζας καυσίμου-δοχείου πειραμάτων A8, B9.

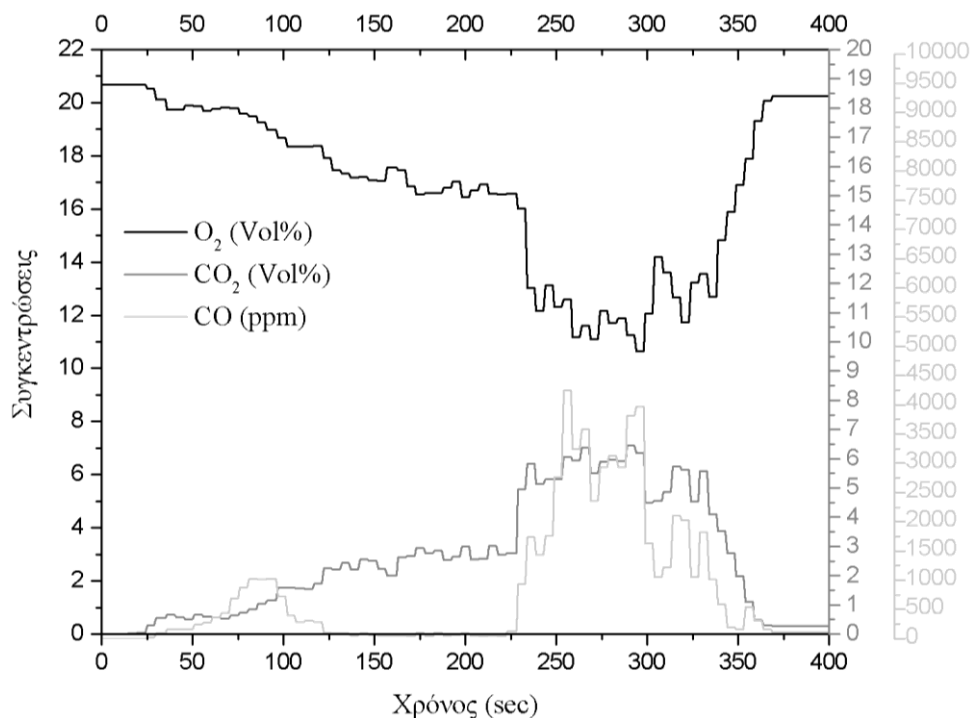
Με τη γραμμική προσέγγιση του Πίνακα 3.13 αποδεικνύεται η σχέση της απώλειας μάζας των πειραμάτων A8 και B9 που περιγράφηκε προηγουμένως. Η μεγαλύτερη κλίση της γραμμής στη γραμμική προσέγγιση δείχνει τον ταχύτερο ρυθμό μείωσης μάζας καυσίμου στο πείραμα A8.

3.5.3 Συγκεντρώσεις O₂, CO₂, CO

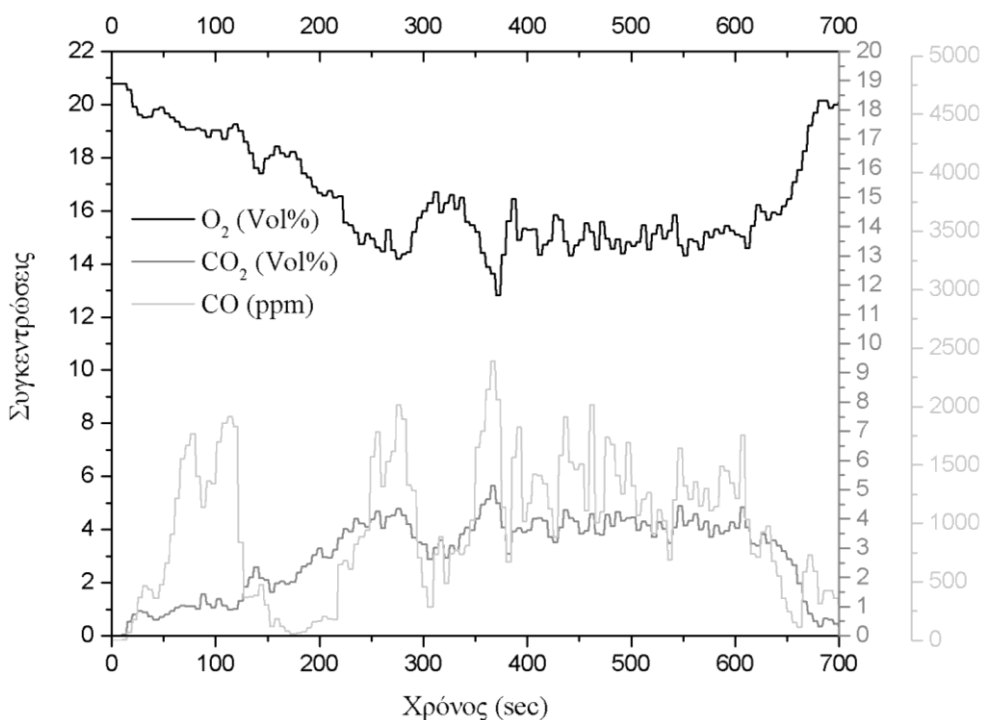
Με τον αναλυτή αερίων μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις αερίων σε ύψος 1.65m από το δάπεδο του δωματίου και σε απόσταση 0.05m από την πρόσοψη. Οι μετρήσεις περιλάμβαναν συγκέντρωση οξυγόνου (O₂), μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Τα γραφήματα των συγκεντρώσεων για κάθε πείραμα εμφανίζονται στα Σχήμα 3.37 Σχήμα 3.38 που ακολουθούν, ενώ στον Πίνακα 3.14 φαίνονται οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές των συγκεντρώσεων στα πειράματα A8 και B9.

Πείραμα	O ₂ (Vol%)		CO ₂ (Vol%)		CO (ppm)	
	Μέγιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή
A8	20.58	10.64	6.45	0.07	4253.44	45.72
B9	20.78	12.82	5.14	0.04	2389.88	2.78

Πίνακας 3.14 Μέγιστες-ελάχιστες τιμές των μετρήσεων O₂, CO₂, CO στα πειράματα A6 και B7.



Σχήμα 3.37 Γραφική αναπαράσταση των συγκεντρώσεων αερίων του πειράματος A8.



Σχήμα 3.38 Γραφική αναπαράσταση των συγκεντρώσεων αερίων του πειράματος B9.

Στο διάγραμμα του πειράματος A8 φαίνεται πως η ελάχιστη τιμή οξυγόνου μετρήθηκε τη χρονική στιγμή 270sec μετά την έναρξη του πειράματος, στιγμή που συμπίπτει με τη χρονική στιγμή όπου εμφανίζεται μέγιστη τιμή στη συγκέντρωση διοξειδίου. Σε αντίθεση με άλλα πειράματα, η μέγιστη τιμή συγκέντρωσης στο μονοξείδιο του άνθρακα είναι περίπου 12sec νωρίτερα, με τη μέγιστη τιμή συγκέντρωσης μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα να μη

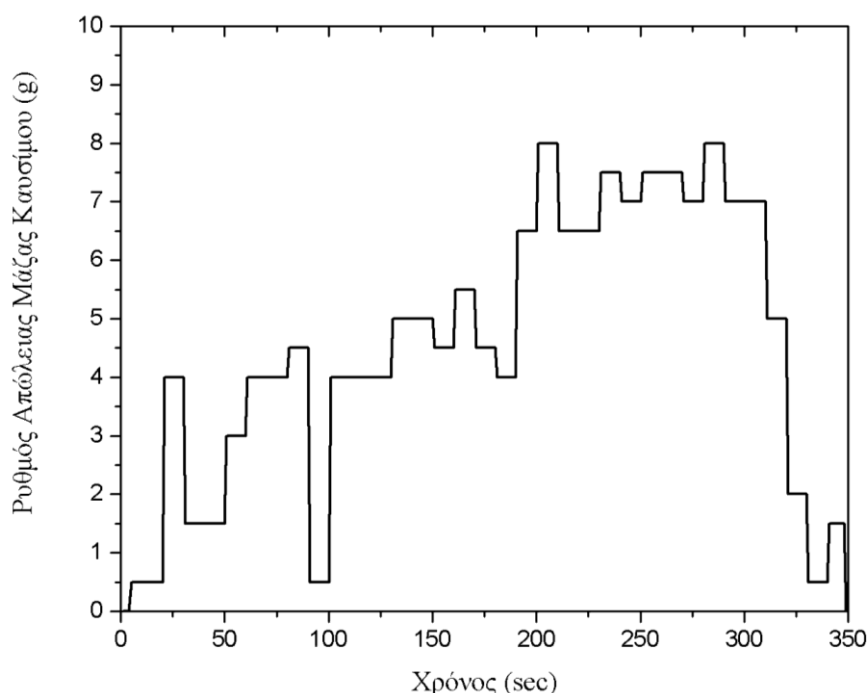
συμπέφτουν χρονικά. Από την άλλη, στο πείραμα B9 παρατηρείται πως η χρονική στιγμή εμφάνισης μέγιστης τιμής στις συγκεντρώσεις μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα είναι ίδια με την εμφάνιση ελάχιστης τιμής στη συγκέντρωση οξυγόνου.

3.5.4 Πείραμα A8

Το πείραμα A8 είχε σκοπό τον έλεγχο του κεντρικού άξονα του πλουμίου. Η ποσότητα του καυσίμου ήταν 2350mL. Το πείραμα είχε διάρκεια 356sec. Το πείραμα A8 είχε ως άνοιγμα πόρτα με παράγοντα αερισμού 0.0707. Η διάταξη των μετρητικών διατάξεων αναλύονται επαρκώς στη διπλωματική εργασία του Κ. Χοτζόγλου (Χοτζόγλου 2013). Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται η πειραματική διάταξη και ο τρόπος που αναπτύχθηκαν οι φλόγες κατά τη διάρκεια των πειραμάτων κλειστού τύπου.

3.5.4.1 Ρυθμός απώλειας μάζας

Στο Σχήμα 3.42 φαίνεται ο ρυθμός απώλειας μάζας του καυσίμου για το πείραμα A8. Η μορφή του διαγράμματος πρέπει να είναι πανομοιότυπη με το προφίλ της μεθόδου M επειδή εξαρτάται μόνο από τη διαφορά μάζας του καυσίμου, εφόσον η θερμογόνος δύναμη είναι σταθερή στις μεθόδους που χρησιμοποιούν την παραδοχή της τέλει καύσης και σχεδόν σταθερή στις μεθόδους της ατελούς καύσης.



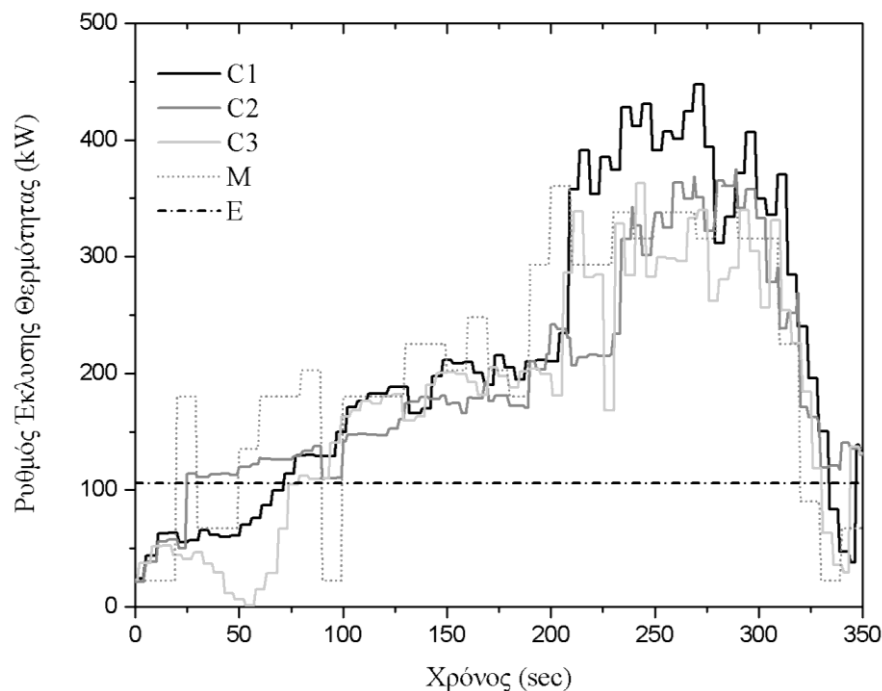
Σχήμα 3.39 Ρυθμός απώλειας μάζας καυσίμου για το πείραμα A8

3.5.4.2 Σύγκριση του ΡΕΘ μεταξύ των μεθόδων C1,C2,C3,M,E

Στο Σχήμα 3.40 του πειράματος A8 φαίνονται οι φάσεις της πυρκαγιάς. Από την αρχή του πειράματος έως τη χρονική στιγμή $t = 200s$, βρίσκεται στη φάση της ανάπτυξης, όπου γίνεται και η καθολική ανάφλεξη, από τη χρονική στιγμή $t = 200s$ έως $t = 550s$ βρίσκεται

στη φάση της πλήρους ανάπτυξης και από $t = 550s$ έως $t = 580s$ βρίσκεται στη φάση της σβέσης, κατά τη λήξη της οποίας παύει να υπάρχει και οπτική φλόγα.

Ο PEΘ για τις μεθόδους C1,C2,C3,M παρουσιάζει μέγιστη τιμή 447.38kW, 393.96kW, 362.97kW, 360.79kW αντίστοιχα και μέση τιμή 216.15kW, 189.02kW, 177.3kW, 195.79kW. Επίσης για τις παραπάνω μεθόδους από το εμβαδόν των διαγραμμάτων του PEΘ σε συνάρτηση με το χρόνο υπολογίζονται οι συνολικές θερμότητες που εκλύονται κατά τη διάρκεια του πειράματος για κάθε μέθοδο 75.00MJ, 65.59MJ, 60.99MJ, 72.83MJ και σχετικά αποκλίσεις των μεθόδων κατανάλωσης οξυγόνου από τη μέθοδο (M) είναι -2.97%, 9.94%, 16.26% αντίστοιχα. Από τις τρεις μεθόδους μέτρησης του PEΘ μέσω κατανάλωσης οξυγόνου φαίνεται ότι η περίπτωση που λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς οι συγκεντρώσεις των O_2, CO_2, CO (C1) προσεγγίζει καλύτερα την αντίστοιχη περίπτωση μέσω του ρυθμού απώλειας μάζας καυσίμου (M).



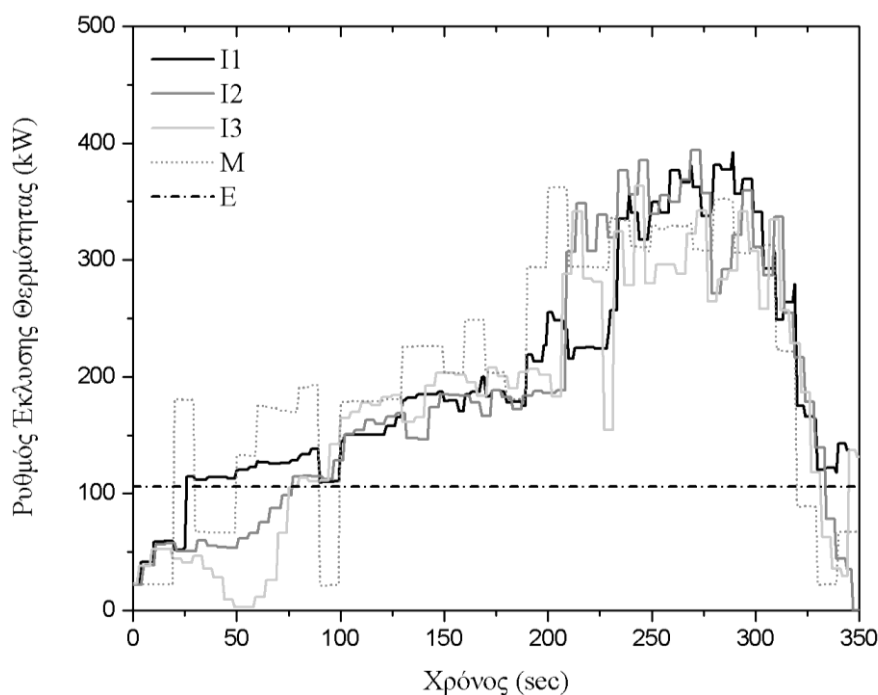
Σχήμα 3.40 Σύγκριση του PEΘ μεταξύ των μεθόδων C1,C2,C3,M,E για το πείραμα A8.

3.5.4.3 Σύγκριση του PEΘ μεταξύ των μεθόδων I1, I2, I3,M,E

Στο Σχήμα 3.15 του πειράματος A8 φαίνονται οι φάσεις της πυρκαγιάς. Από την αρχή του πειράματος έως τη χρονική στιγμή $t = 200s$,βρίσκεται στη φάση της ανάπτυξης, όπου γίνεται και η καθολική ανάφλεξη, από τη χρονική στιγμή $t = 200s$ έως $t = 550s$ βρίσκεται στη φάση της πλήρους ανάπτυξης και από $t = 550s$ έως $t = 580s$ βρίσκεται στη φάση της σβέσης, κατά τη λήξη της οποίας παύει να υπάρχει και οπτική φλόγα.

Ο PEΘ για τις μεθόδους I1,I2,I3,M παρουσιάζει μέγιστη τιμή 415.42kW, 393.85kW, 363.28kW, 363.97kW αντίστοιχα και μέση τιμή 204.34kW, 177.39kW, 177.15kW, 194.41kW. Επίσης για τις παραπάνω μεθόδους από το εμβαδόν των διαγραμμάτων του PEΘ σε συνάρτηση με το χρόνο υπολογίζονται οι συνολικές θερμότητες που εκλύονται κατά τη

διάρκεια του πειράματος για κάθε μέθοδο 70.70MJ, 65.99MJ, 61.11MJ, 72.83MJ και σχετικά αποκλίσεις των μεθόδων κατανάλωσης οξυγόνου από τη μέθοδο (M) είναι 1.72%, 8.75%, 15.49% αντίστοιχα. Από τις τρεις μεθόδους μέτρησης του ΡΕΘ μέσω κατανάλωσης οξυγόνου φαίνεται ότι η περίπτωση που λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς οι συγκεντρώσεις των O_2, CO_2, CO (I1) προσεγγίζει καλύτερα την αντίστοιχη περίπτωση μέσω του ρυθμού απώλειας μάζας καυσίμου (M).



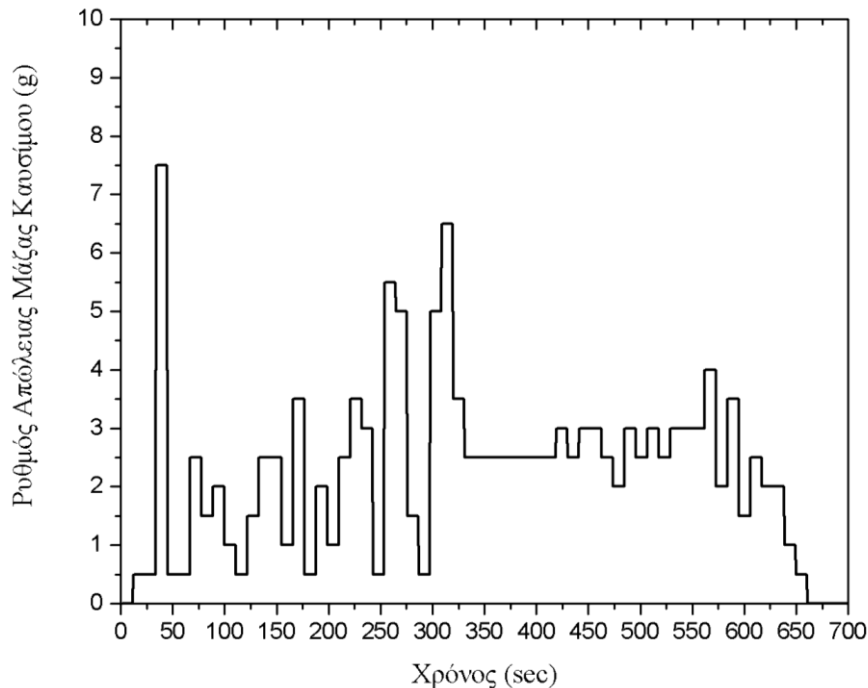
Σχήμα 3.41 Σύγκριση του ΡΕΘ μεταξύ των μεθόδων I1,I2,I3,M,E για το πείραμα A8.

3.5.5 Πείραμα B9

Το πείραμα B9 είχε σκοπό τον έλεγχο του κεντρικού άξονα του πλουμίου. Η ποσότητα του καυσίμου ήταν 2350mL. Το πείραμα είχε διάρκεια 663sec. Το πείραμα B9 είχε ως άνοιγμα παράθυρο με παράγοντα αερισμού 0.0329. Η διάταξη των μετρητικών διατάξεων αναλύονται επαρκώς στη διπλωματική εργασία του Κ. Χοτζόγλου (Χοτζόγλου 2013). Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται η πειραματική διάταξη και ο τρόπος που αναπτύχθηκαν οι φλόγες κατά τη διάρκεια των πειραμάτων κλειστού τύπου.

3.5.5.1 Ρυθμός απώλειας μάζας

Στο Σχήμα 3.42 φαίνεται ο ρυθμός απώλειας μάζας του καυσίμου για το πείραμα B9. Η μορφή του διαγράμματος πρέπει να είναι πανομοιότυπη με το προφίλ της μεθόδου M επειδή εξαρτάται μόνο από τη διαφορά μάζας του καυσίμου, εφόσον η θερμογόνος δύναμη είναι σταθερή στις μεθόδους που χρησιμοποιούν την παραδοχή της τέλει καύσης και σχεδόν σταθερή στις μεθόδους της ατελούς καύσης.

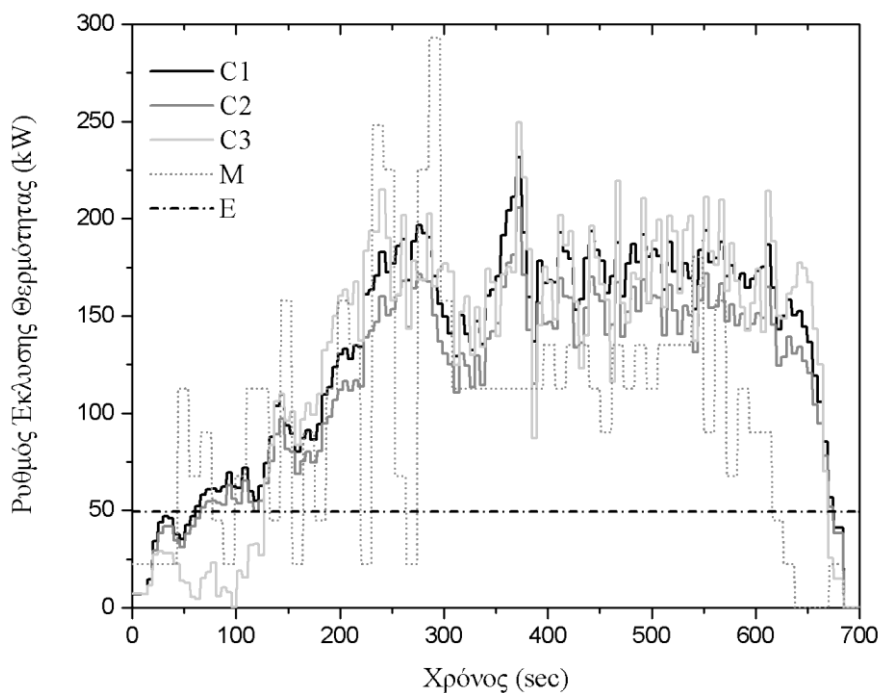


Σχήμα 3.42 Ρυθμός απώλειας μάζας καυσίμου για το πείραμα B9

3.5.5.2 Σύγκριση του PEΘ μεταξύ των μεθόδων C1,C2,C3,M,E

Στο Σχήμα 3.43 του πειράματος B9 φαίνονται οι φάσεις της πυρκαγιάς. Από την αρχή του πειράματος έως τη χρονική στιγμή $t = 200s$, βρίσκεται στη φάση της ανάπτυξης, όπου γίνεται και η καθολική ανάφλεξη, από τη χρονική στιγμή $t = 200s$ έως $t = 550s$ βρίσκεται στη φάση της πλήρους ανάπτυξης και από $t = 550s$ έως $t = 580s$ βρίσκεται στη φάση της σβέσης, κατά τη λήξη της οποίας παύει να υπάρχει και οπτική φλόγα.

Ο PEΘ για τις μεθόδους C1,C2,C3,M παρουσιάζει μέγιστη τιμή 231.48kW, 205.66kW, 249.4kW, 293.14kW αντίστοιχα και μέση τιμή 135.33kW, 118.14kW, 113.63kW, 99.52kW. Επίσης για τις παραπάνω μεθόδους από το εμβαδόν των διαγραμμάτων του PEΘ σε συνάρτηση με το χρόνο υπολογίζονται οι συνολικές θερμότητες που εκλύονται κατά τη διάρκεια του πειράματος για κάθε μέθοδο 84.94MJ, 74.10MJ, 82.04MJ, 66.94MJ και σχετικά αποκλίσεις των μεθόδων κατανάλωσης οξυγόνου από τη μέθοδο (M) είναι -26.88%, -10.68%, -22.55% αντίστοιχα. Από τις τρεις μεθόδους μέτρησης του PEΘ μέσω κατανάλωσης οξυγόνου φαίνεται ότι η περίπτωση που λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς οι συγκεντρώσεις των O_2, CO_2, CO (C3) προσεγγίζει καλύτερα την αντίστοιχη περίπτωση μέσω του ρυθμού απώλειας μάζας καυσίμου (M).

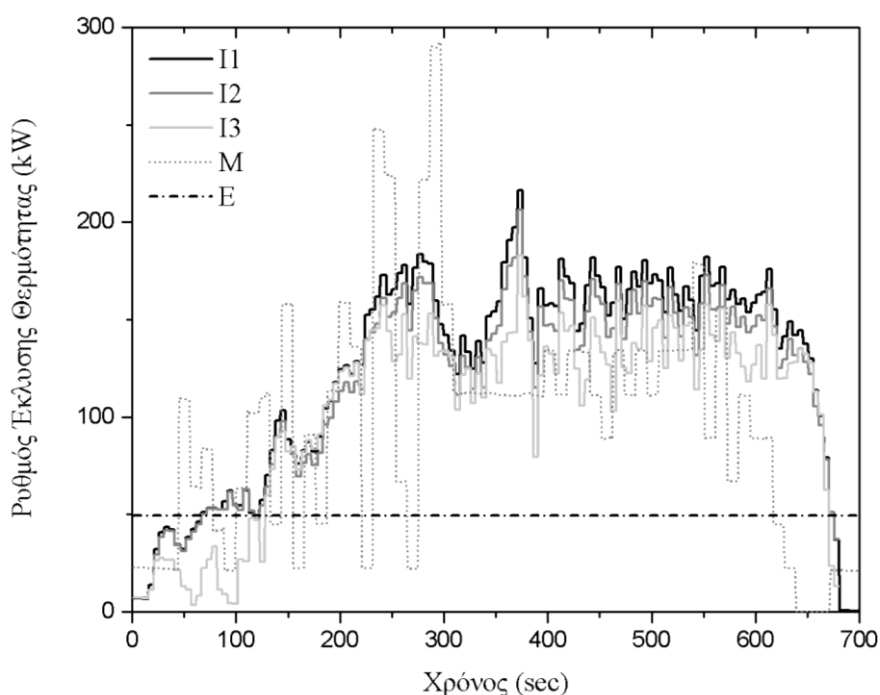


Σχήμα 3.43 Σύγκριση του PEΘ μεταξύ των μεθόδων C1,C2,C3,M,E για το πείραμα B9.

3.5.5.3 Σύγκριση του PEΘ μεταξύ των μεθόδων I1,I2,I3,M,E

Στο Σχήμα 3.15 του πειράματος B9 φαίνονται οι φάσεις της πυρκαγιάς. Από την αρχή του πειράματος έως τη χρονική στιγμή $t = 200s$, βρίσκεται στη φάση της ανάπτυξης, όπου γίνεται και η καθολική ανάφλεξη, από τη χρονική στιγμή $t = 200s$ έως $t = 550s$ βρίσκεται στη φάση της πλήρους ανάπτυξης και από $t = 550s$ έως $t = 580s$ βρίσκεται στη φάση της σβέσης, κατά τη λήξη της οποίας παύει να υπάρχει και οπτική φλόγα.

Ο PEΘ για τις μεθόδους I1,I2,I3,M παρουσιάζει μέγιστη τιμή 216.49kW, 206.33kW, 182.67kW, 292.22kW αντίστοιχα και μέση τιμή 126.97kW, 118.61kW, 105.04kW, 98.29kW. Επίσης για τις παραπάνω μεθόδους από το εμβαδόν των διαγραμμάτων του PEΘ σε συνάρτηση με το χρόνο υπολογίζονται οι συνολικές θερμότητες που εκλύονται κατά τη διάρκεια του πειράματος για κάθε μέθοδο 86.33MJ, 80.65MJ, 71.42MJ, 66.94MJ και σχετικά αποκλίσεις των μεθόδων κατανάλωσης οξυγόνου από τη μέθοδο (M) είναι -29.88%, -20.67%, -6.86% αντίστοιχα. Από τις τρεις μεθόδους μέτρησης του PEΘ μέσω κατανάλωσης οξυγόνου φαίνεται ότι η περίπτωση που λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς οι συγκεντρώσεις των O_2, CO_2, CO (I2) προσεγγίζει καλύτερα την αντίστοιχη περίπτωση μέσω του ρυθμού απώλειας μάζας καυσίμου (M).



Σχήμα 3.44 Σύγκριση του ΡΕΘ μεταξύ των μεθόδων I1,I2,I3,M,E για το πείραμα B9.

3.6 Αναλυτική παρουσίαση αποτελεσμάτων

Στον Πίνακα 3.15 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εκλυόμενης θερμότητας που προσδιορίζεται από το άθροισμα του στιγμιαίου ΡΕΘ για όλα τα πειράματα Α1-Β9 υπολογισμένοι με όλες τις μεθόδους που αναλύθηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια σε κάθε χρονική στιγμή.

Πείραμα	QM (MJ)	QE (MJ)	QEX (MJ)	QI1 (MJ)	QI2 (MJ)	QI3 (MJ)	QC1 (MJ)	QC2 (MJ)	QC3 (MJ)
A1	71.92	37.75	34.17	79.39	69.19	66.24	84.40	73.69	67.49
A2	69.20	37.01	32.19	61.35	53.62	51.95	65.30	57.14	51.65
A3	31.23	39.34	-8.11	-	-	-	-	-	-
A4	66.01	30.01	35.99	-	-	-	-	-	-
A5	144.88	62.25	82.62	150.3	152.61	131.3	175.03	152.77	134.18
A6	71.97	36.48	35.49	58.32	50.01	47.68	61.77	53.15	48.23
B7	69.67	30.64	30.64	87.78	81.60	71.00	88.48	77.11	67.28
A8	72.83	39.45	39.45	70.70	65.99	61.11	75.00	65.59	60.99
B9	66.94	30.64	30.64	86.33	80.65	71.42	84.94	74.10	82.04

Πίνακας 3.15 Θερμότητα που εκλύεται κατά την καύση υπολογισμένη με όλες τις μεθόδους.

Διαιρώντας τα παραπάνω αποτελέσματα του Πίνακα 3.15 με τη χρονική διάρκεια κάθε πειράματος, προσδιορίζεται ο μέσος ΡΕΘ. Στον Πίνακα 3.16 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτής της διαίρεσης για κάθε πείραμα από Α1 έως Β9 και για κάθε περίπτωση υπολογισμού του ΡΕΘ.

Πείραμα	QM (kW)	QE (kW)	QEX (kW)	QI1 (kW)	QI2 (kW)	QI3 (kW)	QC1 (kW)	QC2 (kW)	QC3 (kW)
A1	211.55	111.04	100.51	233.50	203.52	194.84	248.24	216.75	198.50
A2	209.07	111.81	97.26	185.36	162.01	156.97	197.28	172.65	156.05
A3	83.95	105.76	-21.80	-	-	-	-	-	-
A4	125.73	57.16	68.56	-	-	-	-	-	-
A5	243.49	104.62	138.87	252.73	256.5	220.77	294.17	256.76	225.51
A6	214.86	108.89	105.96	174.11	149.28	142.35	184.40	158.66	143.97
B7	105.73	46.50	46.50	133.20	123.83	107.74	134.26	117.02	102.10
A8	204.59	110.81	110.81	198.59	185.36	171.68	210.68	184.24	171.32
B9	100.82	46.15	46.15	130.02	121.47	107.57	127.93	111.60	123.56

Πίνακας 3.16 Μέσος PEΘ κατά την καύση υπολογισμένος με όλες τις μεθόδους.

Θεωρώντας ότι με τη μέθοδο M, δηλαδή υπολογισμός του PEΘ μέσω του ρυθμού απώλειας μάζας καυσίμου (μηχανική μέθοδος), προσεγγίζεται επαρκώς η πραγματική τιμή της ολικής θερμότητας που εκλύεται κατά την καύση στα πειράματα από A1 έως B9 είναι εύλογο να γίνει σύγκριση των υπόλοιπων μεθόδων με αυτή. Στον Πίνακα 3.17 φαίνονται οι τιμές των αποκλίσεων όλων των μεθόδων από τη μέθοδο M. Θετική τιμή της απόκλισης σημαίνει ότι η μέθοδος M είναι μεγαλύτερη από τη μέθοδο με την οποία συγκρίνεται.

Πείραμα	Απόκλιση % E-M	Απόκλιση % I1-M	Απόκλιση % I2-M	Απόκλιση % I3-M	Απόκλιση % C1-M	Απόκλιση % C2-M	Απόκλιση % C3-M
A1	47.97	-10.34	3.82	7.90	-15.67	-0.99	7.51
A2	46.51	10.12	21.41	24.30	5.63	17.42	25.36
A3	-25.98	-	-	-	-	-	-
A4	54.53	-	-	-	-	-	-
A5	57.03	-5.74	-7.31	7.62	-20.81	-5.45	7.38
A6	44.95	18.61	29.44	32.79	14.17	26.15	32.99
B7	56.01	-17.86	-9.65	-4.58	-26.99	-10.68	3.42
A8	45.83	1.72	8.75	15.49	-2.97	9.94	16.26
B9	54.22	-29.88	-20.67	-6.86	-26.88	-10.68	-22.55

Πίνακας 3.17 Ποσοστιαίες αποκλίσεις των μεθόδων υπολογισμού του PEΘ.

Παρατηρείται ότι στα περισσότερα πειράματα οι τιμές της ισχύος υπολογισμένη με την παραδοχή της τέλει σε σχέση με την ατελή καύση είναι περίπου ίδιες με μικρές αποκλίσεις. Αυτό φαίνεται και από τις αντίστοιχες ποσοστιαίες αποκλίσεις από τη μέθοδο M. Από αυτά τα αποτελέσματα συμπεραίνεται ότι η παραδοχή της τέλει καύσης σε πειράματα ΦΕΚ αποτελεί μία ρεαλιστική προσέγγιση του συγκεκριμένου προβλήματος.

Επίσης, στα παραπάνω πειράματα δεν μπορεί να γίνει σαφής διάκριση για τη μέθοδο που προσεγγίζει καλύτερα τη μέθοδο M για κάθε πείραμα καθώς υπάρχουν έντονες διαφοροποιήσεις μεταξύ των πειραμάτων στη συγκεκριμένη συσχέτιση.

Κεφάλαιο 4^ο

4 Πειράματα ανοιχτού τύπου D1-D2

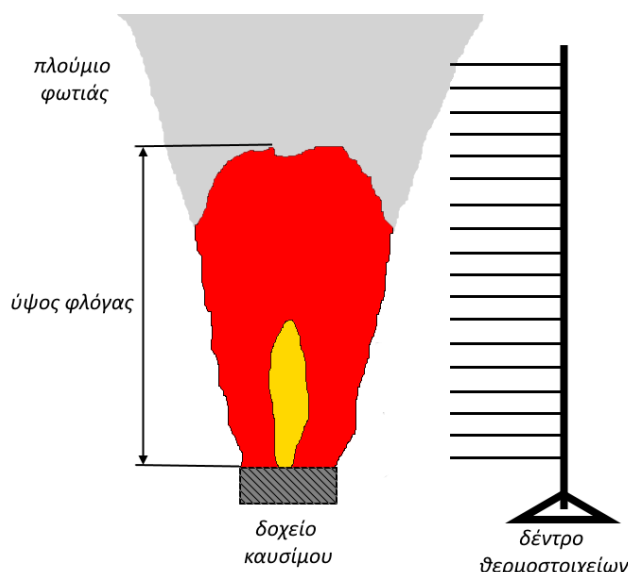
Εκτός από τα πειράματα που είχαν σκοπό τη μελέτη πυρκαγιάς σε κλειστούς χώρους, διεξήχθησαν και πειράματα με στόχο τη διερεύνηση της συμπεριφοράς και των παραμέτρων της φλόγας σε ανοιχτούς χώρους. Η δεύτερη σειρά πειραμάτων είχε σκοπό τον προσδιορισμό του ύψους της φλόγας, τον υπολογισμό το ΡΕΘ με τη μέθοδο κατανάλωσης οξυγόνου, το χρόνο καύσης καθώς και τον τρόπο που επιδρά η ποσότητα του καυσίμου σε αυτούς τους παράγοντες σε ανοιχτού τύπου καύση.

4.1 Περιγραφή

Τα πειράματα D1 και D2 πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας ως καύσιμο 2350ml και 1000ml εξανίου αντίστοιχα το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως καύσιμο, τοποθετημένο σε δοχείο 24cm από το δάπεδο του εργαστηρίου. Και τα δύο πειράματα έγιναν σε ανοιχτό χώρο. Και στις δυο περιπτώσεις η ανάφλεξη έγινε με μεταλλική ράβδο που στη μια άκρη υπήρχε τυλιγμένο μαντήλι εμποτισμένο με καύσιμο λειτουργώντας ως προσάναμμα.

4.1.1 Πειραματική διάταξη

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων D1 και D2 χρησιμοποιήθηκαν διάφορες μετρητικές διατάξεις όπως: δοχείο καυσίμου, δυναμοκυψέλη, αναλυτής αερίων, θερμοστοιχεία τύπου K διατεταγμένα σε προκαθορισμένες θέσεις και επίπεδα θερμοστοιχεία. Τα πειράματα αυτά διεξήχθησαν κάτω από τον αγωγό εξόδου των καυσαερίων 1m x 1m και καταγράφηκαν πλάγια και μπροστινή όψη με χρήση δύο καμερών, καθώς και με θερμοκάμερα. Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται η πειραματική διάταξη καθώς και η διάταξη των θερμοστοιχείων.



Σχήμα 4.1 Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης των πειραμάτων D1 και D2.

4.1.2 Δοχείο καυσίμου

Στη δεύτερη σειρά πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε το ίδιο δοχείο καυσίμου που χρησιμοποιήθηκε και στην πρώτη σειρά που είχε μήκος 25cm, πλάτος 25cm και ύψος 10cm με μέγιστη χωρητικότητα 6.25 λίτρων καυσίμου.

4.1.3 Μετρητικές διατάξεις

4.1.3.1 Επίπεδα θερμοστοιχεία

Στα πειράματα ανοικτού τύπου εκτός από το δέντρο θερμοστοιχείων με τα θερμοστοιχεία τύπου K που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, έγινε η χρήση επίπεδων θερμοστοιχείων για να γίνει η σύγκριση των μετρημένων θερμοκρασιών από τα δύο είδη θερμοστοιχείων.

Τα επίπεδα θερμοστοιχεία σχεδιάστηκαν για να είναι σχετικά φτηνά και να απαρτίζονται από απλά κομμάτια μετρητικού εξοπλισμού του ποσοστού της μεταφοράς θερμότητας μέσω ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας. Τα επίπεδα θερμοστοιχεία όπως φαίνονται στο Σχήμα 4.2 αποτελούνται από μια μεταλλική πλάκα όπου η μία πλευρά είναι εκτεθειμένη στο περιβάλλον που πρόκειται να μετρηθεί και η άλλη είναι μονωμένη. Καταγράφεται η θερμοκρασία του πίσω μέρους της μεταλλικής πλάκας και χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της ροής θερμότητας μέσω ακτινοβολίας που λήφθηκε από το μπροστινό μέρος της πλάκας, υποθέτοντας ομογενείς συνθήκες για τη μεταλλική πλάκα και την πίσω μόνωση.

Μερικές επισημάνσεις σε σχέση με τα επίπεδα θερμοστοιχεία:

- Στα πρώτα 8 λεπτά δεν έχουν καλή απόκριση. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της υψηλής χρονικής σταθεράς του επίπεδου θερμοστοιχείου, δηλαδή της απόκρισης. Στην αρχή υπάρχουν μεγάλες θερμοκρασιακές μεταβολές οι οποίες μειώνονται μετά τα πρώτα 8 λεπτά (Sultan 2006).
- Χρησιμοποιούνται για πειράματα μεγάλης διάρκειας (Sultan 2006).
- Επηρεάζεται η απόκριση από τον τρόπο συγκόλλησης του θερμοστοιχείου στο πίσω μέρος της μεταλλικής πλάκας (Robbins 2009).
- Τα επίπεδα θερμοστοιχεία είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται για σταθερές συνθήκες φωτιάς καθώς επηρεάζονται από το ποσοστό της συναγωγής, αγωγής και ακτινοβολίας που συναλλάσσεται σε μια φωτιά (Robbins 2009).
- Πολλές φορές η θερμοκρασία που καταγράφει το επίπεδο θερμοστοιχείο λόγω ακτινοβολίας είναι σχετικά υψηλότερη από την πραγματική θερμοκρασία των καυσαερίων (Alexandra Bystro 2012).

- Τα επίπεδα θερμοστοιχεία λαμβάνουν περισσότερο υπόψη τη θερμοκρασιακή αύξηση λόγω ακτινοβολίας σε σχέση με τα θερμοστοιχεία τύπου K. Αυτός είναι κι ο λόγος που είναι πιο ρεαλιστική η μέτρηση τους σε θέσεις όπου η συναγωγή δεν είναι σημαντική (Alexandra Bystro 2012).

Παρατήρηση:

Η διάρκεια πειράματος του πειράματος D1 ήταν 8'49'' συνεπώς δεν είναι αρκετός χρόνος για να εξαχθούν συμπεράσματα από τα επίπεδα θερμοστοιχεία εφόσον δεν έχουν εισέλθει στη σταθερή περιοχή.



Σχήμα 4.2 Επίπεδο θερμοστοιχείο.



Σχήμα 4.3 Μόνωση επίπεδου θερμοστοιχείου.



Σχήμα 4.4 Επίπεδο θερμοστοιχείο κατά τη διάρκεια συναρμολόγησής του.

4.1.3.2 Δυναμοκυψέλη

Στη δεύτερη σειρά πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε η ίδια δυναμοκυψέλη που χρησιμοποιήθηκε και στην πρώτη σειρά.

4.1.3.3 Αναλυτής αερίων

Στη δεύτερη σειρά πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος αναλυτής αερίων που χρησιμοποιήθηκε και στην πρώτη σειρά.

4.2 Θεωρητικό ύψος φλόγας

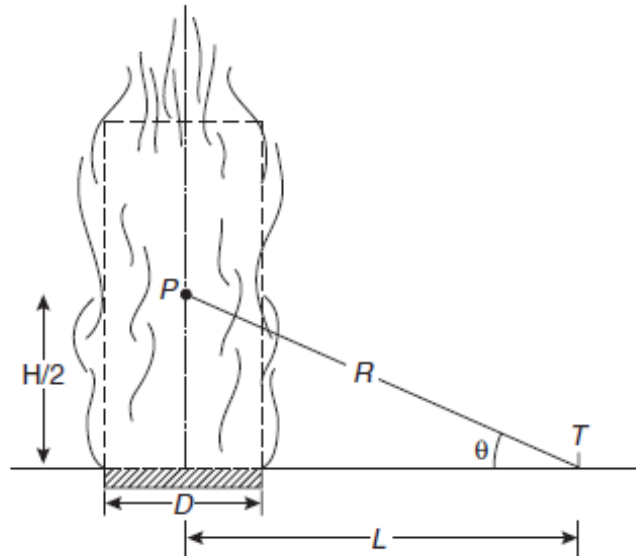
Στο Σχήμα 4.5 φαίνεται η θέση του ισοδύναμου σημείου, P , που βρίσκεται στο κέντρο της κηλίδας καυσίμου και στο μέσο του ύψους της φωτιάς. Το ύψος της φωτιάς σε μέτρα δίνεται από τον τύπο του Heskestad (Heskestad 2002):

$$H = -1.02D + 0.235(\dot{Q}^{2/5}) \quad (4.1)$$

Όπου:

D : διάμετρος δοχείου καυσίμου σε m

\dot{Q} : ισχύς φλόγας σε kW



Σχήμα 4.5 Σχηματική αναπαράσταση εύρεσης ύψους φλόγας.

Στα πειράματα D1 και D2 χρησιμοποιείται η υδραυλική διάμετρος γιατί το δοχείο καυσίμου ήταν τετράγωνου σχήματος. Στους τετράγωνους αγωγούς η υδραυλική διάμετρος D_h ισούται με την πλευρά a του τετραγώνου (εξίσωση 4.2), συνεπώς:

$$D_h = a = 0.25\text{m} \quad (4.2)$$

Η ισχύς της φλόγας μπορεί να βρεθεί αν γίνει αναγωγή του ρυθμού απώλειας μάζας καυσίμου στο ίδιο μέγεθος ανηγμένο σε μονάδες επιφάνειας καυσίμου. Το συγκεκριμένο μέγεθος είναι σταθερά που χαρακτηρίζει το καύσιμο και δίνεται στον Πίνακα 3.5. Συνεπώς άμεση συνέπεια του ορισμού του ΡΕΘ είναι η εξίσωση (4.3):

$$\dot{Q} = \dot{m}'' \Delta H_c A \quad (4.3)$$

Για την αναγωγή της μάζας σε πραγματικές συνθήκες καύσης ισχύει ο τύπος (Heskestad 2002):

$$\dot{m}'' = \dot{m}''_{\infty} (1 - e^{-\kappa\beta D_h}) \quad (4.4)$$

Όπου: \dot{m}''_{∞} είναι ο ανηγμένος ρυθμός απώλειας μάζας καυσίμου σε ιδεατές συνθήκες.

Από τον Πίνακα 3.5 λαμβάνονται οι τιμές των μεγεθών \dot{m}''_{∞} , $\kappa\beta$ και ΔH_c για εξάνιο. Επίσης η επιφάνεια του τετραγωνικού δοχείου καυσίμου καθορίζεται από την πλευρά του τετραγώνου η οποία είναι $a = 0.25\text{m}$ όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3.

$$A = 0.25^2 = 0.0625\text{m}^2$$

Για εξάνιο από Πίνακα 3.5 λαμβάνεται το γινόμενο $\kappa\beta = 1.9\text{m}^{-1}$ και υπολογίζεται:

$$\dot{m}'' = 0.0228\text{kg/m}^2\text{s}$$

Χρησιμοποιώντας όλα τα παραπάνω δεδομένα υπολογίζεται το ύψος της φλόγας για τα δύο πειράματα από την εξίσωση (4.1). Τα αποτελέσματα των υπολογισμών για τα δύο πειράματα φαίνονται στον Πίνακα 4.1.

4.3 Θεωρητικός χρόνος καύσης

Γνωρίζοντας τον ρυθμό απώλειας μάζας ανά μονάδα επιφάνειας και τη συνολική μάζα του καυσίμου, μπορεί να υπολογιστεί ο ρυθμός απώλειας μάζας του καυσίμου από την εξίσωση (4.5):

$$\dot{m} = \dot{m}''A \quad (4.5)$$

Άρα υπολογίζεται ότι:

$$\dot{m} = 0.001425\text{kg/s}$$

Έχοντας υπολογίσει το ρυθμό απώλειας μάζας, μπορεί να προσδιοριστεί ο θεωρητικός χρόνος καύσης:

$$t = m/\dot{m} \quad (4.6)$$

Στον Πίνακα 4.1 φαίνονται η σύγκριση του θεωρητικού χρόνου καύσης σε σχέση με τον πραγματικό. Η διαφορά είναι πολύ μικρή της τάξης του μισού λεπτού. Επίσης φαίνεται και το ύψος της φλόγας που και στις δύο περιπτώσεις είναι το ίδιο. Αυτό ήταν αναμενόμενο επειδή το μόνο που άλλαζε ήταν η ποσότητα του καυσίμου που με την παραδοχή της κηλίδας καυσίμου καίγεται σε στρώματα το καύσιμο. Συνεπώς το κάθε στρώμα καυσίμου που καίγεται έχει τις ίδιες ιδιότητες άρα και το ίδιο ύψος φλόγας.

Πείραμα	Όγκος καυσίμου	Μάζα καυσίμου	Θεωρητικό ύψος φλόγας	Θεωρητικός χρόνος καύσης	Πειραματικός χρόνος καύσης	Μέση ισχύς
---------	----------------	---------------	-----------------------	--------------------------	----------------------------	------------

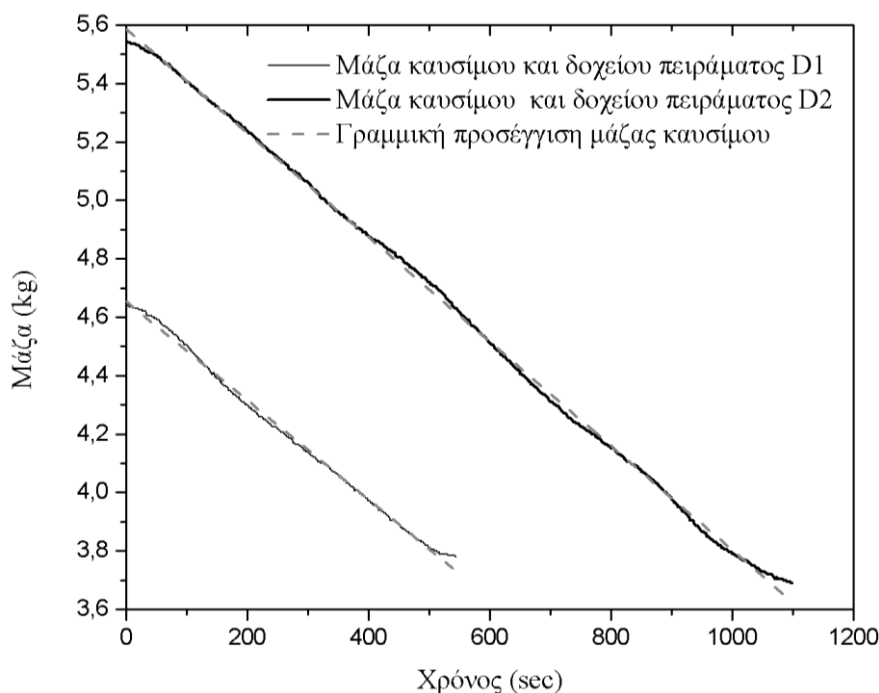
	V(m ³)	m(kg)	L(m)	t _{theoretical} (sec)	t _{exact} (sec)	Q(kW)
D1	1.000	0.65	1.17	456	520	63.7
D2	2.350	1.53	1.17	1072	1106	63.7

Πίνακας 4.1 Σύγκριση θεωρητικού με πραγματικού χρόνου καύσης και ύψος φλόγας για τα πειράματα D1,D2.

4.4 Απώλεια μάζας καυσίμου

Με τη δυναμοκυβέλη η οποία ήταν τοποθετημένη στο κέντρο του δοχείου καυσίμου, γινόταν μέτρηση του βάρους καυσίμου κάθε 2sec. Η αρχική μάζα καυσίμου μαζί με το δοχείο στο πείραμα D1 ήταν 4.63kg. ενώ το δοχείο είχε βάρος 3.8kg. Η διαφορά της μάζας του δοχείου καυσίμου από την πρώτη σειρά πειραμάτων όπου ήταν 4kg η αντίστοιχη τιμή οφείλεται σε λάθος μηδενισμό του οργάνου. Αντίστοιχα, στο πείραμα D2 η αρχική μάζα καυσίμου μαζί με το δοχείο ήταν 5.535kg.

Στο Σχήμα 4.6 φαίνονται οι καμπύλες της μάζας καυσίμου-δοχείου που μετρήθηκε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.



Σχήμα 4.6 Καμπύλες μάζας καυσίμου-δοχείου στα πειράματα D1 και D2.

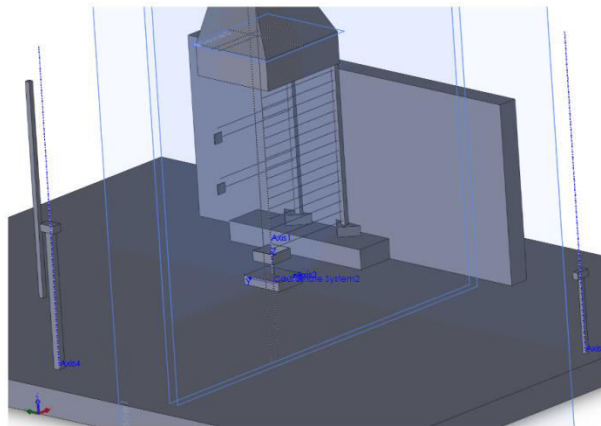
Πείραμα	Γραμμική Προσέγγιση (linefit)	Κλίση a (slope)	Σφάλμα (%)
D1	$y = ax + 4.65434$	-0.0017	1.5709E-6
D2	$y = ax + 5.58623$	-0.00178	3.87434E-6

Πίνακας 4.2 Γραμμική προσαρμογή των καμπυλών μάζας καυσίμου-δοχείου πειραμάτων D1,D2.

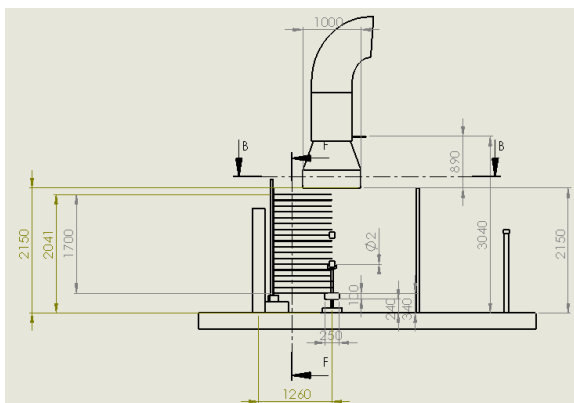
4.5 Πείραμα D1

Η διεξαγωγή του πειράματος D1 έγινε σε ανοιχτό χώρο κάτω από τον αγωγό εξόδου των καυσαερίων του εργαστηρίου και χρησιμοποιήθηκαν 1000ml εξανίου. Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας στήθηκε δέντρο θερμοστοιχείων πάνω από το κέντρο του δοχείου καυσίμου και για τη μελέτη των θερμοκρασιών γύρω από τη φωτιά που οφείλονταν κυρίως στην ακτινοβολία της φωτιάς χρησιμοποιήθηκαν δύο επίπεδα θερμοστοιχεία σε απόσταση 0.6m από το πρώτο δέντρο θερμοστοιχείων σε ύψη 0.6m και 1.1m. 0.1m χαμηλότερα από αυτά τοποθετήθηκαν δύο θερμοστοιχεία τύπου K για την εξακρίβωση της ορθότητας της μέτρησης των επίπεδων θερμοστοιχείων. Για τη στήριξη και τη μέτρηση του δοχείου καυσίμου χρησιμοποιήθηκε δυναμοκουσέλη που τοποθετήθηκε στο δάπεδο του εργαστηρίου.

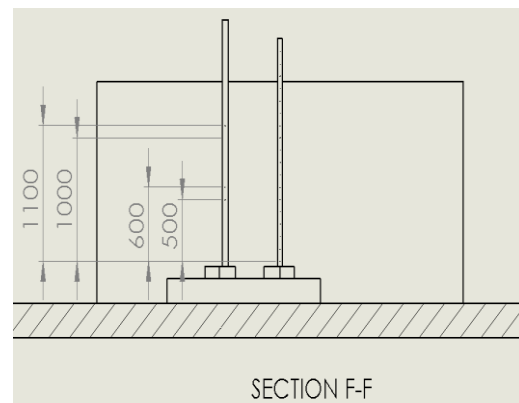
Για να γίνει κατανοητή η παραπάνω περιγραφή και για να υπάρχει καλύτερη εποπτεία των απαραίτητων αποστάσεων μεταξύ των διαφόρων μονάδων του πειράματος σχεδιάστηκε προσεγγιστικά σε λογισμικό SolidWorks 2011 όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7. Το ίδιο φαίνεται επίσης και στα σκαριφήματα πρόσοψης, κάτοψης και πλάγιας όψης στο Σχήμα 4.10. Οι δειγματολήπτες για την μέτρηση των συγκεντρώσεων αερίων βρίσκονταν σε απόσταση 0.69m από την αρχή του αγωγού εξόδου καυσαερίων εντός του σωλήνα αλλά επειδή ήταν σε πολύ μεγάλη απόσταση από την βάση της φλόγας έγινε υπερβολική αραιώση των καυσαερίων με αέρα που παρασύρθηκε από το περιβάλλον έτσι ώστε οι περιεκτικότητες προς μέτρηση να αποκλίνουν κατά πολύ από την πραγματική τους τιμή. Για αυτό δεν χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα για την ανάλυση του ΡΕΘ όπως στην προηγούμενη σειρά πειραμάτων.



Σχήμα 4.7 Σχεδιάση του χώρου που έγινε το πείραμα D1 και της διάταξης των μετρητικών συσκευών.



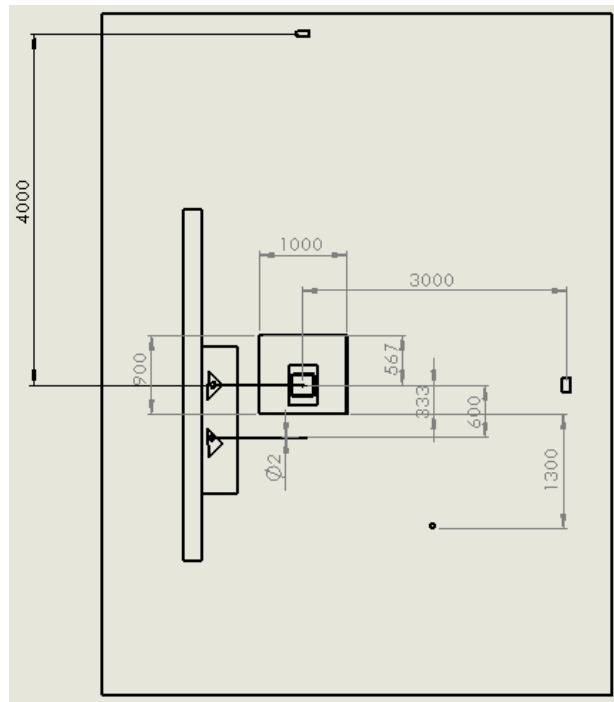
Σχήμα 4.8 Σκαριφήμα του χώρου που έγινε το



Σχήμα 4.9 Πλάγια όψη σκαριφήματος του χώρου

πείραμα D1 και της διάταξη των μετρητικών συσκευών.

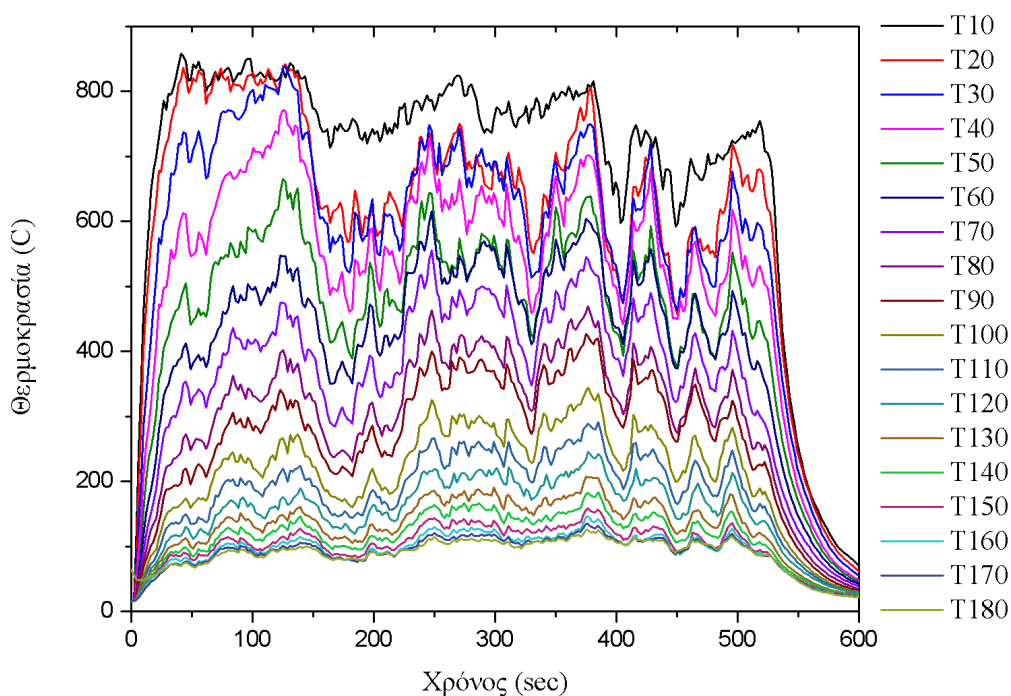
που έγινε το πείραμα D1 και της διάταξης των μετρητικών συσκευών.



Σχήμα 4.10 Κάτοψη σκαριφήματος του χώρου που έγινε το πείραμα D1 και της διάταξη των μετρητικών συσκευών.

4.5.1 Θερμοκρασίες

Η γνώση του θερμοκρασιακού προφίλ σε διάφορες θέσεις καθ' ύψος είναι απαραίτητη για τη γραφική συσχέτιση της μέσης θερμοκρασίας με την ισχύ σε συγκεκριμένες θέσεις. Για το λόγο αυτό στο δέντρο των θερμοστοιχείων τοποθετήθηκαν δεκαοκτώ θερμοστοιχεία τύπου K καθ' ύψος με απόσταση 10cm μεταξύ δύο διαδοχικών θερμοστοιχείων με το πρώτο να έχει τοποθετηθεί σε απόσταση 10cm από το πάνω μέρος του δοχείου καυσίμου (εκεί που αρχίζει η οπτική φλόγα). Στο Σχήμα 4.11 φαίνεται η γραφική παράσταση του προφίλ θερμοκρασιών για όλα τα θερμοστοιχεία. Ο συμβολισμός T_i , όπου ο δείκτης i παίρνει τιμές από 10 έως 180, δηλώνει σε ποια απόσταση (σε mm) σε σχέση με το πάνω μέρος του δοχείου καυσίμου πραγματοποιήθηκε η μέτρηση της θερμοκρασίας.

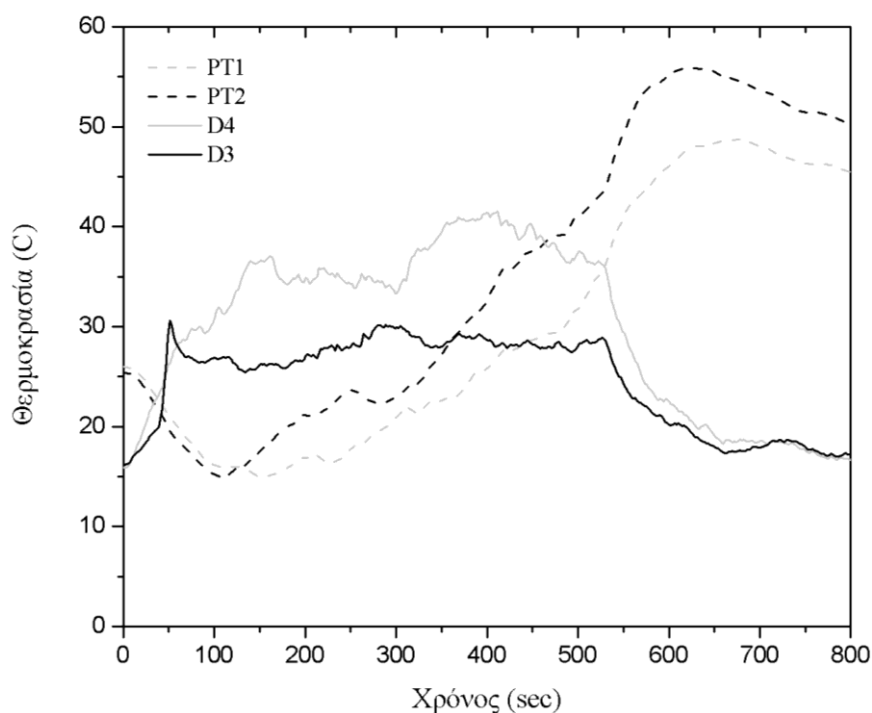


Σχήμα 4.11 Θερμοκρασιακό προφίλ του δέντρου των θερμοστοιχείων του πειράματος D1.

Μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί ότι η θερμοκρασία μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα με τη θέση του θερμοστοιχείου καθ' ύψος. Η θερμοκρασία του θερμοστοιχείου που βρίσκεται στην ψηλότερη θέση κυμαίνεται περίπου στους 100°C ενώ στο αντίστοιχο της χαμηλότερης θέσης είναι περίπου 700°C. Στις χαμηλές θέσεις παρατηρείται έντονη τύρβη της φλόγας ενώ στις μεγαλύτερες από 1m παρατηρείται μια ομαλότερη κατανομή θερμοκρασιών.

4.5.2 Θερμοκρασίες επίπεδων θερμοστοιχείων

Στη συνέχεια στο Σχήμα 4.12 γίνεται η σύγκριση της θερμοκρασία που μετράται με χρήση των επίπεδων θερμοστοιχείων στις θέσεις $z = 0.6\text{m}$ και $z = 1.1\text{m}$ με τις θερμοκρασίες στις θέσεις $z = 0.5\text{m}$ και $z = 1.0\text{m}$ που λαμβάνονται από τα θερμοστοιχεία τύπου K. Η σύγκριση γίνεται μεταξύ των PT1 και D4 και μεταξύ των PT2 και D3. Στο συγκεκριμένο πείραμα ο χρόνος δεν ήταν αρκετός για να αρχίσει να αποκρίνεται το επίπεδο θερμοστοιχείο, συνεπώς δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο συμπέρασμα.

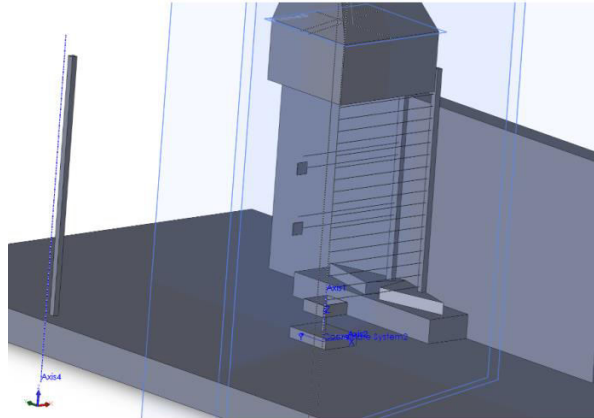


Σχήμα 4.12 Σύγκριση της μέτρησης των επίπεδων θερμοστοιχείων με τα θερμοστοιχεία τύπου K στις αντίστοιχες θέσεις στο πείραμα D1.

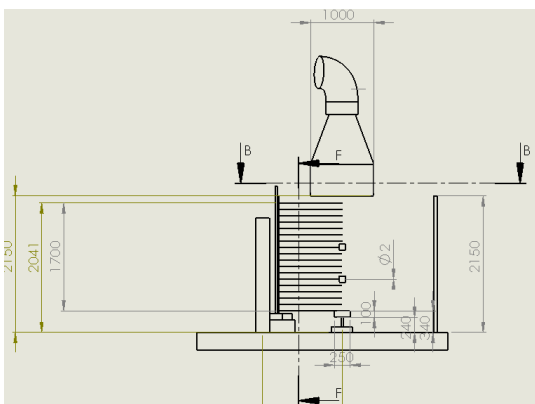
4.6 Πείραμα D2

Η διεξαγωγή του πειράματος D2 έγινε σε ανοιχτό χώρο κάτω από τον αγωγό εξόδου των καυσαερίων του εργαστηρίου και χρησιμοποιήθηκαν 2350ml εξανίου. Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας στήθηκε δέντρο θερμοστοιχείων πάνω από το κέντρο του δοχείου καυσίμου και για τη μελέτη των θερμοκρασιών γύρω από τη φωτιά που οφείλονταν κυρίως στην ακτινοβολία της φωτιάς χρησιμοποιήθηκαν δύο επίπεδα θερμοστοιχεία σε απόσταση 0.4m από το πρώτο δέντρο θερμοστοιχείων σε ύψη 0.6m και 1.1m. 0.1m χαμηλότερα από αυτά τοποθετήθηκαν δύο θερμοστοιχεία τύπου K για την εξακρίβωση της ορθότητας της μέτρησης των επίπεδων θερμοστοιχείων. Για τη στήριξη και τη μέτρηση του δοχείου καυσίμου χρησιμοποιήθηκε δυναμοκουσέλη που τοποθετήθηκε στο δάπεδο του εργαστηρίου.

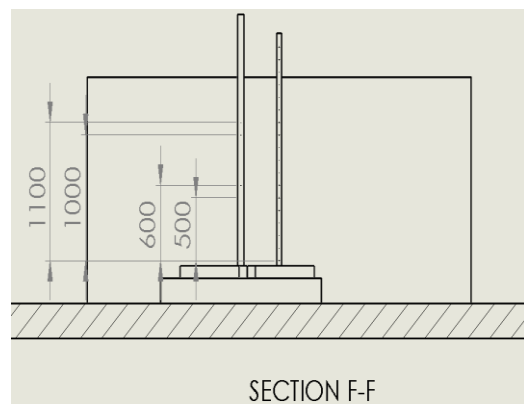
Για να γίνει κατανοητή η παραπάνω περιγραφή και για να υπάρχει καλύτερη εποπτεία των απαραίτητων αποστάσεων μεταξύ των διαφόρων μονάδων του πειράματος σχεδιάστηκε προσεγγιστικά σε λογισμικό SolidWorks 2011 όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.13 όπως επίσης και στα σκαριφήματα πρόσοψης, κάτοψης και πλάγιας όψης στο Σχήμα 4.16.



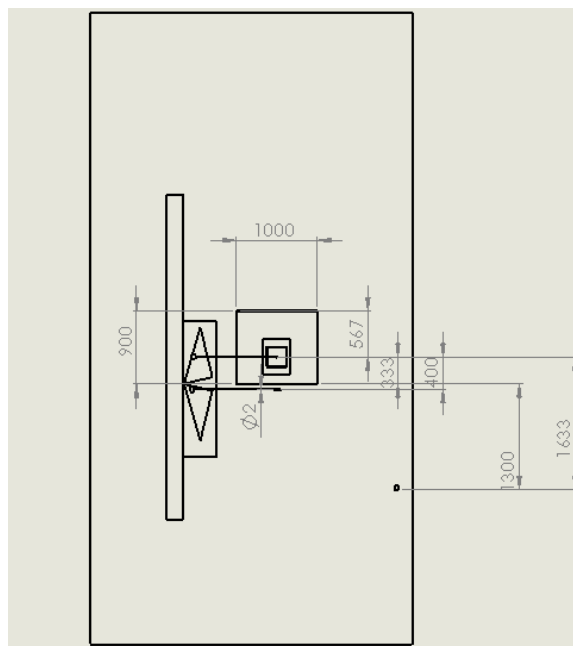
Σχήμα 4.13 Σχεδίαση σε πρόγραμμα SolidWorks 2011 του χώρου που έγινε το πείραμα D2 και της διάταξη των μετρητικών συσκευών.



Σχήμα 4.14 Πρόσψη σκαριφήματος του χώρου που έγινε το πείραμα D1 και της διάταξης των μετρητικών συσκευών.



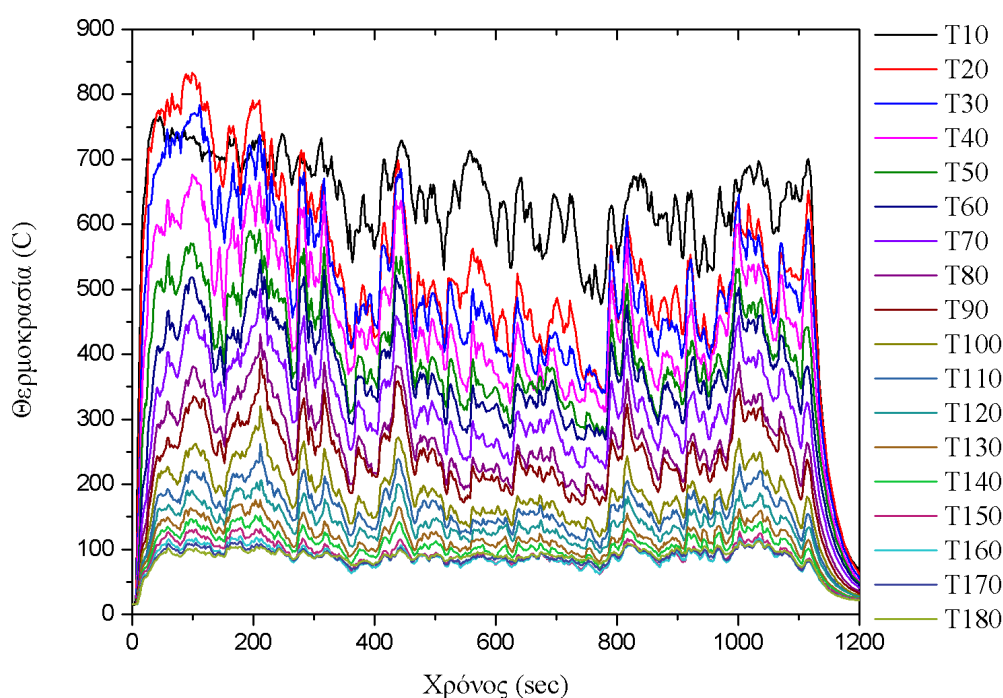
Σχήμα 4.15 Πλάγια όψη σκαριφήματος του χώρου που έγινε το πείραμα D1 και της διάταξης των μετρητικών συσκευών.



Σχήμα 4.16 Κάτοψη σκαριφήματος του χώρου που έγινε το πείραμα D1 και της διάταξη των μετρητικών συσκευών.

4.6.1 Θερμοκρασίες

Η γνώση του θερμοκρασιακού προφίλ σε διάφορες θέσεις καθ' ύψος είναι απαραίτητη για τη γραφική συσχέτιση της μέσης θερμοκρασίας με την ισχύ σε συγκεκριμένες θέσεις. Για το λόγο αυτό στο δέντρο των θερμοστοιχείων τοποθετήθηκαν δεκαοκτώ θερμοστοιχεία τύπου K καθ' ύψος με απόσταση 10cm μεταξύ δύο διαδοχικών θερμοστοιχείων με το πρώτο να έχει τοποθετηθεί σε απόσταση 10cm από το πάνω μέρος του δοχείου καυσίμου (εκεί που αρχίζει η οπτική φλόγα). Στο Σχήμα 4.17 φαίνεται η γραφική παράσταση του προφίλ θερμοκρασιών για όλα τα θερμοστοιχεία. Ο συμβολισμός T_i, όπου ο δείκτης i παίρνει τιμές από 10 έως 180, δηλώνει σε ποια θέση μέτρησης της θερμοκρασίας γίνεται αναφορά.



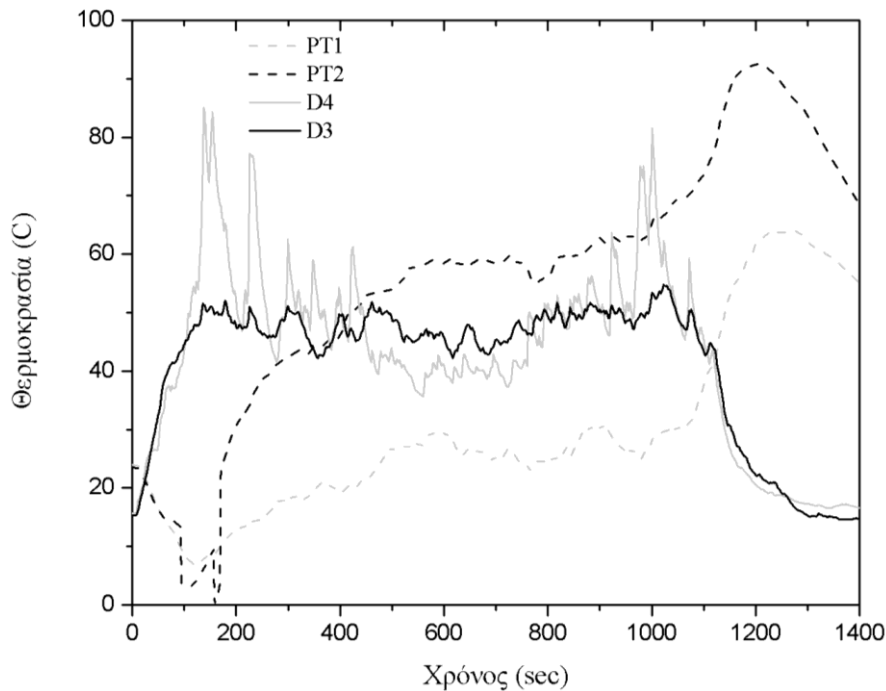
Σχήμα 4.17 Θερμοκρασιακό προφίλ του δέντρου των θερμοστοιχείων του πειράματος D2.

Μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί ότι η θερμοκρασία μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα με τη θέση του θερμοστοιχείου καθ' ύψος. Η θερμοκρασία του θερμοστοιχείου που βρίσκεται στην ψηλότερη θέση κυμαίνεται περίπου στους 100°C ενώ στο αντίστοιχο της χαμηλότερης θέσης είναι περίπου 700°C. Στις χαμηλές θέσεις παρατηρείται έντονη τύρβη της φλόγας ενώ στις μεγαλύτερες από 1m παρατηρείται μια ομαλότερη κατανομή θερμοκρασιών.

4.6.2 θερμοκρασίες επίπεδων θερμοστοιχείων

Στη συνέχεια στο Σχήμα 4.18 γίνεται η σύγκριση της θερμοκρασία που μετράται με χρήση των επίπεδων θερμοστοιχείων στις θέσεις $z = 0.6\text{m}$ και $z = 1.1\text{m}$ με τις θερμοκρασίες στις θέσεις $z = 0.5\text{m}$ και $z = 1.0\text{m}$ που λαμβάνονται από τα θερμοστοιχεία τύπου K. Η σύγκριση γίνεται μεταξύ των PT1 και D4 και μεταξύ των PT2 και D3. Το επίπεδο θερμοστοιχείο PT2 προσέγγισε την τιμή του θερμοστοιχείου D3, ενώ το PT1 είχε μεγάλες αποκλίσεις από το D4. Στο πείραμα αυτό ο χρόνος ήταν επαρκής για να αρχίσουν να αποκρίνονται τα επίπεδα

θερμοστοιχεία Στη σταθερή περιοχή φαίνεται ότι τα επίπεδα θερμοστοιχεία έχουν μεγάλες αποκλίσεις από τα θερμοστοιχεία τύπου K. Αυτό οφείλεται στην αρχή μέτρησης των επίπεδων θερμοστοιχείων που βασίζεται κυρίως στην ακτινοβολία.



Σχήμα 4.18 Σύγκριση της μέτρησης των επίπεδων θερμοστοιχείων με τα θερμοστοιχεία τύπου K στις αντίστοιχες θέσεις στο πείραμα D2.

4.7 Αξονικό προφίλ θερμοκρασιών

Συνήθως για το θερμοκρασιακό προφίλ υπάρχουν τρεις χαρακτηριστικές περιοχές που διαχωρίζουν το είδος της φλόγας: η περιοχή της συνεχόμενης φλόγας όπου βρίσκεται στο κάτω μέρος της φλόγας, η περιοχή του γραμμικού πλουμίου της φλόγας όπου καταλαμβάνει το περισσότερο μέρος της φλόγας και η περιοχή μη γραμμικού πλουμίου της φλόγας όπου βρίσκεται στο πάνω μέρος της φλόγας.

Στο Σχήμα 4.19 φαίνονται οι τρεις περιοχές της φλόγας σε λογαριθμική κλίμακα για τα πειράματα D1 και D2. Οι προσεγγίσεις των περιοχών αυτών ήταν της μορφής:

$$\frac{\Delta T}{T_{\infty}} = \alpha \left(\frac{z}{Q^{2/3}} \right)^{\beta} \quad (4.7)$$

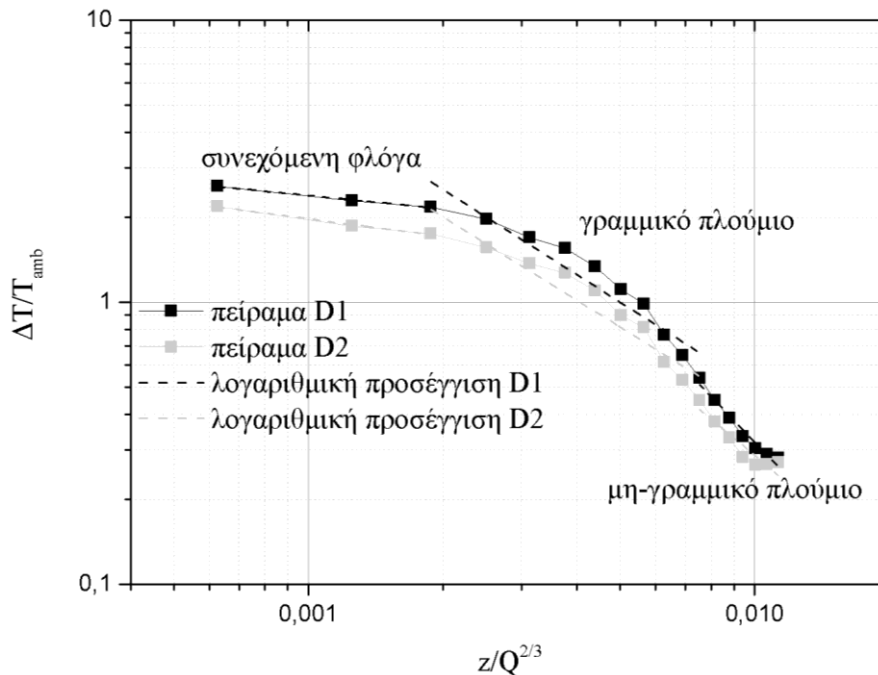
Στον Πίνακα 4.3 και στον Πίνακα 4.4 φαίνονται οι τιμές των σταθερών α και β για τις τρεις περιοχές της φλόγας για τα πειράματα D1 και D2 αντίστοιχα:

περιοχή	α	β
συνεχόμενης φλόγας	0.83555	-0.15263
γραμμικού πλουμίου της φλόγας	0.011627	-0.85712
μη γραμμικού πλουμίου της φλόγας	0.000129	-1.712659

Πίνακας 4.3 Τιμές των σταθερών της λογαριθμικής προσέγγισης των περιοχών της φλόγας του πειράματος D1.

περιοχή	α	β
συνεχόμενης φλόγας	0.227398	-0.3249
γραμμικού πλούμιου της φλόγας	0.00375	-0.978924
μη γραμμικού πλούμιου της φλόγας	0.000994	-1.25057

Πίνακας 4.4 Τιμές των σταθερών της λογαριθμικής προσέγγισης των περιοχών της φλόγας του πειράματος D2.



Σχήμα 4.19 Αξονικό προφίλ θερμοκρασιών για τα πειράματα D1 και D2.

Όπου:

z : ύψος φλόγας που μετρήθηκε η θερμοκρασία του κάθε σημείου του διαγράμματος.

\dot{Q} : Μέση ισχύς για κάθε πείραμα υπολογισμένη στην περίοδο όπου η φλόγα έχει σταθερή συμπεριφορά (μόνιμη κατάσταση φλόγας).

T_{amb} : θερμοκρασία του εργαστηρίου (26°C).

ΔT : Μέση θερμοκρασιακή διαφορά για κάθε πείραμα υπολογισμένη στην περίοδο όπου η φλόγα έχει σταθερή συμπεριφορά (μόνιμη κατάσταση φλόγας) με θερμοκρασία αναφοράς τη θερμοκρασία του εργαστηρίου.

Παρατηρείται από το Σχήμα 4.19 ότι οι θερμοκρασίες στα δύο πειράματα είχαν περίπου τις ίδιες τιμές σε κάθε θέση κατά τον άξονα z . Οι θερμοκρασίες μειώνονταν αντιστρόφως ανάλογα με το ύψος που ήταν τοποθετημένο το θερμοστοιχείο.

Κεφάλαιο 5°

5 Γενικά Συμπεράσματα

Η γνώση και η δυνατότητα πρόβλεψης του ΡΕΘ σε πολλές περιπτώσεις είναι από τους βασικούς παράγοντες που χαρακτηρίζουν μια πυρκαγιά ως προς τη συνολική θερμότητα που θα εκλυθεί κατά το συγκεκριμένο φαινόμενο και κατ' επέκταση ως προς τη δυσκολία πυρόσβεσης. Ο υπολογισμός του απασχόλησε πολλούς ερευνητές και συνεχώς μελετώνται νέοι τρόποι και μεθοδολογίες για την εύρεση κάποιας σαφής και αξιόπιστης μεθόδου με την οποία να μπορεί να γίνει ο συγκεκριμένος υπολογισμός με το ευκολότερο τρόπο τόσο υπολογιστικά όσο και πειραματικά.

Βασικός στόχος της συγκεκριμένης μελέτης ήταν ο υπολογισμός του ΡΕΘ σε πειράματα ανοιχτού και κλειστού τύπου. Επεξεργάστηκαν οι μετρήσεις της περιεκτικότητας του O_2 , CO_2 και CO εφαρμόζοντας την χημική μέθοδο και οι αντίστοιχες της μάζας του καυσίμου για την εφαρμογή της μηχανικής μεθόδου. Σε αυτήν την περίπτωση μελετήθηκαν δύο προσεγγίσεις για την καύσης εξανίου, θεωρώντας τέλεια (C) και ατελή (I) καύση. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν τρεις μεθοδολογίες υπολογισμού του ΡΕΘ. Ο ένας τρόπος (C1,I1) απαιτεί μόνο την πειραματική μέτρηση της περιεκτικότητας του O_2 για τον υπολογισμό του ΡΕΘ. Στο δεύτερο τρόπο (C2,I2) απαιτείται η γνώση των περιεκτικότητων των O_2 και CO_2 , ενώ στον τρίτο (C3,I3) των O_2 , CO_2 και CO .

Με βάση τα παραπάνω, εφαρμόστηκαν σε 9 πειράματα κλειστού τύπου οι μέθοδοι C1,C2,C3,I1,I2,I3. Τα αποτελέσματα αυτών των μεθόδων παραθέτονται σε διαγράμματα ΡΕΘ σε συνάρτηση με το χρόνο όπου γίνεται η οπτική σύγκριση των μεθόδων μεταξύ τους για κάθε περίπτωση καύσης. Σε κάθε διάγραμμα υπάρχει και η συσχέτιση με το ΡΕΘ υπολογισμένο μέσω του ρυθμού απώλειας μάζας καυσίμου (M) όπως επίσης και μέσω του εμπειρικού τύπου (E) που μας εκφράζει σε ποια τιμή του ΡΕΘ προσεγγιστικά θα βγουν οι φλόγες έξω από το δωμάτιο μέσω του ανοίγματος.

Στη συνέχεια παρουσιάστηκε συγκεντρωτικός πίνακας με όλα τα ποσά θερμότητας, και τις τιμές της μέσης ισχύς που εκλύθηκαν σε όλα τα πειράματα κλειστού τύπου όπως επίσης και τις αποκλίσεις τους από τη μέθοδο M. Από το συγκεκριμένο πίνακα φαίνεται ότι στις περισσότερες περιπτώσεις η μέθοδος I3 είναι πιο κοντά αριθμητικά στη μέθοδο M οπότε μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι είναι και η πιο ακριβής μέθοδος αν θεωρηθεί ότι η μέθοδος M δίνει αποτελέσματα κοντά στα πραγματικά και ότι είναι ασφαλές μέτρο σύγκρισης.

Τέλος, διεξήχθησαν 2 πειράματα ανοιχτού τύπου με σκοπό τη μελέτη των χαρακτηριστικών της φωτιάς και την επίδραση της ισχύος στα χαρακτηριστικά του πλουμίου. Μετρήθηκαν οι θερμοκρασίες σε διάφορα σημεία με χρήση θερμοστοιχείων τύπου K όπως επίσης και με επίπεδα θερμοστοιχεία και τα αποτελέσματα παρατέθηκαν σε διαγράμματα. Στο πείραμα D1 όπου ο χρόνος καύσης δεν ξεπέρασε τα 8 λεπτά, δεν είναι δυνατό να εξάγουμε αξιόπιστα συμπεράσματα από τα επίπεδα θερμοστοιχεία. Επιπλέον, παρουσιάστηκε πίνακας με το αξονικό προφίλ θερμοκρασιών προς τη θερμοκρασία αναφοράς σε συνάρτηση με το ύψος μέτρησης της θερμοκρασίας προς τη μέση ισχύ της φλόγας για κάθε πείραμα ανοιχτού τύπου

σε λογαριθμική κλίμακα. Παρατηρήθηκε ότι το θεωρητικό ύψος φλόγας και η θεωρητική ισχύς των πειραμάτων μένουν σταθερά ανεξάρτητα από την ποσότητα του καυσίμου ενώ ο θεωρητικός χρόνος καύσης αυξάνεται ανάλογα με την ποσότητα του καυσίμου.

Υπάρχει η δυνατότητα επιπλέον μελέτης στο θέμα του υπολογισμού του ΡΕΘ για ΦΕΚ καθώς έχουν μελετηθεί πολύ λίγες περιπτώσεις και έχει μεγάλη σημασία τι παραδοχές έχουν γίνει και με ποιόν τρόπο έχουν τοποθετηθεί τα μετρητικά όργανα στην εκάστοτε πειραματική διάταξη. Ένα ζήτημα που θα μπορούσε να αποτελέσει θέμα προς μελέτη είναι η τροποποίηση της εμπειρικής μεθόδου ώστε να προσεγγίζει καλύτερα μερικές περιπτώσεις πυρκαγιών.

Βιβλιογραφία

- Alexandra Bystro, Xudong Cheng, Ulf Wickstrom and Milan Veljkovic. «Measurement and calculation of adiabatic surface temperature in a full-scale compartment fire experiment.» *Journal of Fire Sciences*, 2012: 1–16.
- Babrauskas, V. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association, 1991.
- Babrauskas, Vytenis. «Heat Release Rates.» Στο *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, του/της Pam Powell, 535. Quincy, Massachusetts 02269: National Fire Protection Association, 2012.
- Biteau, Thomas Steinhaus, Christopher Schemel, Albert Simeoni. «Calculation Methods for the Heat Release Rate of Materials of Unknown Composition.» Στο *Fire safety science—proceedings of the ninth international symposium*, pp. 1165-1176. Edinburgh, UK: International association for fire safety science, 2008.
- Emmons, Lee and. «A Study of Natural Convection above a Line Fire.» *Fire Safety Journal*, 1961: Vol. 3, No.3, 1981, pp 107-121.
- Fuji Electric Co., Ltd. *Paramagnetic Oxygen Analyzer*. Gate City Ohsaki: Fuji Electronics Co.,Ltd., 2003.
- Harrison, Roger. *Entrainment of Air into Thermal Spill Plumes*. Christchurch, New Zealand: Department of Civil and Natural Resources Engineering, 2009.
- Heskestad, Gunnar. «Fire Plumes, Flame Height, and Air Entrainment.» Στο *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, του/της Pam Powell, 217-218. Quincy, Massachusetts 02269: National Fire Protection Association, 2002.
- Huggett, C. «Estimation of Rate of Heat Release by Means of Oxygen Consumption Measurements.» 61–65. 1980.
- Hukseflux Thermal Sensors B.V. *SBG01 Water cooled heat flux sensor according to Schmidt Boelter*. Hukseflux Thermal Sensors B.V., 2011.
- Janssens. *Reducing Uncertainty of Quantifying the Burning Rate of Upholstered Furniture*. Washington: National Institute of Justice, 2012.
- Janssens, Marc. «Calorimetry.» Στο *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, του/της Pam Powell, 580-581. Quincy, Massachusetts 02269: National Fire Protection Association, 2002.
- Keisuke Himoto, Tsuneto Tsuchihashi, Yoshiaki Tanaka, Takeyoshi Tanaka. «Modeling the trajectory of window flames with regard to flow attachment to the adjacent wall.» Στο *Fire Safety Journal*, 250–258. Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011, Japan: Pioneering Research Unit for Next Generation, 2009.
- Klopovic, Suzana. *Experimental and Computational Study of Flames Venting Externally During Full Scale Flashover Fires*. Victoria: Victoria University of Technology, 1999.

- L.H. Hu, F. Tang a, M.A. Delichatsios b, Q. Wanga, K.H. Lu a, X.C. Zhang a. «Global behaviors of enclosure fire and façade flame heights in normal and reduced atmospheric pressures at two altitudes.» Στο *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 119-126. Newtownabbey: State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, 2012.
- Michael Delichatsios, Kaihua Lua, Longhua Hua, Fei Tanga, Xiaochun Zhanga, Linghui Hea. «Facade flame heights from enclosure fires with side walls at the opening.» *Procedia Engineering*, 2013: 202 – 210.
- Mulholland, Rodney A. Bryant and George W. «A guide to characterizing heat release rate measurement uncertainty for full-scale fire tests.» Στο *Fire and materials*, 121–139. Gaithersburg: Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, 2008.
- Parkes, A.R. *The Impact of Size and Location of Pool Fires on Compartment Fire Behaviour*. Christchurch, New Zealand: University of Canterbury, 2009.
- Pretrel, H. *Experimental determination of fire heat release rate with OC and CDG calorimetry for ventilated compartments fire scenario*. Centre de Cadarache, 13115 Cédex, St Paul-lez-Durance, France: Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com), 2013.
- Robbins, Amanda. *Plate thermometers for measuring heat transfer*. 2009.
http://www.branz.co.nz/cms_show_download.php?id=1065. (πρόσβαση Building Research Levy).
- Sultan, Mohamed A. «Fire Resistance Furnace Temperature Measurements: Plate Thermometers vs Shielded Thermocouples.» Στο *Fire Technology*, 253–267. United States: Fire Research Program, Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada, Ottawa, Ontario, Canada K1A-0R6, 2006.
- Thomas. «Estimating Temperatures in Compartment Fires.» Στο *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, του/της William D. Walton and Philip H. Thomas, Section three, chapter 6, pages 706,707. Quincy, Massachusetts, Bethesda, Maryland: National Fire Protection Association, Society of Fire Protection Engineers, 2002.
- Thomas, William D. Walton and Philip H. «Compartment Fire Modeling.» Στο *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, του/της Pam Powell, 705-706. Quincy, Massachusetts 02269: National Fire Protection Association, 2002.
- Werner Rüdiger, Carsten Rathke, Michael Ohland, Mario Crevatin. *Advancing contemporary modular gas analyzer*. Baden-Dättwil, Switzerland: Special Report Instrumentation & Analytics, n.d.
- ABB. *Advance Optima -- High Performance Measurement Technology*. Frankfurt a. M.: ABB Automation Products, 2009.
- Κορδούλη, Σοφία. *Ανίχνευση και διερεύνηση χαρακτηριστικών φωτιάς εξερχόμενης από κτίριο*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2014.

Προμηθέας. n.d. <http://5dim-pyrgou.ilei.sch.gr/energy/html/promitheas.htm> (πρόσβαση 10 7, 2014).

Χοτζόγλου, Κωνσταντίνος. πειραματική διερεύνηση χαρακτηριστικών εξερχόμενης φωτιάς σε διάταξη διαμερίσματος-πρόσοψης. Αθήνα, διπλωματική εργασία: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2013.