

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**



**ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ**

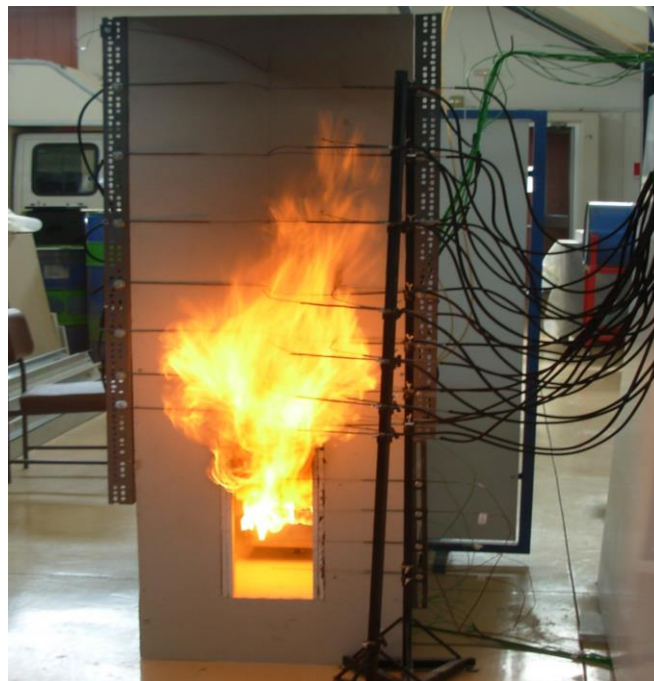
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΤΕΡΟΓΕΝΩΝ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ  
ΚΑΥΣΗΣ**

**ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: Κα. Μ. ΦΟΥΝΤΗ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ  
ΕΞΕΡΧΟΜΕΝΗΣ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΔΙΑΤΑΞΗ  
ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑΤΟΣ-ΠΡΟΣΟΨΗΣ**

**ΧΟΤΖΟΓΛΟΥ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ**



**ΑΘΗΝΑ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2013**



## Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την καθηγήτριά μου, κ. Μαρία Φούντη για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας και την ενθάρρυνσή της κατά τη διάρκεια αυτής. Την υποψήφια διδάκτορα Ελένη-Μαρίνα Ασημακοπούλου για την καθοδήγησή της, το χρόνο που μου αφιέρωσε, τις γόνιμες διορθώσεις της και την αμέριστη συμπαράστασή της κατά τη διάρκεια εκπόνησης του θέματος της εργασίας. Τον κ. Διονύση Κολαΐτη, μετα-διδακτορικό συνεργάτη, για τις πολύτιμες συμβουλές και καθοδήγησή του στη διεξαγωγή των πειραμάτων και τις διορθώσεις του στη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. 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 θερμά τους φίλους μου (συμφοιτητές και μη) για τις καθημερινές στιγμές τόσων ετών. Τέλος, την οικογένειά μου, και κυρίως τους γονείς μου και τα αδέρφια μου που με στήριξαν και συνεχίζουν να με στηρίζουν όλα αυτά τα χρόνια.





# Πρόλογος

Κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς σε ένα κτίριο ένας από τους κινδύνους που σχετίζονται άμεσα με την εξάπλωση της φωτιάς από όροφο σε όροφο ή από κτίριο σε κτίριο είναι το πλούμιο της φωτιάς που εξέρχεται του κτιρίου. Προκειμένου να μπορεί να εξασφαλισθεί αποτελεσματικότερη πρόληψη των πυρκαγιών είναι πολύ σημαντικό να κατανοηθεί και να μελετηθούν τα χαρακτηριστικά και οι παράγοντες που επηρεάζουν το εξερχόμενο πλούμιο της φωτιάς από διαμερίσματα καθώς και η επίδραση που μπορεί να έχει στην πρόσοψη των κτιρίων. Είναι γνωστό ότι οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και την εξέλιξη του εξερχόμενου πλουμίου της φωτιάς είναι η ισχύς του πυροθερμικού φορτίου εσωτερικά του δωματίου, η γεωμετρία του ανοίγματος από όπου εξέρχεται και ο αερισμός του δωματίου. Με σκοπό την μελέτη του φαινομένου υπό συνθήκες μη εξαναγκασμένου αερισμού στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνήθηκε πειραματικά η εξάπλωση της φωτιάς σε διάταξη διαμερίσματος-πρόσοψης σχεδιασμένα υπό κλίμακα.

Αρχικά, όπως παρουσιάζονται στο πρώτο κεφάλαιο, μελετήθηκαν αναλυτικά οι παράγοντες που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά του εξερχόμενου πλουμίου της φωτιάς σε περίπτωση πυρκαγιάς σε διαμέρισμα. Παρουσιάζονται οι υπάρχοντες θεωρητικοί και εμπειρικοί τύποι που υπάρχουν για την μελέτη των χαρακτηριστικών της φωτιάς, με έμφαση στις φωτιές κηλίδας υγρού καυσίμου οι οποίες αποτέλεσαν τη βάση των πειραμάτων που ακολούθησαν. Τέλος, παρουσιάζονται οι συνθήκες εξάπλωσης της φωτιάς σε περιπτώσεις περίσσειας καυσίμου ή περίσσειας αέρα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση των ήδη υπαρχόντων πειραματικών μελετών που αφορούν πειράματα φωτιάς μικρής, μεσαίας και μεγάλης κλίμακας με έμφαση στην παρουσίαση αυτών που επικεντρώνονται στην μελέτη των χαρακτηριστικών της φωτιάς εκτός του δωματίου.

Στο τρίτο κεφάλαιο πραγματοποιείται πλήρης παρουσίαση των χαρακτηριστικών του κάθε πειράματος. Γίνεται περιγραφή των πειραματικών διατάξεων, ενώ παράλληλα περιγράφεται ο τρόπος που κατασκευάστηκε η διάταξη του δωματίου-πρόσοψης μεσαίας κλίμακας που χρησιμοποιήθηκε. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά, ο τρόπος λειτουργίας και η τοποθέτηση των μετρητικών διατάξεων, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στις πειραματικές διατάξεις των πειραμάτων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση του κυρίως αντικείμενου της μελέτης αυτής. Περιγράφεται η διεξαγωγή των πειραμάτων και παρουσιάζονται οι μετρήσεις της θερμοκρασίας στο εσωτερικό και εξωτερικό του δωματίου, οι θερμοκρασίες και η ροή θερμότητας στην πρόσοψη, ο ρυθμός απώλειας μάζας του καυσίμου και οι συγκεντρώσεις τοξικών αερίων και οξυγόνου εκτός του δωματίου για κάθε πείραμα. Οι κύριες παράμετροι που μελετώνται είναι το πώς επηρεάζουν η ισχύς της φωτιάς εντός του δωματίου, η γεωμετρία του ανοίγματος και η θέση του δοχείου του καυσίμου την ανάπτυξη του εξερχόμενου πλουμίου της φωτιάς από το διαμέρισμα και η επίδραση που έχει στην πρόσοψη. Με αναδιάταξη των θερμοστοιχείων εκτός του δωματίου έγινε επιπλέον, προσπάθεια καθορισμού του κεντρικού άξονα μέγιστης θερμοκρασίας του εξερχόμενου πλουμίου της φωτιάς και πώς επηρεάζεται από τη γεωμετρία του ανοίγματος.

Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά την παρουσίαση όλων των μετρήσεων και της μελέτης για την επίδραση των παραμέτρων που προηγήθηκαν.

# Abstract

Spread of fire is a crucial hazard during a fire in any building. Fire's plume is one of the most important parameters of fire spread, having crucial influence on building's façade. So, to ensure effective fire prevention, it is very important to understand and study all the factors and characteristics that effect on fire plume. It is known that the main factors which affect the geometrical characteristics of fire's plume are fire load, the geometry of the opening where plume comes out of the room and the ventilation of the room. The present work is an experimental study of fire spread in a reduced scale room-façade configuration in under-ventilated conditions.

In first chapter are studied in detail the factors affecting the characteristics of exhaust fire's plume in case of a fire in an enclosure. There are also given all the theoretical and empirical formulas available for the study of fire characteristics, with emphasis on liquid pool fires which were the basis of the experiments followed. Finally, there is a presentation of fire spread's conditions in the event of excess fuel or excess air.

In the second chapter a literature review of existing experimental studies is performed, involving fire experiments in small, medium and large scale configurations, with emphasis on the presentation of these focused on the study of external fire's characteristics.

In third chapter there is a presentation in detail of all the characteristics of each experiment. The experimental rig which used in the experiments was a  $\frac{1}{4}$  reduced scale of ISO9705 room, with a façade adjusted on the opening's wall. There is also a description of the way it constructed and the technical specifications of the measuring devices which were used. Liquid hexane was used as fuel in all experiments.

The main object of this study is presented in fourth chapter. The experiments which were conducted are described, as also given a presentation of measurements. That includes temperature measurements inside and outside of the enclosure, temperatures and heat flux on the façade, mass loss and mass loss rate of the fuel and gas species concentration. The main factors studied are the fire power, the geometry of the opening and the position of the fuel pan inside the enclosure. There was also an effort to determine the centreline of fire plume and how it influenced by the opening's geometry.

In last chapter are given general conclusions from the experiments that conducted, regarding all the factors were studied.

# Περιεχόμενα

<b>Πρόλογος</b>	<b>5</b>
<b>1. Θεωρητικό Μέρος</b>	<b>11</b>
1.1 Φάσεις φωτιάς σε κλειστό χώρο	11
1.1.1 Ανάπτυξη φωτιάς	12
1.1.2 Καθολική ανάφλεξη (flashover)	12
1.1.2.1 Χαρακτηριστικά καθολικής ανάφλεξης	12
1.1.3 Πλήρως αναπτυγμένη φωτιά	13
1.1.4 Σβέση φωτιάς	14
1.2 Ρυθμός Έκλυσης Θερμότητας (PEΘ)	14
1.3 Φωτιά Κηλίδας	16
1.3.1 Φωτιές κηλίδας υγρού καυσίμου	16
1.3.2 Φωτιές κηλίδας υγρού καυσίμου σε εξωτερικό χώρο	16
1.3.3 Φωτιές κηλίδας υγρού καυσίμου σε κλειστό χώρο	20
1.3.3.1 Ρυθμός έκλυσης θερμότητας φωτιάς-Ρυθμός κατανάλωσης καυσίμου	21
1.3.3.2 Απώλειες θερμότητας λόγω συναγωγής της ροής αερίων	23
1.3.3.3 Απώλειες λόγω ακτινοβολίας μέσω του ανοίγματος	23
1.3.3.4 Απώλειες λόγω ακτινοβολίας από τα τοιχώματα	23
1.3.3.5 Θερμική ανατροφοδότηση για εξάτμιση περίσσειας καυσίμου	24
1.3.3.6 Ουδέτερο Επίπεδο (Neutral plane)	25
1.3.3.7 Αερισμός	26
1.4 Αδιάστατες Ομάδες – Δημιουργία Κλίμακας	28
1.4.1 Δημιουργία Αδιάστατων Ομάδων	29
1.4.2 Αδιάστατες Ομάδες από Εξισώσεις Διατήρησης	30
1.4.2.1 Διατήρηση Μάζας	30
1.4.2.2 Διατήρηση Ορμής	30
1.4.2.3 Εξίσωση Ενέργειας	32
1.4.2.4 Απώλειες Θερμότητας	33
1.4.2.5 Ρυθμός Έκλυσης Θερμότητας – Θερμοκρασίες	35
<b>2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση</b>	<b>36</b>
2.1 Πειραματικές μελέτες σε διάταξη δωματίου	37
2.1.1 Πειραματικές μελέτες σε διάταξη δωματίου μεγάλης κλίμακας	37
2.1.2 Πειραματικές μελέτες σε διάταξη δωματίου μεσαίας κλίμακας	38
2.1.3 Πειραματικές μελέτες σε διάταξη δωματίου μικρής κλίμακας	41
2.2 Πειραματικές μελέτες σε διάταξη δωματίου βάσει προτύπου ISO9705	42
2.3 Πειραματικές μελέτες για διάδοση φωτιάς σε πρόσοψη	47

<b>3. Πειραματική Εγκατάσταση</b>	<b>51</b>
3.1 Πειραματική διάταξη	51
3.1.1 Κατασκευή σκελετού	52
3.1.2 Τοιχώματα	54
3.1.3 Γεωμετρία Ανοίγματος	55
3.1.4 Πρόσοψη	56
3.1.5 Καύσιμο – Δοχείο Καυσίμου	57
3.2 Μετρητικές διατάξεις	57
3.2.1 Θερμοστοιχεία	57
3.2.1.1 Στήριξη-Μετρήσεις Θερμοστοιχείων	58
3.2.1.2 Σφάλματα θερμοστοιχείων	62
3.2.2 Μετρητής ροής θερμότητας	63
3.2.2.1 Σφάλματα μετρητή ροής θερμότητας	64
3.2.3 Δυναμοκυψέλη	65
3.2.3.1 Ψηφιακός δείκτης φορτίου	67
3.2.4 Σύστημα συλλογής δεδομένων	67
3.2.5 Λογισμικό LabVIEW	68
3.2.6 Αναλυτής Αερίων	71
<b>4. Διεξαγωγή Πειραμάτων</b>	<b>72</b>
4.1 Υπολογισμός Πυροθερμικού Φορτίου	72
4.2 Υπολογισμός Διαστάσεων Δοχείου Καυσίμου	73
4.3 Επαναληψιμότητα	74
4.3.1 Περιγραφή	74
4.3.2 Διάταξη Μετρητικών Συσκευών	78
4.3.3 Ανάλυση Μετρήσεων	78
4.3.3.1 Θερμοκρασίες	78
4.3.3.2 Ροή Θερμότητας	86
4.3.3.3 Απώλεια μάζας καυσίμου	87
4.3.3.4 Συγκεντρώσεις $O_2$ , $CO$ , $CO_2$	87
4.3.4 Συμπεράσματα	89
4.4 Ισχύς φωτιάς	90
4.4.1 Περιγραφή	90
4.4.2 Διάταξη Μετρητικών Συσκευών	95
4.4.3 Ανάλυση Μετρήσεων	96
4.4.3.1 Θερμοκρασίες εσωτερικά του δωματίου	96
4.4.3.2 Θερμοκρασίες στο άνοιγμα του δωματίου	99
4.4.3.3 Θερμοκρασίες στο εξερχόμενο πλούμιο της φωτιάς	101
4.4.3.4 Θερμοκρασίες στην πρόσοψη του δωματίου	104
4.4.3.5 Ροή Θερμότητας	106

4.4.3.6	Απώλεια μάζας καυσίμου	107
4.4.3.7	Συγκεντρώσεις O <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub>	108
4.4.4	Συμπεράσματα	108
4.5	Αερισμός μέσω ανοίγματος	109
4.5.1	Περιγραφή	109
4.5.2	Διάταξη Μετρητικών Συσκευών	113
4.5.3	Ανάλυση Μετρήσεων	114
4.5.3.1	Θερμοκρασίες εσωτερικά του δωματίου	114
4.5.3.2	Θερμοκρασίες στο άνοιγμα του δωματίου	117
4.5.3.3	Θερμοκρασίες στο εξερχόμενο πλούμιο της φωτιάς	117
4.5.3.4	Θερμοκρασίες στην πρόσοψη του δωματίου	121
4.5.3.5	Ροή Θερμότητας	123
4.5.3.6	Απώλεια μάζας καυσίμου	124
4.5.3.7	Συγκεντρώσεις O <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub>	125
4.5.4	Συμπεράσματα	126
4.6	Κεντρικός Άξονας Εξωτερικού Πλούμιου Φωτιάς	127
4.6.1	Περιγραφή	127
4.6.2	Διάταξη Μετρητικών Συσκευών	132
4.6.3	Ανάλυση Μετρήσεων	133
4.6.3.1	Θερμοκρασίες εσωτερικά του δωματίου	133
4.6.3.2	Θερμοκρασίες στο εξερχόμενο πλούμιο της φωτιάς	136
4.6.3.3	Ροή Θερμότητας	140
4.6.3.4	Απώλεια μάζας καυσίμου	141
4.6.3.5	Συγκεντρώσεις O <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub>	142
4.6.4	Συμπεράσματα	143
4.7	Θέση Δοχείου στο Εσωτερικό του Δωματίου	144
4.7.1	Περιγραφή	144
4.7.2	Διάταξη Μετρητικών Συσκευών	144
4.7.3	Ανάλυση Μετρήσεων	144
4.7.3.1	Θερμοκρασίες	144
4.7.3.2	Ροή Θερμότητας	147
4.7.3.3	Απώλεια Μάζας Καυσίμου	148
4.7.4	Συμπεράσματα	148
	<b>5. Γενικά Συμπεράσματα</b>	<b>150</b>
	<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>152</b>
	<b>Παράρτημα</b>	<b>155</b>



# Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>

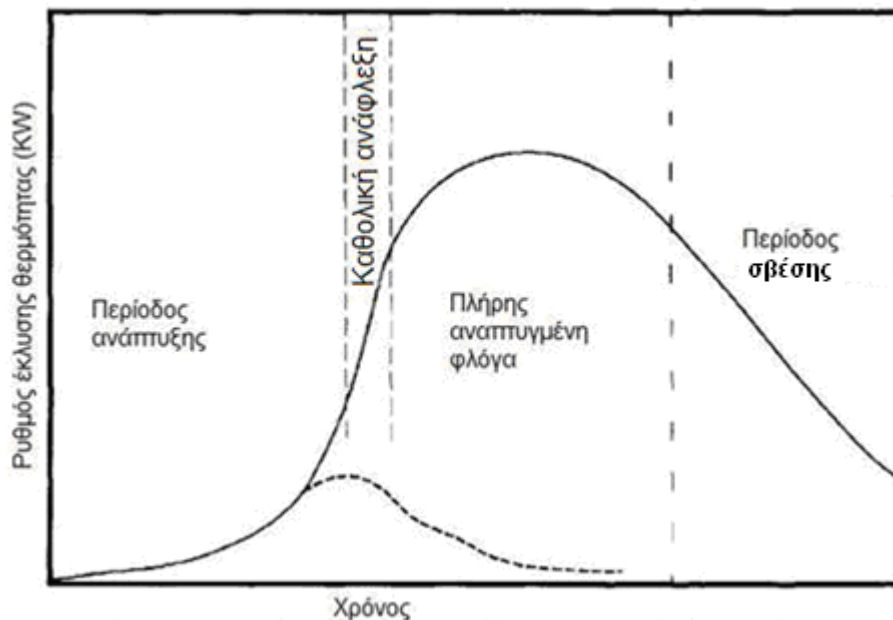
## Θεωρητικό μέρος

Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσεται το θεωρητικό υπόβαθρο που αφορά τις φωτιές οι οποίες αναπτύσσονται σε εσωτερικούς χώρους, με εστίαση σε διαμόρφωση εγκατάστασης που αφορά διαμέρισμα, με τον όρο ‘διαμέρισμα’ να υποδηλώνει οποιοδήποτε κλειστό χώρο με καθορισμένα όρια. Αναλύεται ο διαχωρισμός των φάσεων που παρατηρούνται στην εκδήλωση μιας φωτιάς σε εσωτερικό χώρο, ενώ γίνεται εντοπισμός των στοιχείων εκείνων, των οποίων η συνεισφορά παίζει καταλυτικό ρόλο στα χαρακτηριστικά της φωτιάς κηλίδας υγρού καυσίμου (pool fires) εντός και εκτός διαμερίσματος. Ο ρυθμός απώλειας μάζας καυσίμου, ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας, οι συνθήκες αερισμού είναι ιδιαίτερος σημαντικά για τον χαρακτηρισμό μιας φωτιάς και ο προσδιορισμός τους αναλύεται επίσης στο κεφάλαιο αυτό. Φυσικά υπάρχουν οι απαραίτητες αναφορές σε μελέτες φωτιάς που έγιναν τα περασμένα χρόνια σε πειραματικές εγκαταστάσεις μεσαίας και μεγάλης κλίμακας, ενώ είναι ιδιαίτερος σημαντικό να παρατηρηθεί πως τέτοιου είδους εγκαταστάσεις προσομοιώνουν φωτιές σε χώρους οι οποίοι χρησιμοποιούνται ως διαμερίσματα κτιρίων, γραφεία, δωμάτια, στα οποία ο χαρακτηρισμός μιας φωτιάς παίζει καθοριστικό ρόλο για τους ανθρώπους που ζουν και δραστηριοποιούνται σε αυτούς.

### 1.1 Φάσεις φωτιάς σε κλειστό χώρο

Ο χαρακτηρισμός των φάσεων μιας φωτιάς σε κλειστό χώρο αποτελούν βασική αρχή για τη συνέχεια. Σύμφωνα με τον J.Quintiere [Quintiere, 2006] μια φωτιά σε εσωτερικό χώρο περνά από τρία στάδια, όπως φαίνονται στο σχήμα 1.1,

- ανάπτυξη φωτιάς (*growth*)
- πλήρως αναπτυγμένη φωτιά (*fully developed*)
- σβέση φωτιάς (*decay*)



Σχήμα 1.1 Οι φάσεις μιας φωτιάς συναρτήσει του χρόνου και του ρυθμού έκλυσης θερμότητας.

### 1.1.1 Ανάπτυξη φωτιάς

Κατά τη φάση αυτή, η φωτιά αναπτύσσεται σε μέγεθος με την πάροδο του χρόνου, απελευθερώνοντας ενέργεια και δημιουργώντας προϊόντα καύσης. Η φάση αυτή είναι πολύ σημαντική για τους πυροσβέστες, καθώς στα πρώτα στάδια μιας πυρκαγιάς είναι πιο εύκολος ο έλεγχος και η κατάσβεσή της. Όμως αυτό δεν είναι πάντα εύκολο, καθώς υπάρχουν παράγοντες οι οποίοι μπορούν να επιταχύνουν την ανάπτυξη της και να καταστεί δύσκολο να αντιμετωπιστεί άμεσα. Παράγοντες οι οποίοι δυσκολεύουν την πρόβλεψη του ρυθμού ανάπτυξης μιας πυρκαγιάς είναι ο αερισμός εντός του χώρου, το είδος και η ποσότητα του καυσίμου, καθώς και η διασπορά του μέσα στο διαμέρισμα [Parkes, 2009].

Στο σημείο αυτό είναι απαραίτητη η εισαγωγή του όρου καθολική ανάφλεξη (flashover), ο οποίος θα αναλυθεί εκτενέστερα στο επόμενο εδάφιο. Η φάση της ανάπτυξης της πυρκαγιάς μπορεί να χαρακτηριστεί ως *‘πριν την καθολική ανάφλεξη φάση’* (pre-flashover stage), κατά την οποία η συμπεριφορά της φωτιάς εντός του δωματίου είναι περιορισμένη χωρικά και ο προσδιορισμός της γίνεται αυστηρά στο χώρο αυτό. Εντός του δωματίου οι θερμοκρασίες - αερίων και τοιχωμάτων- θα αυξάνονται κατά τη φάση της ανάπτυξης, έως τη στιγμή όπου θα παρατηρηθεί εμφάνιση καθολικής ανάφλεξης και ο ρυθμός αύξησής τους αλλάζει σημαντικά. Τη στιγμή αυτή, όλα τα εύφλεκτα υλικά περνούν σε κατάσταση άμεσης ανάφλεξης, προσδιορίζοντας τον όρο καθολική ανάφλεξη.

### 1.1.2 Καθολική ανάφλεξη (flashover)

Ο όρος αυτός χαρακτηρίζει ένα φαινόμενο το οποίο γίνεται εμφανές σε κάποιον παρατηρητή κατά την ανάπτυξη μιας πυρκαγιάς σε εσωτερικό χώρο. Ουσιαστικά αποτελεί τη μετάβαση από τη φάση της ανάπτυξης μιας πυρκαγιάς, στη φάση κατά την οποία είναι πλήρως αναπτυγμένη. Η φωτιά αρχικά καίει ελεύθερα, έως τη στιγμή όπου θα παρατηρηθεί μεγάλη και απότομη μείωση του οξυγόνου ή σημαντική έκλυση και ανατροφοδότηση ακτινοβολίας, το οποίο σηματοδοτεί τη διαφορά μεταξύ φωτιάς σε *επαρκούς-αερισμού* (well-ventilated) και *μη επαρκούς-αερισμού* (ventilation-limited) κλειστού χώρου.

Κατά την εμφάνιση μιας τέτοιας κατάστασης, παρατηρείται απότομη και άμεση αλλαγή στην ανάπτυξη και εξέλιξη της φωτιάς, ενώ κυριαρχεί η τάση για συμμετοχή όλου του καυσίμου στην καύση. Στην περίπτωση όπου το διαμέρισμα δεν έχει επαρκή αερισμό και ο εισερχόμενος αέρας μέσω ανοιγμάτων είναι ελάχιστος (φωτιά εξαρτώμενη από τις συνθήκες αερισμού), παράγονται υψηλές φλόγες εκτός του διαμερίσματος, ενώ ταυτόχρονα, λόγω της ατελούς διαδικασίας καύσης προκύπτουν θέματα τοξικότητας [Quintiere, 2006].

#### 1.1.2.1 Χαρακτηριστικά καθολικής ανάφλεξης

Στο σημείο αυτό παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του φαινομένου της καθολικής ανάφλεξης [Quintiere, 2006].

- 1) **Εξωτερική μετάδοση φλόγας:** Συμβαίνει από αυτανάφλεξη ή κατευθυνόμενη ανάφλεξη, ως αποτέλεσμα της θερμότητας δια ακτινοβολίας. Μέσω των θερμών αερίων τα οποία κινούνται ανοδικά, η θερμότητα λόγω ακτινοβολίας στην οροφή του διαμερίσματος είναι αυξημένη. Η ελάχιστη τιμή εκπομπής των περισσότερων υλικών για την κατευθυνόμενη ανάφλεξη είναι περίπου 20 kW/m<sup>2</sup>, η οποία μετράται στο πάτωμα και αντιστοιχεί σε θερμοκρασίες αερίου της τάξης των 500-600°C.
- 2) **Ταχεία διάδοση της φλόγας:** Η προθέρμανση δια ακτινοβολίας ενός υλικού είναι πιθανό να προκαλέσει αύξηση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του υλικού, κάτι το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την προσέγγιση της θερμοκρασίας της κατευθυνόμενης ανάφλεξης.
- 3) **Αστάθεια της καύσης:** Ακόμα και στην περίπτωση όπου η φωτιά δεν εξαπλώνεται μακριά από το αντικείμενο που έχει αναφλεχθεί, υπό τις κατάλληλες συνθήκες, μπορεί να διακριθεί μία ξαφνική αύξηση της φλόγας. Συγκεκριμένα, η μετάδοση της θερμότητας ανάμεσα στο καϊόμενο αντικείμενο και στο θερμαινόμενο διαμέρισμα, μπορεί να προκαλέσει μια ξαφνική



μετάβαση όπου όλες οι επιφάνειες εντός του κλειστού χώρου φτάνουν το σημείο ανάφλεξης τους. Αρχικά παρατηρείται σταθερή κατάσταση καύσης σε συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος, ενώ μετά την καθολική ανάφλεξη και τη θέρμανση του διαμερίσματος, παρατηρείται μια νέα σταθερή κατάσταση κατά την οποία έρχεται σε ισορροπία η καύση του καυσίμου.

4) **Τροφοδοσία οξυγόνου:** Η ξαφνική θραύση ενός παραθύρου ή το άνοιγμα μίας πόρτας επιτρέπει σε καθαρό οξυγόνο να εισέλθει απότομα στον κλειστό χώρο. Καθώς αυτό αναμιγνύεται με τα ζεστά αέρια που εμφανίζουν περίσσεια καυσίμου, παρατηρείται ανάφλεξη των αερίων αυτών. Το φαινόμενο αυτό, υπάρχει ενδεχόμενο να συμβεί τόσο γρήγορα, που να παρουσιαστεί σημαντική αύξηση της πίεσης και να προκαλέσει κατάρρευση τοίχων και παράθυρων. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται εκτόνωση της φωτιάς (backdraft), και έχουν γίνει εκτεταμένα πειράματα [Hayasaka et, al., 2008] για τη μελέτη του.

5) **Υπερχείλιση:** Πρόκειται για ένα φαινόμενο που συμβαίνει όταν το νερό ψεκάζεται σε ένα λιγότερο πυκνό υγρό το οποίο έχει θερμοκρασία βρασμού υψηλότερη από αυτήν του νερού. Σταγονίδια νερού μεταβαίνουν σε στιγμιαίο ατμό, η αύξηση του οποίου είναι πιθανό να προκαλέσει ψεκάσμο του καυσίμου. Η αύξηση της περιοχής του υγρού καυσίμου που ψεκάζεται μπορεί να προκαλέσει αύξηση της ισχύος της φωτιάς.

Ακόμα κι αν αυτό δεν συμβαίνει στην επιφάνεια, η συλλογή του βαρύτερου νερού στο κάτω μέρος της κηλίδας καυσίμου μπορεί να προκαλέσει ταχύ βρασμό, καθώς το υγρό καύσιμο υποχωρεί προς τον πυθμένα της κηλίδας.

### 1.1.3 Πλήρως αναπτυγμένη φωτιά

Σε περίπτωση που δε γίνει κάποια ενέργεια για την κατάσβεση της φωτιάς σε πρώιμο στάδιο, θα παρατηρηθεί αύξηση της φωτιάς μέχρι να φθάσει ένα μέγιστο μέγεθος κατά το οποίο η ισχύς της, είτε θα ελέγχεται από την ποσότητα καυσίμου που έχει απομείνει (*fuel controlled*), είτε από την ποσότητα του αέρα που εισέρχεται μέσω των ανοιγμάτων (*ventilation controlled*).



**Σχήμα 1.2** Μετάβαση από το στάδιο ανάπτυξης της φωτιάς, στο στάδιο πλήρως αναπτυγμένης, μέσω της καθολικής ανάφλεξης.

Στην πλήρως αναπτυγμένη φάση, ή αλλιώς τη *‘μετά την καθολική ανάφλεξη φάση’* (*post-flashover stage*), οι εκτιθέμενες επιφάνειες όλων των εύφλεκτων αντικειμένων στο δωμάτιο προέλευσης της φωτιάς θα αρχίσουν να καίγονται κι ο ρυθμός εκλυόμενης ενέργειας θα λάβει τη μέγιστη τιμή του. Αυτό σημαίνει πως το οξυγόνο που εισέρχεται εντός του κλειστού χώρου θα είναι λιγότερο από όσο χρειάζεται το καύσιμο για να καεί πλήρως. Αυτή η κατάσταση ονομάζεται *περιορισμένου αερισμού* (*ventilation limited*), ενώ το καύσιμο που έχει απομείνει θα εξέλθει του διαμερίσματος με τη ροή θερμών αερίων και θα καεί έξω από τον κλειστό χώρο.

Η φάση της αναπτυσσόμενης φωτιάς επηρεάζεται από

- Το μέγεθος και το σχήμα του χώρου/διαμερίσματος,
- Την ποσότητα, κατανομή και τον τύπο του καυσίμου,
- Τις συνθήκες αερισμού στο εσωτερικό του χώρου,
- Τη μορφή και τον τύπο των δομικών υλικών που χρησιμοποιούνται για τους τοίχους, την οροφή και το πάτωμα του διαμερίσματος. [Quintiere, 2006]

Κατά το στάδιο αυτό η θερμοκρασία μπορεί να φτάσει τη μέγιστη τιμή των 1200°C, αν και συνήθως οι θερμοκρασίες που παρατηρούνται σε φάση αναπτυσσόμενης φωτιάς εντός διαμερίσματος είναι μεταξύ 900 – 1000 °C.

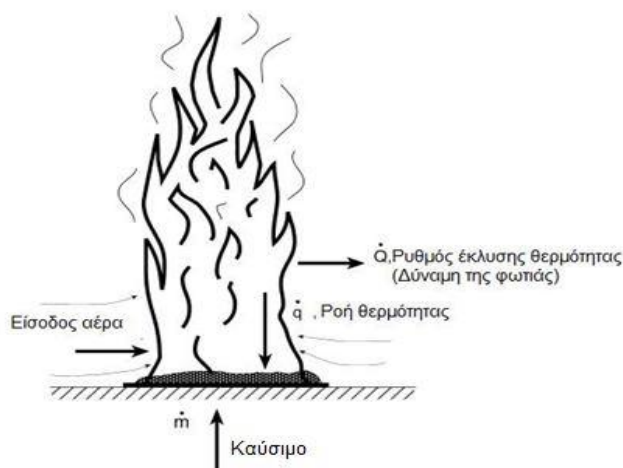
Κατά τη διάρκεια της περιόδου της πλήρους αναπτυσσόμενης φλόγας (Σχήμα 1.2), τα δομικά στοιχεία του κτηρίου μπορούν να φτάσουν θερμοκρασίες στις οποίες υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να αστοχήσουν. Μια τέτοια αστοχία ενός δομικού στοιχείου μπορεί να προκαλέσει τοπική ή γενική κατάρρευση της κατασκευής του κτηρίου. Με τον όρο ‘αστοχία’ θα πρέπει να συμπεριληφθούν τα στοιχεία εκείνα τα οποία παρόλο που δεν καταρρέουν, επιτρέπουν τη μετάδοση και εξάπλωση της φωτιάς σε διπλανούς χώρους, όπως είναι οι τυχόν ρωγμές που μπορεί να εμφανιστούν [Drysdale et al., 1999]. Η επίδραση της χρονικής περιόδου κατά την οποία είναι σε εξέλιξη η φάση μετά την καθολική ανάφλεξη στις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται, δεν μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί από τους μηχανικούς. Αυτό καταστά ιδιαίτερα χρήσιμη τη διεξαγωγή πειραμάτων προκειμένου να προσδιοριστεί η αντοχή των δομικών υλικών σε υψηλές θερμοκρασίες. Κάτι τέτοιο θα ήταν ιδιαίτερος σημαντικό για τους πυροσβέστες αλλά και εργαλείο σε συστήματα πυρόσβεσης.

#### 1.1.4 Σβέση φωτιάς

Μετά από κάποιο χρονικό διάστημα η φωτιά θα υποχωρήσει και τελικά θα σβήσει χωρίς παρέμβαση λόγω της έλλειψης οξυγόνου ή της μείωσης του καυσίμου, ενώ πιο άμεσα θα σβήσει με τη βοήθεια συστημάτων πυρόσβεσης τα οποία έχουν αναπτυχθεί σε πολλές περιπτώσεις.

### 1.2 Ρυθμός Έκλυσης Θερμότητας (ΡΕΘ)

Ο Ρυθμός Έκλυσης Θερμότητας (ΡΕΘ) αποτελεί το σημαντικότερο παράγοντα για το χαρακτηρισμό της δριμύτητας μιας φωτιάς [Babrauskas και Peacock, 1992] και δίνει το ρυθμό με τον οποίο οι αντιδράσεις καύσης παράγουν θερμότητα. Μια φωτιά για να αναπτυχθεί χρειάζεται την ύπαρξη καυσίμου και οξυγόνου. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 1.3, η καύση που γίνεται από τη μίξη καυσίμου και αέρα, παράγει φωτιά, της οποίας η δύναμη μετράται σε κιλοβάτ, μέσω του ρυθμού έκλυσης θερμότητας.



Σχήμα 1.3 Χαρακτηρισμός φωτιάς

Στην πιο απλή περίπτωση -κατά την οποία υπάρχει επαρκές οξυγόνο και η θερμοκρασία δεν παρουσιάζει ραγδαία άνοδο-, ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας δίνεται από τη σχέση

$$\dot{Q} = \dot{m}_f \times \Delta H_c \quad (1.1)$$

Όπου  $\dot{Q}$  = ρυθμός έκλυσης θερμότητας (kW)

$\dot{m}_f$  = ρυθμός απώλειας μάζας καυσίμου (kg/s)

$\Delta H_c$  = θερμογόνος ικανότητα (kJ/kg)

Για τη μέτρηση του ρυθμού εκλυόμενης θερμότητας χρησιμοποιούνται δύο βασικές μέθοδοι. Η πρώτη ονομάζεται “θερμιδομετρία κατανάλωσης οξυγόνου” (oxygen consumption calorimetry), και επιτυγχάνεται με ειδικές μετρητικές διατάξεις. Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στη μέτρηση της απελευθέρωσης του ποσού ενέργειας ανά μονάδα μάζας καυσίμου που καταναλώνεται, κατά τη διάρκεια καύσης στερεών και υγρών καυσίμων. Μετά την ανάφλεξη, τα εύφλεκτα προϊόντα μετακινούνται δια μέσου ενός αγωγού εξαγωγής, όπου μετράται η ροή, η περιεκτικότητα και η ποσότητα του οξυγόνου που έχει καταναλωθεί κατά την καύση των πτητικών προϊόντων της καύσης του καυσίμου. Έτσι ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας υπολογίζεται μέσω της σχέσης που υπάρχει ανάμεσα στην περιεκτικότητα του οξυγόνου και στην ενέργεια η οποία απελευθερώνεται.

Η δεύτερη μέθοδος στηρίζεται στη μέτρηση του ρυθμού απώλειας μάζας καυσίμου. Με τη βοήθεια δυναμοκυψέλης είναι δυνατός ο προσδιορισμός της απώλειας μάζας του καυσίμου και στη συνέχεια χρειάζεται μόνο γνώση της θερμογόνου ικανότητας του για τον υπολογισμό του ΡΕΘ. Η θερμογόνος ικανότητα ενός καυσίμου είναι η ενέργεια που εκλύεται κατά την πλήρη και τέλεια καύση του με το οξυγόνο, με τα προϊόντα και τα αντιδρώντα να βρίσκονται στους 25°C, ενώ εκφράζεται σε μονάδες ενέργειας ανά μονάδα μάζας καυσίμου (kJ/kg, kcal/kg, BTU/lb). Η θερμογόνος ικανότητα διακρίνεται σε ανώτερη (HHV - Higher Heating Value), όταν στα προϊόντα καύσης το νερό βρίσκεται σε υγρή κατάσταση και κατώτερη (LHV - Lower Heating Value), όταν στα προϊόντα καύσης το νερό βρίσκεται σε αέρια κατάσταση. Για την εκτίμηση του ρυθμού έκλυσης θερμότητας σε φωτιά, χρησιμοποιείται πάντα η κατώτερη θερμογόνος ικανότητα.

Η θερμογόνος ικανότητα (Heat of Combustion) διακρίνεται στη θεωρητική και στην πραγματική θερμογόνος ικανότητα. Η θεωρητική -που υπολογίζεται βάση στοιχειομετρίας- είναι το μέγεθος της ενέργειας που απελευθερώνεται όταν η καύση ολοκληρωθεί, χωρίς να μένει κατάλοιπο καυσίμου και απελευθερώνοντας όλη τη χημική ενέργεια του υλικού. Από την άλλη, η πραγματική θερμογόνος ικανότητα - που μετράται πειραματικά- αφορά μία φωτιά στην οποία η καύση δεν είναι απαραίτητα τέλεια και παραμένουν κάποια κατάλοιπα καυσίμου. Τυπικά, η πραγματική και θεωρητική θερμογόνος ικανότητα μετράται με θερμιδόμετρο τύπου Οβίδας οξυγόνου (oxygen bomb calorimeter) που φαίνεται στο Σχήμα 1.4.



Σχήμα 1.4 Θερμιδόμετρο τύπου Οβίδας οξυγόνου.

### 1.3 Φωτιά κηλίδας

Με τον όρο κηλίδα αναφερόμαστε στο καύσιμο το οποίο είναι είτε σε υγρή μορφή, είτε σε επίπεδες στερεές πλάκες οι οποίες συμπεριφέρονται κατά τη σβέση τους όπως τα υγρά καύσιμα. Ένα υγρό καύσιμο μπορεί να καίγεται σε ανοιχτό δοχείο ή ακόμα και στο έδαφος, έχοντας το σχήμα μιας κηλίδας (pool fire). Στη δεύτερη περίπτωση, το σχήμα και το μέγεθος της διαμορφώνονται με βάση τη γεωμετρία της γύρω περιοχής [Igbal et al., 2003].

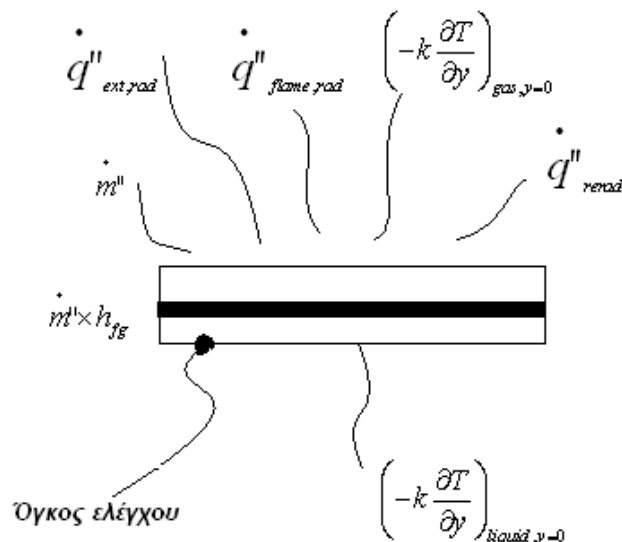
#### 1.3.1 Φωτιά κηλίδας υγρού καυσίμου

Στην περίπτωση των υγρών καυσίμων είναι σημαντικό να περιγραφούν οι φυσικές διαστάσεις της κηλίδας, καθώς το μέγεθος της φωτιάς εξαρτάται από τις διαστάσεις αυτές. Στην περίπτωση της κηλίδας, το ρόλο των ορίων παίζουν είτε τα τοιχώματα ενός δοχείου, είτε τα τοιχώματα ενός δωματίου, είτε οποιοδήποτε άλλο εμπόδιο υπάρχει –φυσικό και μη- το οποίο περιορίζει τη μάζα του καυσίμου σε ευδιάκριτο χώρο. Με τον όρο ισχύς της φωτιάς εννοείται πάντα η ποσότητα ενέργειας που εκλύεται, μετρούμενη σε κιλοβάτ (kW).

Αφού γίνει ανάφλεξη, η φωτιά εξαπλώνεται σε όλη την επιφάνεια της υγρής κηλίδας, οπότε οι διαστάσεις της κηλίδας παίζουν σημαντικό ρόλο στην εξάπλωση της φωτιάς. Παρατηρείται πως για τη δημιουργία μιας κηλίδας από υγρό καύσιμο, βασική παράμετρος είναι τα χαρακτηριστικά του υποστρώματος στο οποίο χύνεται το καύσιμο. Ανάλογα με το είδος αυτού –τραχύτητα και υλικό- το καύσιμο δημιουργεί διαφορετικού μεγέθους κηλίδες, κάτι που επιδρά άμεσα στο ρυθμό καύσης του. Για παράδειγμα, υπάρχει μεγάλη διαφορά όταν το ίδιο καύσιμο χυθεί σε στρώμα από μπετόν και σε στρώμα από άμμο. Η άμμος, ως πιο πορώδες υλικό θα αλλάξει άρδην το ρυθμό καύσης του καυσίμου.

#### 1.3.2 Φωτιά κηλίδας υγρού καυσίμου σε εξωτερικό χώρο

Για τη μαθηματοποίηση της καύσης κηλίδας υγρού καυσίμου σε εξωτερικό χώρο, θεωρείται μονοδιάστατη επιφάνεια ατμοποίησης στην οποία διακρίνονται η μεταφορά μάζας και θερμότητας. [Yüi, 2002] (Σχήμα 1.5).



Σχήμα 1.5 Σχηματική αναπαράσταση μεταφοράς μάζας και θερμότητας σε κηλίδα φωτιάς

Εφαρμόζοντας την εξίσωση διατήρησης ενέργειας στην επιφάνεια, για τον όγκο ελέγχου του Σχήματος 1.5, μπορεί να εξαχθεί η εξίσωση (1.2)

$$\dot{m}'' h_{fg} = \left( -k \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{\text{gas}, y=0} + \left( \dot{q}''_{\text{flame, rad}} + \dot{q}''_{\text{ext, rad}} \right) - \varepsilon_s \sigma T_v^4 - \left( -k \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{\text{liquid}, y=0} \quad (1.2)$$

Με κάθε όρο αντίστοιχα, να είναι

**(Ποσοστό ενέργειας προς εξάτμιση) = (Ποσοστό αγωγής φλόγας) + (Ποσοστό ακτινοβολίας φλόγας) + (Ποσοστό εξωτερικής ακτινοβολίας) - (Ποσοστό ανατροφοδότησης ακτινοβολίας) - (Ποσοστό απώλειας ενέργειας για τη θέρμανση του υγρού)**

Όπου  $h_{fg}$  η ενθαλπία αλλαγής φάσης του καυσίμου από υγρό σε αέριο υπό γνωστή πίεση.

Κατά την αεριοποίηση, η επιφάνεια έχει θερμοκρασία αεριοποίησης,  $T_v$ , ενώ ο όγκος του υγρού έχει θερμοκρασία  $T_o$ , οπότε η ενέργεια που απαιτείται για τη μετάβαση της θερμοκρασίας του υγρού από  $T_o$  σε  $T_v$  είναι

$$\left( -k \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{\text{liquid}, y=0} = \dot{m}'' c_{p,l} (T_v - T_o) \quad (1.3)$$

με  $c_{p,l}$  η ειδική θερμοχωρητικότητα του υγρού.

Με αντικατάσταση της (1.3) στην (1.2) προκύπτει

$$\left( -k \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{\text{gas}, y=0} = \dot{m}'' \left\{ h_{fg} + c_{p,l} (T_v - T_o) - \frac{1}{\dot{m}''} \left[ \left( \dot{q}''_{\text{flame, rad}} + \dot{q}''_{\text{ext, rad}} \right) - \varepsilon_s \sigma T_v^4 \right] \right\} \quad (1.4)$$

Ή αλλιώς

$$\left( -k \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{\text{gas}, y=0} = \dot{m}'' \hat{L} \quad (1.5)$$

με  $\hat{L}$  η ενεργός θερμότητα αεριοποίησης, στην οποία περιλαμβάνεται η επίδραση της ακτινοβολίας.

Η ροή μάζας υπολογίζεται από την εξίσωση (1.6), κατά τη διάρκεια μιας υποθετικής σταθερής κατάστασης που υπάρχει καθαρή συναγωγή. Αυτό γίνεται υποθέτοντας τον αριθμό Lewis ο οποίος ισούται με τη μονάδα, στην επιφάνεια του εξατμιζόμενου καυσίμου –με ή χωρίς καύση- [Kanury, 1992], οπότε είναι

$$\dot{m}'' = \frac{h}{c_{p, \text{gas}}} \ln(1 + B) \quad (1.6)$$

Όπου  $h$  είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας συναγωγής,  $c_{p, \text{gas}}$  η ειδική θερμοχωρητικότητα του αερίου και ο αριθμός  $B$  για ανοιχτό χώρο καύσης δίνεται από τη σχέση

$$B = \frac{Y_{\text{OX}, \infty} \frac{\Delta H_{c, \text{net}}}{r_{\text{OX}}} + c_{p, \text{gas}} (T_{\infty} - T_v)}{\hat{L}} \quad (1.7)$$

Με  $Y_{OX,\infty}$  το κλάσμα μάζας οξυγόνου,  $T_\infty$  η θερμοκρασία σε εξωτερικές συνθήκες και  $r_{OX}$  το στοιχειομετρικό κλάσμα οξυγόνου προς μάζα καυσίμου.

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (1.4), (1.6) και (1.7) η τελική εξίσωση (1.8) που προκύπτει

$$\dot{m}'' = \frac{\frac{h}{c_{p,gas}} \left( \frac{\xi}{e^\xi - 1} \right) \left[ Y_{OX,\infty} \frac{\Delta H_{c,net}}{r_{OX}} + c_{p,gas} (T_\infty - T_v) \right] + \left[ \left( \dot{q}''_{flame,rad} + \dot{q}''_{ext,rad} \right) - \varepsilon_s \sigma T_v^4 \right]}{h_{fg} + c_{p,l} (T_v - T_o)} \quad (1.8)$$

Όπου

$$\xi = \frac{\dot{m}'' c_{p,gas}}{h} \quad (1.9)$$

Ο παρανομαστής της (1.8) αντιπροσωπεύει τη θερμότητα αεριοποίησης

$$L_g = h_{fg} + c_{p,l} (T_v - T_o) \quad (1.10)$$

και ο πρώτος όρος του αριθμητή τη ροή θερμότητας λόγω συναγωγής, δηλαδή

$$\dot{q}''_{flame,conv} = \frac{h}{c_{p,gas}} \left( \frac{\xi}{e^\xi - 1} \right) \left[ Y_{OX,\infty} \frac{\Delta H_{c,net}}{r} + c_{p,gas} (T_\infty - T_o) \right] \quad (1.11)$$

Η τελευταία σχέση (1.11) καταδεικνύει πως η αύξηση του ρυθμού εξάτμισης του καυσίμου, αποφέρει μείωση της ροής θερμότητας λόγω συναγωγής της φλόγας.

Όμως είναι φανερό ότι η εξίσωση (1.11) δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτούσια, καθώς οι συνιστώσες της ροής θερμότητας λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας της φλόγας είναι άγνωστες. Για το λόγο αυτό, για να υπολογιστεί ο ρυθμός απώλειας μάζας καυσίμου, χρησιμοποιείται η εμπειρική σχέση (1.12)

$$\dot{m}'' = \dot{m}''_\infty (1 - e^{-k\beta D}) \quad (1.12)$$

Όπου  $\dot{m}''_\infty$ ,  $k$  και  $\beta$  παίρνουν τιμές ανάλογα το καύσιμο και  $D$  (m) είναι η διάμετρος της κηλίδας καυσίμου [Babrauskas, 1992].

Η εμπειρική σχέση (1.12) που παρουσίασε ο Babrauskas, αποτελεί εργαλείο για τον υπολογισμό του ρυθμού απώλειας μάζας καυσίμου, όταν η διάμετρος είναι μεγαλύτερη των 0.2m.

Έτσι, για το ρυθμό έκλυσης θερμότητας, βάση των (1.1) και (1.12) είναι

$$\dot{q} = \dot{m}'' \Delta H_c A_p \quad (1.13)$$

Με  $A_p$  την έκταση της καίμενης κηλίδας (m<sup>2</sup>).

Οι δύο τελευταίες εξισώσεις (1.12), (1.13), αναφέρονται σε περιπτώσεις κηλίδας καυσίμου που καίγεται σε εξωτερικό χώρο, με την προϋπόθεση οι θερμοκρασίες να μην αυξάνονται με ραγδαίο ρυθμό. Σε περίπτωση όπου η καύση γίνεται σε κλειστό χώρο, πρέπει να τονιστεί πως οι σχέσεις αυτές ισχύουν μόνο μέχρι τη στιγμή της καθολικής ανάφλεξης (flashover) και όχι πέρα από αυτή [Babrauskas, 1986], καθώς οι επιπτώσεις από την ακτινοβολία στα τοιχώματα του χώρου έχουν σημαντική επίδραση στη συμπεριφορά της καύσης.

Στη συνέχεια δίνεται πίνακας με τις τιμές των εμπειρικών σταθερών για διάφορα είδη καυσίμου.

Υλικό	Ρυθμός απώλειας καυσίμου (kg/m <sup>2</sup> sec)	Θερμότητα καύσης (kJ/kg)	Ποκνότητα (kg/m <sup>3</sup> )	Εμπειρική σταθερά κβ (m <sup>-1</sup> )
Αλκοόλες				
Μεθανόλη	0.017	20000	796	100
Αιθανόλη	0.015	26800	794	100
<b>Απλά οργανικά καύσιμα</b>				
Βουτάνιο	0.078	45700	573	2.7
Βενζίνη	0.085	40100	874	2.7
Εξάνιο	0.074	44700	650	1.9
Επτάνιο	0.101	44600	675	1.1
Ξυλένιο	0.090	40800	870	1.4
Ακετόνη	0.041	25800	791	1.9
Διοξάνιο	0.018	26200	1035	5.4
Διαιθυλικός αιθέρας	0.085	34200	714	0.7
<b>Προϊόντα πετρελαίου</b>				
Benzine	0.048	44700	740	3.6
Gasoline	0.055	43700	740	2.1
Κηροζίνη	0.039	43200	820	3.5
JP-4	0.051	43500	760	3.6
JP-5	0.054	43000	810	1.6
Έλαιο καυσίμου (fuel oil)	0.035	39700	940-1000	1.7
Αργό πετρέλαιο	0.022-0.045	42500	830-880	2.8
<b>Στερεά</b>				
Πολυμεθυλομεθακρυλικό (polymethylmethacrylate)	0.020	24900	1184	3.3
Πολυπροπυλένιο	0.018	43200	905	100
Πολυστυρόλιο (polystyrene)	0.034	39700	1050	100

**Πίνακας 1.1** Ιδιότητες καυσίμων κοινά χρησιμοποιούμενων σε μεγάλες κηλίδες φωτιάς [Igbal et al., 2003]

Η εξίσωση (1.13) αποτελεί μια ιδανική προσέγγιση για το ρυθμό έκλυσης θερμότητας. Όμως, στην πραγματικότητα υπάρχουν παράγοντες οι οποίοι επιδρούν σε αυτήν. Κάποιοι από τους πιο σημαντικούς είναι

- **Επίδραση ανέμου**, που αφορά κυρίως φωτιές σε εξωτερικό χώρο. Όσο αφορά τις πειραματικές εγκαταστάσεις κλειστού χώρου, έχει αναγνωριστεί [Emmons, 2002] η επίδραση της ταχύτητας του ανέμου κοντά ή πάνω στην κηλίδα καυσίμου, που οφείλεται από την εισροή του ανέμου μέσω του ανοίγματος της εγκατάστασης.
- **Διαφορά ύψους χείλους**, το οποίο ορίζεται ως η διαφορά του ύψους του χείλους του δοχείου που χρησιμοποιείται από το ύψος της στάθμης του καυσίμου. Το ύψος του χείλους του δοχείου επιλέγεται ώστε το καύσιμο να παραμένει εντός του δοχείου και να μην υπάρχουν απώλειες καυσίμου κατά την καύση του. Παράλληλα, είναι σημαντικό να μην υπάρχει μεγάλη επίδραση στη συμπεριφορά του πλουμίου της φωτιάς και σε οποιαδήποτε μορφή ακτινοβολίας.
- **Παροδικές επιδράσεις στην κηλίδα**, οι οποίες δεν της επιτρέπουν την καύση σε σταθερή κατάσταση. Κατά την ανάπτυξη της φωτιάς, οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στα τοιχώματα και στη βάση του δοχείου επιδρούν σημαντικά στο ρυθμό καύσης, κάτι που αποτελεί βασική συμπεριφορά καύσης μιας κηλίδας. Με προσθήκη μόνωσης στο δοχείο είναι δυνατόν να αποφύγουμε τέτοιες επιδράσεις και να θεωρήσουμε καύση σε σταθερή κατάσταση (quasi-steady state).
- **Εξάπλωση του βρασμού**, κατά την οποία ο βρασμός του καυσίμου ξεπερνά τα τοιχώματα του δοχείου και γίνεται εκτός του ύψους του.

### 1.3.3 Φωτιά κηλίδας υγρού καυσίμου σε κλειστό χώρο

Όταν η κηλίδα υγρού καυσίμου καεί μέσα σε κλειστό χώρο –διάταξη δωματίου- τότε αλλάζουν άρδην ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας και ο ρυθμός καύσης του καυσίμου. Η διάταξη κλειστού χώρου αποφέρει σημαντικές επιδράσεις στα δύο αυτά μεγέθη.

Όπως έχει αναφερθεί, η φάση κατά την οποία η φωτιά αναπτύσσεται αποτελεί την ‘πρίν την καθολική ανάφλεξη’ φάση. Στη φάση αυτή, ο ρυθμός καύσης αυξάνεται συναρτήσει του χρόνου, καθώς αιθάλη και θερμά αέρια συσσωρεύονται στην οροφή και τα τοιχώματα του κλειστού χώρου. Αυτό έχει ως επακόλουθο, την αύξηση της θερμότητας που ακτινοβολείται προς την επιφάνεια του καυσίμου, η οποία προέρχεται από το άνω θερμαινόμενο στρώμα των αερίων και τα τοιχώματα του χώρου. Όσο η φωτιά αναπτύσσεται, το φαινόμενο αυτό θα είναι πιο έντονο, κάτι που θα αποφέρει αύξηση της θερμοκρασίας των θερμών αερίων στα ανώτερα στρώματα (upper layers).

Στη συνέχεια, μετά την καθολική ανάφλεξη, ακολουθεί η φάση όπου η φωτιά είναι πλήρως αναπτυγμένη, ή όπως έχει χαρακτηριστεί ‘μετά την καθολική ανάφλεξη’ φάση. Στη φάση αυτή η ακτινοβολία παρουσιάζει μεγάλη αύξηση, το οποίο προκαλεί αύξηση του ρυθμού καύσης κατά έξι με επτά φορές σε σχέση με την καύση σε ανοιχτό χώρο [Bullen και Thomas, 1976]. Σε αυτό το στάδιο, σημαντικό ρόλο για την καύση εντός κλειστού χώρου διαδραματίζει ο παράγοντας του αερισμού του χώρου. Το οξυγόνο το οποίο είναι απαραίτητο για την καύση που πραγματοποιείται σχετίζεται άμεσα με την ποσότητα του αέρα που εισέρχεται μέσω των ανοιγμάτων εντός του χώρου. Αν ο αερισμός είναι περιορισμένος, η περιορισμένη διαθεσιμότητα του οξυγόνου προκαλεί ατελή καύση με αποτέλεσμα να μειώνεται ο ΡΕΘ. Αν και η μείωση του οξυγόνου μπορεί να φέρει μείωση της ταχύτητας καύσης, μια μείωση της επιφάνειας του ανοίγματος, μπορεί να μην επιφέρει μείωση του οξυγόνου που έρχεται σε επαφή με τη φωτιά [Parkes, 2009].

Οι θερμοκρασίες μέσα στο χώρο στη φάση ‘μετά την καθολική ανάφλεξη’ είναι ιδιαίτερος υψηλές. Για την αξιολόγηση και περιγραφή των θερμοκρασιών αυτών χρησιμοποιείται η αρχή διατήρησης ενέργειας και μάζας εντός του χώρου.

Για την κατάστροψη των εξισώσεων διατήρησης σε ένα κλειστό χώρο, χρησιμοποιείται συχνά το μοντέλο μονής ζώνης (single zone model), σύμφωνα με το οποίο θεωρείται ως κλειστός χώρος ένα διαμέρισμα ορθογωνικών διαστάσεων το οποίο φέρει ως άνοιγμα ένα ορθογωνικό παράθυρο. Το άνοιγμα αυτό χρησιμοποιείται ως η μοναδική δίοδος της φωτιάς που καίει εντός του δωματίου με την εξωτερική ατμόσφαιρα. Ως όγκος ελέγχου, θεωρείται ο όγκος ολόκληρου του δωματίου, ενώ λαμβάνονται οι κάτωθι παραδοχές [Yii, 2002]

- Η θερμοκρασία αερίων εντός του δωματίου είναι ομοιόμορφη.
- Η αντίδραση μεταξύ του ατμού του καυσίμου και του εισερχόμενου αέρα γίνεται απείρως γρήγορα.
- Το περιβάλλον της φωτιάς βρίσκεται σε σταθερή κατάσταση (quasi-steady).
- Τα αέρια που ρέουν εντός και εκτός του διαμερίσματος -μέσω του ανοίγματος- οφείλονται στις διαφορές της υδροστατικής πίεσης μεταξύ του εσωτερικού περιβάλλοντος και του εξωτερικού αέρα.

Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ενέργειας, η ενέργεια η οποία εισέρχεται στον όγκο ελέγχου είναι ίση με την ενέργεια η οποία εξέρχεται από αυτόν.

Αυτό συνεπάγεται πως η θερμότητα που εκλύεται από τη φωτιά, είναι ίση με το άθροισμα της απώλειας θερμότητας λόγω συναγωγής της ροής αερίων, των απωλειών λόγω ακτινοβολίας μέσω του ανοίγματος, των απωλειών λόγω ακτινοβολίας από τα τοιχώματα, της θερμικής ανατροφοδότησης για εξάτμιση περίσσειας καυσίμου και της θερμότητας που αποθηκεύεται στον όγκο του αερίου.

Η εξίσωση δίνεται

$$\dot{Q}_{\text{fire}} = \dot{Q}_L + \dot{Q}_R + \dot{Q}_W + \dot{Q}_{\text{FB}} + \dot{Q}_G \quad (1.14)$$



- Όπου  $\dot{Q}_{\text{fire}}$  η θερμότητα που εκλύεται από τη φωτιά
- $\dot{Q}_L$  οι απώλειες θερμότητας λόγω συναγωγής της ροής αερίων
- $\dot{Q}_R$  οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας μέσω του ανοίγματος
- $\dot{Q}_W$  οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας από τα τοιχώματα
- $\dot{Q}_{\text{FB}}$  η θερμική ανατροφοδότηση για εξάτμιση περίσσειας καυσίμου
- $\dot{Q}_G$  η θερμότητα που αποθηκεύεται στον όγκο του αερίου

Ο όρος της θερμότητας που αποθηκεύεται στον όγκο του αερίου, στα περισσότερα μοντέλα δε λαμβάνεται υπόψη, καθώς η συνεισφορά του στη θερμοκρασία είναι σχεδόν ασήμαντη σε σχέση με τη συνεισφορά των άλλων όρων [Kawagoe, 1967]. Κάτι τέτοιο οδηγεί στην αρχική παραδοχή που έγινε και αφορά στην διατήρηση σταθερής κατάστασης για το περιβάλλον της φωτιάς κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς.

Στη συνέχεια, σύμφωνα με την παραδοχή της σταθερής κατάστασης, το ισοζύγιο μάζας πρέπει να είναι σταθερό. Αυτό σημαίνει πως ο ρυθμός της μάζας που εισέρχεται εντός του δωματίου θα πρέπει να είναι ίσος με αυτόν που εξέρχεται. Το ισοζύγιο αυτό δίνεται από τη σχέση (1.15)

$$\dot{m}_{\text{in}} + \dot{m}_p = \dot{m}_{\text{out}} \quad (1.15)$$

- Όπου  $\dot{m}_{\text{in}}$  ο ρυθμός ροής της μάζας η οποία εισέρχεται στο εσωτερικό μέσω του ανοίγματος,
- $\dot{m}_{\text{out}}$  ο ρυθμός ροής της μάζας η οποία εξέρχεται από το εσωτερικό μέσω του ανοίγματος,
- $\dot{m}_p$  ο ρυθμός απώλειας μάζας καυσίμου εντός του διαμερίσματος.

Οι εξισώσεις (1.14) και (1.15) αποτελούν τις δύο θεμελιώδεις σχέσεις που αφορούν την καύση κηλίδας καυσίμου σε εσωτερικό χώρο.

### 1.3.3.1 Ρυθμός έκλυσης θερμότητας φωτιάς-Ρυθμός κατανάλωσης καυσίμου

Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας της φωτιάς σε ένα δωμάτιο εξαρτάται από το ρυθμό απώλειας μάζας του καυσίμου και το ρυθμό εισαγωγής αέρα από το άνοιγμα, ενώ αποτελεί αιτία για την αύξηση της θερμοκρασίας εντός του δωματίου. Ανάλογα τη διαθεσιμότητα του αέρα εντός του δωματίου που είναι απαραίτητος για τη διατήρηση της καύσης, γίνεται ο διαχωρισμός σε δύο βασικές κατηγορίες

- Αν ο αέρας εντός του δωματίου είναι λιγότερος από αυτόν που χρειάζεται το καύσιμο για να καεί, τότε έχουμε 'κατάσταση περίσσειας καυσίμου' ή αλλιώς, 'κατάσταση περιορισμένου αερισμού' (under-ventilated condition).
- Αν ο αέρας εντός του δωματίου είναι περισσότερος από αυτόν που χρειάζεται το καύσιμο για να καεί, τότε έχουμε 'κατάσταση περίσσειας αέρα' ή αλλιώς, 'κατάσταση περιορισμένου καυσίμου' (over-ventilated condition).

Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας σε κάθε περίπτωση δίνεται από τις σχέσεις (1.16) και (1.17)

$$\dot{Q}_{\text{fire}} = \dot{m}_p \times \frac{1}{\text{GER}} \times \Delta H_{\text{c,net}} \times b \quad (\text{κατάσταση περίσσειας καυσίμου}) \quad (1.16)$$

$$\dot{Q}_{\text{fire}} = \dot{m}_p \times \Delta H_{c,\text{net}} \times b \quad (\text{κατάσταση περισσειας αέρα}) \quad (1.17)$$

Όπου  $\Delta H_{c,\text{net}}$  η πραγματική θερμογόνος ικανότητα του καυσίμου (kJ/kg)

**b** εμπειρικός συντελεστής (<1), ο οποίος δείχνει την αποτελεσματικότητα της ανάμειξης [Babrauskas, 1981] και συνήθως λαμβάνει τιμές μεταξύ 0.5-0.9.

**GER** ο καθολικός λόγος ισοδυναμίας (Global Equivalence Ratio).

Ο **GER** χαρακτηρίζει τις συνθήκες αερισμού εντός του δωματίου και ορίζεται από τη σχέση (1.18) ως

$$(\text{GER}) = \frac{r_s}{Y_{\text{O}_2,\alpha}} \times \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_{\text{in}}} \quad (1.18)$$

Όπου  $r_s$  το στοιχειομετρικό κλάσμα μάζας οξυγόνου-καυσίμου

$Y_{\text{O}_2,\alpha}$  το στοιχειομετρικό κλάσμα μάζας οξυγόνου στον ατμοσφαιρικό αέρα

Ο ρυθμός κατανάλωσης καυσίμου βρέθηκε πως είναι άμεσα συνδεδεμένος με τον αερισμό εντός του δωματίου. Σε πειράματα που έγιναν από τον Kawagoe [Kawagoe, 1958], ο οποίος χρησιμοποίησε ως καύσιμο σωρούς ορθογωνικά διατεταγμένων ξύλινων ράβδων (wood cribs), αναδείχθηκε η σημασία του αερισμού στη συμπεριφορά του ρυθμού κατανάλωσης καυσίμου και προσδιορίστηκε ο παράγοντας αερισμού που επιδρά στην κατανάλωση του καυσίμου. Ο παράγοντας αερισμού (ventilation factor) υπολογίστηκε πως εξαρτάται από την επιφάνεια του ανοίγματος πολλαπλασιασμένη με τη ρίζα του ύψους του ανοίγματος και δίνεται στην εξίσωση (1.19)

$$(\text{παράγοντας αερισμού}) = A_v \sqrt{H_v} \quad (1.19)$$

Όπου  $A_v$  η επιφάνεια του ανοίγματος (m<sup>2</sup>)

$H_v$  το ύψος του ανοίγματος (m)

Η σχέση μεταξύ του παράγοντα αερισμού και της επιφάνειας της καιόμενης κηλίδας ( $A_p$ ), αποτελεί το σημαντικότερο παράγοντα για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς της καύσης σε κηλίδες καυσίμου [Babrauskas, 1979]. Άλλωστε, η ταχύτητα της καύσης επηρεάζεται από το ποσό της θερμότητας που εκλύεται προς την επιφάνεια της κηλίδας.

Σύμφωνα με τον Babrauskas [Babrauskas, 1980], η θεωρητική τιμή του ρυθμού έκλυσης θερμότητας στην οποία προβλέπεται καθολική ανάφλεξη δίνεται από τη Σχέση (1.20)

$$\dot{Q} = 600 A_v \sqrt{H_v} \quad (1.20)$$

Ο ρυθμός απώλειας μάζας καυσίμου στην ‘μετά την καθολική ανάφλεξη’ φάση (post-flashover stage) δίνεται από τη σχέση

$$\dot{m}_p = A_p \frac{\varepsilon \sigma (T_g^4 - T_b^4)}{L_g} \quad (1.21)$$

Όπου  $\varepsilon$  η ικανότητα εκπομπής αερίων (θεωρείται ίδιος με τον όρο εκπομπής από την κηλίδα)

$\sigma$  η σταθερά Stefan-Boltzmann (=  $5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ )

$T_g$  η θερμοκρασία αερίων (°K)

$T_b$  η θερμοκρασία βρασμού του καυσίμου (°K)

$L_g$  η θερμότητα αεριοποίησης (kJ/kg)

### 1.3.3.2 Απώλειες θερμότητας λόγω συναγωγής της ροής αερίων

Οι απώλειες θερμότητας λόγω συναγωγής της ροής αερίων ( $\dot{Q}_L$ ) υπολογίζεται ως το γινόμενο του ρυθμού εξερχόμενης μάζας αέρα επί την ενθαλπία που αποκτήθηκε με την αύξηση της θερμοκρασίας και δίνονται από την εξίσωση (1.22)

$$\dot{Q}_L = \dot{m}_{out} \times \sum_i Y_i h_i \quad (1.22)$$

Όπου

$$h_i = \int_{T_o}^T c_{pi} dT$$

Με  $h_i$  η ενθαλπία που αποκτήθηκε από κάθε είδος λόγω αύξησης θερμοκρασίας (J)

$Y_i$  το κλάσμα μάζας κάθε είδους ανά μονάδα εξερχόμενης μάζας

$c_{pi}$  η ειδική θερμότητα κάθε είδους αερίου (J/(kgK))

### 1.3.3.3 Απώλειες λόγω ακτινοβολίας μέσω του ανοίγματος

Οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας μέσω του ανοίγματος ( $\dot{Q}_R$ ) δίνονται από τη σχέση (1.23), όπου θεωρείται ροή θερμότητας λόγω της ακτινοβολίας αντικειμένου, θερμοκρασίας  $T_g$ .

$$\dot{Q}_R = A_v \sigma (T_g^4 - T_o^4) \quad (1.23)$$

Με  $\sigma$  η σταθερά Stefan-Boltzmann ( $= 5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$ )

$T_g$  η θερμοκρασία αερίων (°K)

$T_o$  η θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος (°K)

$A_v$  η επιφάνεια του ανοίγματος ( $\text{m}^2$ )

### 1.3.3.4 Απώλειες λόγω ακτινοβολίας από τα τοιχώματα

Οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας από τα τοιχώματα ( $\dot{Q}_w$ ) σε διαμέρισμα συνολικού εμβαδού τοιχωμάτων  $A_t$  ( $\text{m}^2$ ) δίνονται από την εξίσωση (1.24).

$$\dot{Q}_w = A_t h_{fire} (T_g - T_{wi}) + A_t \epsilon_{res} \sigma (T_g^4 - T_{wi}^4) \quad (1.24)$$

Σε μια διάταξη δωματίου, οι τοίχοι και η οροφή αποτελούν τα συμπαγή όρια της κατασκευής μέσω των οποίων μεταφέρεται και απορροφάται θερμότητα, συμπεριφερόμενα ως ομογενή στερεά με σταθερές θερμικές ιδιότητες. Η μεταφορά της θερμότητας δια μέσω των τοίχων θεωρείται μονοδιάστατη. Η στιγμιαία αγωγιμότητα του τοιχώματος δίνεται από τη σχέση (1.25)

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\phi} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.25)$$

με  $\phi$  η θερμική διάχυση, η οποία υπολογίζεται από την εξίσωση (1.26)

$$\phi = \frac{k}{\rho c_p} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (1.26)$$

Όπου  $k$  η σταθερά θερμικής αγωγιμότητας (W/(mK))

$\rho$  η πυκνότητα (kg/m<sup>3</sup>)

$c_p$  η ειδική θερμότητα (J/(kgK))

Η μεταφορά θερμότητας δια συναγωγής και δια ακτινοβολίας σε κάθε πλευρά των τοιχωμάτων υπολογίζεται από τις εξισώσεις (1.27) και (1.28)

• για την εξωτερική πλευρά του τοιχώματος (εξωτερικές συνθήκες)

$$-k \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{\text{solid,amb}} = h_{\text{amb}} (T_{\text{wo}} - T_o) + \sigma \epsilon_w (T_{\text{wo}}^4 - T_o^4) \quad (1.27)$$

• για την εσωτερική πλευρά του τοιχώματος (συνθήκες φωτιάς)

$$-k \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{\text{solid,fire}} = h_{\text{fire}} (T_g - T_{\text{wi}}) + \sigma \epsilon_{\text{res}} (T_g^4 - T_{\text{wi}}^4) \quad (1.28)$$

με

$$\epsilon_{\text{res}} = \left( \frac{1}{\epsilon_g} + \frac{1}{\epsilon_w} - 1 \right)^{-1} \quad (1.29)$$

Όπου  $h_{\text{fire}}$  ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας δια συναγωγής για την εσωτερική πλευρά των τοιχωμάτων (W/m<sup>2</sup> K)

$h_{\text{amb}}$  ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας δια συναγωγής για την εξωτερική πλευρά των τοιχωμάτων (W/m<sup>2</sup> K)

$T_{\text{wo}}$  η θερμοκρασία του τοιχώματος από την εξωτερική πλευρά (°K)

$T_{\text{wi}}$  η θερμοκρασία του τοιχώματος από την εσωτερική πλευρά (°K)

$\epsilon_g$  ο συντελεστής εκπομπής των αερίων

$\epsilon_w$  ο συντελεστής εκπομπής των επιφανειών των τοιχωμάτων

$\epsilon_{\text{res}}$  ο συνολικός συντελεστής εκπομπής των αερίων και επιφανειών των τοιχωμάτων

Τυπικές τιμές για τους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας δια συναγωγής, είναι 10 W/m<sup>2</sup> K για την εξωτερική πλευρά και 25 W/m<sup>2</sup> K για την πλευρά που εκτίθεται σε συνθήκες φωτιάς [Yii, 2002].

### 1.3.3.5 Θερμική ανατροφοδότηση για εξάτμιση περίσσειας καυσίμου

Ο όρος αυτός υποδηλώνει τη θερμότητα που είναι αναγκαία για την εξάτμιση οποιασδήποτε περίσσειας καυσίμου ( $\dot{Q}_{\text{FB}}$ ) και η εξίσωση (1.30) δίνει την ποσότητα αυτή.

$$\dot{Q}_{\text{FB}} = (\dot{m}_p - \frac{\dot{Q}_{\text{fire}}}{\Delta H_{\text{c,net}}}) \times L_g \quad (1.30)$$

Εξ ορισμού, η ενέργεια η οποία απαιτείται για την εξάτμιση του υγρού καυσίμου υπεισέρχεται στη θερμογόνο ικανότητα, οπότε ο όρος ‘ανατροφοδότηση’ αφορά σε ποσότητα καυσίμου που δεν έχει συμμετάσχει στην καύση. Στην ποσότητα αυτή αναφέρεται ο όρος μέσα στην παρένθεση της εξίσωσης (1.30).

### 1.3.3.6 Ουδέτερο Επίπεδο (Neutral plane)

Στο μοντέλο μονής ζώνης είναι ιδιαίτερα σημαντική η αναφορά στο ουδέτερο επίπεδο, το οποίο χρησιμοποιείται για την εξαγωγή εξισώσεων που χρησιμοποιούνται στον αερισμό του δωματίου και αποτελεί γεωμετρικό μέγεθος του χώρου που εξετάζεται.

Ως ουδέτερο επίπεδο (neutral plane)  $Z_n$  ορίζεται το επίπεδο εκείνο στο οποίο η διαφορά πίεσης μεταξύ του εξωτερικού περιβάλλοντος και του περιβάλλοντος της φωτιάς (εσωτερικό του δωματίου) είναι μηδέν. Για τον υπολογισμό του ουδέτερου επιπέδου, χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές.

Μια αρκετά διαδεδομένη εμπειρική προσέγγιση ορίζει ότι το ουδέτερο επίπεδο βρίσκεται στο μισό ύψος του ανοίγματος.

Οι Guigery, Eliassen και Bjom [Guigery et, al., 2010] χρησιμοποίησαν τη σχέση (1.31) για τον υπολογισμό του ουδέτερου επιπέδου, η οποία χρησιμοποιεί την πυκνότητα του αέρα τόσο στο εσωτερικό, όσο και στο εξωτερικό του δωματίου. Αυτό προϋποθέτει τη γνώση της θερμοκρασίας στους χώρους αυτούς, με τη θερμοκρασία μόνο του εξωτερικού περιβάλλοντος να είναι εύκολο να βρεθεί. Για τη θερμοκρασία του εσωτερικού του δωματίου, μια προσέγγιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί με χρήση εμπειρικών σχέσεων όπως αυτές παρουσιάζονται στον Ευρωκώδικα (Eurocode).

$$Z_n = \frac{H_v}{1 + \left(\frac{\rho_g}{\rho_o}\right)^{1/3}} \quad (1.31)$$

Ο δείκτης ‘ο’ υποδεικνύει τις εξωτερικές συνθήκες, ενώ ο δείκτης ‘g’ τις συνθήκες θερμού περιβάλλοντος.

Θεωρώντας πως τα αέρια συμπεριφέρονται με ιδανικό τρόπο, σύμφωνα με το νόμο ιδανικών αερίων, η εξίσωση (1.32) συνδέει την πυκνότητα με τη θερμοκρασία είναι

$$P = \rho RT \quad (1.32)$$

με **P** η πίεση (Pa)

**ρ** η πυκνότητα (kg/m<sup>3</sup>)

**R** η ειδική σταθερά αερίων (= **287 Jkg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>**)

**T** η θερμοκρασία (°K)

Επειδή η ατμοσφαιρική πίεση αλλάζει ελάχιστα συναρτήσει του ύψους σε διάταξη δωματίου,

μπορεί να θεωρηθεί σταθερή. Υπολογίζοντας την πυκνότητα στην εξίσωση (1.33), με βάση την τιμή 101.3 kPa για ατμοσφαιρική πίεση, είναι

$$\rho = 353 / T \quad (1.33)$$

### 1.3.3.7 Αερισμός

Στο μοντέλο μονής ζώνης, θεωρείται πως η υδροστατική πίεση εντός και εκτός του δωματίου είναι γραμμικά εξαρτημένη με το ύψος, ενώ οι θερμοκρασίες είναι ομοιόμορφες. Η ροή δια μέσω του ανοίγματος ορίζεται από τη διαφορά πίεσης μεταξύ του εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος, λόγω της θερμοκρασιακής διαφοράς. Η ανάλυση του αερισμού σύμφωνα με το μοντέλο μονής ζώνης έχει περιγραφεί από πολλούς ερευνητές [Babrauskas και Williamson, 1978], [Utiskul, 2007] και αναλύεται στη συνέχεια.

Στο Σχήμα 1.6 φαίνεται ένα δωμάτιο με παράθυρο ως άνοιγμα. Στο σχήμα είναι εμφανής ο όγκος ελέγχου ο οποίος θεωρείται ως ο όγκος ολόκληρου του δωματίου, σημειώνονται τα διάφορα ύψη τα οποία παίζουν ρόλο στην ανάλυση, ενώ φαίνεται και το ουδέτερο επίπεδο (neutral plane).

Τα ύψη τα οποία φαίνονται στο Σχήμα 1.6 ορίζονται ως εξής

$H_c$  το ύψος του δωματίου

$H_v$  το ύψος του ανοίγματος

$\delta$  το ύψος από το δάπεδο μέχρι το κατώφλι του ανοίγματος

$H_n$  το ύψος από το δάπεδο μέχρι το ανώτερο επίπεδο του ανοίγματος

$Z_n$  το ύψος του ουδέτερου επιπέδου (neutral plane)

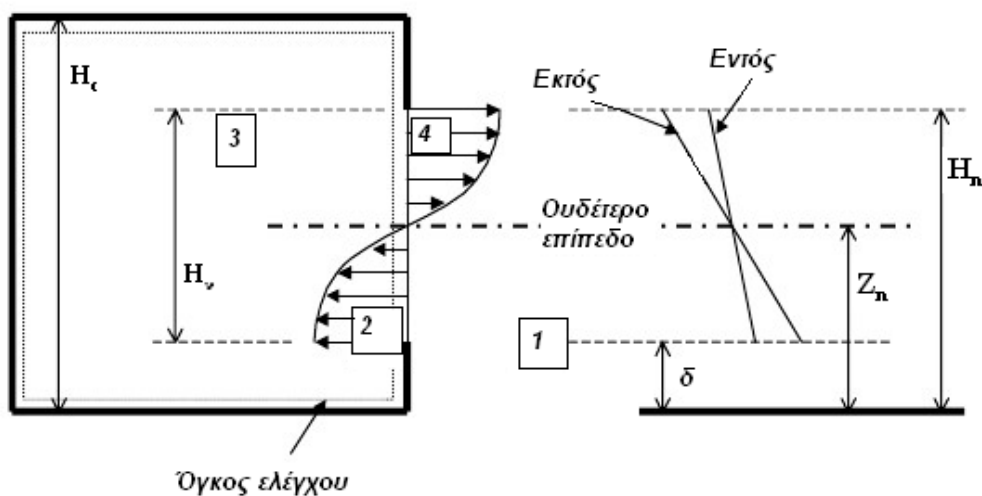
Το σημείο 1 θεωρείται σε απόσταση πολύ μακριά από το άνοιγμα, το σημείο 2 στο εσωτερικό του δωματίου πολύ κοντά στο άνοιγμα, ενώ και τα δύο σημεία 1, 2 θεωρούνται στο ίδιο ύψος από το δάπεδο. Ανάλογα την πυκνότητα του αέρα σε κάθε σημείο, η πίεση σε αυτά, από τις εξισώσεις (1.34) και (1.35) είναι

$$P_1 = P_o + \rho_o g y \quad (1.34)$$

$$P_2 = P_o + \rho_g g y \quad (1.35)$$

$g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $=9.81 \text{ m/s}^2$ )

$y$  η υψομετρική απόσταση σε σχέση με το ουδέτερο επίπεδο (m)



**Σχήμα 1.6** Σχηματική αναπαράσταση των ροών σε δωμάτιο με ένα άνοιγμα, όπου η θερμοκρασία θεωρείται ομοιόμορφη.

Εφαρμόζοντας την εξίσωση Bernoulli (1.36) –αρχή διατήρησης ορμής- σύμφωνα με την οποία

$$\frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz = \text{σταθερά} \quad (1.36)$$

υπολογίζεται η εξίσωση της ορμής για τα σημεία 1, 2 με βάση την εξίσωση (1.37) ως

$$\frac{P_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2} \quad (1.37)$$

Υποθέτοντας ότι ο εξωτερικός αέρας είναι σε κατάσταση ηρεμίας έχουμε

$\mathbf{v}_1 = \mathbf{0}$  και επίσης  $\rho_1 = \rho_2 = \rho_o$  (πυκνότητες ίσες με αυτή εξωτερικών συνθηκών), οπότε από την εξίσωση (1.37) εξάγεται η εξίσωση (1.38)

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho_o} = \frac{v_2^2}{2} \quad (1.38)$$

Αντικαθιστώντας τις προηγούμενες σχέσεις, τελικά προκύπτει η εξίσωση (1.39)

$$v_2 = v_{in} = \sqrt{\frac{2\Delta P_{12}}{\rho_o}} = \sqrt{2gy \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_o}\right)} \quad (1.39)$$

Για την εκροή αέρα, οι πιέσεις στα σημεία 3, 4, κατά τον ίδιο τρόπο δίνονται στις εξισώσεις (1.40) και (1.41) ως εξής

$$P_3 = P_o - \rho_g gy \quad (1.40)$$

$$P_4 = P_o - \rho_o gy \quad (1.41)$$

Το σημείο 3 βρίσκεται εντός του δωματίου σε μεγάλη απόσταση από το άνοιγμα, το σημείο 4 είναι εκτός δωματίου, πολύ κοντά στο άνοιγμα, ενώ και τα δύο σημεία θεωρούνται στο ίδιο ύψος.

Με εφαρμογή της εξίσωσης Bernoulli μεταξύ των δύο σημείων και θεωρώντας  $\mathbf{v}_3 \approx \mathbf{0}$ , εξάγεται η εξίσωση (1.42)

$$\frac{P_3 - P_4}{\rho_g} = \frac{v_4^2}{2} \quad (1.42)$$

Με βάση τις εξισώσεις (1.40) και (1.41), προκύπτει τελικά η εξίσωση (1.43)

$$v_4 = v_{out} = \sqrt{\frac{2\Delta P_{34}}{\rho_g}} = \sqrt{2gy \left(\frac{\rho_o}{\rho_g} - 1\right)} \quad (1.43)$$

Σύμφωνα με τις εξισώσεις (1.39) και (1.43) φαίνεται πως οι ταχύτητες εισροής και εκροής του αέρα μεταβάλλονται με βάση το ύψος από το ουδέτερο επίπεδο. Με ενσωμάτωση των κατανομών ταχύτητας καθ' ύψος από το ουδέτερο επίπεδο προς το περβάζι και το άνω ύψος του ανοίγματος, για τους ρυθμούς εισόδου και εξόδου της μάζας (mass inflow-outflow rates) ισχύει

Ο ρυθμός ροής εισερχόμενης μάζας δίνεται από την εξίσωση (1.44)

$$\begin{aligned}
\dot{m}_{in} &= C_d \rho_o W_v \int_0^{Z_n - \delta} v_{in} dy = \\
&= C_d \rho_o W_v \int_0^{Z_n - \delta} \sqrt{2gy \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_o}\right)} \cdot dy = \\
&= \frac{2}{3} C_d \rho_o W_v \sqrt{2g \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_o}\right)} (Z_n - \delta)^{3/2}
\end{aligned} \tag{1.44}$$

Ο ρυθμός ροής εξερχόμενης μάζας, αντίστοιχα από την εξίσωση (1.45)

$$\begin{aligned}
\dot{m}_{out} &= C_d \rho_g W_v \int_0^{H_n - Z_n} v_{out} dy = \\
&= C_d \rho_g W_v \int_0^{H_n - Z_n} \sqrt{2gy \left(\frac{\rho_o}{\rho_g} - 1\right)} \cdot dy \\
&= \frac{2}{3} C_d \rho_g W_v \sqrt{2gy \left(\frac{\rho_o}{\rho_g} - 1\right)} (H_n - Z_n)^{3/2}
\end{aligned} \tag{1.45}$$

Όπου  $W_v$  το πλάτος του ανοίγματος (m)  
 $C_d$  συντελεστής παροχής (<1)

Όσον αφορά το συντελεστή παροχής  $C_d$ , ο υπολογισμός του είναι πειραματικός και έχει απασχολήσει πολλούς ερευνητές [Prah1 και Emmons, 1975], [Steckler, 1984], [Cooper, 2002]. Σύμφωνα με τους Prah1 και Emmons [Prah1 και Emmons, 1975], ο συντελεστής βρέθηκε να είναι 0.68 και στις δύο περιπτώσεις –εισερχόμενης και εξερχόμενης μάζας αέρα-, ενώ σύμφωνα με το Steckler [Steckler, 1984] βρέθηκε 0.68 για τον εισερχόμενο αέρα και 0.73 για τον εξερχόμενο. Τέλος, ο Cooper [Cooper, 2002] υπέδειξε την τιμή 0.61 και στις δύο περιπτώσεις. Πάνω στη βάση αυτή, η τιμή του συντελεστή θεωρείται 0.68, όντας η καλύτερη προσέγγιση σε κάθε περίπτωση πυρκαγιάς [Prah1 και Emmons, 1975].

Αντί της εξίσωσης (1.44), ο ρυθμός με τον οποίο η μάζα αέρα εισέρχεται στο δωμάτιο μέσω του ανοίγματος, προτάθηκε [Rockett, 1976] να δίνεται από την απλουστευμένη σχέση (1.46)

$$\dot{m}_{in} \approx 0.52 A_v \sqrt{H_v} \tag{1.46}$$

#### 1.4 Αδιάστατες Ομάδες – Δημιουργία Κλίμακας

Η δυσκολία επίλυσης των εξισώσεων της δυναμικής των ρευστών, ακόμα και από ηλεκτρονικούς υπολογιστές, δημιούργησε την ανάγκη για μελέτη των εξισώσεων ρευστοδυναμικής μέσω πειραμάτων –συνήθως- μικρότερης κλίμακας. Για την αντιπροσώπευση πραγματικών καταστάσεων μέσω τέτοιων πειραμάτων υπό κλίμακα είναι απαραίτητη η δημιουργία κανόνων μέσω των οποίων θα διερευνάται η ροή πάνω σε πολύπλοκα γεωμετρικά σχήματα, ενώ παράλληλα θα διατηρείται σταθερός ο αριθμός Reynolds (Re). Στη μηχανική ρευστών ο αριθμός αυτός είναι μια αδιάστατη ποσότητα η οποία δίνει την αναλογία των αδρανειακών δυνάμεων προς τις δυνάμεις ιξώδους. Είναι ένας τρόπος για την ποσοτικοποίηση των δύο αυτών ειδών δυνάμεων για δεδομένες συνθήκες ροής και ορίζεται από τη σχέση (1.47)



$$Re = \frac{\rho v l}{\mu} \quad (1.47)$$

- Όπου  $\rho$  η πυκνότητα του ρευστού ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $v$  η ταχύτητα του ρευστού ( $\text{m/s}$ )  
 $\mu$  το δυναμικό ιξώδες του ρευστού ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$  ή  $\text{N}\cdot\text{s/m}^2$  ή  $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ )  
 $l$  η κλίμακα μήκους ( $\text{m}$ )

Γενικά, ο αριθμός Reynolds επαρκεί για την ομοιότητα και προσομοίωση ενός μοντέλου με το πρωτότυπο του, όμως σε διάφορες περιπτώσεις –στις οποίες συγκαταλέγεται η περίπτωση φωτιάς- χρειάζονται και άλλες προϋποθέσεις για την προσομοίωση. Αυτό βέβαια δεν αναιρεί το γεγονός πως η χρησιμοποίηση διαφόρων μοντέλων υπό κλίμακα μπορεί να οδηγήσει σε ορθά συμπεράσματα των φαινόμενων φωτιάς για διαφορετικής κλίμακας μοντέλα. Για τη σωστή δημιουργία κλίμακας απαιτείται η αναγνώριση και εισαγωγή των κυρίαρχων μεταβλητών ενός προβλήματος.

Στο σημείο αυτό είναι απαραίτητη η εισαγωγή του αριθμού Froude ( $Fr$ ) ο οποίος είναι μια αδιάστατη ποσότητα η οποία δίνει την αναλογία της χαρακτηριστικής ταχύτητας προς τη βαρυτική ταχύτητα κύματος. Η μοντελοποίηση με βάση τον αριθμό αυτό αποτελεί μια αποτελεσματική μέθοδο για τη μοντελοποίηση ροής καπνού και φαινόμενων φωτιάς. Ο αριθμός Froude ( $Fr$ ) ορίζεται από τη σχέση (1.48) ως εξής

$$Fr = \frac{u^2}{gl} \quad (1.48)$$

Όπου  $u$  η ταχύτητα ( $\text{m/s}$ ).

Στη συνέχεια περιγράφεται η μεθοδολογία για τη μοντελοποίηση φαινόμενων φωτιάς όπως αναλύεται από τον J. Quintiere [Quintiere, 2006], στην οποία οι ιδιότητες και άλλες σταθερές που σχηματίζουν τις αδιάστατες ρυθμίσεις γράφονται ως  $\Pi$ . Με τις αδιάστατες ομάδες (μεταβλητές) μπορούν να δημιουργηθούν προσεγγιστικές σχέσεις, με τη χρησιμοποίηση νόμων και ισολογισμών ενέργειας σύμφωνα με τη θεωρία, με τις οποίες να γίνεται ευκολότερα η μοντελοποίηση της φωτιάς και των φαινόμενων που τη διέπουν. Η διαδικασία της μοντελοποίησης χρησιμοποιείται σε πολλές περιπτώσεις –π.χ συστήματα πυρασφάλειας-, παρόλο που η ομοιότητα δεν είναι πάντα αντιπροσωπευτική, καθώς είναι αδύνατο να διατηρηθούν όλες οι σχέσεις των  $\Pi$ .

### 1.4.1 Δημιουργία Αδιάστατων Ομάδων

Για τη δημιουργία των αδιάστατων ομάδων-μεταβλητών χρησιμοποιούνται συνήθως τρεις μέθοδοι.

- Η θεωρία των  $\Pi$  (Buckingham Pi method).
- Η μέθοδος των μερικών διαφορικών εξισώσεων (partial differential equation method).
- Η διαστατική ανάλυση (dimensional analysis).

Σύμφωνα με την πρώτη μέθοδο, γίνεται επιλογή συνόλου σχετικών μεταβλητών και παραμέτρων οι οποίες σχετίζονται με τη ζητούμενη εφαρμογή μοντελοποίησης. Στη συνέχεια προσδιορίζεται ο αριθμός των ανεξάρτητων μεταβλητών και τελικά ο αριθμός των αδιάστατων ομάδων ισούται με τον αριθμό των μεταβλητών μείον τον αριθμό των διαστάσεων.

Κατά τη δεύτερη μέθοδο, γίνεται ο εντοπισμός της βασικής μερικής διαφορικής εξίσωσης και οι μεταβλητές του προβλήματος μετατρέπονται σε αδιάστατες με κατάλληλες παραμέτρους αδιαστατοποίησης.

Στην τρίτη μέθοδο αναγνωρίζεται και ορίζεται στην απλούστερη, αλλά πλήρη μορφή της, η φυσική του προβλήματος. Στη συνέχεια προσδιορίζονται από ταυτότητες οι αδιάστατες μεταβλητές και οι σχέσεις που τις διέπουν.

Μελέτη των μεθόδων αυτών μπορεί να βρεθεί στη βιβλιογραφία [Quintiere, 2006], [Warnatz et. al, 2006] ενώ στη συνέχεια οι αδιάστατες ομάδες στην περίπτωση φωτιάς προσεγγίζονται με βάση την τρίτη μέθοδο.

## 1.4.2 Αδιάστατες Ομάδες από Εξισώσεις Διατήρησης

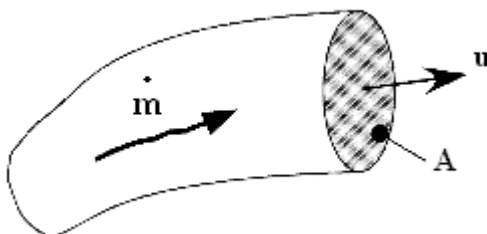
Η δημιουργία αδιάστατων ομάδων για την περίπτωση φωτιάς και των φαινομένων που τη χαρακτηρίζουν θα γίνει με χρησιμοποίηση των εξισώσεων διατήρησης, με χρήση κοινών συμβόλων. Η πυκνότητα θα θεωρηθεί σταθερή ( $\rho_\infty$ ), ενώ θα εξεταστεί μόνο η εξίσωση ορμής κατά την κάθετη συνιστώσα. Η ομαλοποίηση των παραμέτρων θα γράφεται ως  $()^*$ , ενώ με τη δημιουργία των αδιάστατων ομάδων θα διατηρηθούν οι αδιάστατες μεταβλητές. Ο τρόπος προσδιορισμού διαφόρων  $\Pi$  έχει αναλυθεί από ερευνητές στην αντίστοιχη βιβλιογραφία [Quintiere, 2006], ενώ στην εργασία αυτή γίνεται κυρίως, αναφορά στους τελικούς τύπους που περιγράφουν τις αδιάστατες ομάδες.

### 1.4.2.1 Διατήρηση Μάζας

Ο ρυθμός ροής μάζας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.7 δίνεται από τη σχέση (1.49)

$$\dot{m} = \rho u A \quad (1.49)$$

Έτσι, η επιφάνεια  $A$ , θα προσδιορίζεται με βάση τη μονάδα κλίμακας  $l$ , ως  $A \sim l^2$  και ο όγκος ως  $A \sim l^3$  ομοίως.



Σχήμα 1.7 Ρυθμός ροής μάζας.

### 1.4.2.2 Διατήρηση Ορμής

Η διατήρηση της ορμής ή αλλιώς, ο 2<sup>ος</sup> νόμος του Νεύτωνα, εφαρμόζεται σε ένα σωματίδιο ή σε ένα σύστημα σωματιδίων, όπου η ταχύτητα πρέπει να ορίζεται πάντα σε σχέση με ένα σταθερό επίπεδο αναφοράς.

$$F = \frac{d(mu)}{dt} \quad (1.50)$$

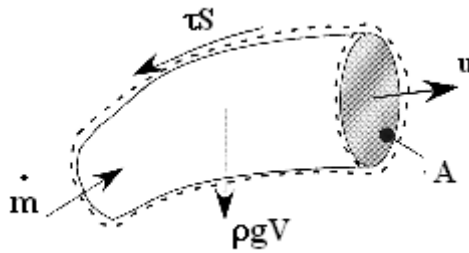
Ο 2<sup>ος</sup> νόμος του Νεύτωνα, με βάση έναν ορισμένο όγκο ελέγχου (CV) και ορίζοντας ως  $u_x$  την κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας κατά τον άξονα  $x$ , είναι

(Άθροισμα των δυνάμεων που ασκούνται στο ρευστό σε όλο τον όγκο ελέγχου κατά τον άξονα x) = (Ρυθμός μεταβολής ορμής του ρευστού στον όγκο ελέγχου κατά τον άξονα x) + (Ποσοστό ορμής του ρευστού που ρέει εκτός όγκου ελέγχου κατά τον άξονα x)

Η σχέση (1.51) που περιγράφει το νόμο αυτό δίνει,

$$\sum F_x = \frac{d}{dt} \iiint_{CV} \rho u_x dV + \iint_{CS} \rho u_x n(u-w) dS \quad (1.51)$$

Στο Σχήμα 1.8 φαίνεται ο όγκος ελέγχου με τις δυνάμεις του βάρους  $\rho g V$  και διατμητικές δυνάμεις  $\tau S$  που ασκούνται.



Σχήμα 1.8 Διατήρηση ορμής

Με την εισαγωγή των δυνάμεων αυτών, όπως επίσης της πίεσης, η σχέση για τη διατήρηση της ορμής κατά τον κάθετο άξονα δίνεται από την εξίσωση (1.52)

$$\rho V \frac{du}{dt} + \dot{m} u \sim (\rho_\infty - \rho) g V + p A + \tau S \quad (1.52)$$

Η σχέση μεταξύ των όρων της εξίσωσης (1.52) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αδιαστατοποίηση παραμέτρων.

Στη συνέχεια θα εξεταστεί η εξαγωγή παράγοντα κλίμακας για την ταχύτητα σε συνθήκες φυσικής συναγωγής.

Συσχετίζοντας τη ροή της ορμής με την άνωση εξάγεται η εξίσωση (1.53)

$$\rho u^2 l^2 \sim (\rho_\infty - \rho) g l^3 \quad (1.53)$$

Η ταχύτητα, βάσει της εξίσωσης (1.54) είναι

$$u \sim \sqrt{\left(\frac{\rho_\infty - \rho}{\rho}\right) g l} \quad (1.54)$$

Από το νόμο των τέλειων αερίων υπό σταθερή πίεση προκύπτει η εξίσωση (1.55) ως

$$\frac{\rho_\infty - \rho}{\rho} = \frac{T - T_\infty}{T_\infty} \quad (1.55)$$

Οπότε από τη σχέση (1.54) συνεπάγεται η εξίσωση (1.56)

$$u \sim \sqrt{\left(\frac{T - T_\infty}{T_\infty}\right) g l} \sim \sqrt{g l} \quad (1.56)$$

Η εξίσωση (1.56) δίνει μια παράμετρο αδιαστατοποίησης για την ταχύτητα η οποία φαίνεται στην εξίσωση (1.57) και είναι

$$u^* \sim \sqrt{gl} \quad (1.57)$$

Η τάση ( $\tau$ ) και η πίεση μπορούν να αδιαστατοποιηθούν όπως δείχνει η εξίσωση (1.58)

$$\tau^* \sim p^* \sim \rho_\infty gl \quad (1.58)$$

Με βάση το νόμο του Νεύτωνα για τα ιξώδη η εξίσωση (1.59) είναι

$$\tau^* \sim \mu \frac{\partial u}{\partial x} \sim \mu \frac{u^*}{l} \quad (1.59)$$

Οπότε για την αδιαστατοποίηση, από τις σχέσεις (1.53), (1.59) συνεπάγεται η εξίσωση (1.60)

$$\rho_\infty u^{*2} l^2 \sim \mu \frac{u^*}{l} l^2 \quad (1.60)$$

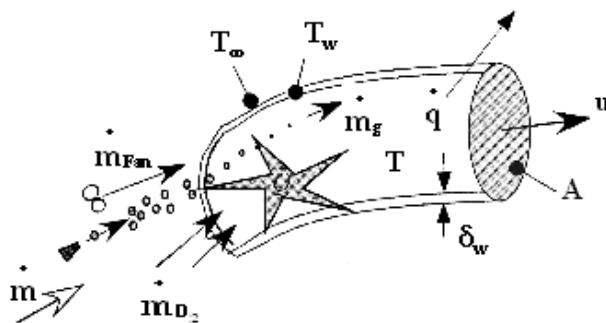
Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (1.47), καθώς και την εξίσωση (1.60) εξάγεται η πρώτη αδιάστατη ομάδα ( $\Pi_1$ ) η οποία αφορά τον αριθμό Reynolds, και δίνεται από την εξίσωση (1.61) ως εξής

$$Re = \Pi_1 = \frac{\rho_\infty u^* l}{\mu} \quad (1.61)$$

Η εξίσωση (1.61) αποτελεί αδιάστατη ομάδα ( $\Pi$ ) η οποία προσομοιώνει το λόγο της ορμής προς τη διατμητική δύναμη.

### 1.4.2.3 Εξίσωση Ενέργειας

Για την εξαγωγή περισσότερων αδιάστατων ομάδων,  $\Pi$ , χρησιμοποιείται η εξίσωση ενέργειας στην οποία λαμβάνουν μέρος διαδικασίες όπως η καύση, η μεταφορά θερμότητας κ.α. όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.9.



Σχήμα 1.9 Μεταφορά ενέργειας

Η δεύτερη αδιάστατη ομάδα ( $\Pi_2$ ) εξάγεται από την εξίσωση ενέργειας σε συγκεκριμένο

όγκο ελέγχου και συνδιάζει τη δύναμη της φωτιάς ( $\dot{Q}_{fire}$ ) με την ενθαλπία.

Η εξίσωση ενέργειας του σχήματος 1.9 με βάση συγκεκριμένο όγκο ελέγχου δίνεται από την εξίσωση (1.62)

$$\rho c_p V \frac{dT}{dt} + \dot{m} c_p (T - T_\infty) \sim \dot{Q} - \dot{q} \quad (1.62)$$

Ο τύπος για το  $\Pi_2$  δίνεται από την εξίσωση (1.63)

$$\Pi_2 = \frac{\dot{Q}_{\text{fire}}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}} \quad (1.63)$$

#### 1.4.2.4 Απώλειες Θερμότητας

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τις απώλειες θερμότητας αποτελούν βασικές εξισώσεις για τη δημιουργία περισσοτέρων  $\Pi$ .

Η εξίσωση για την ικανότητα εκπομπής αερίων ( $\epsilon = \epsilon_g$ ) που υπεισέρχεται στην εξίσωση απωλειών μέσω ακτινοβολίας (εξίσωση (1.24)) δίνεται από την εξίσωση (1.64)

$$\epsilon_g \sim 1 - \exp(-\kappa l) \quad (1.64)$$

Όπου  $\kappa$  συντελεστής απορρόφησης, [Utiskul,2007].

Η αδιάστατη ομάδα για την ακτινοβολία αερίων ορίζεται από το  $\Pi_3$  μέσω της εξίσωσης (1.65) ως εξής

$$\Pi_3 = \kappa l \quad (1.65)$$

Η εξίσωση  $\Pi_4$ , που συνδέει το ρυθμό απώλειας θερμότητας λόγω ακτινοβολίας μέσω μιας επιφάνειας  $A$  που περικλείεται από τον όγκο ελέγχου ( $\dot{q}_o$ ) προς τη δύναμη της φωτιάς δίνεται από την εξίσωση (1.66).

$$\Pi_4 = \frac{\dot{q}_o}{\dot{Q}_{\text{fire}}} \quad (1.66)$$

Πολύ σημαντικές επίσης είναι οι ομάδες που αφορούν στις απώλειες λόγω αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας. Από τις εξισώσεις που αφορούν τις απώλειες αυτές [Quintiere, 2006] εξάγονται οι ομάδες  $\Pi_5$ ,  $\Pi_6$ ,  $\Pi_7$  όπως φαίνονται στις εξισώσεις (1.67)-(1.69) συνδέοντας αντίστοιχα τις απώλειες αυτές με την ενθαλπία ως εξής

$$\Pi_5 = \frac{(k \rho c_p)_w^{1/2}}{\rho_\infty c_p g^{1/4} l^{3/4}} \quad (\text{αγωγή/ενθαλπία}) \quad (1.67)$$

$$\Pi_6 = \frac{h_c}{\rho_\infty c_p \sqrt{g l}} \quad (\text{συναγωγή/ενθαλπία}) \quad (1.68)$$

$$\Pi_7 = \frac{\sigma T_\infty^3}{\rho_\infty c_p \sqrt{g l}} \quad \{\text{ακτινοβολία/ενθαλπίας}\} \quad (1.69)$$

Όπου  $h_c$  ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας.

Για την αγωγή μέσω πεπερασμένου τοίχου πάχους  $\delta_w$ , εξάγεται η εξίσωση (1.70) για το  $\Pi_8$  η οποία δίνει το λόγο του πάχους προς το θερμικό μήκος (thickness/thermal length) και είναι

$$\Pi_8 = \left( \frac{\rho c_p}{k} \right)_w^{1/2} \left( \frac{g}{l} \right)^{1/4} \delta_w \quad (1.70)$$

Η αναφορά στις πρώτες αυτές ομάδες των  $\Pi$  ( $i=1..8$ ) έγινε διότι αποτελούν τις ομάδες εκείνες οι οποίες είναι απαραίτητες για τη δημιουργία κλίμακας σε μοντέλο στο οποίο μελετάται η μεταφορά θερμότητας. Ειδικότερα, οι σχέσεις για τα  $\Pi_3$ ,  $\Pi_5$ ,  $\Pi_6$ ,  $\Pi_7$ ,  $\Pi_8$  στις περιπτώσεις αυτές πρέπει να διατηρούνται, ώστε η μοντελοποίηση να γίνεται πάνω σε ορθούς κανόνες ομοιότητας. Φυσικά υπάρχουν και άλλες σχέσεις που να βοηθούν στη μοντελοποίηση περιπτώσεων φωτιάς, όμως δε γίνεται αναφορά όλων τους, καθώς δεν αποτελούν ιδιαίτερης σημασίας στις περιπτώσεις των πειραμάτων που διεξήχθησαν κατά τη διάρκεια της εργασίας αυτής και για το λόγο αυτό η αναφορά τους παραλείπεται. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως στις περισσότερες περιπτώσεις, είναι αδύνατο να διατηρηθούν αρκετές από τις ομάδες αυτές αφού είτε όπως αναφέρθηκε αποτελούν μικρής σημασίας, είτε πολλές φορές αγνοούνται σε περίπτωση που κάποιος άλλος όρος παίζει κυρίαρχο ρόλο στην αντίστοιχη σχέση.

$\Pi_i$	Σχέση	Σχόλια
$\Pi_1$	$\frac{\rho_\infty u^* l}{\mu}$	Αφορά τον αριθμό Reynolds-Συνήθως δε χρησιμοποιείται
$\Pi_2$	$\frac{\dot{Q}_{fire}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}}$	Σημαντική σχέση για την καύση.
$\Pi_3$	$kl$	Σημαντική για την ακτινοβολία αερίων
$\Pi_4$	$\frac{\dot{q}_o}{\dot{Q}_{fire}}$	Συνήθως χρησιμοποιείται σε περίπτωση ελεύθερης καύσης (σε εξωτερικό χώρο)
$\Pi_5$	$\frac{(k\rho c_p)_w^{1/2}}{\rho_\infty c_p g^{1/4} l^{3/4}}$	Μεταφορά θερμότητας με αγωγή
$\Pi_6$	$\frac{h_c}{\rho_\infty c_p \sqrt{gl}}$	Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή
$\Pi_7$	$\frac{\sigma T_\infty^3}{\rho_\infty c_p \sqrt{gl}}$	Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία
$\Pi_8$	$\left( \frac{\rho c_p}{k} \right)_w^{1/2} \left( \frac{g}{l} \right)^{1/4} \delta_w$	Μεταφορά θερμότητας μέσω τοιχωμάτων πάχους $\delta_w$
$\Pi_9$	$\frac{\dot{m}_{Fan}}{\rho_\infty l^{5/2} \sqrt{g}}$	Ροή σε συνθήκες εξαναγκασμένου αερισμού- π.χ με ανεμιστήρα (fan)
$\Pi_{10}$	$\frac{\dot{m}_f}{\rho_\infty l^{5/2} \sqrt{g}}$	Ροή μάζας καυσίμου
$\Pi_{11}$	$c_p (T_v - T_\infty) / L_g$	Όρος για το ρυθμό καύσης ( $T_v$ η θερμοκρασία επιφάνειας)

**Πίνακας 1.2** Περιγραφή σημαντικότερων σχέσεων για τις αδιάστατες ομάδες των  $\Pi$  [Quintiere, 2006].

Στον Πίνακα 1.2 δίνονται περιληπτικά οι σχέσεις για τις σημαντικότερες ομάδες  $\Pi_i$  που αφορούν περιπτώσεις φωτιάς σε εσωτερικό ή εξωτερικό χώρο, καθώς και κάποια σχόλια για κάθε περίπτωση.

#### 1.4.2.5 Ρυθμός Έκλυσης Θερμότητας – Θερμοκρασίες

Οι σχέσεις για τη δημιουργία μοντέλων κλίμακας σε περιπτώσεις φωτιάς όπως αναφέρθηκαν στο εδάφιο 1.4.2.4 και φαίνονται στον Πίνακα 1.2 αποτελούν το σημαντικότερο εργαλείο για τη διεξαγωγή πειραμάτων μικρότερης κλίμακας από το πρωτότυπο. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στα πλαίσια της εργασίας, ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα μεγέθη για τη διερεύνηση μιας πυρκαγιάς, καθώς μετράται ουσιαστικά η δύναμη της φωτιάς. Για τη μοντελοποίηση τέτοιων περιπτώσεων είναι απαραίτητη η συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού έκλυσης θερμότητας στην περίπτωση του μοντέλου με αυτή του πρωτοτύπου.

Από τις σχέσεις των  $\Pi$ , παρατηρείται πως για την απεικόνιση της σχέσης μεταξύ του ρυθμού έκλυσης θερμότητας του μοντέλου και του πρωτοτύπου, είναι απαραίτητο να διατηρηθεί η σχέση του  $\Pi_2$ .

Στην περίπτωση της μοντελοποίησης με βάση τη γεωμετρική κλίμακα, όπου το  $l$  είναι μια φυσική διάσταση του συστήματος, με διατήρηση της σχέσης  $\Pi_2$  δίνεται η εξίσωση (1.71) που συσχετίζει το PEΘ μεταξύ μοντέλου-πρωτοτύπου

$$\dot{Q}_m = \dot{Q}_p \left( \frac{l_m}{l_p} \right)^{5/2} \quad (1.71)$$

ή διαφορετικά, η εξίσωση (1.72)

$$\dot{Q} \sim l^{5/2} \quad (1.72)$$

Όπου  $\dot{Q}_m$  ο PEΘ του μοντέλου

$\dot{Q}_p$  ο PEΘ του πρωτοτύπου

$l_m$  φυσική διάσταση του μοντέλου

$l_p$  φυσική διάσταση του πρωτοτύπου

Στις περιπτώσεις όπου μοντελοποιείται η περίπτωση πυρκαγιάς σε κλειστό χώρο είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της θερμοκρασίας, η οποία αποτελεί βασικό εργαλείο για τη μελέτη των χαρακτηριστικών μιας πυρκαγιάς. Βασική επιδίωξη είναι η διατήρηση της θερμοκρασίας σε όμοια σημεία κατά την ανάλυση σε γεωμετρικά όμοια συστήματα. Με τον όρο όμοια σημεία αναφέρονται τα σημεία που η αναλογία του χώρου και του χρόνου (ως αδιάστατες μεταβλητές) μένει ίδια. Δηλαδή, στο μοντέλο και στο πρωτότυπο οι διαστάσεις

ενός όμοιου σημείου ( $\hat{x}$ ,  $\hat{y}$ ,  $\hat{z}$ ) ακολουθούν την αναλογία της κλίμακας που έχει επιλεγεί, ενώ για το χρόνο ομοίως ισχύει η εξίσωση (1.73)

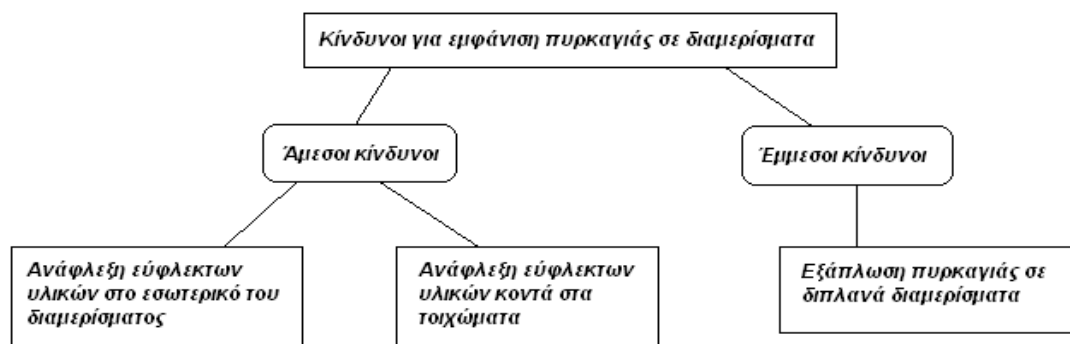
$$\hat{t} = t\sqrt{g/l} \quad (1.73)$$

Από την εξίσωση ενέργειας (1.62), αν όλες οι απώλειες θερμότητας θεωρηθούν  $l^{5/2}$ , τότε για τη θερμοκρασία είναι  $T \sim l^0$ . Αυτό υποδεικνύει πως η θερμοκρασία είναι ανεξάρτητη από τις φυσικές διαστάσεις της κλίμακας και δεν επηρεάζεται από αυτή.

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>

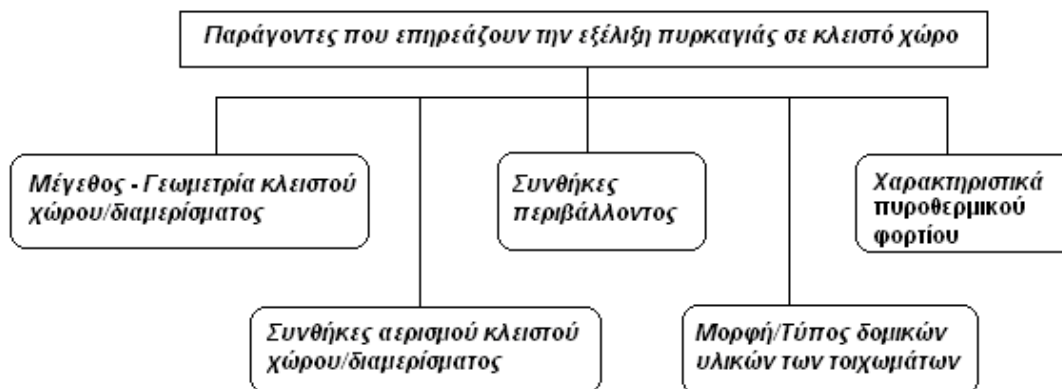
### Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Η ραγδαία εξέλιξη στον κατασκευαστικό τομέα τα τελευταία χρόνια, έδωσε τη δυνατότητα για τη σχεδίαση και κατασκευή όλο και μεγαλύτερων κτιρίων και εγκαταστάσεων που χρησιμοποιούνται ως κατοικίες (π.χ πολυκατοικίες, ουρανοξύστες κ.α), βιομηχανίες, εργοστάσια, νοσοκομεία κ.α. Η δημιουργία τέτοιων κατασκευών επέφερε την ανάγκη μελέτης των διαφόρων κινδύνων που μπορούν να δημιουργηθούν λόγω φυσικών αιτιών και μη, όπως σεισμοί, πυρκαγιές κ.α, οι οποίοι μπορεί να αποβούν μοιραίοι για τους ανθρώπους που ζουν και δραστηριοποιούνται σε αυτές τις κατασκευές. Άμεσος κίνδυνος στον οποίο υπάρχει πιθανότητα έκθεσης σε περιπτώσεις διαμερισμάτων αποτελεί η εμφάνιση πυρκαγιάς, η οποία μπορεί να δημιουργηθεί είτε από ανάφλεξη εύφλεκτων υλικών μέσα στα διαμερίσματα, είτε από ανάφλεξη εκτιθέμενων εύφλεκτων επιφανειών στην πρόσοψη αυτών. Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι επίσης πολύ σημαντικό να αναφερθεί ο έμμεσος κίνδυνος για εξάπλωση της πυρκαγιάς σε διπλανά διαμερίσματα. (Σχήμα 2.1)



Σχήμα 2.1 Εμφάνιση πυρκαγιάς σε περίπτωση διαμερίσματος: άμεσοι και έμμεσοι κίνδυνοι

Για την αντιμετώπιση τέτοιων κινδύνων και τη λήψη απαραίτητων μέτρων πυροπροστασίας, είναι απαραίτητη η μελέτη όλων εκείνων των παραγόντων που επηρεάζουν την εξέλιξη μιας πυρκαγιάς σε κλειστό χώρο, όπως είναι οι συνθήκες περιβάλλοντος, τα χαρακτηριστικά του πυροφορτίου, η γεωμετρία του διαμερίσματος, ο τύπος δομικών υλικών των τοιχωμάτων και οι συνθήκες αερισμού του διαμερίσματος, όπως φαίνονται και στο Σχήμα 2.2. Ένας τρόπος για την επίτευξη του σκοπού αυτού είναι μέσω διενέργειας και μελέτης πειραμάτων φωτιάς σε διαμερίσματα υπό κλίμακα.



Σχήμα 2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την εξέλιξη μιας πυρκαγιάς σε διαμέρισμα.

Τέτοια πειράματα, που έχουν ως σκοπό την κατανόηση των χαρακτηριστικών της φωτιάς και των παραγόντων που επηρεάζουν στην εξέλιξή της, λαμβάνουν χώρα τα τελευταία χρόνια σε



πολλά ερευνητικά και εκπαιδευτικά ιδρύματα σε πολλές χώρες [Quintiere, et al., 1979], [Yii, 2002], [Makhviladze et al., 2006] κ.α. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται μια ανασκόπηση σε πειράματα που αφορούν πυρκαγιές σε κλειστούς χώρους τα οποία συνέβαλαν στην εξέλιξη της γνώσης για τα φαινόμενα που διέπουν μια φωτιά μέσα σε διαμέρισμα.

## **2.1 Πειραματικές μελέτες σε διάταξη δωματίου**

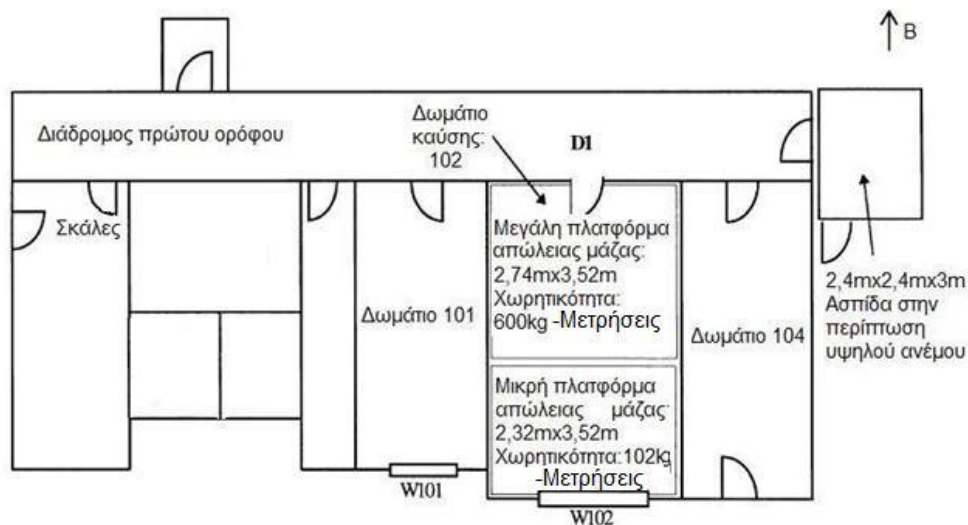
Σε πειραματικές μελέτες όπου χρησιμοποιείται διάταξη δωματίου, μεταβάλλονται κατάλληλες παράμετροι που διευκολύνουν τη μελέτη των χαρακτηριστικών της φωτιάς και των φαινομένων που τη διέπουν. βοηθούν ώστε τα συμπεράσματα να αντιστοιχούν σε πολλές πιθανές περιπτώσεις. Οι κύριες παράμετροι που επηρεάζουν την εξέλιξη μιας πυρκαγιάς είναι το είδος καυσίμου και το είδος αερισμού του δωματίου [Bundy et al., 2007], [Quintiere, et al., 1979]. Για τη διερεύνηση των παραμέτρων αυτών πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μελέτες σε δωμάτια υπό μεγάλη, μεσαία και μικρή κλίμακα. Στη συνέχεια ακολουθεί παρουσίαση πειραματικών μελετών για φωτιά σε διάταξη δωματίου.

### **2.1.1 Πειραματικές μελέτες σε διάταξη δωματίου μεγάλης κλίμακας**

Στην εργασία του Humins για το National Institute of Standards and Technology (NIST) [Humins et al., 2005] διενεργήθηκαν πειράματα σε δωμάτιο μεγάλης κλίμακας με διαστάσεις 3.60m(πλάτος) x 7.04m(μήκος) x 3.82m(ύψος) χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικά καύσιμα, το επτάνιο και ένα μίγμα με 60%επτάνιο-40%τολουόλιο κατά μάζα. Στη μελέτη αυτή δόθηκε έμφαση στη μελέτη εξαναγκασμένων συνθηκών αερισμού (Forced drought) με τη χρήση 4 ανοιγμάτων στον έναν τοίχο και 4 ανοιγμάτων στον απέναντι τοίχο. Όλος ο σκελετός ήταν φτιαγμένος από χάλυβα, με τοιχώματα από σανίδες Marinite I και γυψοσανίδες. Η μελέτη αυτή έγινε με σκοπό την προσομοίωση της φωτιάς σε μεγάλης κλίμακας διαμέρισμα, ώστε να είναι εφικτή η μελέτη της επίδρασης της φωτιάς στα κατασκευαστικά υλικά και τη θερμική τους συμπεριφορά. Η εργασία είχε ως έρεισμα την κατάρρευση του Κέντρου Εμπορίου (World Trade Center) της Ν. Υόρκης, θέλοντας να δώσει απαντήσεις σε περιπτώσεις όπου οι υψηλές θερμοκρασίες λόγω πυρκαγιάς δημιουργούν αστοχίες στα δομικά υλικά. Οι μετρήσεις που έγιναν αφορούσαν το ρυθμό έκλυσης θερμότητας, τη θερμοκρασία αερίων που πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας σειρές θερμοστοιχείων (τύπου K) τοποθετημένες σε δύο σημεία εντός του δωματίου, συγκεντρώσεις οξυγόνου, μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα. Πραγματοποιήθηκαν επίσης μετρήσεις θερμοκρασίας στα τοιχώματα του διαμερίσματος και στις επιφάνειες του χαλύβδινου σκελετού, οι οποίες σε συνδυασμό με μετρήσεις ροής θερμότητας και ταχύτητας των αερίων κοντά στα τοιχώματα επέτρεψαν την αξιολόγηση της συμπεριφοράς των υλικών κατασκευής σε υψηλές θερμοκρασίες. Στα αποτελέσματα δόθηκε έμφαση στην επίτευξη επαναληψιμότητας (repeatability) στα πειράματα που διενεργήθηκαν. Οι θερμοκρασίες των αερίων κοντά στην οροφή έφτασαν τους 700-800°C, ενώ οι θερμοκρασίες πάνω από το δοχείο καυσίμου είχαν τις μεγαλύτερες τιμές. Οι θερμοκρασίες που παρατηρήθηκαν στις επιφάνειες του χαλύβδινου σκελετού ήταν εμφανώς μικρότερες στις περιπτώσεις που υπήρχε μόνωση, δίνοντας παράλληλα τιμές στις οποίες υπάρχει αστοχία υλικών. Όσο αφορά το μονοξείδιο του άνθρακα, οι μετρήσεις έδειξαν την εξάρτησή του από την τοποθεσία, το χρόνο και τις συνθήκες που επικρατούσαν.

Το 1997 μελετήθηκε, εκτεταμένα για πρώτη φορά, η επίδραση του αερισμού, κατά τη διάρκεια της καθολικής ανάφλεξης, [S. Klorovic and O.F. Turan, 1998]. Το ύψος της κατασκευής έφτανε τα 12m, ενώ η συνολική επιφάνεια ήταν 12m x 15m αντιπροσωπεύοντας διαμερίσματα ενός οικοδομικού τετραγώνου. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν από θερμοστοιχεία τύπου K, τρεις υδρόψυκτους μετρητές ροής θερμότητας, ενώ χρησιμοποιήθηκαν τρεις κάμερες για καταγραφή των πειραμάτων. Οι περιπτώσεις αερισμού που μελετήθηκαν ήταν εξαναγκασμένης και μη εξαναγκασμένης ροής. Οι συνθήκες αυτές αντιστοιχούσαν σε ανοιχτή πόρτα (D1) και παράθυρο (W102) (περίπτωση εξαναγκασμένης ροής) στο δωμάτιο καύσης και σε κλειστή πόρτα (D1) και ανοιχτό παράθυρο (W102) (περίπτωση μη εξαναγκασμένης ροής), όπως φαίνονται στο Σχήμα 2.3. Κατά τη διάρκεια δυο

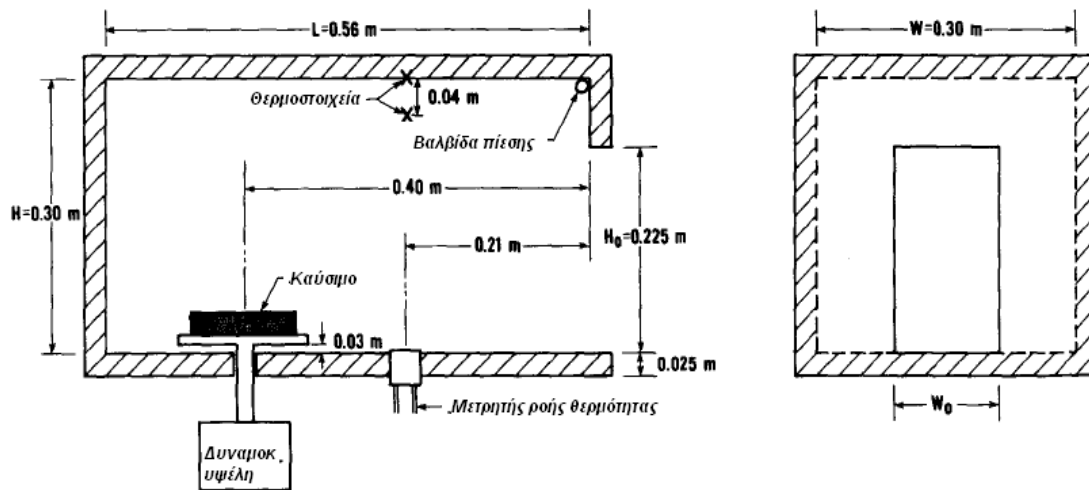
σειρών πειραμάτων μεγάλης κλίμακας προέκυψαν συμπεράσματα, σχετικά με την περίοδο ύπαρξης σταθερούς εξωτερικής φλόγας από το άνοιγμα καθώς και για την πιθανότητα έναρξης μίας δευτέρας εστίας φωτιάς, στο εξωτερικό του κτιρίου ή σε κάποιους από τους υπόλοιπους ορόφους της εγκατάστασης. Τα πειράματα επαναλήφθηκαν με διαφορετικά είδη αερισμού και πυροθερμικού φορτίου προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση τους στην εξέλιξη του φαινομένου.



**Σχήμα 2.3** Κάτοψη του δωματίου καύσης στον πρώτο όροφο του κτιρίου διεξαγωγής πειραμάτων φωτιάς για την μελέτη των Klorovic και Turan [Klorovic and O.F. Turan, 1998].

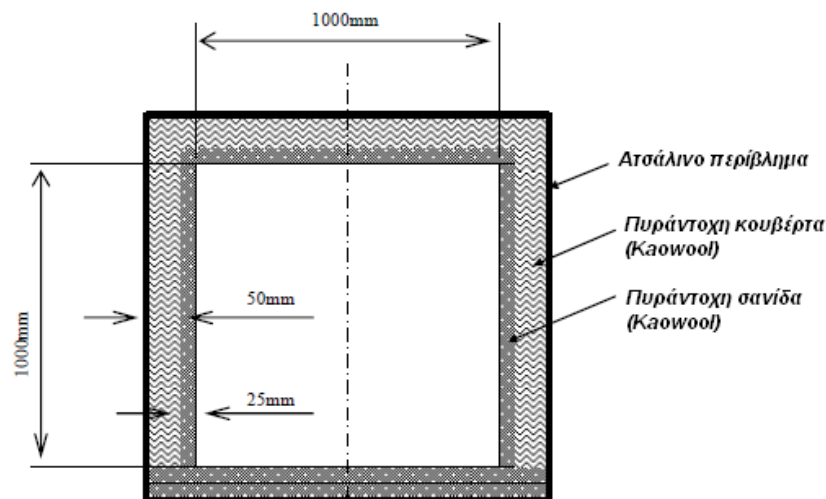
### 2.1.2 Πειραματικές μελέτες σε διάταξη δωματίου μεσαίας κλίμακας

Μια από τις πρώτες και σημαντικότερες μελέτες που αφορά φωτιές κηλίδας (pool fires) έγινε από τους Quintiere, McCaffrey και Den Braven [Quintiere, et al., 1979]. Στην εργασία αυτή μελετήθηκαν τα χαρακτηριστικά των φωτιών κηλίδας συναρτήσει δύο παραμέτρων, του πλάτους της πόρτας και της επιφάνειας του καυσίμου. Η διάταξη του δωματίου με διαστάσεις 0.30m(πλάτος) x 0.56m(μήκος) x 0.30m(ύψος) και πόρτα σταθερού ύψους και μεταβλητού πλάτους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4, αντιστοιχεί σε υπό κλίμακα αναπαράσταση ενός τυπικού διαμερίσματος. Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκε στερεό καύσιμο σε πλάκες διαφόρων επιφανειών, μελετώντας τη μάζα καυσίμου. Για τη μελέτη των φαινομένων χρησιμοποιήθηκαν θερμοστοιχεία χρωμίου, μετρητής ροής θερμότητας και δυναμοκυψέλη. Με αυτά έγιναν μετρήσεις της θερμοκρασίας αερίου κοντά στην οροφή, της μεταβολής της μάζας καυσίμου και της ροής θερμότητας στο δάπεδο του δωματίου. Στα πλαίσια της εργασίας ο ρυθμός απώλειας της μάζας καυσίμου, οι θερμοκρασίες και η θερμότητα που ακτινοβολείται εντός του δωματίου προς το δάπεδο συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες θεωρητικές τιμές. Η σύγκριση θεωρήθηκε αρκετά καλή όσο αφορά το ποιοτικό σκέλος, ενώ και ποσοτικά σε ορισμένες περιπτώσεις η σύγκριση ήταν αρκετά ενθαρρυντική.



**Σχήμα 2.4** Πειραματική διάταξη και μετρητικά συστήματα των πειραμάτων που διενεργήθηκαν από τους Quintiere, McCaffrey και Den Braven [Quintiere, et al., 1979].

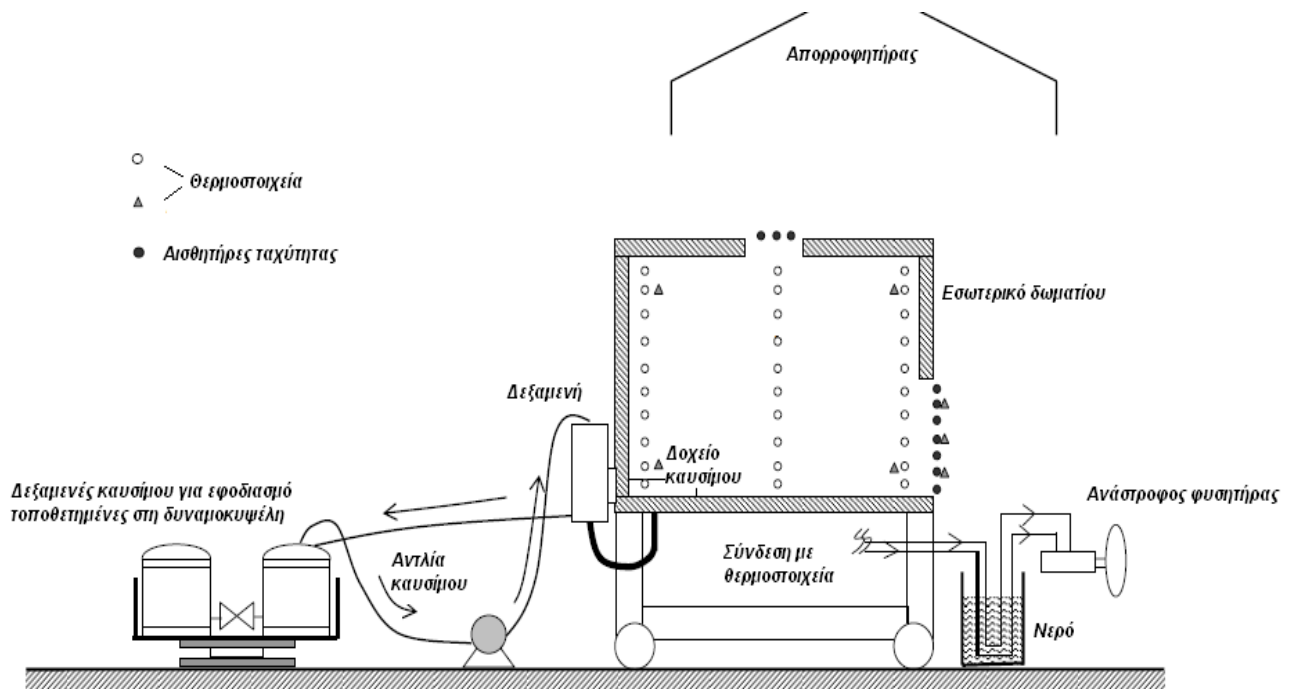
Σημαντική μελέτη [Yii, 2002] για τη μοντελοποίηση φωτιάς σε διάταξη δωματίου αποτέλεσε η εργασία του Yii το 2002 στο πανεπιστήμιο Κάντερμπερ της Ν. Ζηλανδίας. Τα πειράματα έγιναν σε δωμάτιο μειωμένης κλίμακας (Σχήμα 2.5), διαστάσεων 1m(πλάτος) x 1.5m (μήκος) x 1m (ύψος), με βασική παράμετρο μελέτης την επίδραση της μεταβολής της γεωμετρίας των ανοιγμάτων. Ως ανοίγματα χρησιμοποιήθηκαν πόρτα μεταβλητού ύψους και ένα κυκλικό άνοιγμα μεταβλητής διαμέτρου στην οροφή. Το καύσιμο που χρησιμοποιήθηκε ήταν επτάνιο και η τροφοδοσία του γινόταν μέσω δύο δεξαμενών τοποθετημένων σε δυναμοκυψέλη προκειμένου να μπορεί να μετράται η μεταβολή της μάζας της δεξαμενής.



**Σχήμα 2.5** Βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά και διάταξη υλικών τοιχωμάτων του δωματίου [Yii, 2002].

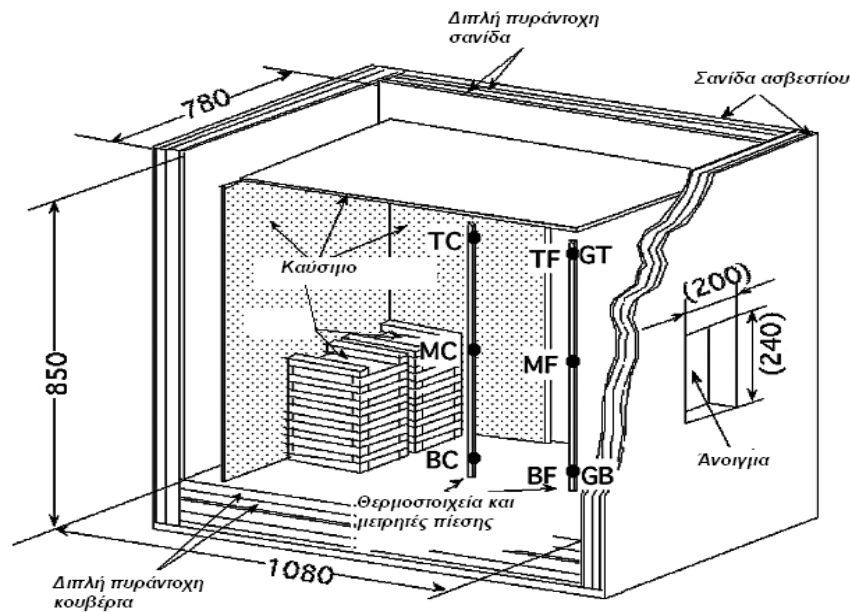
Οι θερμοκρασίες εντός του δωματίου μετρήθηκαν με θερμοστοιχεία τύπου K, ενώ μετρήθηκαν ο ρυθμός ροής του αέρα στα ανοίγματα με κατάλληλους αισθητήρες ταχύτητας (τα σημεία των μετρήσεων φαίνονται στο Σχήμα 2.6). Τα πειράματα του Yii είχαν ως σκοπό τη μελέτη της φωτιάς σε διαμερίσματα στη φάση 'μετά την καθολική ανάφλεξη' (post-flashover), αντιπαραβάλλοντας τα πειραματικά αποτελέσματα με θεωρητικούς υπολογισμούς που προέκυψαν με χρήση μοντέλου ενιαίας ζώνης (single zone model). Οι περιπτώσεις μελέτης αφορούσαν 1) ένα κάθετο άνοιγμα και 2) ένα κάθετο και ένα οριζόντιο άνοιγμα. Όσο αφορά υγρά καύσιμα, αποδείχθηκε ότι καύσιμα με χαμηλή θερμοότητα αεριοποίησης απαιτούν μικρότερη επιφάνεια καυσίμου σε σχέση με φωτιές όπου το καύσιμο είναι σωροί

ορθογωνικά διατεταγμένων ράβδων από ξύλο (wood crib fires), προκειμένου η φωτιά να χαρακτηριστεί ως ελεγχόμενη από τις συνθήκες αερισμού (ventilation controlled).



Σχήμα 2.6 Πειραματική διάταξη εργασίας Yii [Yii, 2002].

Στην πειραματική μελέτη των Hayasaka H., Kudo Y., Kojima H., Hashigami T., Ito J., Ueda T. [Hayasaka et al., 2008] μελετάται το φαινόμενο της εκτόνωσης της φωτιάς (backdraft). Το δωμάτιο που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα μεσαίας κλίμακας είχε διαστάσεις 0.78m(πλάτος) x 1.08m(μήκος) x 0.85m(ύψος) με άνοιγμα για την εισαγωγή αέρα ένα παράθυρο με μεταβλητές διαστάσεις. Το καύσιμο που χρησιμοποιήθηκε ήταν ξύλο πεύκου σε σωρούς ορθογωνικά διατεταγμένων ράβδων (wood cribs), ενώ οι τοίχοι του δωματίου ήταν φτιαγμένοι με τρεις στρώσεις υλικών, όπως φαίνονται στο Σχήμα 2.7. Για τη μελέτη του φαινομένου εκτόνωσης της φωτιάς χρησιμοποιήθηκαν θερμοστοιχεία τύπου K για μέτρηση θερμοκρασιών αερίου, αναλυτής αερίων για μέτρηση συγκέντρωσης οξυγόνου, μετρητής πίεσης και δυο κάμερες για τη μελέτη του ύψους φλόγας και χρώματος καπνού. Τα πειράματα για τη μελέτη της επίδρασης του αερισμού που διενεργήθηκαν, είχαν ως αποτέλεσμα την εξαγωγή πολύτιμων συμπερασμάτων για τις φάσεις του φαινομένου εκτόνωσης φωτιάς σε συνθήκες μειωμένου αερισμού. Κατά την περίοδο εμφάνισης της εκτόνωσης της φωτιάς όλα τα διαθέσιμα καύσιμα αναμειγνύονται με το οξυγόνο και δημιουργούν μια ενιαία μάζα φωτιάς (fireball) η οποία οδηγείται εκτός του δωματίου.

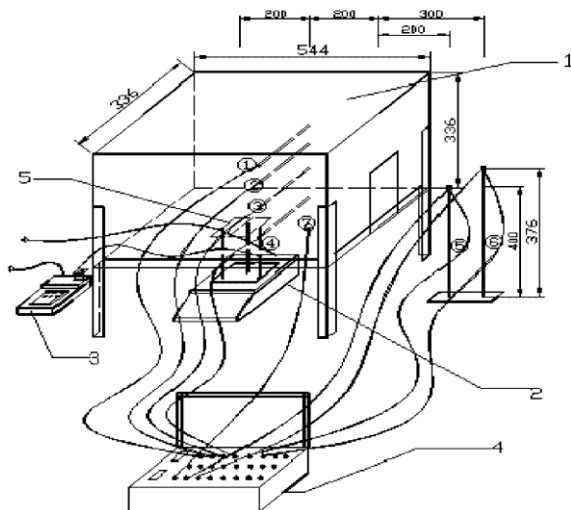


**Σχήμα 2.7** Διαστάσεις και μετρητικές συσκευές στην πειραματική διάταξη των Hayasaka H., Kudo Y., Kojima H., Hashigami T., Ito J., Ueda T. [Hayasaka et al., 2008].

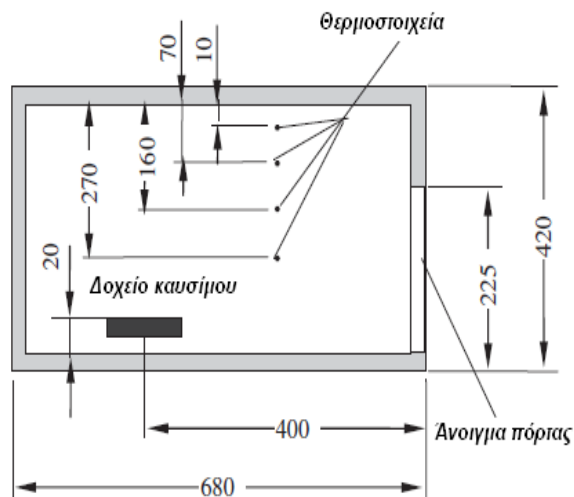
### 2.1.3 Πειραματικές μελέτες σε διάταξη δωματίου μικρής κλίμακας

Η πιθανότητα εμφάνισης του φαινομένου καθολικής ανάφλεξης (flashover) μελετήθηκε από τους Chen A., Yang S., Dong X. [Chen et al., 2011] σε πειράματα μικρής κλίμακας σε δωμάτιο με εσωτερικές διαστάσεις 0.33m(πλάτος) x 0.60m(μήκος) x 0.36m(ύψος) και ανοίγματος μια πόρτα με σταθερό ύψος (0.225m) και μεταβλητό πλάτος (0.015-0.285m). Σημαντική παράμετρος μελέτης ήταν το υλικό της μόνωσης των τοιχωμάτων, καθώς χρησιμοποιήθηκαν πέντε διαφορετικά είδη. Οι θερμοκρασίες μετρήθηκαν σε 4 σημεία εντός του δωματίου με θερμοστοιχεία, ο ρυθμός καύσης μάζας καυσίμου μετρήθηκε με δυναμοκυψέλη, ενώ χρησιμοποιήθηκε και μετρητής ροής θερμότητας, όπως φαίνεται στην απεικόνιση της διάταξης στο Σχήμα 2.18. Σκοπός της μελέτης ήταν η συσχέτιση των τεσσάρων παραγόντων (θερμική αδράνεια υλικών, αερισμός ανοίγματος, ρυθμός απελευθέρωσης καυσίμου και γεωμετρία δωματίου) με την εμφάνιση καθολικής ανάφλεξης. Σύμφωνα με τα ευρήματα της μελέτης, η πιθανότητα εμφάνισης καθολικής ανάφλεξης μειώνεται όσο αυξάνεται ο αερισμός του δωματίου, σε αντίθεση με αύξηση του ρυθμού έκλυσης θερμότητας το οποίο επιφέρει αύξηση της πιθανότητας να εμφανιστεί καθολική ανάφλεξη.

Με βάση την πειραματική διάταξη της εργασίας των Chen A., Yang S., Dong X. [Chen et al., 2011], μελετήθηκε το φαινόμενο της εκτόνωσης της φωτιάς (backdraft) από τους Chen A., Zhou L., Liu B., Chen W. [Chen, Zhou et al., 2011]. Με ίδια πειραματική διάταξη (Σχήμα 2.9) και χρησιμοποιώντας ως καύσιμα ξύλο και επτάνιο, μελετήθηκε η πιθανότητα να συμβεί το φαινόμενο με βάση τον αριθμό β. Ο αριθμός β χρησιμοποιείται για την έκφραση της αναλογίας του καυσίμου κλάσματος του όγκου καυσαερίων με το χαμηλότερο όριο έκρηξης του μίγματος. Έτσι, με χρησιμοποίηση των ίδιων μετρητικών διατάξεων με το πείραμα [Chen et al., 2011] και εισαγωγή αναλυτή αερίων μετρήθηκαν οι θερμοκρασίες αερίου, η μάζα καυσίμου κάθε χρονική στιγμή και οι συγκεντρώσεις οξυγόνου, μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα, καθώς και οξείδια του αζώτου.



**Σχήμα 2.8** Πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα από τον Chen [Chen et al., 2011].



**Σχήμα 2.9** Διάταξη των μετρητικών συστημάτων στα πειράματα του Chen [Chen et al., 2011].

## 2.2 Πειραματικές μελέτες σε διάταξη δωματίου βάσει προτύπου ISO9705

Η ανάπτυξη ενός πρότυπου δωματίου, βάσει του οποίου γίνεται η μελέτη των χαρακτηριστικών της φωτιάς σε μοντέλο υπό κλίμακα, αποτέλεσε σημαντικό παράγοντα για την ύπαρξη κοινού σημείου αναφοράς μεταξύ των πειραμάτων που διεξάγονται τα τελευταία χρόνια. Οι προδιαγραφές για ένα τέτοιο δωμάτιο αναφέρονται στο πρότυπο ISO9705 [International Organization for Standardization, 1993], σύμφωνα με το οποίο οι διαστάσεις ενός πρότυπου δωματίου είναι 3.66m x 2.44m x 2.44m με άνοιγμα πόρτας 2m x 0.8m. Πολλές μελέτες στηρίχτηκαν στις διαστάσεις που ορίζονται στο πρότυπο αυτό για τη διεξαγωγή πειραμάτων, όπως οι [Bundy et al., 2007], [Ko et al., 2009] κ.α. που περιγράφονται στη συνέχεια.

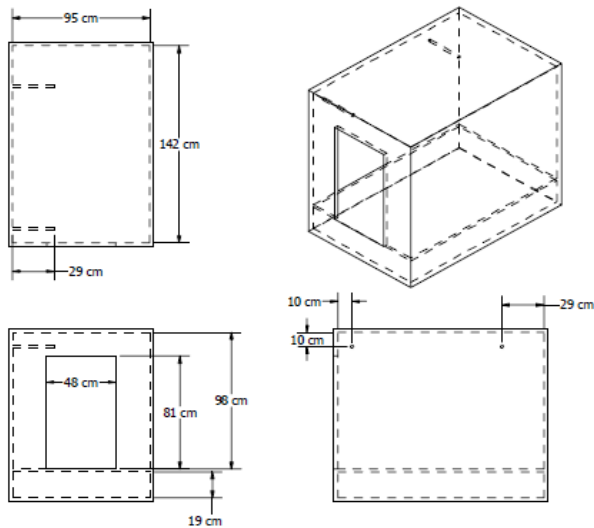
Σε εργασία των G. M. Makhviladze, A. V. Shamshin, S. E. Yakush και A. P. Zykov [Makhviladze et al., 2006] παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε μια σειρά πειραμάτων μικρής (1/5, 1/7, 1/8) και μεσαίας (1/3, 1/4) κλίμακας ως προς το πρότυπο κατά ISO9705. Στα πειράματα επικρατούσαν συνθήκες μη-επαρκούς αερισμού διαφοροποιώντας τον τύπο καυσίμου (χρησιμοποιήθηκαν 3 τύποι), το ρυθμό εφοδιασμού του καυσίμου, την τοποθεσία του καυστήρα και τη γεωμετρία του ανοίγματος (Πίνακας 2.1). Στα πειράματα μελετήθηκαν τα χαρακτηριστικά της φλόγας που εξήλθε από το διαμέρισμα και έγινε σύγκριση των πειραματικών τιμών με τιμές από τη μοντελοποίηση μέσω προγραμμάτων υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD models). Το χαρακτηριστικό της φωτιάς στο οποίο δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση σε αυτήν τη μελέτη ήταν ο χρόνος που χρειάζεται η φλόγα για να εξέλθει από το διαμέρισμα σε σχέση με τη στιγμή έναρξης της (ignition point). Με βάση τα μοντέλα υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD) παρουσιάστηκε μια ποιοτική σύγκλιση των τιμών τους με τις πειραματικές τιμές που παρατηρήθηκαν, με την προϋπόθεση να είναι σταθερός ο ρυθμός εφοδιασμού καυσίμου.

Πείραμα	Διαμέρισμα			Άνοιγμα		Καυστήρας
	H, m	W, m	L, m	h, m	w, m	l, m
P1A	0.275	0.300	0.590	0.090	0.075	0.190
P1B	0.275	0.300	0.590	0.090	0.075	0.400
P2A	0.275	0.300	0.590	0.090	0.115	0.190
P2B	0.275	0.300	0.590	0.090	0.115	0.400
P3A	0.275	0.300	0.590	0.130	0.095	0.190
P3B	0.275	0.300	0.590	0.130	0.095	0.400
P4B	0.275	0.300	0.430	0.090	0.075	0.400
P5B	0.275	0.300	0.430	0.090	0.115	0.400
P6B	0.275	0.300	0.430	0.130	0.095	0.400
P7C	0.480	0.480	0.720	0.150	0.125	0.360
P8C	0.480	0.480	0.720	0.140	0.160	0.360
P9C	0.480	0.480	0.720	0.180	0.080	0.360
P10C	0.700	0.720	1.025	0.300	0.250	0.513
P11C	0.700	0.720	1.025	0.285	0.320	0.513
M11C	0.700	0.720	1.025	0.285	0.320	0.513
P12B	0.700	0.720	0.655	0.160	0.160	0.505
M12B	0.700	0.720	0.655	0.160	0.160	0.505
N12B	0.700	0.720	0.655	0.160	0.160	0.505

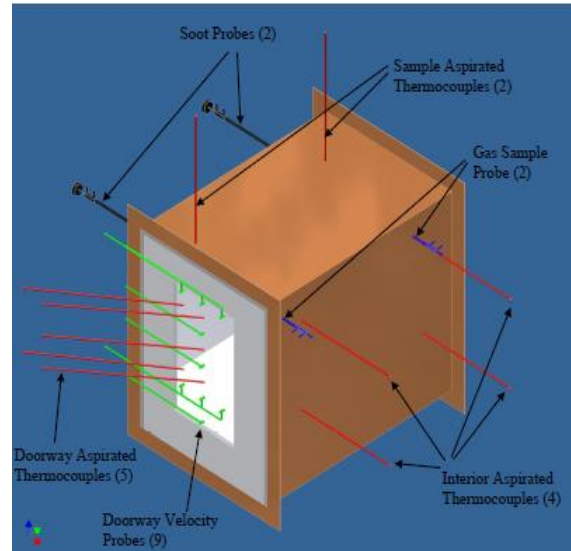
**Πίνακας 2.1** Διαστάσεις διαμερίσματος και καυστήρα που χρησιμοποιήθηκαν ως παράμετροι στα πειράματα των G. M. Makhviladze, A. V. Shamshin, S. E. Yakush και A. P. Zykov [Makhviladze et al., 2006].

Μελέτη η οποία βασίστηκε επίσης στις διαστάσεις κατά το πρότυπο ISO9705 (κλίμακα 2/5 του προτύπου, Σχήμα 2.10) αποτέλεσε αυτή του Bundy M., κ.α για το NIST [Bundy et al., 2007]. Στη μελέτη αυτή έγινε ο προσδιορισμός των θερμοκρασιών εντός του διαμερίσματος με θερμοστοιχεία τύπου K και ανάλυση της σύστασης των καυσαερίων (οξυγόνου, μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα) με χρήση θερμιδόμετρου και αναλυτή αερίων (Σχήμα 2.11). Η μελέτη εστιάζει στη σύγκριση του μεγέθους της φωτιάς ανάλογα με το καύσιμο και τη γεωμετρία του ανοίγματος. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν έξι διαφορετικοί τύποι καυσίμου και πόρτα όπου το ύψος μένει σταθερό και το πλάτος της μεταβάλλεται. Για τον έλεγχο της ροής καυσίμου χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις διαφορετικού τύπου καυστήρες. Μια άλλη παράμετρος που εξετάστηκε ήταν το υλικό κατασκευής τοιχωμάτων (Marinite-I και Kaowool M-board) και η αντοχή τους έναντι στη φωτιά. Ένα από τα κυρίως αποτελέσματα που προέκυψαν είναι πως η συγκέντρωση του CO αποτελεί μια πολύπλοκη συνάρτηση του μεγέθους φωτιάς, του τύπου καυσίμου, του αερισμού και της τοποθεσίας μέτρησης. Παράλληλα, τα αποτελέσματα για αντοχή των υλικών αποτελούν βάση για μελλοντικά πειράματα, δίνοντας κάποιες ενδεικτικές τιμές θερμοκρασίας στις οποίες αστοχούν τα υλικά κατασκευής.



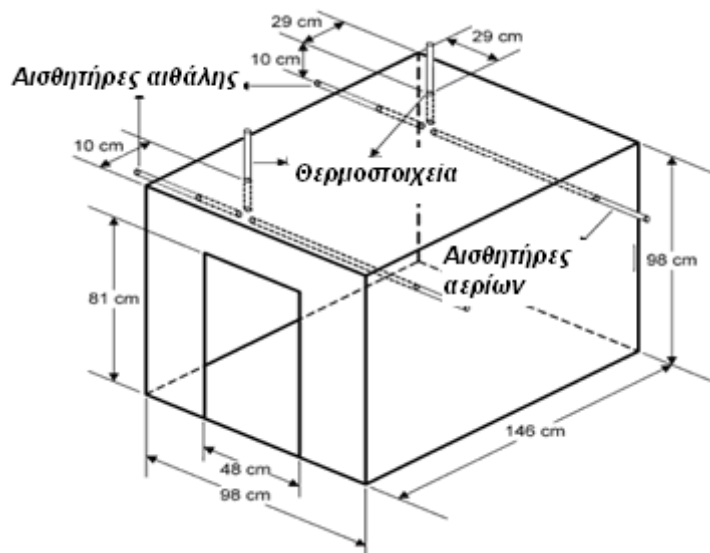


Σχήμα 2.10 Διαστάσεις δωματίου [Bundy et al., 2007].



Σχήμα 2.11 Μετρητικές διατάξεις [Bundy et al., 2007].

Στη μελέτη που δημοσιεύθηκε το 2009 από τους Ko, Hummins κ.α. [Ko et al., 2009] τα πειράματα έγιναν σε διαμέρισμα με διαστάσεις δωματίου υπό κλίμακα 2/5 σύμφωνα με το ISO9705. Η μελέτη αφορούσε τα χαρακτηριστικά των χημικών ειδών που παράγονται από τη φωτιά σε ένα διαμέρισμα, όταν χρησιμοποιούνται καύσιμα που παράγουν μεγάλες ποσότητες καπνού. Για το λόγο αυτό ο τύπος καυσίμου που χρησιμοποιήθηκε άλλαξε (επτάνιο, τολουόλιο, πολυστυρένιο), ενώ χρησιμοποιήθηκαν θερμοστοιχεία σε δύο τοποθεσίες όπως δείχνει το Σχήμα 2.12. Παράλληλα έγιναν μετρήσεις συγκέντρωσης καυσαερίων και αιθάλης σε επίσης δύο σημεία όπως φαίνονται στο Σχήμα 2.12. Ως αποτέλεσμα, υπολογίστηκε το κλάσμα μάζας των προϊόντων καύσης ως συνάρτηση του κλάσματος μείγματος, ενώ αξιολογήθηκαν τα ισοζύγια μάζας του στοιχειακού άνθρακα σε σχέση με το CO και την αιθάλη. Τέλος, βρέθηκε πως η μισή (και παραπάνω) ποσότητα άνθρακα του καυσίμου υπάρχει στην αιθάλη του ανώτερου στρώματος εντός του δωματίου.

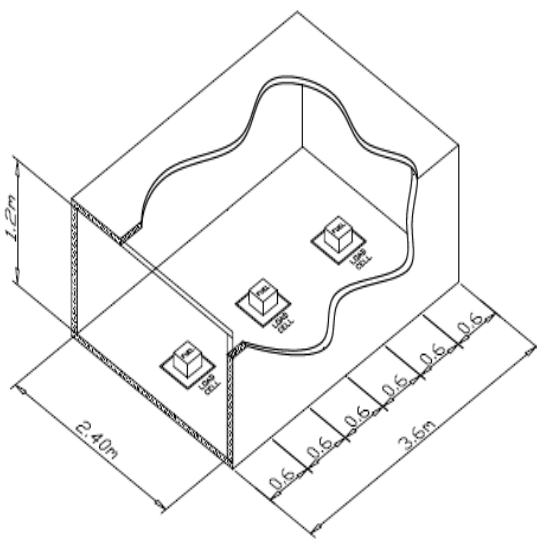


Σχήμα 2.12 Διαστάσεις και μετρητικά στη διάταξη των πειραμάτων του Ko [Ko et al., 2009].

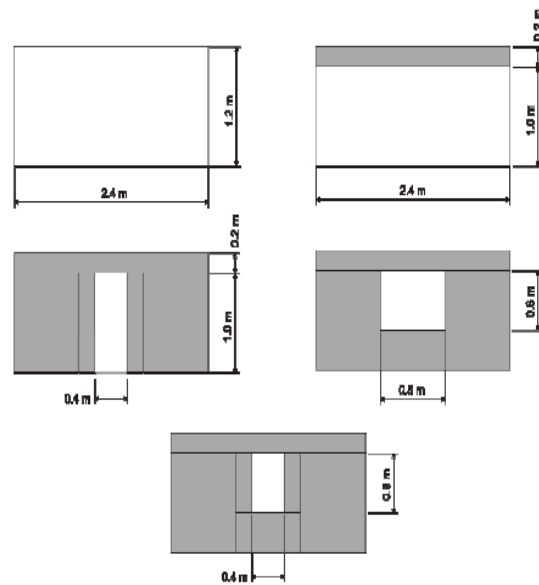
Πολύ σημαντική μελέτη σε πειράματα φωτιάς αποτέλεσε η εργασία του Parkes [Parkes, 2009] στην οποία διερευνάται η επίδραση του μεγέθους και της τοποθεσίας του δοχείου καυσίμου σε περίπτωση φωτιάς σε διαμέρισμα. Τα πειράματα έγιναν σε δωμάτιο (Σχήμα 2.13) με διαστάσεις κατά το πρότυπο ISO9705 (εκτός του ύψους που θεωρήθηκε  $\frac{1}{2}$  του



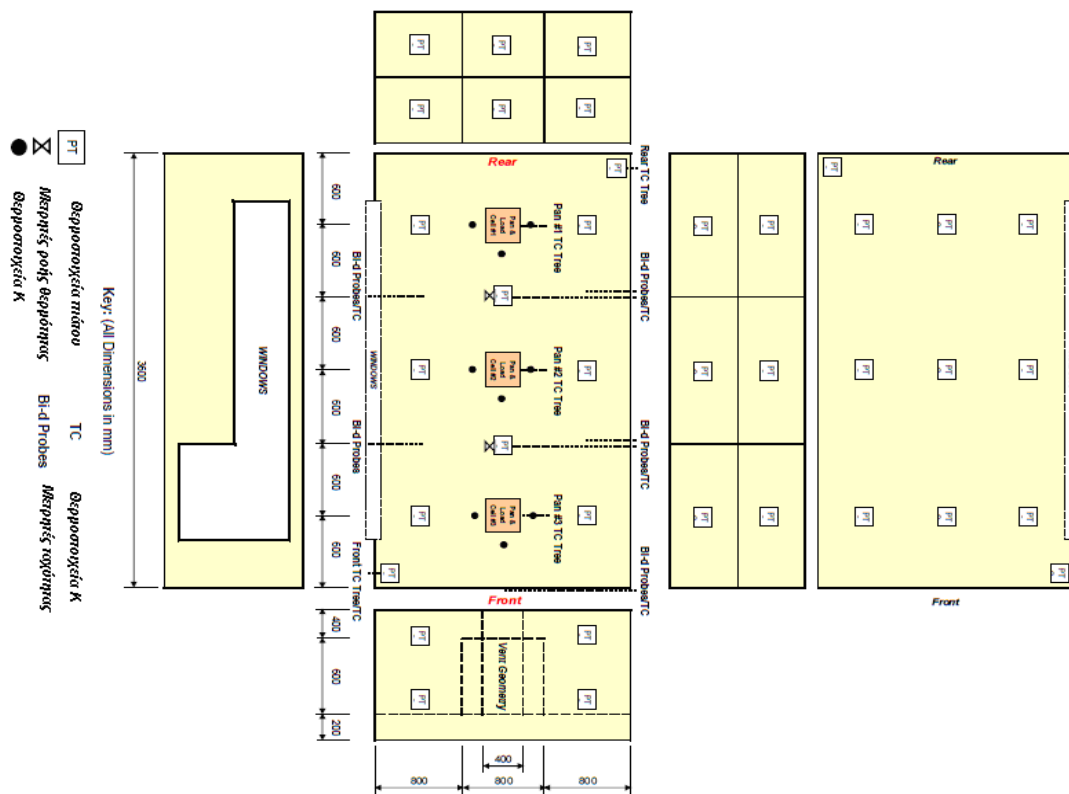
αντίστοιχου κατά ISO9705) και βασική παράμετρος που μεταβλήθηκε ήταν η γεωμετρία του ανοίγματος (Σχήμα 2.14) ενώ ως καύσιμο χρησιμοποιήθηκε επτάνιο.



Σχήμα 2.13 Διαστάσεις πειραματικής διάταξης [Parkes, 2009]



Σχήμα 2.14 Διαστάσεις και διάταξη των διαφόρων ανοιγμάτων [Parkes, 2009]

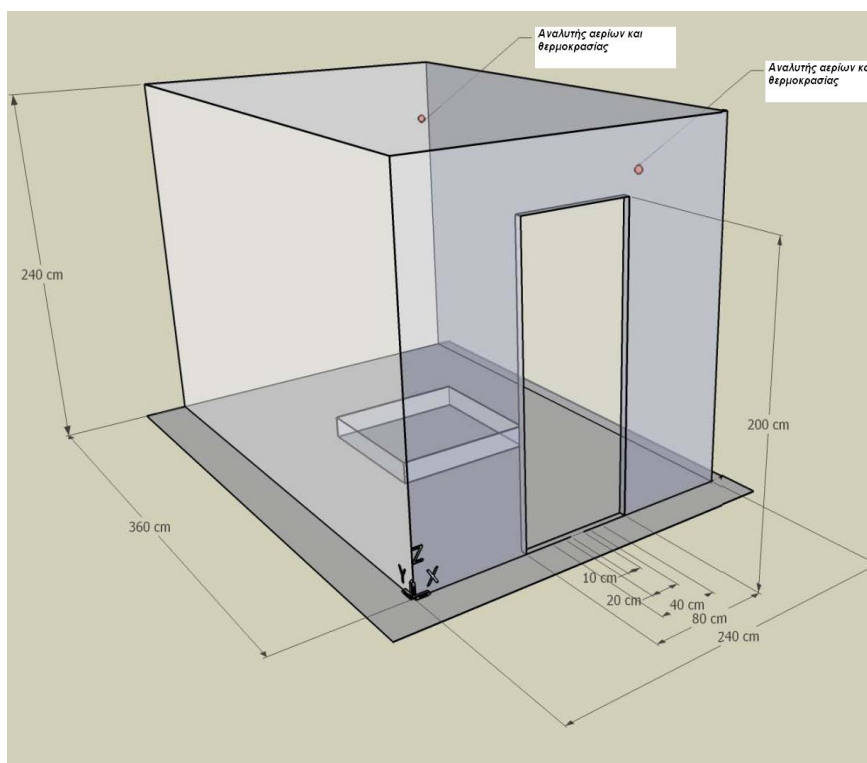


Σχήμα 2.15 Τοποθεσία μετρητικών συστημάτων της μελέτης του Parkes [Parkes, 2009].

Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν μετρητικές διατάξεις (Σχήμα 2.15) οι οποίες περιλάμβαναν θερμοστοιχεία τύπου K για τη μέτρηση των θερμοκρασιών εντός και εκτός δωματίου, υδρόψηκτους μετρητές ροής θερμότητας τύπου Gardon για τον υπολογισμό της θερμότητας, μετρητές ταχύτητας και αναλυτής αερίων για τη μέτρηση των συγκεντρώσεων οξυγόνου, μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα. Η μέτρηση της μεταβολής της μάζας του καυσίμου έγινε με δυναμοκυψέλη προσαρμοσμένη κάτω από το δοχείο. Σκοπός αυτών των πειραμάτων

ήταν η μελέτη της φωτιάς σε δωμάτιο και η συσχέτισή της με τον παράγοντα αερισμού και την πηγή καυσίμου. Η τοποθεσία του δοχείου διαφοροποίησε τον τρόπο μετάβασης από την κατάσταση 'πριν την καθολική ανάφλεξη' στην κατάσταση 'μετά την καθολική ανάφλεξη', ενώ σημαντικό ρόλο έπαιξε και ο αερισμός.

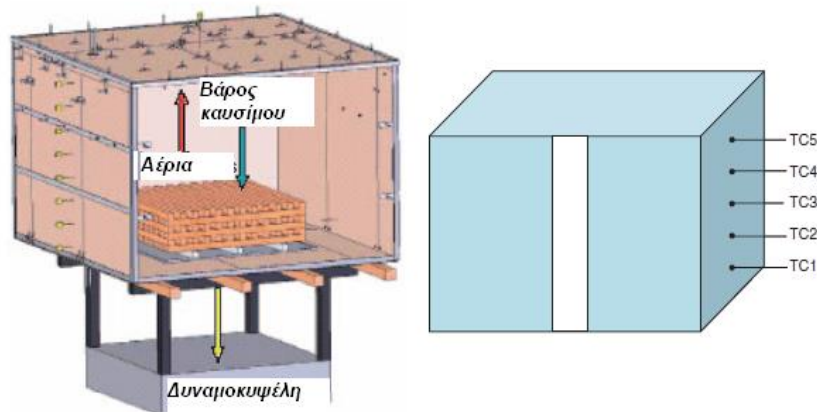
Για το NIST, μελετήθηκε σε εργασία [Lock et al., 2008] η περίπτωση της φωτιάς σε περιορισμένου αερισμού δωμάτιο με διαστάσεις ίδιες κατά το πρότυπο ISO9705 (Σχήμα 2.16). Βασικός στόχος ήταν η μελέτη της επίδρασης του τύπου του καυσίμου και του παράγοντα αερισμού στην εξάπλωση φωτιάς σε δωμάτιο κανονικών διαστάσεων. Για τη μελέτη του αερισμού, χρησιμοποιήθηκαν πόρτες στο 1/2, 1/4, 1/8 και 1/1 του προτύπου κατά ISO9705, ώστε να επιτευχθούν συνθήκες μη επαρκούς αερισμού σε γρηγορότερο χρονικό διάστημα ανά περίπτωση. Παράλληλα χρησιμοποιήθηκαν διάφορα είδη καυσίμου (στερεάς, υγρής και αέριας μορφής) για τη μελέτη της επίδρασης του καυσίμου στο μέγεθος της φωτιάς. Η ανάλυση του προφίλ των θερμοκρασιών και συγκέντρωσης αερίων στο εσωτερικό του δωματίου για την εξαγωγή συμπερασμάτων πραγματοποιήθηκε με χρησιμοποίηση θερμοστοιχείων, μετρητών ροής θερμότητας και αναλυτή αερίων. Η επίτευξη συνθηκών μειωμένου αερισμού παρατηρήθηκε για τα περισσότερα καύσιμα και έγινε εφικτή η μελέτη των συγκεντρώσεων αερίων σε δύο σημεία εντός του διαμερίσματος.



Σχήμα 2.16 Πειραματική διάταξη μελέτης [Lock et al., 2008].

Μια πολύ σημαντική πειραματική μελέτη για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων της θεωρίας μοντελοποίησης υπό κλίμακα σε περιπτώσεις φωτιάς στο εσωτερικό δωματίου, υπήρξε η εργασία των Wang M., Perricone J., Quintiere G. και Chang P. [Wang et al., 2008]. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε δωμάτια τριών διαφορετικών γεωμετριών, όλων βάσει των διαστάσεων του προτύπου κατά ISO9705. Στην πρώτη περίπτωση τα πειράματα ήταν μεγάλης κλίμακας σε δωμάτιο με διαστάσεις 3.7m(πλάτος) x 3.7m(μήκος) x 2.44m(ύψος) και άνοιγμα μήκους 0.5m-ύψους 2.44m, ενώ τα τοιχώματα φτιάχτηκαν από γυψοσανίδα τύπου C. Στη δεύτερη περίπτωση το δωμάτιο ήταν υπό κλίμακα 1/4 του δωματίου μεγάλης κλίμακας με τα τοιχώματα να είναι από σανίδα Kaowool 3000. Τέλος, στην τρίτη περίπτωση το δωμάτιο φτιάχτηκε υπό κλίμακα 1/8 του δωματίου μεγάλης κλίμακας με τα τοιχώματα να είναι από σανίδα τύπου Saffil LD. Σε όλες τις περιπτώσεις το καύσιμο που χρησιμοποιήθηκε

ήταν σωροί ορθογωνικά διατεταγμένων ράβδων από ξύλο λευκού δρυός. Τα δυο σενάρια φωτιάς που μελετήθηκαν αφορούσαν φωτιά μικρής διάρκειας 15min και μεγάλης διάρκειας 60min. Η θερμοκρασία των αερίων μετρήθηκε με θερμοστοιχεία τύπου K σε 5 διαφορετικά ύψη, ο ρυθμός απώλειας μάζας καυσίμου μετρήθηκε με δυναμοκυψέλη και η ροή θερμότητας με τους μετρητές ροής θερμότητας, όπως φαίνονται στο Σχήμα 2.17. Με τα πειράματα αυτά αναδείχθηκαν τεχνικές για τη μελέτη φωτιάς σε εσωτερικούς χώρους, χρησιμοποιώντας μοντέλα υπό κλίμακα.

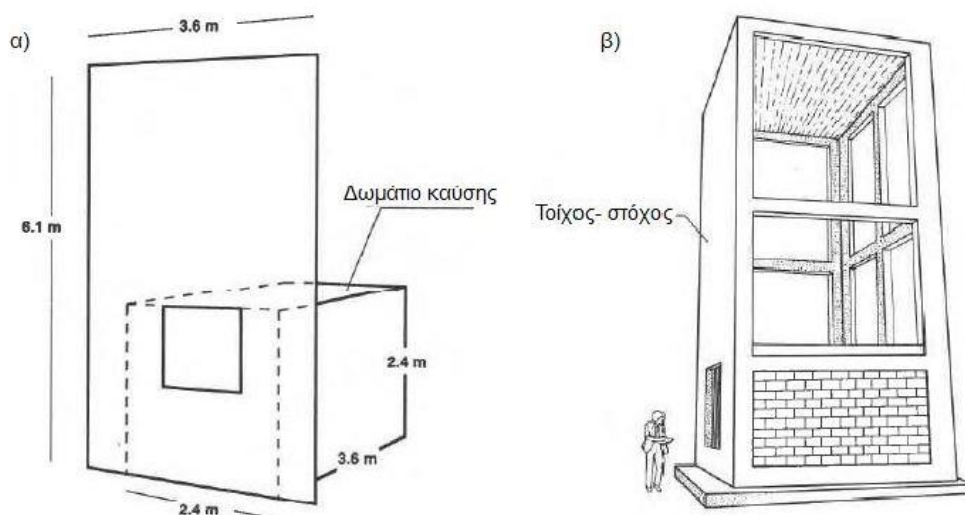


Σχήμα 2.17 Απεικόνιση της πειραματικής διάταξης του Wang [Wang et al., 2008].

### 2.3 Πειραματικές μελέτες για διάδοση φωτιάς σε πρόσοψη

Η φωτιά που εξέρχεται από παράθυρα ή πόρτες είναι ένα ιδιαίτερος σημαντικό ζήτημα το οποίο έχει αποτελέσει αντικείμενο πολλών πειραματικών μελετών, καθώς είναι από τις πιο επικίνδυνες και πιθανές αιτίες εξάπλωσης φωτιάς από δωμάτιο σε δωμάτιο και αντίστοιχα από κτίριο σε κτίριο. Για το συγκεκριμένο φαινόμενο έχουν διατυπωθεί πολλά μοντέλα πρόβλεψης διάδοσης της φλόγας.

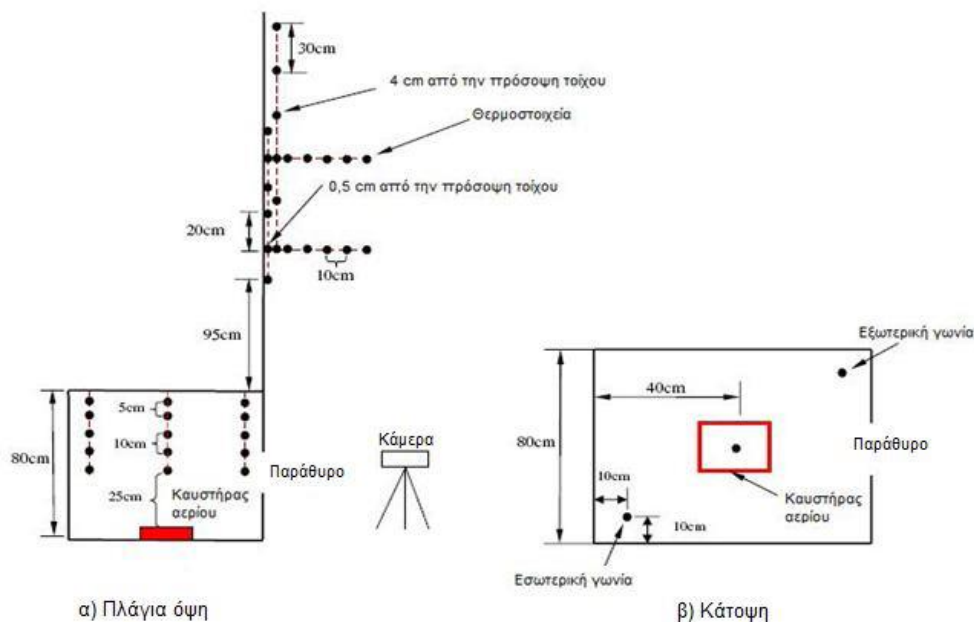
Στη μελέτη [Oleszkiewicz et al., 1989], ο Oleszkiewicz ασχολήθηκε με τη διάδοση φωτιάς σε πρόσοψη κτιρίων σε μοντέλα πραγματικής κλίμακας. Για τα πειράματα που διεξήχθησαν, χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές εγκαταστάσεις (μία μικρότερη και μία μεγαλύτερη) και δύο διαφορετικά καύσιμα (σωροί ορθογώνια διατεταγμένων ξύλινων ράβδων και προπάνιο σε αέρια μορφή). Οι διαστάσεις ήταν 2.4m(πλάτος) x 3.6m(μήκος) x 2.4m(ύψος), ενώ η πρόσοψη είχε πλάτος 3.6m και ύψος 5.1m. Στο Σχήμα 2.18 φαίνονται οι δύο εγκαταστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν.



Σχήμα 2.18 Η πειραματική διάταξη των πειραμάτων του Oleszkiewicz [Oleszkiewicz et al., 1989].

Στη μικρότερη εγκατάσταση (Σχήμα 2.18, αριστερά) καταγράφηκε η ολική μεταφορά θερμότητας στον τοίχο πάνω από το παράθυρο, μεταβάλλοντας τη γεωμετρία του ανοίγματος στην πρόσοψη του κτιρίου. Στην πιο μεγάλη εγκατάσταση (Σχήμα 2.18, δεξιά) εξετάστηκε η ολική μεταφορά θερμότητας στον τοίχο που βρίσκεται πάνω από το άνοιγμα του παράθυρου. Στα πειράματα με προπάνιο σε αέρια μορφή, που πραγματοποιήθηκαν στη μεγαλύτερη πειραματική εγκατάσταση εξετάστηκαν οι επιπτώσεις που έχουν ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας και οι διαστάσεις του παραθύρου στη μεταφορά θερμότητας στον εξωτερικό τοίχο πάνω από το παράθυρο. Στη συνέχεια δημιουργήθηκε μαθηματικό μοντέλο για την περιγραφή της ροής θερμότητας σε προσόψεις κτιρίων, το οποίο προσεγγίζει φωτιές με ένα μέσο ρυθμό καύσης υλικών. Επίσης, καταγράφηκε η ανάγκη για περισσότερη έρευνα σε περιπτώσεις υλικών που καίγονται πιο γρήγορα, όπως πλαστικό, εύφλεκτες πλάκες κ.α.

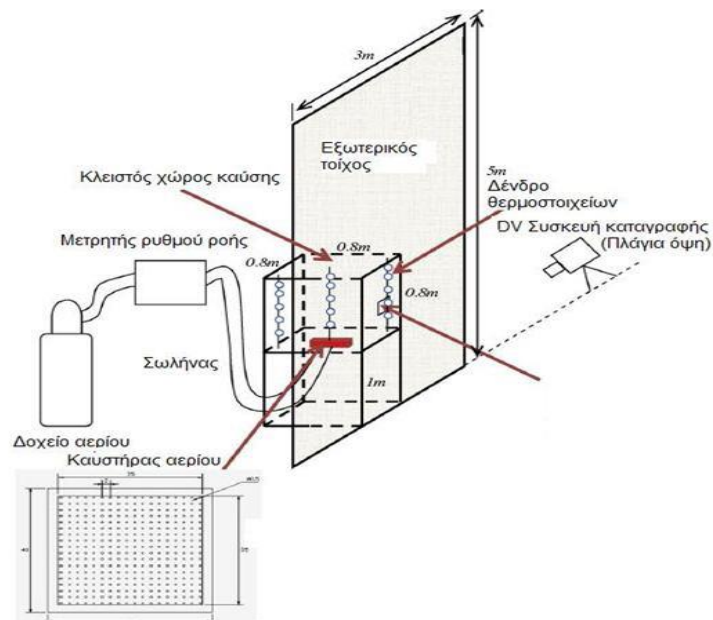
Μια πιο πρόσφατη μελέτη [Tang et al., 2012] που διεξήχθη σε μοντέλο μειωμένης κλίμακας και αφορά διάδοση φλόγας σε πρόσοψη κτιρίων είχε ως αντικείμενο την μελέτη του ύψους της φλόγας και του θερμοκρασιακού προφίλ ανοδικού πλουμίου εξερχόμενο από παράθυρο διαμερίσματος. Τα πειράματα διεξήχθησαν σε κυβικό δωμάτιο διαστάσεων 0.80m(πλάτος) x 0.80m (μήκος) x 0.80m (ύψος) με πρόσοψη 3m(πλάτος) x 5m(ύψος), σε συνθήκες φωτιάς μη επαρκούς αερισμού, με χρησιμοποίηση προπανίου ως καύσιμο (καυστήρας τοποθετημένος στο κέντρο του δωματίου). Επιπλέον πραγματοποιήθηκε παραμετρική μελέτη για διαφορετικές γεωμετρίες ανοίγματος παραθύρου. Στο Σχήμα 2.19 φαίνεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα, καθώς και οι μετρητικές διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν θερμοστοιχεία τύπου K και μια κάμερα για την καταγραφή του ύψους φλόγας εξωτερικά του δωματίου. Στόχος ήταν η μελέτη του ύψους της φλόγας και του θερμοκρασιακού προφίλ εντός του δωματίου και εκτός αυτού, πάνω στην πρόσοψη κατά τον κάθετο άξονα. Οι θερμοκρασίες αερίου στο εσωτερικό προσδιορίζονται από την ενεργειακή ισορροπία μεταξύ του ρυθμού έκλυσης θερμότητας, της αγωγιμότητας του τοιχώματος και τις απώλειες θερμότητας από το άνοιγμα, χρησιμοποιώντας ένα γενικό συντελεστή απώλειας θερμότητας. Τα αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μοντελοποίηση των θερμοκρασιών τόσο μέσα στον κλειστό χώρο, όσο και στην πρόσοψη τοίχου ακριβώς πάνω από το άνοιγμα του δωματίου, καθώς και του ύψους της φλόγας εξωτερικά του δωματίου.



Σχήμα 2.19 Η πειραματική διάταξη των πειραμάτων της μελέτης [Tang et al., 2012].

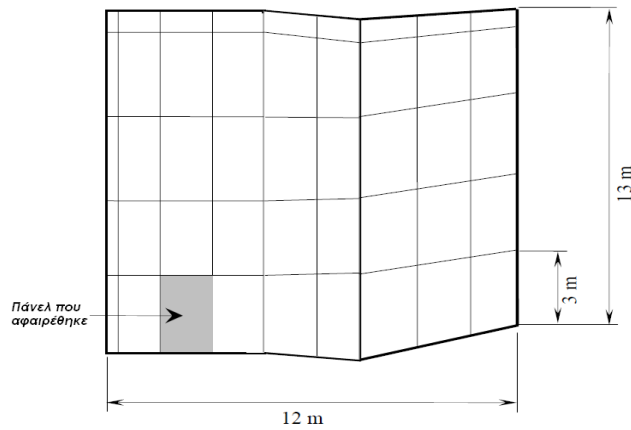
Μια άλλη πρόσφατη πειραματική μελέτη [Hu et al., 2012], είχε ως αντικείμενο τις φωτιές σε κλειστούς χώρους και σε πρόσοψη. Τα πειράματα διεξήχθησαν σε κυβικό μοντέλο υπό κλίμακα (πλευράς 0.8m) το οποίο απεικονίζεται στο Σχήμα 2.20. Η διάταξη που

χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα ήταν βάσει της διάταξης των πειραμάτων της μελέτης [Tang et al.,2012]. Χρησιμοποιώντας ίδιες μετρητικές διατάξεις, οι ερευνητές έκαναν δοκιμές με διαφορετικούς ρυθμούς τροφοδότησης αερίου καυσίμου (υγροποιημένου αερίου πετρελαίου) και με διαφορετικές γεωμετρίες ανοίγματος του παράθυρου. Στόχος των πειραμάτων ήταν η μελέτη του μεταβατικού στάδιου της φωτιάς, καταγράφοντας την πιθανότητα εμφάνισης φλόγας εκτός του δωματίου, ενώ παράλληλα δημιουργήθηκε μοντέλο όπου λαμβάνοντας ως δεδομένα κάποιες παραμέτρους υπολογίζεται η πιθανότητα εμφάνισης φωτιάς έξω από τον κλειστό χώρο. Στα συμπεράσματα της μελέτης, η πιθανότητα αυτή βρέθηκε να αυξάνεται με την αύξηση της ανατροφοδότησης καυσίμου ή του ρυθμού έκλυσης θερμότητας.

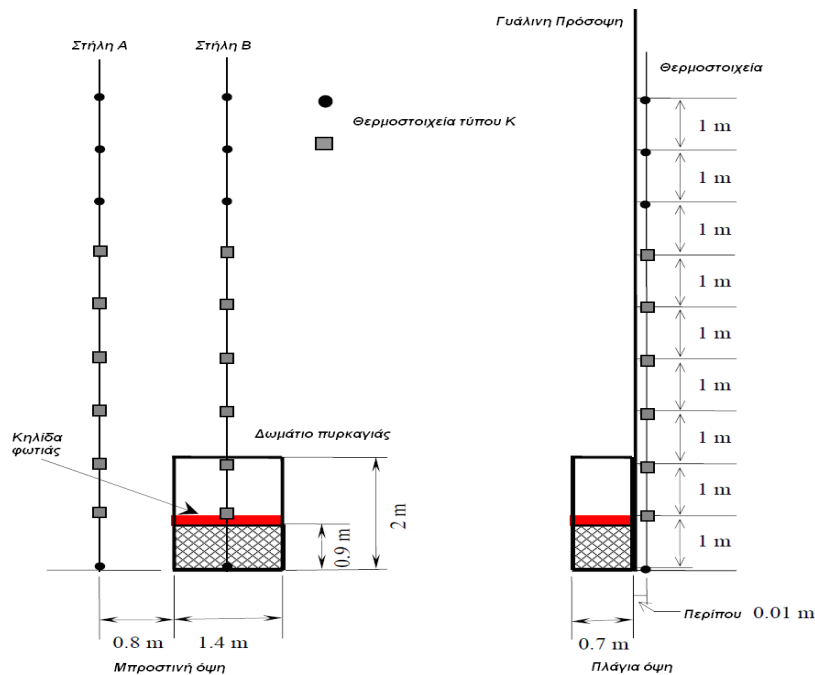


**Σχήμα 2.20** Η πειραματική διάταξη των πειραμάτων της μελέτης [Hu et al.,2012].

Σημαντική πειραματική μελέτη διάδοσης φωτιάς σε πραγματικής κλίμακας μοντέλο ήταν η εργασία [Chow et al., 2007] που δημοσιεύτηκε το 2007. Στη μελέτη αυτή έγινε προσομοίωση της διάδοσης φωτιάς σε γυάλινη πρόσοψη με συνολικές διαστάσεις 12m(πλάτος) x 13m(ύψος), η οποία αποτελείται από γυάλινους πίνακες (panels), ενώ για να επιτευχθεί η άμεση διάδοση φωτιάς από το δωμάτιο όπου βρισκόταν το δοχείο καυσίμου, έγινε αφαίρεση του ενός πίνακα (Σχήμα 2.21). Ως καύσιμο χρησιμοποιήθηκαν 50 λίτρα βενζίνης τα οποία αντιστοιχούν σε φωτιά ισχύος 2MW. Με αυτή την ποσότητα υπολογίστηκε η εμφάνιση καθολικής ανάφλεξης (flashover), με επακόλουθο τη διάδοση της φωτιάς εκτός του δωματίου (το οποίο είχε διαστάσεις 0.7m x 1.4m x 2m) μέσω πόρτας 0.8m x 2m. Η μελέτη των θερμοκρασιών στην πρόσοψη έγινε με θερμοστοιχεία τύπου K σε θέσεις που φαίνονται στο Σχήμα 2.22, μετρώντας το θερμοκρασιακό προφίλ επάνω και δίπλα από το δωμάτιο. Οι θερμοκρασίες που μετρήθηκαν επάνω από το δωμάτιο πυρκαγιάς (Στήλη Β) έφθασαν μέχρι τους 900°C σε κάποια σημεία, ενώ οι θερμοκρασίες δίπλα από το δωμάτιο (Στήλη Α) δεν ξεπέρασαν τους 80 °C, δείχνοντας πως περιοχές σε απόσταση περίπου 1.5m από το σημείο διάδοσης της πυρκαγιάς δε θερμαίνονται ραγδαία. Με την κάθετη διάδοση της φλόγας, η φωτιά εξαπλώνεται γρήγορα σε ολόκληρο το κτίριο, ενώ με δεδομένο πως σε μεγάλες πόλεις η απόσταση μεταξύ των κτιρίων είναι ιδιαίτερος μικρή, τίθεται σε κίνδυνο και τα διπλανά κτίρια όσο πιο κοντά βρίσκονται.



Σχήμα 2.21 Γυάλινη πρόσοψη [Chow et al., 2007].



Σχήμα 2.22 Διάταξη θερμοστοιχείων της πειραματικής διάταξης [Chow et al., 2007].

Με την παρούσα βιβλιογραφική ανασκόπηση παρουσιάστηκαν πειραματικές μελέτες που αποτέλεσαν αντικείμενο μελέτης πριν τη διεξαγωγή των πειραμάτων της εργασίας αυτής. Η πλειοψηφία των μελετών που παρουσιάστηκαν είχαν ως σκοπό τη μελέτη των χαρακτηριστικών της φωτιάς εκτός δωματίου και πάνω στην πρόσοψη αυτού. Στις περισσότερες περιπτώσεις έγινε προσπάθεια σύνδεσης του θερμοκρασιακού προφίλ του εξωτερικού πλουμίου της φωτιάς και της πρόσοψης με αυτό που αναπτύσσεται εντός του δωματίου. Παράλληλα, πέραν των μετρήσεων θερμοκρασίας, ιδιαίτερες διαδομένες μεταξύ των πειραμάτων ήταν η μέτρηση της ροής θερμότητας πάνω στην πρόσοψη και των συγκεντρώσεων αερίων. Αντικείμενο μελέτης υπήρξε επίσης η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα διάφορα μοντέλα υπολογιστικής ρευστομηχανικής που έχουν αναπτυχθεί. Αυτή η όλο και αυξανόμενη τάση δημιουργεί την ανάγκη για ύπαρξη περισσότερων δεδομένων από πειραματικές μετρήσεις ώστε η μοντελοποίηση μέσω προγραμμάτων υπολογιστικής ρευστομηχανικής να αντιπροσωπεύει με ακρίβεια περισσότερες περιπτώσεις πυρκαγιάς σε εσωτερικούς χώρους.



## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>

### Πειραματική εγκατάσταση

#### 3.1 Πειραματική διάταξη

Για την πραγματοποίηση πειραμάτων που αφορούν στην εξάπλωση φωτιάς σε κλειστό χώρο, αναπτύχθηκε μια μέθοδος, πλήρους κλίμακας, η οποία προσομοιώνει φωτιές σε εσωτερικό χώρο με ένα άνοιγμα (πόρτα), προκειμένου να αξιολογηθεί και να μελετηθεί η εξάπλωση μιας τέτοιας πυρκαγιάς σε σχέση με τα προϊόντα και τα υλικά των γύρω επιφανειών. Η μέθοδος αυτή περιγράφεται σύμφωνα με το ISO9705 [International Organization for Standardization, 1993].

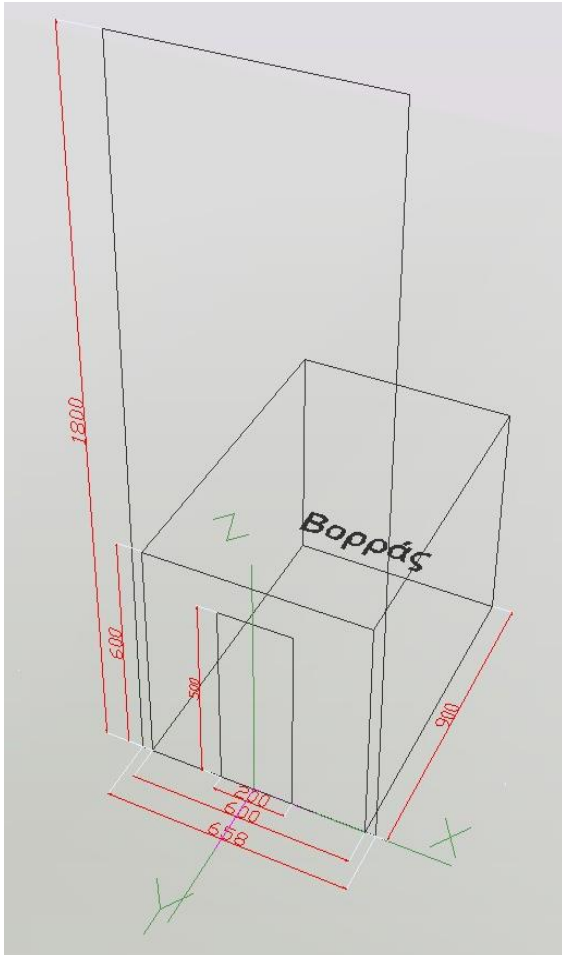
Στα περισσότερα πειράματα μεγάλης και μεσαίας κλίμακας χρησιμοποιούνται διαστάσεις δωματίου υπό κλίμακα [Lock et al., 2008], [Bryner et al., 1994] με βάση το πρότυπο δωμάτιο του ISO9705. Οι διαστάσεις ενός τυπικού δωματίου, σύμφωνα με το ISO9705, είναι 3.66 m μήκος επί 2.44 m πλάτος επί 2.44 m ύψος. Για άνοιγμα θεωρείται πόρτα, πλάτους 0.8 m και ύψους 2 m. Είναι εύλογο να παρατηρηθεί πως η διάσταση του ύψους στην περίπτωση του πρότυπου δωματίου είναι ίδια με την ενός εκ των δύο διαστάσεων της επιφάνειας.

Τα πειράματα έγιναν στο Εργαστήριο Ετερογενών Μιγμάτων και Συστημάτων Καύσης, της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η πραγματοποίησή τους έγινε 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 μεσαίας 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 0.60 m 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 3.1, ενώ στη συνέχεια πραγματοποιείται εκτενέστερη ανάλυση αυτών.

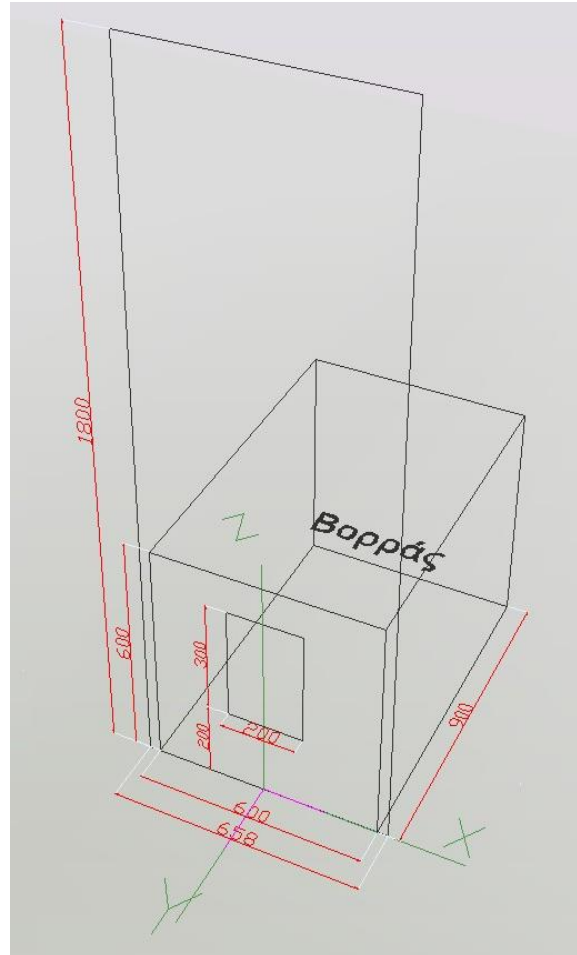
	Μήκος (mm)	Πλάτος (mm)	Ύψος (mm)
Δωμάτιο (εσωτερικές διαστάσεις)	900	600	600
Άνοιγμα	-	-	-
Α' περίπτωση-Πόρτα	-	200	500
Β' περίπτωση-Παράθυρο	-	200	300 (απόσταση από δάπεδο=200mm)
Πρόσοψη	-	658	1800

Πίνακας 3.1 Διαστάσεις κατασκευής.

Στα Σχήματα 3.1.α-3.1.β φαίνεται η γεωμετρία του δωματίου που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα. Σε αυτό είναι εμφανής ο προσανατολισμός με βάση τον οποίο περιγράφονται τα τοιχώματα παρακάτω, ενώ παρατηρείται επίσης, η αρχή των αξόνων, βάσει της οποίας περιγράφονται οι συντεταγμένες των μετρητικών διατάξεων της πειραματικής διάταξης. Η αρχή των αξόνων τοποθετείται στη μέση του πλάτους του νότιου τοίχου, στο ύψος του δαπέδου του δωματίου. Τέλος, φαίνονται οι δυο περιπτώσεις γεωμετρίας ανοίγματος που χρησιμοποιήθηκαν. Στο Σχήμα 3.1.α φαίνεται η περίπτωση Α', με άνοιγμα πόρτα, ενώ στο Σχήμα 3.1.β φαίνεται η περίπτωση Β', με άνοιγμα παράθυρο.



**Σχήμα 3.1.α** Σχέδιο Κατασκευής-Διαστάσεις-Αρχή αξόνων-Προσανατολισμός Δωματίου στα πειράματα της περίπτωσης Α'.



**Σχήμα 3.1.β** Σχέδιο Κατασκευής-Διαστάσεις-Αρχή αξόνων-Προσανατολισμός Δωματίου στα πειράματα της περίπτωσης Β'.

### 3.1.1 Κατασκευή σκελετού

Ο σκελετός της κατασκευής κατασκευάστηκε από χάλυβα (Σχήμα 3.2) διαστάσεων 40mm x 40mm x 4mm (πάχος). Η κατασκευή του σκελετού από χάλυβα έγινε ώστε να αντέξει τις υψηλές θερμοκρασίες που επρόκειτο να εμφανισθούν στη διάρκεια του πειράματος χωρίς την εμφάνιση ρωγμών που θα θέσουν σε κίνδυνο ολόκληρη την κατασκευή.



**Σχήμα 3.2** Ο τύπος “γωνιάς” που χρησιμοποιήθηκε.



Ο σχεδιασμός του σκελετού πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα AutoCAD. Η κοπή των διαφόρων κομματιών έγινε σε κοπτικό μηχάνημα του εργαστηρίου, ενώ για την ένωσή τους χρησιμοποιήθηκε συγκόλληση τύπου ‘‘μινγκ’’.

Ο σκελετός που δημιουργήθηκε αποτελείται από δύο μέρη, το βασικό σκελετό του δωματίου και ένα καπάκι τα οποία φαίνονται στα σχήματα 3.3 και 3.4. Το καπάκι εφάπτεται πλήρως με το σκελετό του δωματίου και ουσιαστικά ακουμπάει επάνω σε αυτόν. Αυτό έγινε ώστε να επιτευχθεί ευκολότερη τοποθέτηση των τοιχωμάτων στο δωμάτιο και ταυτόχρονα πιο εύκολη προσβασιμότητα. Επιπλέον, με τον τρόπο αυτό γίνεται ευέλικτος ο σκελετός σε περίπτωση μεταφοράς του. Το καπάκι σχεδιάστηκε ώστε σε αυτό να στερεωθεί η πρόσοψη του δωματίου.

Οι διαστάσεις του βασικού σκελετού του δωματίου και του καπακιού φαίνονται στον Πίνακα 3.2. Μετά την κατασκευή όλος ο σκελετός βάφτηκε με μαύρο χρώμα.

	Μήκος (mm)	Πλάτος (mm)	Ύψος (mm)	Πάχος Κατασκευής (mm)
<b>Σκελετός δωματίου</b>	958	658	654	4
<b>Καπάκι</b>	958	658	1000	4

Πίνακας 3.2 Διαστάσεις βασικού κορμού και καπακιού της κατασκευής.



Σχήμα 3.3 Ο βασικός σκελετός του δωματίου πριν τη βαφή



Σχήμα 3.4 Το καπάκι του σκελετού μετά τη βαφή

Για την καλύτερη στήριξη και ευθυγράμμιση ολόκληρης της κατασκευής, χρησιμοποιήθηκαν στην κάτω πλευρά του, τέσσερα στηρίγματα (ένα σε κάθε γωνία), ρυθμιζόμενου ύψους. Τελικά, το δωμάτιο τοποθετήθηκε -με τα στηρίγματα αυτά- σε ύψος 19.6cm από το δάπεδο του εργαστηρίου.

Η τελική διάταξη του μεταλλικού σκελετού φαίνεται στο Σχήμα 3.5



Σχήμα 3.5- Σκελετός κατασκευής

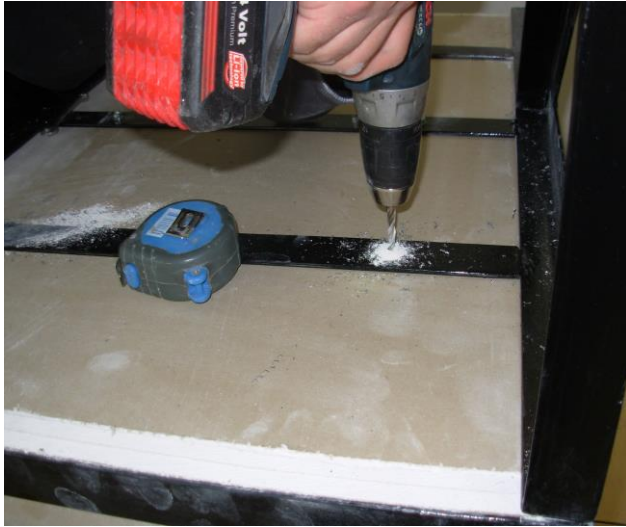
### 3.1.2 Τοιχώματα

Για τα πλαινά τοιχώματα, την οροφή και το δάπεδο, χρησιμοποιήθηκαν δύο στρώσεις πυράντοχης γυψοσανίδας πάχους 12.5mm η κάθεμία, εσωτερικά του σκελετού. Η τοποθέτησή τους έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να μην υπάρχουν ορατά μέρη του σκελετού από την εσωτερική πλευρά του δωματίου. Η ορατότητα του σκελετού στο εσωτερικό της κατασκευής θα είχε αρνητικό αντίκτυπο στις μετρήσεις, μεταβάλλοντας άρδην την ακτινοβολία εντός του δωματίου. Για το λόγο αυτό, τοποθετήθηκαν πρώτα οι γυψοσανίδες του δαπέδου και στη συνέχεια αυτές των πλαινών τοιχωμάτων με “συρταρωτό” τρόπο όπως δείχνει το σχήμα 3.7. Τέλος, οι γυψοσανίδες της οροφής βιδώθηκαν στην κάτω πλευρά του καπακιού, ώστε οι ακμές τους να εφάπτονται στις εσωτερικές πλευρές των πλαινών γυψοσανίδων. Με το βιδώμα αυτό, αποφεύγεται το ενδεχόμενο κατάρρευσής τους λόγω του βάρους τους. Τα βιδώματα αυτά έγιναν πάνω σε τρεις λάμες 40mm πλάτους επί 4mm πάχους, οι οποίες συγκολλήθηκαν κατά μήκος του καπακιού, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.6. Σε κάθε περίπτωση το άνοιγμα της διάταξης έγινε στο νότιο τοίχο του δωματίου.

Ο Πίνακας 3.3 δείχνει τις διαστάσεις των γυψοσανίδων που χρησιμοποιήθηκαν.

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

Πίνακας 3.3 Διαστάσεις γυψοσανίδων της κατασκευής.



**Σχήμα 3.6** Στερέωση γυψοσανίδων οροφής με βίδες πάνω στις λάμες του καπακιού



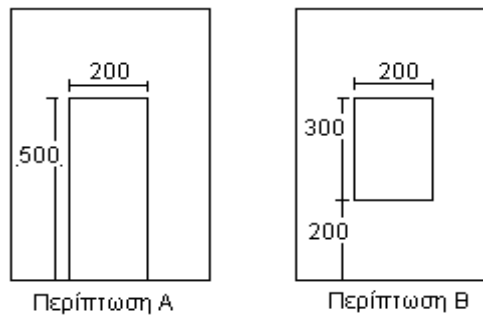
**Σχήμα 3.7** Εσωτερικό του δωματίου, μετά την τοποθέτηση των πλαινών και του δαπέδου γυψοσανίδων

### 3.1.3 Γεωμετρία Ανοίγματος

Αντικείμενο μελέτης της εργασίας αυτής αποτέλεσε η μελέτη της επίδρασης του αερισμού στην εξέλιξη της φωτιάς σε δωμάτιο 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 3.4 και τη διάταξη του ανοίγματος στο Σχήμα 3.8.

	Πλάτος (mm)	Ύψος (mm)
<b>Περίπτωση Α: Πόρτα</b>	200	500
<b>Περίπτωση Β: Παράθυρο</b>	200	300

**Πίνακας 3.4** Διαστάσεις ανοίγματος.



**Σχήμα 3.8** Γεωμετρία ανοίγματος στα πειράματα

Από τη σχέση (1.19), υπολογίζεται ο παράγοντας αερισμού σε κάθε περίπτωση

- Περίπτωση Α: Πόρτα  

$$A_v \sqrt{H_v} = 0.2 \times 0.5 \sqrt{0.5} = 0.0707$$

- Περίπτωση Β: Παράθυρο  

$$A_v \sqrt{H_v} = 0.2 \times 0.3 \sqrt{0.3} = 0.0329$$

### 3.1.4 Πρόσοψη

Στο δωμάτιο προστέθηκε πρόσοψη από πυράντοχη γυψοσανίδα πάχους 12.5mm, με διαστάσεις 0.658m πλάτος επί 1.8m ύψος, η οποία τοποθετήθηκε εξωτερικά της πλευράς του ανοίγματος (νότιας πλευράς) και φαίνεται στα Σχήματα 3.9-3.10.

Η πρόσοψη βιδώθηκε πάνω στο καπάκι του σκελετού και στα στηρίγματα της κατασκευής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.11.



**Σχήμα 3.9** Εμπρόσθια όψη της πρόσοψης πάνω στην κατασκευή



**Σχήμα 3.10** Πλάγια όψη της κατασκευής



**Σχήμα 3.11** Φωτογραφία στηρίγματος κατασκευής και βίδωμα πρόσοψης σε αυτό



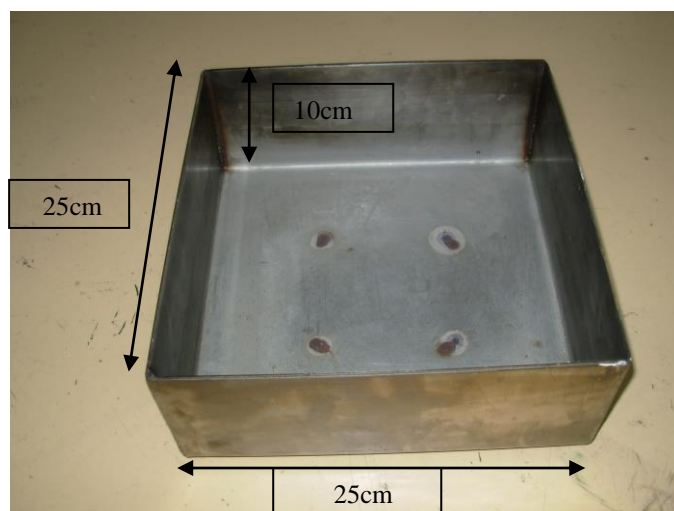
### 3.1.5 Καύσιμο – Δοχείο Καυσίμου

Στα πειράματα που έγιναν, 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 3.5 που ακολουθεί.

Χημικός τύπος	$C_6H_{14}$
Σημείο βρασμού	69°C (342,2°K)
Πυκνότητα	654,8 kg/m <sup>3</sup>
Θερμογόνος ικανότητα	44732 kJ/kg
Θερμότητα αεριοποίησης	433 kJ/kg

Πίνακας 3.5 Θερμοχημικές ιδιότητες εξανίου.

Η τοποθέτηση του υγρού καυσίμου έγινε σε δοχείο (pan) τετραγωνικού σχήματος (Σχήμα 3.12), με διαστάσεις 25x25(cm) και βάθους 10cm. Το δοχείο κατασκευάστηκε από χάλυβα, ενώ τα τοιχώματά του ήταν πάχους 3mm.



Σχήμα 3.12 Το δοχείο που χρησιμοποιήθηκε

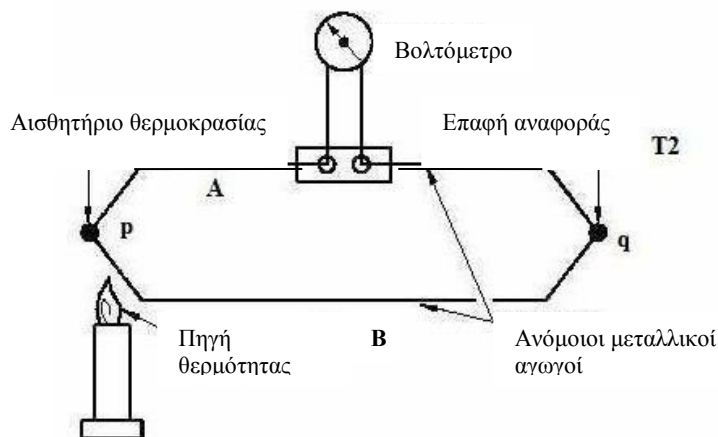
## 3.2 Μετρητικές διατάξεις

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.

### 3.2.1 Θερμοστοιχεία

Τα θερμοστοιχεία αποτελούν τη βασική μετρητική συσκευή για τη μέτρηση θερμοκρασίας. Ο τρόπος λειτουργίας τους βασίζεται στο φαινόμενο Σίμπек (Seebeck effect, κατά τον Εσθονό φυσικό Τόμας Σίμπεκ) ή αλλιώς θερμοηλεκτρισμός. Κατά το φαινόμενο αυτό, υπάρχει μετατροπή της θερμότητας σε ηλεκτρισμό, λόγω της εμφάνισης διαφοράς δυναμικού σε

μεταλλικό δείγμα που οφείλεται στη θερμοκρασιακή διαφορά των δύο άκρων του (Σχήμα 3.13). Ένα θερμοστοιχείο αποτελείται από δύο μεταλλικούς αγωγούς κατασκευασμένους από διαφορετικά μέταλλα, οι οποίοι στις άκρες τους έρχονται σε επαφή. Η μια από τις δύο επαφές των δύο υλικών διατηρείται σε μία γνωστή θερμοκρασία αναφοράς ( $0^{\circ}\text{C}$ ), ενώ η άλλη χρησιμοποιείται για τη μέτρηση μιας εξωτερικής θερμοκρασίας. Μόλις τα μέταλλα αυτά θερμανθούν, παρατηρείται κίνηση των ηλεκτρονίων της θερμής περιοχής προς την ψυχρή περιοχή των μετάλλων, γεγονός που αποφέρει παραγωγή ηλεκτρικής τάσης (διαφορά δυναμικού) στα άκρα τους. Το μέγεθος της παραγόμενης ηλεκτρικής τάσης εξαρτάται από τη διαφορά της θερμοκρασίας του σημείου επαφής, το οποίο χρησιμοποιείται ως αισθητήριο θερμοκρασίας (measuring junction), με άλλο σημείο του κυκλώματος. Για τη διατήρηση της επαφής αναφοράς (reference junction) στη σταθερή θερμοκρασία των  $0^{\circ}\text{C}$  χρησιμοποιούνται διάφορες ηλεκτρονικές και φυσικές μέθοδοι [Kasap, 2004].



#### Αρχή λειτουργίας θερμοστοιχείου

Σχήμα 3.13 Αρχή λειτουργίας ενός θερμοστοιχείου.

Υπάρχουν πολλά θερμοστοιχεία, ανάλογα με τα υλικά κατασκευής τους και η επιλογή τους σε κάθε περίπτωση διαφέρει ανάλογα το εύρος θερμοκρασιών που μετράται και την ευαισθησία. Διάφοροι τύποι είναι οι K, J, N, E, B, R, S κ.α.

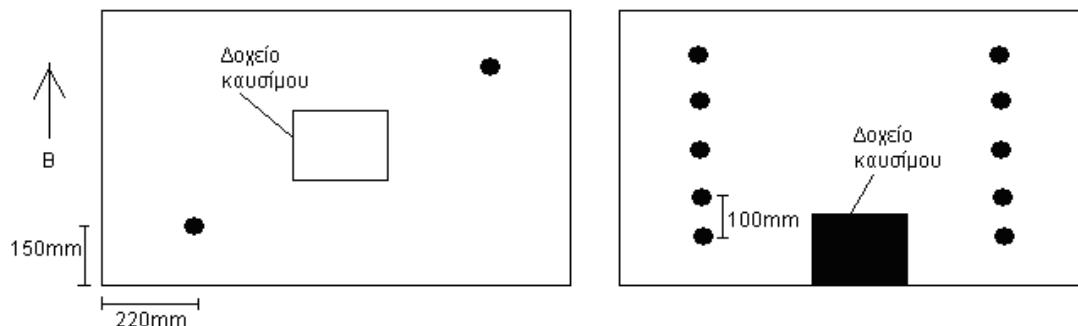
#### 3.2.1.1 Στήριξη-Μετρήσεις Θερμοστοιχείων

Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν μη-γειωμένα θερμοστοιχεία τύπου K, διαμέτρου 1.59mm ( $=0,062\text{in.}$ ), όπου το υλικό κατασκευής τους είναι 90% Ni – 10% Cr για το θετικό πόλο, ενώ για τον αρνητικό 95% Ni – 2% Al – 2% Mn. Το ανώτερο όριο θερμοκρασίας που μπορούν να λειτουργήσουν είναι  $1038^{\circ}\text{C}$  ( $=1900^{\circ}\text{F}$ ), ενώ χρησιμοποιήθηκαν θερμοστοιχεία με δύο διαφορετικά μήκη, 450mm και 150mm (18in και 6in).



Σχήμα 3.14 Θερμοστοιχείο τύπου K που χρησιμοποιήθηκε

Τα θερμοστοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στο εσωτερικό της κατασκευής (σχήμα 3.14) ήταν μήκους 150mm, και τοποθετήθηκαν στη βόρειοδυτική και νότιοανατολική γωνία του δωματίου (Σχήμα 3.15). Η στερέωσή τους έγινε πάνω στη γυψοσανίδα, όπως φαίνεται στα Σχήματα 3.16-3.17, η οποία τρυπήθηκε στα επιθυμητά σημεία. Σε κάθε γωνία τοποθετήθηκαν θερμοστοιχεία καθ' ύψος, ανά 10cm από το δάπεδο του δωματίου και σε αποστάσεις 22.5cm από τη βόρεια-15cm από τη δυτική και 22.5cm από τη νότια-15cm από την ανατολική πλευρά του δωματίου αντίστοιχα.



**Σχήμα 3.15** Κάτοψη και πλάγια όψη του δωματίου



**Σχήμα 3.16** Τα θερμοστοιχεία στο εσωτερικό του δωματίου



**Σχήμα 3.17** Καλώδια θερμοστοιχείων στην εξωτερική πλευρά

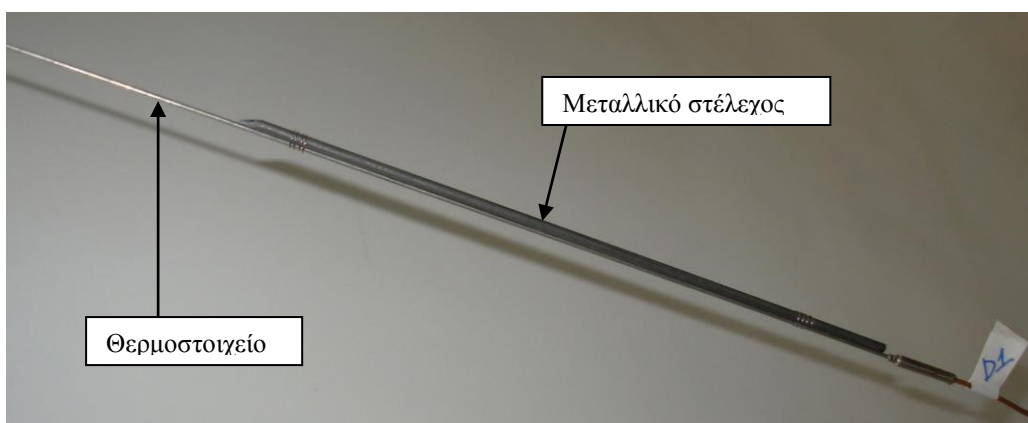
Στην πρόσοψη και στο άνοιγμα, χρησιμοποιήθηκαν θερμοστοιχεία των 450mm καθώς και των 150mm. Στην πρόσοψη, σε σημεία της μεσοκαθέτου του ανοίγματος μπήκαν μεγάλου μήκους (450mm), και τα μικρού μήκους (150mm) στο  $\frac{1}{4}$  του πλάτους της πρόσοψης (σε απόσταση 1645mm από την άκρη), όπως φαίνονται στο Σχήμα 3.18. Τα ύψη στα οποία στερεώθηκαν δεν ήταν τα ίδια σε κάθε πείραμα και οι ακριβείς τους θέσεις αναγράφονται στο Παράρτημα. Η επιλογή να μην μπουν θερμοστοιχεία και στις δύο πλευρές της μεσοκαθέτου, έγκειται στη θεώρηση πως οι θερμοκρασίες στην πρόσοψη αναπτύσσονται με συμμετρικό τρόπο.

Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας στο άνοιγμα, τοποθετήθηκαν θερμοστοιχεία στο μέσο του και σε αποστάσεις 100, 200, 300, 400mm καθ' ύψος από το δάπεδο του δωματίου. Σε απόσταση 100 και 200mm τοποθετήθηκαν δύο θερμοστοιχεία μήκους 150mm και σε απόσταση 300 και 400mm από το δάπεδο δύο θερμοστοιχεία μήκους 450mm. Για τη στερέωσή τους βιδώθηκαν πάνω στο σκελετό, σε κάθε πλευρά της πρόσοψης, δύο στήλες τύπου 'ντέξιον' (dexion), πάνω στις οποίες τοποθετήθηκαν τα θερμοστοιχεία. Η στερέωση πάνω στις στήλες αυτού του τύπου φαίνεται στο σχήμα 3.16.



**Σχήμα 3.18** Στήριξη θερμοστοιχείων στην πρόσοψη, πάνω στη στήλη ‘ντέξιον’

Για την αποφυγή παλινδρομικών κινήσεων των θερμοστοιχείων λόγω της έντονα τυρβώδους κίνησης του εξωτερικού πλουμίου της φωτιάς και σταθεροποίησή τους στα επιθυμητά ύψη, όλα τα θερμοστοιχεία στερεώθηκαν πάνω σε μεταλλικά στελέχη διαμέτρου 3mm και μήκους 200mm. Τα στελέχη αυτά με το βάρος τους επιτυγχάνουν τη σταθερότητα των θερμοστοιχείων, ενώ χρησιμεύουν και ως ‘οδηγοί’ για την τοποθέτηση των θερμοστοιχείων σε όποια οριζόντια θέση είναι επιθυμητή, με ολίσθηση προς το σημείο αυτό. Η στήριξη του θερμοστοιχείου επάνω στο μεταλλικό στέλεχος έγινε με ελατήρια διαμέτρου 3mm, 4-5 σπειρωμάτων, τα οποία τοποθετήθηκαν σε δύο σημεία του στελέχους. Το μεταλλικό στέλεχος το οποίο χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στο σχήμα 3.19.



**Σχήμα 3.19** Το μεταλλικό στέλεχος πάνω στο οποίο έχει στηριχτεί με τα ελατήρια το θερμοστοιχείο

Για τη μελέτη των θερμοκρασιών του εξωτερικού πλουμίου της φωτιάς που εξέρχεται του δωματίου μέσω του ανοίγματος χρησιμοποιήθηκαν θερμοστοιχεία τύπου K.

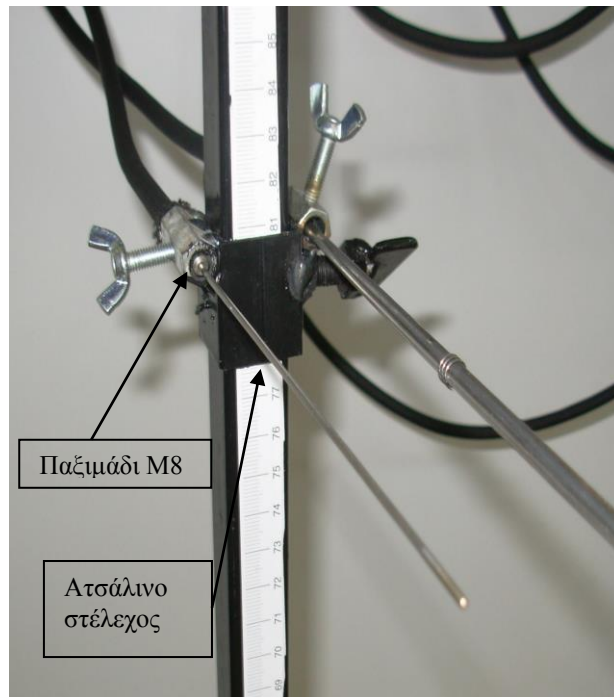
Για την στήριξη των θερμοστοιχείων αυτών, σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν δύο χαλύβδινοι τετραγωνικοί στύλοι, πλευράς 3x3cm, ύψους 1.8m, στους οποίους χαλύβδινα στελέχη (στη λογική των δαχτυλιδιών) πλευράς 4x4cm και ύψους 3cm, συσφίχτηκαν στα επιθυμητά ύψη. Πάνω στα δαχτυλίδια συγκολλήθηκαν παξιμάδια M8 μήκους 30mm, μέσα από τα οποία περάστηκαν τα θερμοστοιχεία. Με τον τρόπο αυτό η στήριξη των θερμοστοιχείων σε οποιαδήποτε ύψος γινόταν με απλή μετακίνηση του στελέχους επάνω στον κάθε στύλο.



Η τοποθέτησή τους έγινε στη μεσοκάθετο του ανοίγματος και στο  $\frac{1}{4}$  του πλάτους της πρόσοψης (όπως εκείνα της πρόσοψης). Η στήριξη στους τετραγωνικούς στύλους φαίνεται στα σχήματα 3.20-3.21 που ακολουθούν.



**Σχήμα 3.20** Φωτογραφία στύλου, όπου φαίνονται τα χαλύβδινα στελέχη στα οποία στηρίζονται τα θερμοστοιχεία



**Σχήμα 3.21** Ατσάλινο στέλεχος με δύο παξιμάδια M8, στα οποία έχουν περαστεί τα θερμοστοιχεία

Οι στύλοι και τα στελέχη που χρησιμοποιήθηκαν βάφτηκαν με μαύρο χρώμα προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η ακτινοβολία από τις επιφάνειές τους, ενώ όλα τα καλώδια των θερμοστοιχείων της πρόσοψης και του ανοίγματος επενδύθηκαν στην εξωτερική τους πλευρά με μονωτικό υλικό και τοποθετήθηκαν πίσω από την πρόσοψη για την καλύτερη δυνατή προστασία από τις υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης, με μονωτικό υλικό επενδύθηκαν και τα καλώδια των θερμοστοιχείων που τοποθετήθηκαν στους στύλους. Στη συνέχεια όλα τα καλώδια προστατεύτηκαν από ένα ξύλινο πλαίσιο το οποίο χώριζε το χώρο διεξαγωγής των πειραμάτων από τις ηλεκτρονικές διατάξεις. Ο τρόπος προστασίας και τοποθέτησης των καλωδίων δίνεται από το σχήμα 3.22.



Σχήμα 3.22 Οι καλωδιώσεις των θερμοστοιχείων τοποθετημένες πίσω από την πρόσοψη

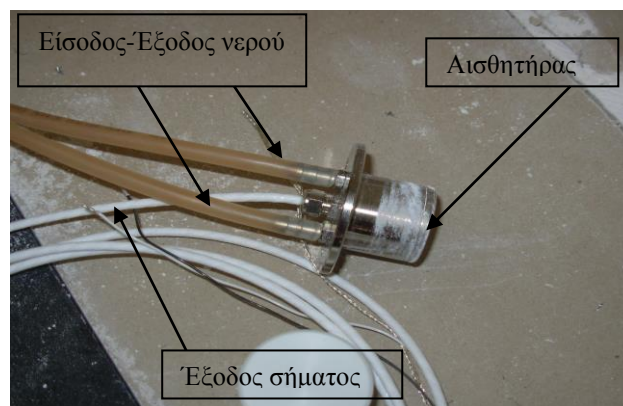
### 3.2.1.2 Σφάλματα θερμοστοιχείων

Τα σφάλματα στις μετρητικές διατάξεις διακρίνονται σε δύο είδη, τα συστηματικά και τα μη συστηματικά. Η μετρούμενη θερμοκρασία από θερμοστοιχεία είναι διαφορετική από την πραγματική λόγω τέτοιων σφαλμάτων που μπορεί να προκύψουν [Nakos, 2004]. Στα πειράματα φωτιάς, όπου χρησιμοποιούνται θερμοστοιχεία για τη μέτρηση θερμοκρασίας στο εσωτερικό και στο εξωτερικό ενός δωματίου, οι παράγοντες που δημιουργούν τα μη συστηματικά σφάλματα είναι η επικάλυψη αισθάλης πάνω στο αισθητήριο, η θερμική αδράνεια του θερμοστοιχείου, καθώς και η ακτινοβολία. Τα συστηματικά σφάλματα προκύπτουν κυρίως από σφάλματα κατά τη βαθμονόμηση, σφάλματα που οφείλονται στα καλώδια και στις προεκτάσεις αυτών και σφάλματα από τη σύνδεση των καλωδίων με συστήματα συλλογής δεδομένων [Nakos, 2004]. Επίσης, συστηματικό σφάλμα προκαλεί η μετακίνηση των θερμοστοιχείων το οποίο οδηγεί σε αλλαγή θέσης του αισθητήρα τους [Nakos, 2004]. Τα θερμοστοιχεία τύπου K, με τα καλώδια τους τα οποία χρησιμοποιήθηκαν, έχουν συστηματικό σφάλμα βαθμονόμησης που ανέρχεται στο  $\pm 2.2$  °C, ή  $\pm 0.75\%$  [Omega engineering, 2000] για μετρήσεις θερμοκρασίας άνω των 0 °C. Σε κάθε περίπτωση, επιλέγεται εκείνο από το οποίο προκύπτει η μεγαλύτερη κατά απόλυτο τιμή. Επίσης, για τη μείωση ενδεχόμενου λάθους κατά τη βαθμονόμηση των θερμοστοιχείων χρησιμοποιήθηκαν καινούργια καλώδια και προεκτάσεις, ώστε να μην έχουν φθαρεί από προηγούμενη χρήση. Συστηματικό σφάλμα το οποίο επίσης οφείλεται στα καλώδια των θερμοστοιχείων επιφέρει χρονική υστέρηση στη λήψη της μέτρησης [Nakos, 2004]. Συστηματικά σφάλματα οφείλονται και στα συστήματα συλλογής δεδομένων. Από τους κατασκευαστές των συστημάτων συλλογής δεδομένων, δίνονται τιμές για συστηματικά σφάλματα που οφείλονται στο 'θερμικό θόρυβο'. Ο 'θερμικός θόρυβος' σε ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές οφείλεται στην κίνηση των φορέων του ηλεκτρικού φορτίου μέσα στο ηλεκτρικό κύκλωμα. Πέραν του θερμικού θορύβου τα κυκλώματα εμφανίζουν θόρυβο από επαγωγή που προκαλούν σε αυτά οι ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές από το περιβάλλον, λόγω της διακριτότητας του φορτίου των φορέων σε ρεύματα χαμηλής έντασης καθώς και άλλους τύπους θορύβου (αυξανόμενες συχνότητες, τυχαίες μικροδιακυμάνσεις) που παράγονται ενδογενώς στο κύκλωμα λόγω των χαρακτηριστικών των στοιχείων του. Οι τιμές των

σφαλμάτων λόγω θορύβου είναι 0.0015% επί της τιμής και 0.0004% επί του εύρους των τιμών [Agilent 34970A/34972A, 2012], [NI cDAQ-9172, 2008].

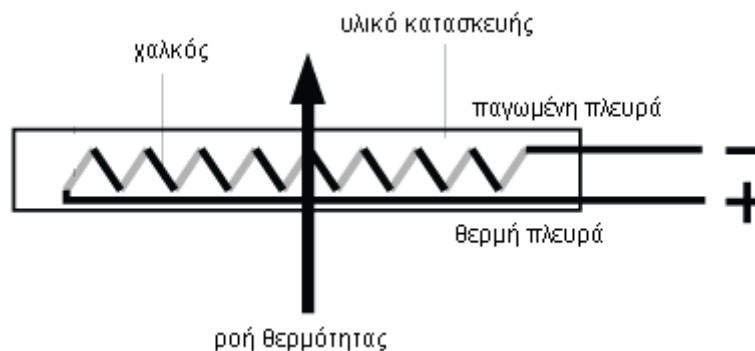
### 3.2.2 Μετρητής ροής θερμότητας

Ένας μετρητής ροής θερμότητας είναι μετρητική συσκευή με την οποία δίνεται η δυνατότητα μέτρησης της ροής θερμότητας από το περιβάλλον στο σημείο που είναι τοποθετημένη η συσκευή, ενώ υπό φυσιολογικές συνθήκες, το οπτικό πεδίο ενός τέτοιου μετρητή είναι 180°. Για τη μελέτη της ροής θερμότητας της φωτιάς στις πειραματικές δοκιμές, χρησιμοποιήθηκε ένας υδρόψυκτος μετρητής ροής θερμότητας (water-cooled heat flux sensor), ο οποίος είναι κατασκευασμένος για μετρήσεις σε περιβάλλον υψηλών θερμοκρασιών και τοποθετήθηκε στη μεσοκάθετο της πρόσοψης, στα 20cm πάνω από το άνοιγμα. Ο μετρητής αυτός φαίνεται στο σχήμα 3.23.



Σχήμα 3.23 Ο υδρόψυκτος μετρητής ροής θερμότητας

Ο αισθητήρας αποτελείται από μια θερμοστήλη, η οποία ουσιαστικά είναι θερμοστοιχεία τοποθετημένα σε σειρά. Με τη θερμοστήλη αυτή μετράται η διαφορά θερμοκρασίας μέσα σε ένα πλαστικό σώμα το οποίο βρίσκεται μέσα στη συσκευή. Με τον τρόπο αυτό, δημιουργείται μικρή διαφορά δυναμικού (τάση) ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας η οποία αναγκάζει τη ροή θερμότητας κινείται δια μέσω αυτού (Σχήμα 3.24). Η ροή θερμότητας είναι ανάλογη της θερμοκρασιακής διαφοράς, διαιρεμένης με τη θερμική αγωγιμότητα του αισθητήρα, ενώ το σήμα το οποίο παράγει ο μετρητής είναι σε  $\text{Watt/m}^2$ .



Σχήμα 3.24 Χαρακτηριστικά ενός μετρητή ροής θερμότητας

$$(\text{Ροή θερμότητας}) = (\text{Διαφορά δυναμικού}) / (\text{Θερμική αγωγιμότητα αισθητήρα})$$

Η θερμική αγωγιμότητα του αισθητήρα είναι μια σταθερά η οποία υπολογίζεται με πειραματικές μεθόδους στο εργαστήριο παρασκευής της συσκευής και επισυνάπτεται με τη

συσκευή κατά την παραγγελία της. Ο αισθητήρας που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα είναι κατασκευασμένος ώστε να μετράει ροή θερμότητας έως 200 kW/m<sup>2</sup>.

Όπως αναφέρθηκε, ο μετρητής που χρησιμοποιήθηκε ήταν υδρόψυκτος, οπότε σε φυσιολογικές εφαρμογές μελέτης φωτιάς απαιτείται η σύνδεσή του με παροχή νερού 3 bars. Ο αισθητήρας διαμέτρου 25.4mm (που χρησιμοποιήθηκε) χρειάζεται παροχή νερού 30 λίτρα/ώρα (l/hr) ώστε να απομακρύνει τη θερμότητα που παράγεται με αύξηση θερμοκρασίας μικρότερης των 10°C. Για το λόγο αυτό η σύνδεσή και ο έλεγχός του γινόταν με παροχόμετρο συνδεδεμένο στο κεντρικό δίκτυο ύδρευσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.25. Παράλληλα, ο έλεγχος της θερμοκρασίας του νερού της εξόδου από τη συσκευή πραγματοποιούνταν με θερμοστοιχείο συνδεδεμένο με βολτόμετρο. Η μέτρηση της θερμοκρασίας γινόταν με το θερμοστοιχείο να είναι βυθισμένο σε μικρό γυάλινο δοχείο στο οποίο κατέληγε το νερό που κυκλοφορούσε στο μετρητή, με σωληνάκι εσωτερικής διαμέτρου 3mm, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.26.



Σχήμα 3.25 Η παροχή νερού του μετρητή ροής θερμότητας με το παροχόμετρο.



Σχήμα 3.26 Έλεγχος της θερμοκρασίας του νερού εξόδου με θερμοστοιχείο βυθισμένο σε δοχείο.

### 3.2.2.1 Σφάλματα μετρητή ροής θερμότητας

Στο μετρητή ροής θερμότητας η ακρίβεια βαθμονόμησης είναι +/- 3%. Επιπροσθέτως, εκτός από αυτό το σφάλμα, υπάρχουν και κάποια που οφείλονται στη μη-γραμμικότητα, τη συναγωγή και την ακτινοβολία.

Κατά τη μέτρηση, ο αισθητήρας δημιουργεί τάση η οποία είναι γραμμική ως προς τη ροή θερμότητας, κάτι το οποίο δεν είναι αληθές. Η απόκλιση αυτή από την ιδανική συμπεριφορά, αποτυπώνεται στο **σφάλμα μη-γραμμικότητας**. Το σφάλμα αυτό εκφράζεται ως ποσοστό επί της πλήρους κλίμακας ροής θερμότητας που χρησιμοποιήθηκε κατά τη βαθμονόμηση στο εργοστάσιο παρασκευής και μπορεί να είναι αρκετά μεγάλο. Γι αυτό το λόγο θα πρέπει αν είναι δυνατόν να χρησιμοποιείται τέτοιος αισθητήρας σε επίπεδα όπου η ροή θερμότητας να είναι υψηλότερα από το 50% της πλήρους κλίμακας ροής θερμότητας. Οπότε το σφάλμα μη-γραμμικότητας υπολογίζεται ως εξής

$$\text{(Μη-γραμμικότητα)} = \frac{\text{(Σφάλμα μέτρησης)}}{\text{(Πλήρους κλίμακας ροή θερμότητας)}}$$

$$\text{με } \text{(Σφάλμα μέτρησης)} = \text{(Πραγματική τιμή)} - \text{(Τιμή μέτρησης)}$$

Θα πρέπει να σημειωθεί πως για μεγάλες τιμές ροής θερμότητας, το σφάλμα είναι αρκετά μικρότερο σε σχέση με τη λειτουργία σε χαμηλές τιμές ροής θερμότητας. Για παράδειγμα, σε

μια τιμή των 200 kW/ m<sup>2</sup>, ένα +/-2% δίνει σφάλμα +/- 4 kW/ m<sup>2</sup>, ενώ στις περιπτώσεις των πειραμάτων όπου καταγράφηκαν τιμές χαμηλότερες των 100 kW/ m<sup>2</sup>, το σφάλμα κυμαίνεται σε λίγο χαμηλότερα επίπεδα από το +/- 20%.

Σε τέτοιους μετρητές ροής θερμότητας, όπως αναφέρθηκε, δημιουργούνται επίσης σφάλματα από τη συναγωγή και την ακτινοβολία.

Λόγω συναγωγής δημιουργούνται δύο σφάλματα. Το πρώτο είναι το **σφάλμα συναγωγής** το οποίο οφείλεται στη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ αέρα-αισθητήρα και δημιουργεί επίδραση στην τιμή της ροής θερμότητας, ενώ το δεύτερο είναι το **σφάλμα ευαισθησίας**, όπου ο τοπικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας κυμαίνεται ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου.

Επειδή η βαθμονόμηση γίνεται βάσει ακτινοβολίας, η μέτρηση ενός μετρητή ροής θερμότητας αφορά την εξισορρόπηση **ακτινοβολίας**, κατά την οποία η ροή θερμότητας όπως μετρήθηκε από τον αισθητήρα (σε kW/ m<sup>2</sup>) είναι η διαφορά της ροής θερμότητας που δημιουργείται μείον τη ροή θερμότητας που εκπέμπεται (σε kW/ m<sup>2</sup> επίσης).

Και οι δύο αυτές ροές θερμότητας είναι ανάλογες της σταθεράς Boltzmann, με την πρώτη να είναι ανάλογη της θερμοκρασίας του αισθητήρα και τη δεύτερη ανάλογη της θερμοκρασίας της πηγής της ακτινοβολίας. Η ροή που εκπέμπεται στους 20°C είναι 0.420 kW/ m<sup>2</sup>, οπότε κατά τη βαθμονόμηση όπου οι θερμοκρασίες είναι άνω των 800°C η συνεισφορά αυτή θεωρείται αμελητέα και θεωρείται 0.6%.

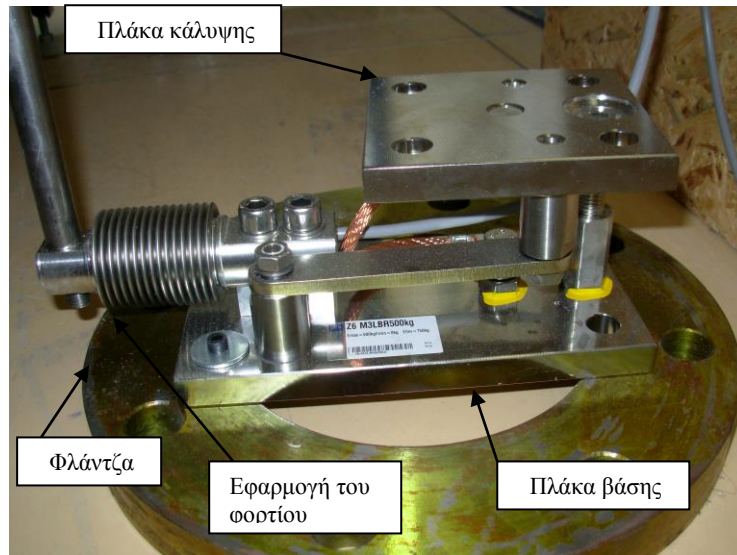
### 3.2.3 Δυναμοκυψέλη

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.

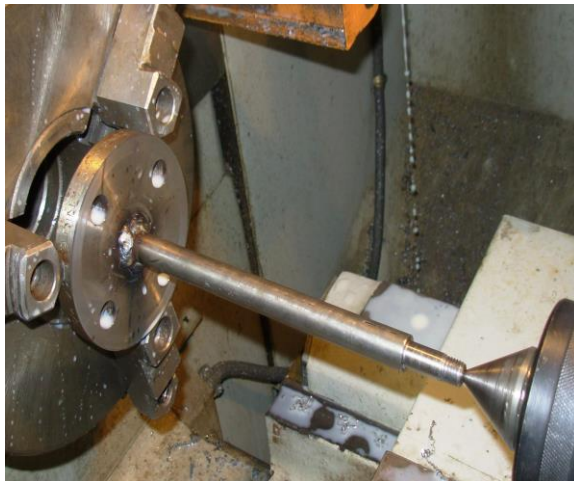
Η δυναμοκυψέλη που χρησιμοποιήθηκε, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.27, έχει μέγιστη ικανότητα μέτρησης φορτίου τα 500kg, ενώ αποτελείται από την πλάκα βάσης, τα διάφορα στοιχεία εφαρμογής του φορτίου, την πλάκα κάλυψης καθώς και το καλώδιο (γειωμένο) για τη σύνδεση με άλλη συσκευή. Η τοποθέτησή της έγινε σε φλάντζα του εργαστηρίου με βίδες. Οι πλάκες είναι φτιαγμένες από ενισχυμένο ατσάλι ενώ το καλώδιο από PVC. Η εφαρμογή του φορτίου είναι απαραίτητο να γίνεται με άσκηση κάθετης δύναμης στο σημείο εφαρμογής της δυναμοκυψέλης.

Επειδή είναι απαραίτητο η δύναμη να ασκείται κάθετα στο σημείο μέτρησης, κατασκευάστηκε στο εργαστήριο ατσάλινη δοκός διαμέτρου 15mm και αρχικού μήκους 228mm όπου στη μια άκρη είχε στρογγυλή βάση διαμέτρου 120mm και στην άλλη άκρη σπείρωμα διαμέτρου 11mm. Ο σκοπός αυτής της κατασκευής είναι η τοποθέτηση του δοχείου με το καύσιμο επάνω στη βάση της δοκού, ενώ με το σπείρωμα που δημιουργήθηκε ασφαλίζεται η δοκός στο σημείο επαφής και μέτρησης του φορτίου. Η δοκός καθώς και ο τρόπος στήριξής της απεικονίζονται στα Σχήματα 3.28-3.29.

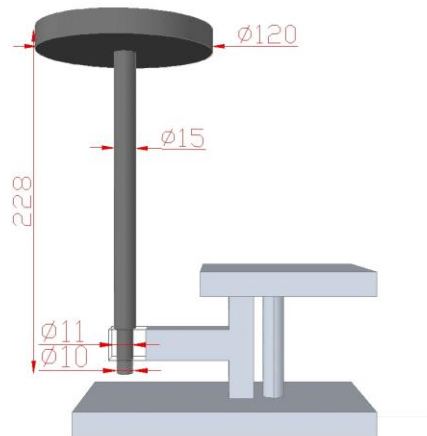




Σχήμα 3.27 Η δυναμοκυψέλη τοποθετημένη σε φλάντζα.



Σχήμα 3.28 Δημιουργία δοκού στον τόρνο του εργαστηρίου



Σχήμα 3.29 Διαστάσεις και τρόπος εφαρμογής δοκού στη δυναμοκυψέλη

Στη συνέχεια, δίνονται στον Πίνακα 3.6 οι βασικότερες προδιαγραφές της δυναμοκυψέλης.

Μέγιστο βάρος (kg)	500
Ονομαστική ευαισθησία (mV/V)	2
Ελάχιστη διακριτική ικανότητα (% της ονομαστικής ευαισθησίας)	0.0090
Ανοχή ευαισθησίας (%)	<+/-0.05
Σφάλμα υστέρησης (%)	<+/- 0.012
Σφάλμα μη-γραμμικότητας (%)	<+/- 0.012
Ερπυσμός σε 30 λεπτά (%)	<+/- 0.01
Τάση αναφοράς (V)	5
Εύρος τάσης διέγερσης (V)	0.5 ... 12

Πίνακας 3.6 Προδιαγραφές δυναμοκυψέλης

### 3.2.3.1 Ψηφιακός δείκτης φορτίου

Η δυναμοκυψέλη συνδέθηκε μέσω σύνδεσης RS-232 με ψηφιακό δείκτη για την άμεση και ψηφιακή απεικόνιση του βάρους. Η συσκευή αυτή δίνει τη δυνατότητα ελέγχου των παραμέτρων λειτουργίας της δυναμοκυψέλης, ενώ γίνεται δυνατή η καταγραφή και αποθήκευση των ενδείξεων του φορτίου. Μέσω ενός συνοδευτικού προγράμματος δίνεται η δυνατότητα ελέγχου και διαχείρισης της δυναμοκυψέλης στο χρήστη μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή. Μέσω του προγράμματος αυτού, ορίστηκε ως μονάδα μέτρησης το κιλό (kg), ενώ ως διακριτική ικανότητα τα 0.05 kg. Φυσικά, προτού ξεκινήσουν τα πειράματα, έγινε βαθμονόμηση της δυναμοκυψέλης με βάση πρότυπα βάρη. Η καταγραφή τιμών ορίστηκε να γίνεται ανά δύο δευτερόλεπτα (2 sec.) μέσω του προγράμματος LabVIEW. Ο ψηφιακός δείκτης που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στο σχήμα 3.30 που ακολουθεί.



Σχήμα 3.30 Ο ψηφιακός δείκτης, συνδεδεμένος με τη δυναμοκυψέλη

### 3.2.4 Σύστημα συλλογής δεδομένων

Για την καταγραφή και αποθήκευση των πειραματικών δεδομένων από τις μετρητικές συσκευές χρησιμοποιήθηκαν δύο *Συστήματα συλλογής δεδομένων (Data Acquisition Systems)*. Οι συσκευές αυτές δέχονται ως είσοδο την τάση που δημιουργείται στις συσκευές μέτρησης και παράγουν ως αποτέλεσμα τη μέτρηση σε επιθυμητές μονάδες. Τα θερμοστοιχεία παράγουν σήμα τάσης, το οποίο επιλέχθηκε να μετατρέπεται σε θερμοκρασία (μετρούμενη σε βαθμούς Κελσίου), ενώ ο μετρητής ροής θερμότητας παράγει σήμα τάσης το οποίο και χρησιμοποιείται απευθείας.

Το ένα σύστημα που χρησιμοποιήθηκε είναι σύστημα συλλογής δεδομένων *NI cDAQ-9172*, το οποίο είναι της National Instruments και φαίνεται στο σχήμα 3.31. Στο σύστημα αυτό είναι συνδεδεμένη μια κάρτα με 18 κανάλια (channels) για την είσοδο σημάτων (signals) από συσκευές μέτρησης όπως θερμοστοιχεία, δυναμοκυψέλες κ.α. Στο σύστημα αυτό υπάρχει δυνατότητα να συνδεθούν μέχρι οκτώ κάρτες. Το σύστημα της National Instruments συνδέθηκε μέσω θύρας USB με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή και χρησιμοποιήθηκε αντίστοιχο λογισμικό της εταιρείας για τον έλεγχο, τη δημιουργία, τη διαχείριση και φυσικά, τη δυνατότητα ορισμού βασικών παραμέτρων των καναλιών που χρησιμοποιούνται (όπως το εύρος μέτρησης, οι μονάδες μέτρησης κ.α).

Το δεύτερο σύστημα συλλογής δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε είναι το *Agilent 34972A* της εταιρείας Agilent Technologies όπως φαίνεται στο σχήμα 3.32. Σε αυτό εφαρμόζονται μέχρι τρεις κάρτες, οι οποίες δέχονται σήμα (signal) για καθένα από τα 20 κανάλια (channels) τα οποία διαθέτουν. Στα πειράματα, χρησιμοποιήθηκαν δύο κάρτες, με το σύνολο των 40 καναλιών τους να συμπληρώνονται από θερμοστοιχεία. Από την εταιρεία δίνεται το απαραίτητο λογισμικό για τη διαχείριση και τον ορισμό βασικών παραμέτρων των καναλιών

(όπως το εύρος μέτρησης, οι μονάδες μέτρησης κ.α), ενώ η σύνδεση του Agilent με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή έγινε μέσω θύρας USB.



Σχήμα 3.31 Το NI DAQ που χρησιμοποιήθηκε

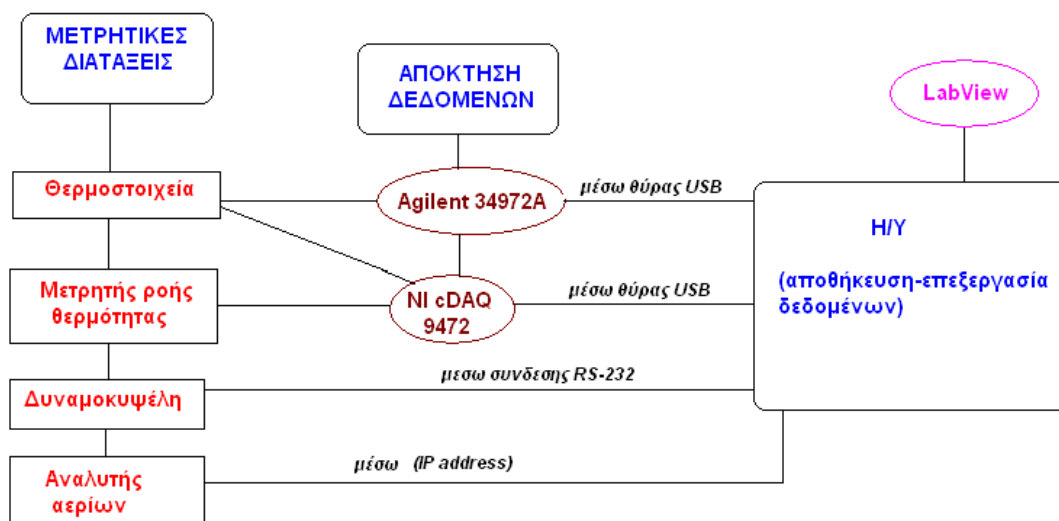


Σχήμα 3.32 Το Agilent που χρησιμοποιήθηκε

Η συλλογή των τιμών από τα δύο συστήματα συλλογής δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν γινόταν κάθε δύο δευτερόλεπτα (2 sec.), ώστε να υπάρχει αρκετός χρόνος για τη συλλογή δεδομένων από όλα τα συνδεδεμένα κανάλια και να μη χάνονται οι μετρήσεις. Ο απαιτούμενος αυτός κύκλος για τη συλλογή τιμών βρέθηκε κατόπιν δοκιμών.

### 3.2.5 Λογισμικό LabVIEW

Ο ηλεκτρονικός υπολογιστής του εργαστηρίου είχε ως λειτουργικό σύστημα τα Windows XP Professional. Για την αποθήκευση, επεξεργασία και παρουσίαση των τιμών από τις κάρτες συλλογής δεδομένων των δυο συστημάτων που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και από τη σειριακή θύρα (σύνδεση RS-232) του ηλεκτρονικού υπολογιστή χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό *LabVIEW*. Στο σχήμα 3.33 δίνεται μια σχηματική απεικόνιση της σύνδεσης όλων των μετρητικών διατάξεων.



Σχήμα 3.33 Απεικόνιση μετρητικών διατάξεων και σύνδεσή τους μέσω LabVIEW με τον Η/Υ.

Το πρόγραμμα LabVIEW είναι ένα περιβάλλον προγραμματισμού στο οποίο χρησιμοποιείται η γλώσσα προγραμματισμού G, η οποία είναι γλώσσα γραφικού σχεδιασμού. Αυτή είναι και η μεγάλη διαφορά με γλώσσες κειμένου όπως η C, η C++ κ.α. Έτσι, με το LabVIEW, δημιουργείται πρόγραμμα το οποίο έχει τη μορφή διαγράμματος.



Το LabVIEW περιέχει βιβλιοθήκες με υπορουτίνες για κάθε είδους πρόγραμμα. Οι βιβλιοθήκες αυτές περιέχουν εργαλεία και υπορουτίνες για συλλογή δεδομένων, επεξεργασία, αποθήκευση, αλλά και τρόπο παρουσίασης σε πραγματικό χρόνο (real time).

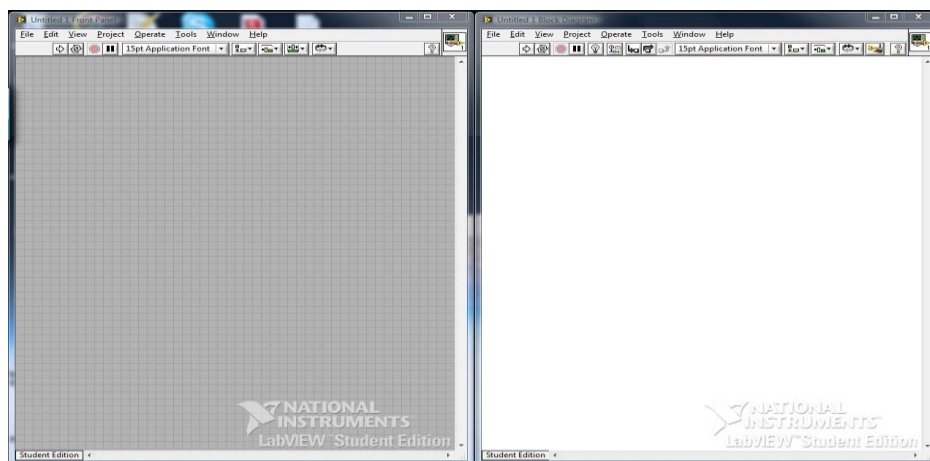
Για την ανάπτυξη οποιουδήποτε προγράμματος γενικού σκοπού χρειάζεται χρησιμοποιούνται πολλά προγραμματιστικά εργαλεία. Ένα από αυτά, ιδιαίτερης σημασίας είναι η οπτικοποίηση της εκτέλεσης του προγράμματος, ώστε να φαίνεται ο τρόπος κίνησης και επεξεργασίας των δεδομένων κατά την εκτέλεση του προγράμματος, ενώ υπάρχει και εργαλείο ένδειξης του σημείου στο οποίο έχει γίνει λάθος κατά την συγγραφή του προγράμματος (debugging tools). Σημαντικό επίσης εργαλείο είναι η δυνατότητα εκτέλεσης του προγράμματος σε διάφορα βήματα, κάτι που χρησιμοποιείται συχνά σε πολλές εφαρμογές.

Βασικό στοιχείο του προγράμματος είναι τα VIs (virtual instrument), τα οποία εκτελούνται από τον πίνακα ελέγχου (front panel) και από το διάγραμμα ροής δεδομένων (block diagram) (Σχήμα 3.34). Μέσω αυτών ο χρήστης έχει τη δυνατότητα επικοινωνίας με το πρόγραμμα και τις λειτουργίες του. Με τον πίνακα ελέγχου ο χρήστης μπορεί να αλλάξει λειτουργίες και να έχει οπτικοποίηση των δεδομένων του, ενώ το διάγραμμα ροής δεδομένων αποτελεί την απεικόνιση του προγράμματος προς εκτέλεση. Και στα δύο VIs ο χρήστης μπορεί να επέμβει και οποιαδήποτε αλλαγή εφαρμόσει στο ένα θα εμφανιστεί αυτόματα και στο άλλο VI.

Για τη δημιουργία ενός διαγράμματος χρησιμοποιούνται κάποια βασικά εργαλεία τα οποία περιέχονται στο πρόγραμμα και θα αναλυθούν παρακάτω.

Αυτά αποτελούνται από τα εργαλεία ελέγχου (*control*) και τους δείκτες (*indicators*). Τα εργαλεία ελέγχου αποτελούν δεδομένα εισόδου ενώ οι δείκτες δεδομένα εξόδου. Αυτά μπορεί να έχουν αριθμητική τιμή (ακέραιος, πραγματικός), TRUE ή FALSE, ενώ μπορεί να έχουν χαρακτήρες μορφής ASCII για απεικόνιση κειμένων.

Επίσης, σημαντικό χαρακτήρα έχουν οι επαναληπτικοί βρόγχοι (*loops*) και οι σήραγγες δομής (*structure tunnels*). Με επαναληπτικό βρόγχο εκτελείται επανειλημμένα κάποιο μέρος του προγράμματος ή ολόκληρο το πρόγραμμα όσο η συνθήκη εκτέλεσης έχει την τιμή TRUE, ενώ μόλις πάρει την τιμή FALSE η εκτέλεση σταματάει. Η σήραγγα δομής επιτρέπει στο χρήστη τη μεταφορά δεδομένων από μια δομή σε άλλη. Με τη χρησιμοποίηση γραφημάτων (*graphs*) γίνεται η απεικόνιση δεδομένων ίδιου τύπου, ενώ ίδιου τύπου δεδομένα περιέχουν και τα διανύσματα (*arrays*). Αντίθετα, διαφορετικού τύπου δεδομένα μπορεί να έχουν οι ομάδες (*clusters*).



**Σχήμα 3.34** Στα αριστερά ο πίνακας ελέγχου και στα δεξιά το διάγραμμα ροής δεδομένων του προγράμματος

Τέλος, μείζονος σημασίας είναι η δομή *Case*, η οποία αποτελεί δομή εκτέλεσης εντολών κατά συνθήκη. Με τον τρόπο αυτό δίνεται η δυνατότητα εκτέλεσης εντολών με αυστηρή σειρά η οποία καθορίζεται από το χρήστη (χρησιμοποίηση των τιμών TRUE/FALSE).

Σε κάθε πείραμα χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα LabVIEW για τον έλεγχο, την καταγραφή και την αποθήκευση των μετρήσεων των μετρητικών διατάξεων. Η μεθοδολογία που

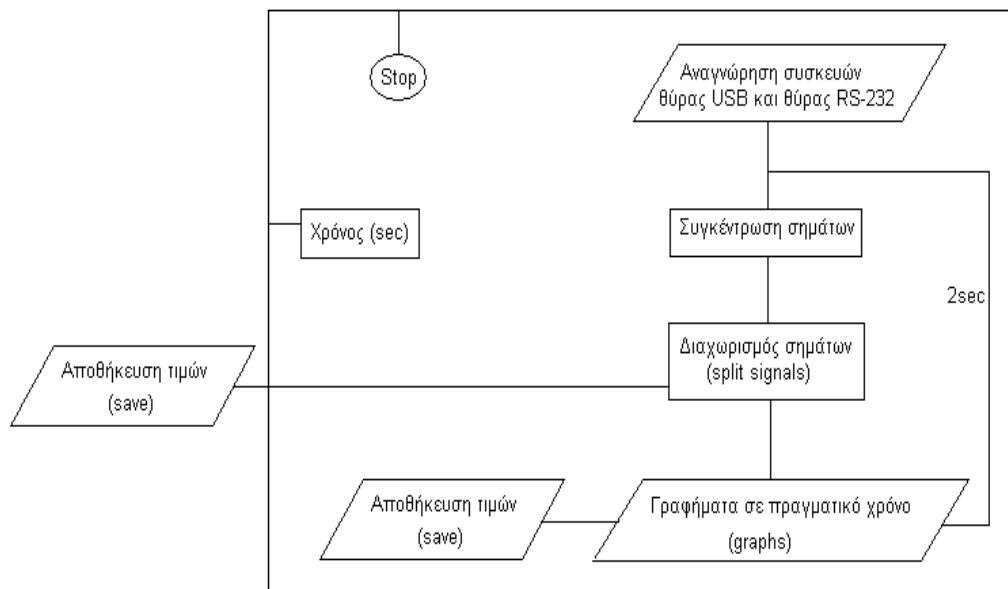
χρησιμοποιήθηκε για τη σχεδίαση προγράμματος σε κάθε πείραμα ήταν ίδια, έχοντας κάποιους βασικούς άξονες.

Αρχικά, μέσω υπορουτίνων από βιβλιοθήκες του προγράμματος, γινόταν η αναγνώριση των συσκευών που ήταν συνδεδεμένες με τις θύρες USB και τη σειριακή θύρα του Η/Υ. Έτσι αναγνωριζόταν το μέγεθος του σήματος που έστελναν οι συσκευές απόκτησης δεδομένων και η δυναμοκυψέλη.

Στη συνέχεια, τοποθετήθηκε επαναληπτικός βρόγχος και οι εντολές που βρίσκονταν εντός αυτού πραγματοποιούνταν ανά 2sec. Το σήμα από την αναγνώριση των συσκευών που προηγήθηκε μεταφερόταν εντός βρόγχου μέσω σήραγγας δομής. Εντός του επαναληπτικού βρόγχου πραγματοποιούνταν συλλογή σήματος μέσω των εργαλείων ελέγχου (Signal Output) από τις συσκευές που είχαν ήδη αναγνωριστεί. Στη συνέχεια, σημαντικό βήμα αποτέλεσε ο διαχωρισμός των σημάτων από τις συσκευές για την καλύτερη διαχείριση και επεξεργασία κάθε μέτρησης. Αυτό έγινε με εισαγωγή του εργαλείου ελέγχου Signal Input, το οποίο κατηγοριοποιούσε τα σήματα σε ομάδες με οποιαδήποτε επιθυμητή σειρά. Με τον τρόπο αυτό έγινε δυνατή η επεξεργασία οποιουδήποτε σήματος θεωρούταν σημαντικό, ενώ από το σημείο εκείνο γινόταν εύκολη η παρουσίαση των αποτελεσμάτων στην οθόνη του Η/Υ. Έχοντας τη δυνατότητα επεξεργασίας κάθε σήματος, με τους δείκτες, απεικονίζονταν σε γραφικές παραστάσεις (graph) οι τιμές των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο. Επειδή τα αποτελέσματα από τη σειριακή θύρα εμφανίζονταν σε μορφή ASCII, γινόταν μετατροπή τους σε δεκαδική μορφή μέσω αντίστοιχης ενσωματωμένης εντολής του προγράμματος. Παράλληλα, γινόταν αποθήκευση όλων των τιμών σε αρχεία μορφής .txt σε φάκελο του υπολογιστή που οριζόταν από την αρχή.

Τέλος, τοποθετήθηκε χρονόμετρο εκτός του επαναληπτικού βρόγχου το οποίο άρχιζε με την εκκίνηση του προγράμματος (που γινόταν από το χρήστη) και τελείωνε με το κουμπί Stop (επίσης από το χρήστη).

Οι λειτουργίες που χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα φαίνονται στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 3.35 που ακολουθεί.



Σχήμα 3.35 Διάγραμμα ροής των λειτουργιών του προγράμματος LabVIEW

### 3.2.6 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. Η σύνδεση του αναλυτή αερίων στον ηλεκτρονικό υπολογιστή έγινε μέσω δικτύου (IP address), ενώ η λειτουργία του ξεκινούσε περίπου 3 ώρες πριν την έναρξη κάθε πειράματος.

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>

### Διεξαγωγή Πειραμάτων

Τα πειράματα διεξήχθησαν στο Εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. κατά τη διάρκεια της περιόδου του Ιουλίου 2013. Συνολικά διεξήχθησαν 9 πειράματα κατά το διάστημα αυτό, στη διάταξη δωματίου με πρόσοψη που δημιουργήθηκε για το σκοπό αυτό (βλ. Κεφάλαιο 3). Οι παράμετροι οι οποίες μεταβάλλονταν ήταν η γεωμετρία του ανοίγματος και η ισχύς της φωτιάς. Το καύσιμο που χρησιμοποιήθηκε σε όλα τα πειράματα ήταν εξάνιο. Η διάταξη των θερμοστοιχείων εξωτερικά του δωματίου άλλαξε, ενώ οι θέσεις αναρρόφησης του αναλυτή αερίων και του μετρητή ροής θερμότητας παρέμειναν σταθερές σε όλα τα πειράματα, με το μετρητή ροής θερμότητας να βρίσκεται πάνω στην πρόσοψη, στο μέσο του πλάτους της και 200mm πάνω από το άνοιγμα, ενώ ο αναλυτής αερίων σε απόσταση 50mm από την πρόσοψη, στο μέσο του πλάτους της και σε ύψος 1650mm από το δάπεδο. Συνολικά, τα χαρακτηριστικά του κάθε πειράματος που διεξήχθη και θα αναλυθεί στη συνέχεια, φαίνονται στον Πίνακα 4.1, ενώ οι συνθήκες εργαστηρίου στις οποίες διεξήχθησαν αναλύονται στο Παράρτημα Α.

Πείραμα	Όγκος καυσίμου (ml)	Είδος Ανοίγματος	Παράγοντας Αερισμού $A_v \sqrt{H_v}$	Διαστάσεις Ανοίγματος [ύψος x πλάτος] (mm)	Ύψος πυθμένα δοχείου από δάπεδο (mm)	Διάρκεια Φωτιάς (sec)
A1	2350	Πόρτα	0.0707	500x200	20	339
A2	2350	Πόρτα	0.0707	500x200	20	331
A3	1000	Πόρτα	0.0707	500x200	75	372
A4	2350	Πόρτα	0.0707	500x200	75	525
A5	4700	Πόρτα	0.0707	500x200	20	595
A6	2350	Πόρτα	0.0707	500x200	20	336
B7	2350	Παράθυρο	0.0329	300x200	20	659
A8	2350	Πόρτα	0.0707	500x200	20	356
B9	2350	Παράθυρο	0.0329	300x200	20	663

**Πίνακας 4.1** 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, οι οποίοι αναλύονται στο Εδάφιο 4.1, 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.

#### 4.1 Υπολογισμός Πυροθερμικού φορτίου

Αναλυτικότερα, στα πειράματα μελετήθηκε η φωτιά σε δωμάτιο μειωμένης κλίμακας βάσει του πρότυπου ISO9705. Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 9705, οι διαστάσεις ενός δωματίου είναι 3,6x2,4x2,4 (m), οπότε το εμβαδό της επιφάνειάς του είναι  $A = 3,6 \times 2,4 = 8,64 \text{ m}^2$ .

Σύμφωνα με στοιχεία που δίνονται στον Ευρωκώδικα, για γραφείο είναι  $511 \text{ MJ/m}^2$ , οπότε το φορτίο φωτιάς υπολογίζεται ως εξής

$$511(\text{MJ/m}^2) \times 8,64 \text{ m}^2 = 4415 \text{ MJ}$$

Για το πυροθερμικό φορτίο ισχύει

$$\dot{Q} = (\text{πυροθερμικό φορτίο})/\Delta t = 4415/\Delta t \quad (4.1)$$

Από Σχέση (1.66), η σχέση που συνδέει το πυροθερμικό φορτίο σε δωμάτιο κανονικών διαστάσεων και σε δωμάτιο υπό κλίμακα είναι

$$\dot{Q}_m = \dot{Q}_p \left( \frac{l_m}{l_p} \right)^{5/2} \quad (4.2)$$

Οπότε, για δωμάτιο (δείκτης m) υπό κλίμακα 1/4 και δωμάτιο κατά το πρότυπο ISO9705 (δείκτης p), ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας φωτιάς στην περίπτωση των πειραμάτων μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση

$$\begin{aligned} \dot{Q}_m &= \dot{Q}_p \left( \frac{1}{4} \right)^{5/2} \Rightarrow \\ \dot{Q}_m &= 0,03125 \dot{Q}_p \end{aligned} \quad (4.3)$$

Στον Πίνακα 4.2 που ακολουθεί, φαίνονται ο όγκος καυσίμου και η ισχύς της φωτιάς σε κάθε πείραμα που διεξήχθη, καθώς και η αντίστοιχη ισχύς σε πραγματικές διαστάσεις δωματίου.

Πείραμα	Όγκος καυσίμου (ml)	Ισχύς σε κλίμακα 1/4 (kW)	Ισχύς σε πραγματικές διαστάσεις (MW)
A3	1000	49	1.57
A1, A2, A4, A6, B7, A8, B9	2350	115	3.68
A5	4700	230	7.35

**Πίνακας 4.2** Ισχύς φωτιάς σε κάθε πείραμα που διεξήχθη, σε σχέση με τον όγκο καυσίμου που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε περίπτωση.

## 4.2 Υπολογισμός Διαστάσεων Δοχείου Καυσίμου

Οι υπολογισμοί για την εύρεση των διαστάσεων του δοχείου έγιναν με βάση το μέγιστο φορτίο πυρκαγιάς που επιδιώχθηκε να επιτευχθεί, δηλαδή τα 230kW.

Για περίπτωση πυρκαγιάς, από σχέση (1.1) είναι

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= \dot{m}_f \times \Delta H_c \\ \Rightarrow \dot{m}_f &= \frac{\dot{Q}}{\Delta H_c} = \frac{230}{44700} = 5.14 \times 10^{-3} \text{ kg / sec.} \end{aligned}$$

Όπου 44700 η κατώτερη θερμογόνο ικανότητα του εξανίου (βλέπε Πίνακα 1.1)

Με πυκνότητα εξανίου  $\rho=654,8 \text{ kg/m}^3$  (Πίνακας 3.5) ισχύει

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}_f}{\rho} = 7.90 \text{ m}^3 / \text{sec}$$

Τελικά, για τον όγκο καυσίμου που χρειάζεται και χρονική διάρκεια 600sec είναι τελικά

$$\begin{aligned} V &= \dot{V} \times \Delta t \\ \Rightarrow V &= 4700 \text{ ml} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Από σχέση (1.21), λύνοντας ως προς τη διάμετρο, και με αντικατάσταση των τιμών από Πίνακα 3.5, υπολογίζεται ότι

$D=0.28\text{m}$  (αντιστοιχεί σε τετραγωνικό δοχείο πλευράς 0.25m, βλέπε Κεφάλαιο 1)

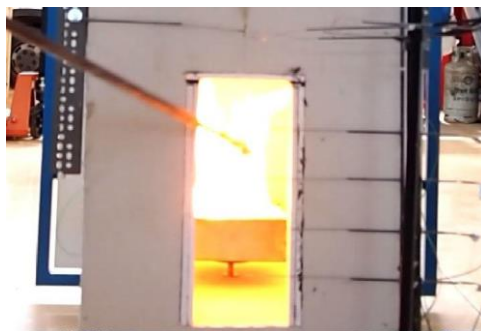
### 4.3 Επαναληψιμότητα

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.

#### 4.3.1 Περιγραφή

Η επαναληψιμότητα των μετρήσεων αποτέλεσε βασικό άξονα στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, καθώς μόνο με επίτευξή της τα συμπεράσματα μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστα. Έτσι, τα πρώτα πειράματα A1 και A2 διεξήχθησαν στις ίδιες ακριβώς συνθήκες προκειμένου να διαπιστωθεί η επαναληψιμότητα των μετρήσεων.

Το πείραμα A1, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.1, 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 μεταλλικό ραβδί όπου στη μια άκρη του είχε τοποθετημένο μαντήλι εμποτισμένο με καύσιμο (Σχήμα 4.1). Από τη στιγμή της ανάφλεξης, η διάρκεια της φωτιάς ήταν 339sec.



Σχήμα 4.1 Ανάφλεξη του καυσίμου με χρήση μεταλλικού ραβδιού.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται φωτογραφίες κατά τη διάρκεια του πειράματος A1 (Σχήματα 4.1-4.9). Οι φλόγες στο πείραμα A1 άρχισαν να γίνονται εμφανείς εκτός του δωματίου περίπου 50-55sec μετά την ανάφλεξη του καυσίμου (Σχ. 4.2 και 4.3) ενώ από το σημείο εκείνο και μετά μένουν σταθερά εκτός δωματίου όντας ορατές στην πρόσοψη (Σχήματα 4.4-4.7). Μετά τα 280sec η πυρκαγιά έχει εισέλθει φανερά πλέον στη φάση της σβέσης (Σχήματα 4.8-4.9)

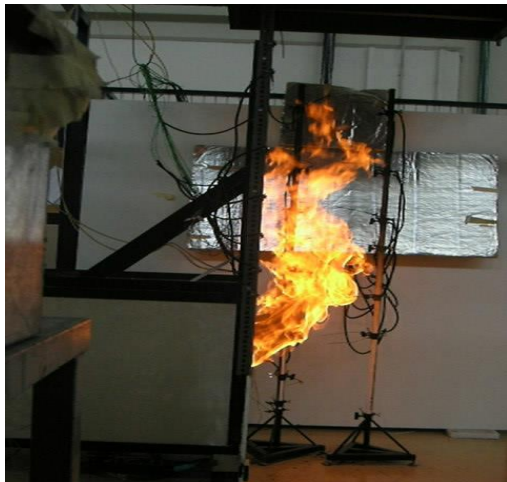




**Σχήμα 4.2** Εξερχόμενη φλόγα, 50sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A1).



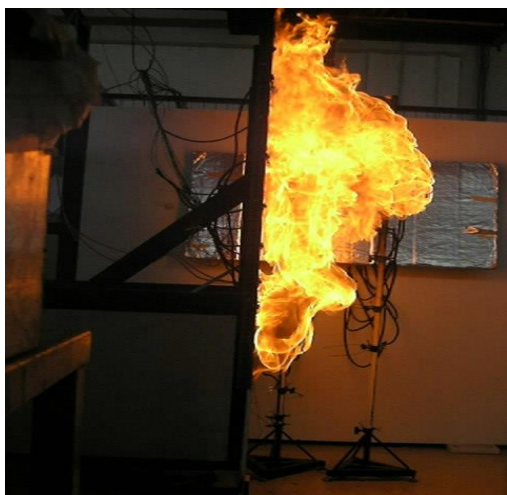
**Σχήμα 4.3** Εξερχόμενη φλόγα, 50sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A1).



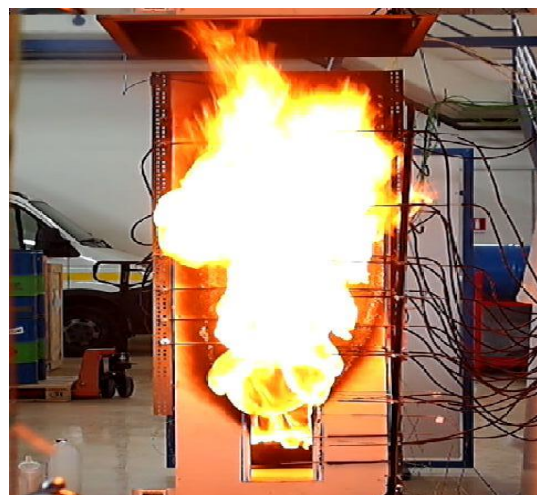
**Σχήμα 4.4** Εξερχόμενη φλόγα, 120sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A1).



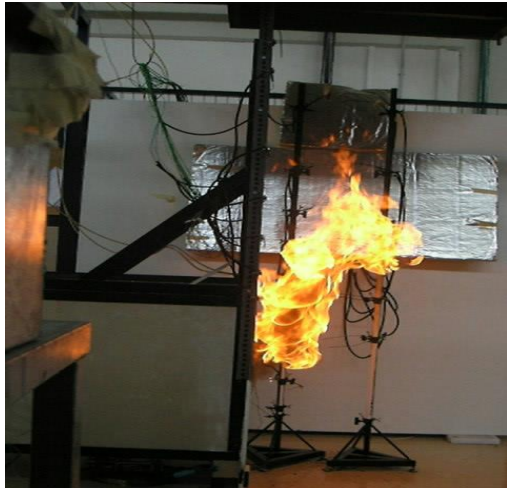
**Σχήμα 4.5** Εξερχόμενη φλόγα, 120sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A1).



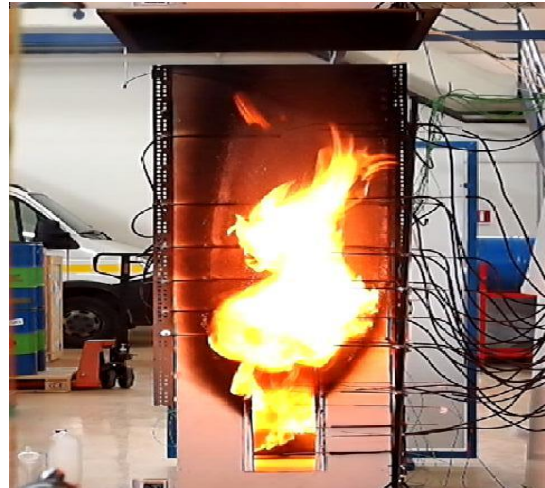
**Σχήμα 4.6** Εξερχόμενη φλόγα, 240sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A1).



**Σχήμα 4.7** Εξερχόμενη φλόγα, 240sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A1).



**Σχήμα 4.8** Εξερχόμενη φλόγα, 300sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A1).



**Σχήμα 4.9** Εξερχόμενη φλόγα, 300sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A1).

Το πείραμα A2, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.1, 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 μεταλλικό ραβδί όπου στη μια άκρη του είχε τοποθετημένο μαντήλι εμποτισμένο με καύσιμο (Σχήμα 4.1). 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. Οι φλόγες γίνονται φανερές εκτός δωματίου μετά τα 45-50sec και παραμένουν εκτός δωματίου από το σημείο αυτό και μετά (Σχήματα 4.10-4.15). Τελικά η φλόγα μπαίνει στη φάση της σβέσης μετά τα 300sec. (Σχήματα 4.16-4.17).



**Σχήμα 4.10** Εξερχόμενη φλόγα, 45sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A2).



**Σχήμα 4.11** Εξερχόμενη φλόγα, 45sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A2).

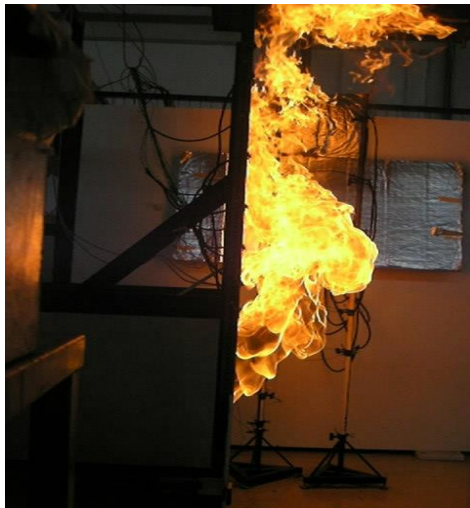




**Σχήμα 4.12** Εξερχόμενη φλόγα, 120sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A2).



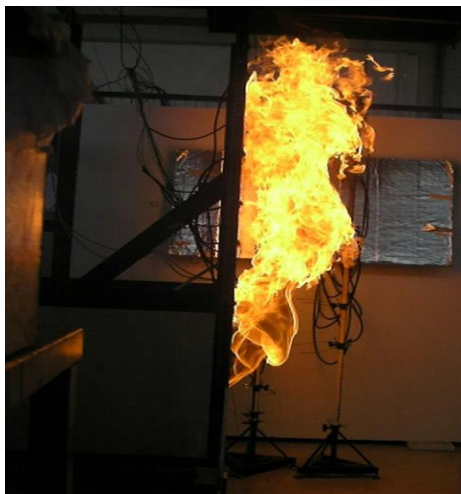
**Σχήμα 4.13** Εξερχόμενη φλόγα, 120sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A2).



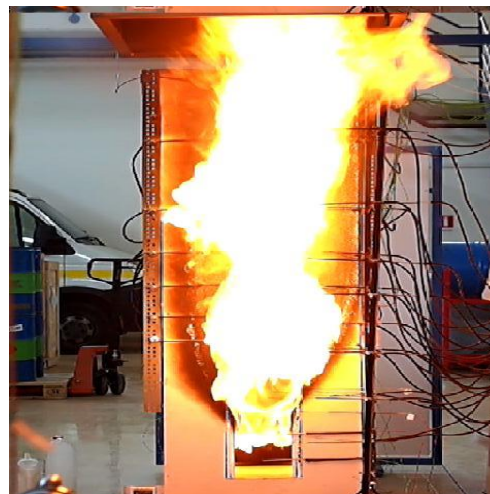
**Σχήμα 4.14** Εξερχόμενη φλόγα, 240sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A2).



**Σχήμα 4.15** Εξερχόμενη φλόγα, 240sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A2).



**Σχήμα 4.16** Εξερχόμενη φλόγα, 300sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A2).

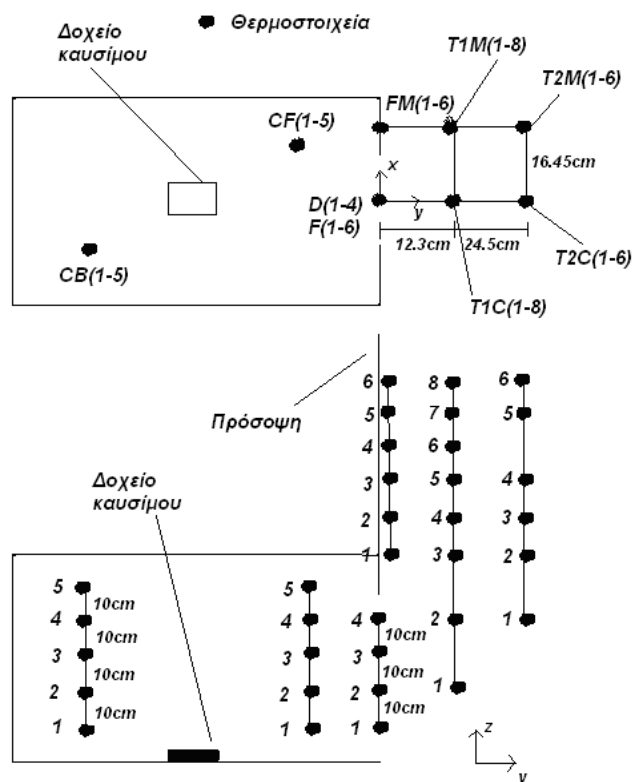


**Σχήμα 4.17** Εξερχόμενη φλόγα, 300sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A2).

### 4.3.2 Διάταξη Μετρητικών Συσκευών

Στα πειράματα A1 και A2 χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες μετρητικές συσκευές α) θερμοστοιχεία τύπου K, β) μετρητής ροής θερμότητας, γ) αναλυτής αερίων και δ) δυναμοκουφέλη. Η λήψη μετρήσεων από τις συσκευές ανάκτησης δεδομένων γινόταν ανά 2sec.

Ο αναλυτής αερίων βρίσκεται σε ύψος 165cm και απόσταση 5cm από την πρόσοψη κατά τον άξονα y. Αντίστοιχα, ο μετρητής ροής θερμότητας τοποθετήθηκε σε ύψος 70cm από το δάπεδο, ενώ τοποθετήθηκε μέσα στη γυψοσανίδα της πρόσοψης. Τα θερμοστοιχεία δείχνονται στο Σχήμα 4.18, ενώ όλες οι αποστάσεις των μετρητικών συσκευών περιγράφονται αναλυτικά στο Παράρτημα Α. Οι θερμοκρασίες αερίων εντός του δωματίου μετρήθηκαν στις δυο γωνίες αυτού, όπου σε κάθε γωνία τοποθετήθηκαν καθ' ύψος 5 θερμοστοιχεία ανά 10cm. Εκτός του δωματίου, για τη μέτρηση θερμοκρασιών πάνω και κοντά στην πρόσοψη, τοποθετήθηκαν θερμοστοιχεία στη μεσοκάθετο και στο 1/4 του πλάτους της κάτοψης, θεωρώντας πως το προφίλ των θερμοκρασιών είναι συμμετρικό ως προς τη μεσοκάθετο. Αρχή μέτρησης θεωρήθηκε το σημείο της μεσοκάθετου του ανοίγματος στο δάπεδο του δωματίου.



Σχήμα 4.18 Σχηματικό διάγραμμα των θέσεων των θερμοστοιχείων στα πειράματα A1 και A2.

### 4.3.3 Ανάλυση Μετρήσεων

#### 4.3.3.1 Θερμοκρασίες

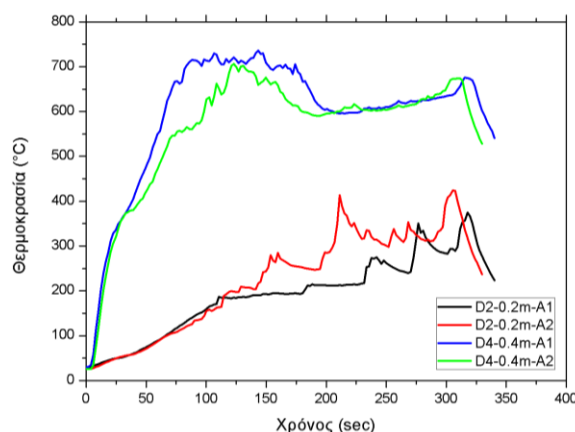
Από τα πειράματα A1 και A2 έγινε συλλογή των μετρήσεων, από τις οποίες εξετάστηκαν και συγκρίθηκαν οι θερμοκρασίες σε όλες τις θέσεις. Σκοπός ήταν να γίνει σύγκριση των μετρήσεων ως προς το επίπεδο τους και τη χρονική μεταβολή τους, ώστε να υπάρξουν ασφαλή συμπεράσματα για την επαναληψιμότητα των μετρήσεων.

Αρχικά, από τα θερμοστοιχεία της πόρτας (D), υπολογίστηκαν οι μέγιστες τιμές και οι μέσες τιμές των θερμοκρασιών. Στη συνέχεια υπολογίστηκε η απόκλιση μεταξύ των τιμών αυτών για τα πειράματα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 4.3 που ακολουθεί.

Θέση	Μέγιστη θερμοκρασία (°C)		Αποκλίσεις μέγιστων θερμοκρασιών (%)	Μέση τιμή θερμοκρασιών (°C)		Αποκλίσεις μέσων τιμών (%)
	A1	A2		A1	A2	
D1	115,69	110,05	4,87	86,27	79,371	7,9
D2	374,47	424,43	11,7	191,3	222,22	13,9
D3	761,51	715,24	6,07	596,33	552,47	7,3
D4	735,89	706,43	4	593,42	557,35	6,1

**Πίνακας 4.3** Μέγιστες θερμοκρασίες, μέσες τιμές θερμοκρασιών και αντίστοιχες αποκλίσεις, για τις θερμοκρασίες της πόρτας στα πειράματα A1 και A2.

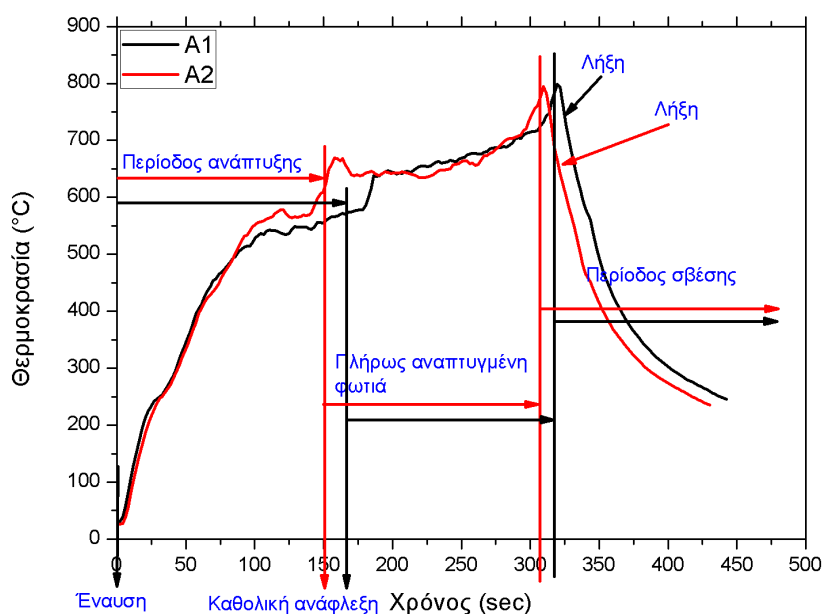
Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 4.3, οι αποκλίσεις στις περισσότερες περιπτώσεις είναι μικρότερες από 8%, εκτός της θέσης D2, όπου εμφανίζονται οι μέγιστες αποκλίσεις μεταξύ των πειραμάτων ελάχιστα αυξημένες σε σχέση με τις άλλες θέσεις. Στο γράφημα του Σχήματος 4.19 η απόκλιση των μετρήσεων από το θερμοστοιχείο D2 φαίνεται χαρακτηριστικά στη χρονική περίοδο από 150-250sec. Παρά τις εμφανείς διαφορές στο γράφημα, το μοτίβο των θερμοκρασιών ταυτίζεται, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στην περίπτωση του θερμοστοιχείου D4 του Σχήματος 4.19, το οποίο βρίσκεται σε ύψος 40cm από το δάπεδο του δωματίου. Η σύγκλιση των θερμοκρασιών στις θέσεις του ανοίγματος αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την επαναληψιμότητα, καθώς είναι αυτές οι οποίες καθορίζουν το ουδέτερο επίπεδο (neutral plane) στις περιπτώσεις φωτιάς σε διαμέρισμα. Ομοίως, παρατηρήθηκε σύγκλιση και στις υπόλοιπες θέσεις του ανοίγματος, πιστοποιώντας την επαναληψιμότητα των μετρήσεων στην περιοχή αυτή.



**Σχήμα 4.19** Συγκριτικό διάγραμμα των θερμοκρασιών στα θερμοστοιχεία D2, D4 των πειραμάτων A1 και A2.

Στο σχήμα 4.20 φαίνονται οι φάσεις της φωτιάς εντός του δωματίου, με βάση τις μέσες τιμές των θερμοκρασιών από τα θερμοστοιχεία CB και CF κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Σημειώνεται πως η κλίμακα του χρόνου στο γράφημα του Σχήματος 4.20, όπως και στα υπόλοιπα γραφήματα που ακολουθούν, σταματάει τη στιγμή που το κάθε πείραμα ολοκληρώνεται. Φυσικά, κατά τη διάρκεια των πειραμάτων δεν έγινε συλλογή στοιχείων μόνο κατά τη διάρκεια αυτή, αλλά και αρκετή ώρα μετά από τη στιγμή λήξης του κάθε πειράματος. Παρατηρείται πως πέραν των καμπύλων, οι οποίες συγκλίνουν σε μεγάλο ποσοστό, οι περίοδοι της φωτιάς σχεδόν συμπίπτουν σε κάθε περίπτωση. Κάθε αλλαγή από τη μια στην επόμενη περίοδο, γίνεται, με το πείραμα A2 να προπορεύεται πάντα από αυτές στο πείραμα A1, κάτι που δικαιολογείται αν αναλογιστεί κανείς πως το πείραμα A2 διήρκεσε

λιγότερο χρόνο. Η μικρότερη διάρκεια του πειράματος A2 μπορεί να οφείλεται στην ποσότητα του καυσίμου, δηλαδή σε σφάλμα κατά την τοποθέτηση του ή στην πιθανή εξάτμιση κάποιας ποσότητάς του κατά την περίοδο από την τοποθέτησή του έως την έναυση. Στη φάση της σβέσης παρατηρείται ραγδαία μείωση στις θερμοκρασίες εντός δωματίου, κάτι που δικαιολογείται από τη μείωση του καυσίμου σε πολύ χαμηλά επίπεδα, μέχρι η φωτιά να σβήσει.



**Σχήμα 4.20** Συγκριτικό διάγραμμα των μέσων θερμοκρασιών εντός του δωματίου για τα πειράματα A1 και A2.

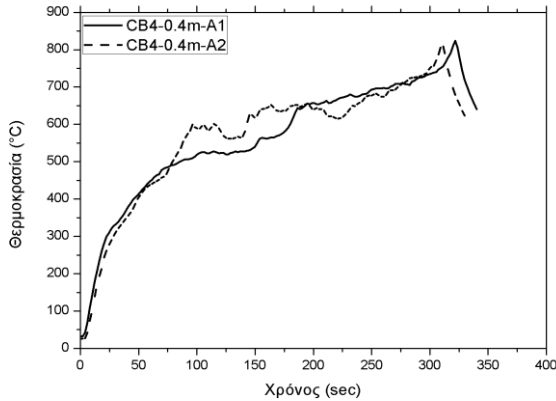
Για τις θέσεις CF και CB των θερμοστοιχείων, η σύγκλιση των τιμών που παρατηρείται είναι ικανοποιητική. Οι αποκλίσεις κυμαίνονται μεταξύ 0-6%, με τα ποσοστά αυτά να θεωρούνται μηδαμικά ως προς τη διαφορά που παρουσιάζουν τα μέγιστα και οι μέσες τιμές. Χαρακτηριστικά, στα Σχήματα 4.21 και 4.22 φαίνονται οι καμπύλες των θερμοκρασιών για τα θερμοστοιχεία στις θέσεις CB4 και CB5 τα οποία χαρακτηρίζουν το ανώτερο στρώμα (upper layer) εντός δωματίου, με τις χαρακτηριστικές καμπύλες να εμφανίζουν μεγάλη σύγκλιση των τιμών. Στη δεύτερη περίπτωση τα ποσοστά αποκλίσεων ανέρχονται στα ίδια επίπεδα, με μόνη διαφορά την περίπτωση των μέσων τιμών στο θερμοστοιχείο στη θέση CF1 που βρίσκεται 10cm πάνω από το δάπεδο του δωματίου. Φυσικά, το ποσοστό του 13,7% είναι ελάχιστο στο επίπεδο των τιμών που μελετώνται, οπότε η σύγκλιση των τιμών θεωρείται πολύ καλή. Αντίστοιχα, οι καμπύλες των θερμοκρασιών που μετρήθηκαν από τα θερμοστοιχεία στις θέσεις CF3 και CF5 φαίνονται στα Σχήματα 4.23-4.24. Παρατηρείται πως σε πολλά σημεία ο διαχωρισμός της κάθε καμπύλης κρίνεται ιδιαίτερος δύσκολος, αποδεικνύοντας την πολύ καλή σύγκλιση των τιμών. Οι Πίνακες 4.4-4.5 με τις μέγιστες, τις μέσες τιμές των θερμοκρασιών και τις αποκλίσεις από τα θερμοστοιχεία στις θέσεις CB και CF φαίνονται στη συνέχεια.

Θέση	Μέγιστη θερμοκρασία (°C)		Αποκλίσεις μέγιστων θερμοκρασιών (%)	Μέση τιμή θερμοκρασιών (°C)		Αποκλίσεις μέσων τιμών (%)
	A1	A2		A1	A2	
CB1	862,57	848,77	1,63	388,98	416,59	6,62
CB2	900,15	884,39	1,82	495,72	494,57	0,23
CB3	855,33	854,81	0,61	565,51	571,88	1,11
CB4	824,10	808,87	1,86	563,76	566,25	0,44
CB5	793,31	790,28	0,38	568,92	564,15	0,83

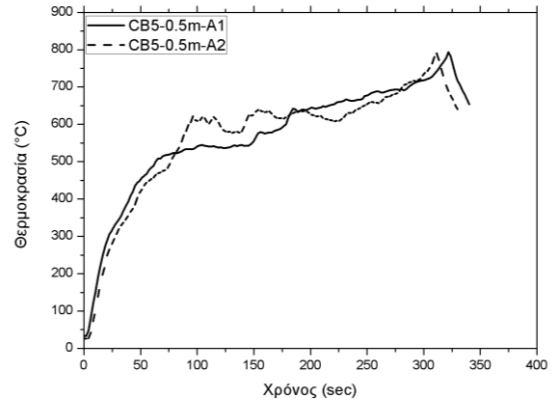
**Πίνακας 4.4** Μέγιστες θερμοκρασίες, μέσες τιμές θερμοκρασιών και αντίστοιχες αποκλίσεις, για τις θερμοκρασίες στις θέσεις (CB) στα πειράματα A1 και A2.

Θέση	Μέγιστη θερμοκρασία (°C)		Αποκλίσεις μέγιστων θερμοκρασιών (%)	Μέση τιμή θερμοκρασιών (°C)		Αποκλίσεις μέσων τιμών (%)
	A1	A2		A1	A2	
CF1	705,02	752,15	6,27	382,75	443,95	13,7
CF2	834,11	816,42	2,12	599,26	570,93	4,72
CF3	830,36	782,76	5,73	628,32	610,80	2,78
CF4	795,80	793,96	0,23	628,57	611,76	2,67
CF5	768,91	774,58	0,73	768,91	610,57	20,5

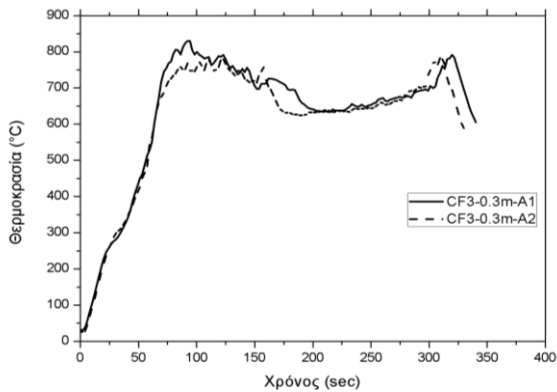
**Πίνακας 4.5** Μέγιστες θερμοκρασίες, μέσες τιμές θερμοκρασιών και αντίστοιχες αποκλίσεις, για τις θερμοκρασίες στις θέσεις (CF) στα πειράματα A1 και A2.



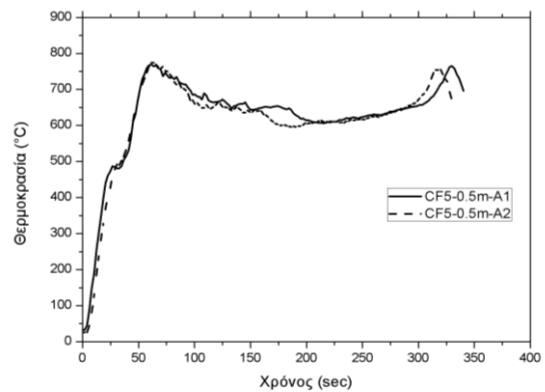
**Σχήμα 4.21** Συγκριτικό διάγραμμα των θερμοκρασιών στη θέση CB4 των πειραμάτων A1 και A2.



**Σχήμα 4.22** Συγκριτικό διάγραμμα των θερμοκρασιών στη θέση CB5 των πειραμάτων A1 και A2.



**Σχήμα 4.23** Συγκριτικό διάγραμμα των θερμοκρασιών στη θέση CF3 των πειραμάτων A1 και A2.



**Σχήμα 4.24** Συγκριτικό διάγραμμα των θερμοκρασιών στη θέση CF5 των πειραμάτων A1 και A2.

Στην περίπτωση των θερμοστοιχείων που τοποθετήθηκαν σε απόσταση από την πρόσοψη χρησιμοποιήθηκαν δυο χαλύβδινοι στύλοι πάνω στους οποίους στερεώθηκαν τα θερμοστοιχεία. Στον πρώτο στύλο η απόσταση από την πρόσοψη ήταν 12.3cm με τις μέγιστες τιμές και τις μέσες τιμές να φαίνονται στους Πίνακες 4.6-4.7, καθώς και τα ποσοστά των διαφορών στις μετρήσεις των δυο πειραμάτων.



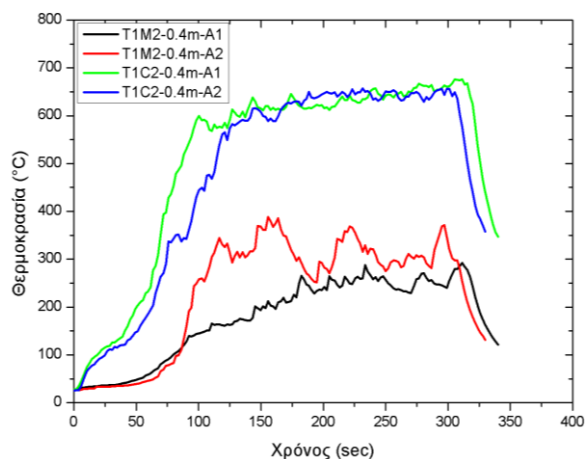
Θέση	Μέγιστη θερμοκρασία (°C)		Αποκλίσεις μέγιστων θερμοκρασιών (%)	Μέση τιμή θερμοκρασιών (°C)		Αποκλίσεις μέσω των τιμών (%)
	A1	A2		A1	A2	
T1M1	155,35	154,55	0,51	108,88	100,34	7,85
T1M2	291,99	388,13	24,76	176,05	230,49	23,61
T1M3	677,76	709,92	4,52	476,45	502,91	5,25
T1M4	705,01	790,33	10,79	502,43	526,71	4,61
T1M5	730,39	869,41	15,99	503,23	527,40	4,58
T1M6	699,43	809,50	13,59	250,38	273,88	8,58
T1M7	360,43	395,84	8,94	175,02	198,56	11,85
T1M8	296,79	731,16	59,40	139,00	179,10	22,39

**Πίνακας 4.6** Μέγιστες θερμοκρασίες, μέσες τιμές θερμοκρασιών και αντίστοιχες αποκλίσεις, για τις θερμοκρασίες στις θέσεις (T1M) στα πειράματα A1 και A2.

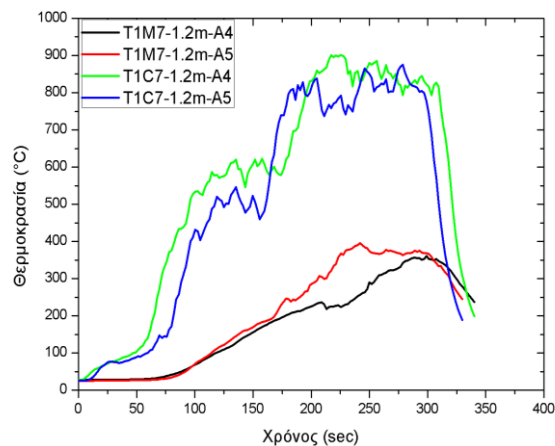
Θέση	Μέγιστη θερμοκρασία (°C)		Αποκλίσεις μέγιστων θερμοκρασιών (%)	Μέση τιμή θερμοκρασιών (°C)		Αποκλίσεις μέσω των τιμών (%)
	A1	A2		A1	A2	
T1C1	110,18	106,13	0,03	83,11	72,99	12,17
T1C2	675,87	656,73	0,02	506,24	475,18	6,13
T1C3	716,37	719,67	0,004	602,42	570,71	5,26
T1C4	908,61	905,51	0,0034	655,41	623,34	4,89
T1C5	907,63	912,77	0,0056	620,76	583,49	6,00
T1C6	911,67	901,77	0,01	587,55	541,72	7,79
T1C7	901,52	875,62	0,02	548,44	495,89	9,58
T1C8	844,94	765,75	0,09	465,85	409,92	12,00

**Πίνακας 4.7** Μέγιστες θερμοκρασίες, μέσες τιμές θερμοκρασιών και αντίστοιχες αποκλίσεις, για τις θερμοκρασίες στις θέσεις (T1C) στα πειράματα A1 και A2.

Στην περίπτωση των θερμοστοιχείων στις θέσεις (T1M) παρατηρήθηκαν ιδιαίτερες μικρές αποκλίσεις. Γενικά οι αποκλίσεις εμφανίζουν πολύ καλή σύγκλιση αν θεωρηθεί πως σε τέτοια απόσταση διαμορφώνεται το πλούμιο της φωτιάς και η κεντρική ζώνη της φωτιάς. Όμως, η απόκλιση που εμφανίζεται στο θερμοστοιχείο T1M2 της τάξεως 24.76% στη μέγιστη τιμή και 23.61% στη μέση τιμή είναι ιδιαίτερος σημαντική. Αυτή η διαφορά φαίνεται στο γράφημα του Σχήματος 4.25 όπου στο χρονικό διάστημα 100-200sec οι διαφορές στις μετρήσεις είναι εμφανείς. Παράλληλα είναι άξια σχολιασμού η πολύ μεγάλη απόκλιση που αναδεικνύεται στην ψηλότερη θέση του στύλου (T1M8). Στις περιπτώσεις αυτές οι αυξημένες μέγιστες τιμές που μετρήθηκαν στο πείραμα A5 μπορεί να οφείλονται στις εργαστηριακές συνθήκες. Μπορεί να υπήρξε μια ριπή αέρα, ίσως να άνοιξε κάποια πόρτα κοντά στο χώρο διεξαγωγής του πειράματος και έτσι η μέτρηση εκείνης της χρονικής στιγμής να παρουσίασε τέτοια διαφορά Στο Σχήμα 4.26 φαίνονται οι καμπύλες για τα θερμοστοιχεία T1M7 και T1C7 όπου αντιστοιχούν σε αποκλίσεις 1-12%.



**Σχήμα 4.25** Συγκριτικό διάγραμμα των θερμοκρασιών στις θέσεις T1M2 και T1C2 των πειραμάτων A1 και A2.



**Σχήμα 4.26** Συγκριτικό διάγραμμα των θερμοκρασιών στις θέσεις T1M7 και T1C7 των πειραμάτων A1 και A2.

Στην περίπτωση του δεύτερου στύλου, όπου ήταν σε απόσταση 24.5cm από την πρόσοψη, οι καταγραφές μέγιστων και μέσων τιμών των θερμοστοιχείων φαίνονται στους Πίνακες 4.8-4.9.

Στον Πίνακα 4.8 ο οποίος αφορά τα θερμοστοιχεία στις θέσεις T2M, παρατηρούνται αποκλίσεις επιπέδου 6-14% για τις μέγιστες τιμές και 0-4% στις μέσες τιμές. Και στις δυο περιπτώσεις οι αποκλίσεις που παρουσιάζονται είναι ιδιαίτερος χαμηλές, με τη σύγκλιση των δυο πειραμάτων σε επίπεδο και μορφή τιμών να είναι μεγάλη. Αξιοσημείωτο στον πίνακα είναι το γεγονός πως ελαφρώς αυξημένα ποσοστά στις αποκλίσεις των τιμών παρουσιάζονται στις θέσεις 3,4 και 5 που αφορούν τα ύψη 0.85, 1, 1.2 m από το δάπεδο του δωματίου. Μια χαρακτηριστική καμπύλη για τα ύψη αυτά είναι του θερμοστοιχείου στη θέση T2M5 που φαίνεται στο Σχήμα 4.28.

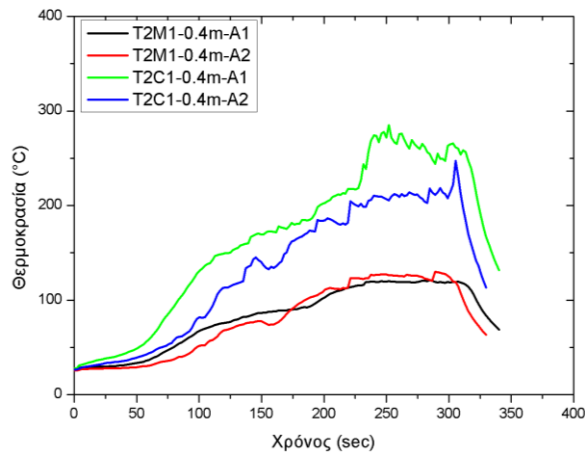
Θέση	Μέγιστη θερμοκρασία (°C)		Αποκλίσεις μέγιστων θερμοκρασιών (%)	Μέση τιμή θερμοκρασιών (°C)		Αποκλίσεις μέσων τιμών (%)
	A1	A2		A1	A2	
T2M1	121,14	130,02	6,82	82,33	79,210	3,79
T2M2	552,54	605,08	8,68	366,65	375,32	2,31
T2M3	675,98	752,05	10,11	466,38	460,32	1,29
T2M4	706,72	804,50	12,15	462,50	464,66	0,46
T2M5	693,18	799,57	13,30	420,59	430,41	2,28
T2M6	618,42	660,70	6,39	360,28	347,20	3,61

**Πίνακας 4.8** Μέγιστες θερμοκρασίες, μέσες τιμές θερμοκρασιών και αντίστοιχες αποκλίσεις, για τις θερμοκρασίες στις θέσεις (T2M) στα πειράματα A1 και A2.

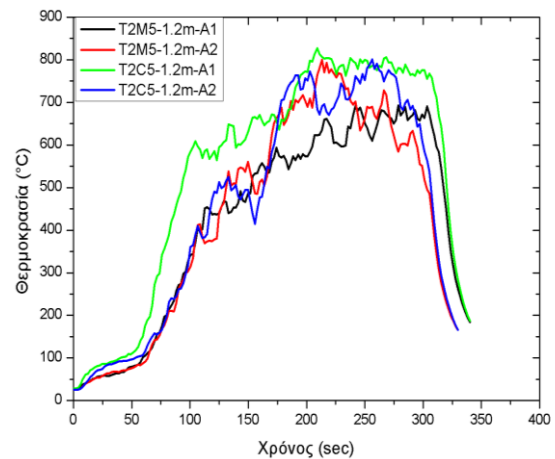
Από τον Πίνακα 4.9 παρατηρούνται πολύ χαμηλές αποκλίσεις των μέγιστων τιμών σε επίπεδα 1-7%. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί το θερμοστοιχείο στη θέση T2C1 (βλ. Σχήμα 4.27), το οποίο στο πείραμα A1 έφτασε μέγιστη θερμοκρασία περίπου 37°C ψηλότερη σε σχέση με την αντίστοιχη στο πείραμα A2. Αυτό έδειξε διαφορά της τάξεως του 13.19% το οποίο είναι μεν αυξημένο από τα αντίστοιχα στις άλλες θέσεις αλλά δεν αποτελεί αρκετά μεγάλη απόκλιση ώστε να μη θεωρηθεί ιδιαίτερος καλή η σύγκλιση των τιμών. Κατά τον ίδιο τρόπο, η ανάλυση στις μέσες τιμές δείχνει ποσοστά αποκλίσεων 5-17%, αποκλίσεις φυσιολογικές και κοντά στις αντίστοιχες τιμές σε άλλες θέσεις, με το θερμοστοιχείο στη θέση T2C1 να διαφέρει κατά 19.92%.

Θέση	Μέγιστη θερμοκρασία (°C)		Αποκλίσεις μέγιστων θερμοκρασιών (%)	Μέση τιμή θερμοκρασιών (°C)		Αποκλίσεις μέσων τιμών (%)
	A1	A2		A1	A2	
T2C1	284,75	247,18	13,19	164,66	131,85	19,92
T2C2	664,07	648,05	2,41	469,24	444,27	5,32
T2C3	799,16	775,44	2,96	582,38	513,60	11,80
T2C4	831,30	820,05	1,35	582,54	510,17	12,42
T2C5	827,23	800,89	3,18	535,40	451,23	15,72
T2C6	724,19	674,68	6,83	425,14	353,94	16,74

**Πίνακας 4.9** Μέγιστες θερμοκρασίες, μέσες τιμές θερμοκρασιών και αντίστοιχες αποκλίσεις, για τις θερμοκρασίες στις θέσεις (T2C) στα πειράματα A1 και A2.



**Σχήμα 4.27** Συγκριτικό διάγραμμα των θερμοκρασιών στις θέσεις T2M1 και T2C1 των πειραμάτων A1 και A2.



**Σχήμα 4.28** Συγκριτικό διάγραμμα των θερμοκρασιών στις θέσεις T2M5 και T2C5 των πειραμάτων A1 και A2.

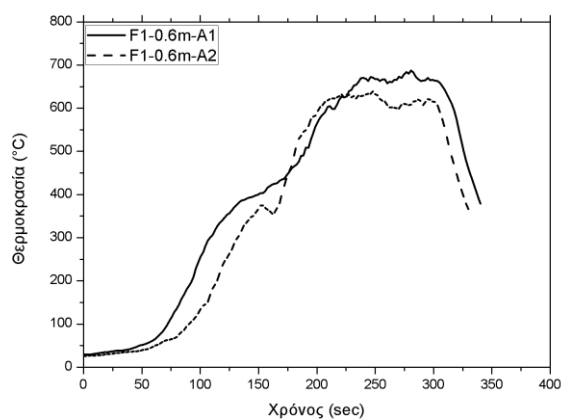
Ομοίως, έγινε συλλογή και επεξεργασία των τιμών των θερμοκρασιών από τις θέσεις των θερμοστοιχείων της πρόσοψης (F) και (FM), οι οποίες φαίνονται στους Πίνακες 4.10 και 4.11 αντίστοιχα.

Για τα θερμοστοιχεία στις θέσεις (F), στη μεσοκάθετο της πρόσοψης, υπολογίστηκαν τιμές στις αποκλίσεις της τάξεως του 4-11%. Το επίπεδο των τιμών αυτό είναι μεν ελαφρώς αυξημένο σε σχέση με τις αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν εντός του δωματίου αλλά παραμένει σε ιδιαίτερος ικανοποιητικό επίπεδο. Χαρακτηριστικά, το θερμοστοιχείο F1 το οποίο εμφανίζει τη μεγαλύτερη απόκλιση στις μέσες τιμές φαίνεται στο Σχήμα 4.29, ενώ στο Σχήμα 4.30 φαίνεται η καμπύλη για τις μετρήσεις θερμοκρασίας του F5. Και τα δυο αυτά θερμοστοιχεία παρουσιάζουν αρκετά καλή σύγκλιση, με τις καμπύλες να παρουσιάζουν παρόμοιο προφίλ θερμοκρασιών.

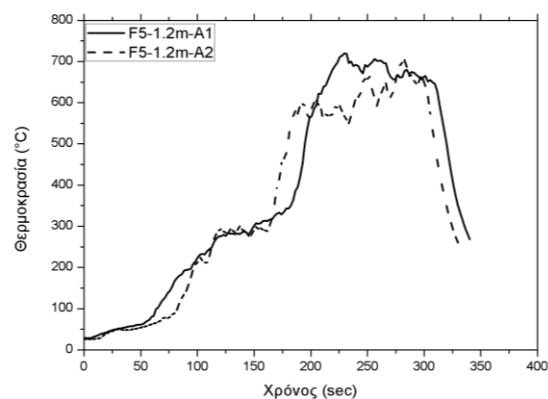
Θέση	Μέγιστη θερμοκρασία (°C)		Αποκλίσεις μέγιστων θερμοκρασιών ν (%)	Μέση τιμή θερμοκρασιών (°C)		Αποκλίσεις μέσων τιμών (%)
	A1	A2		A1	A2	
F1	687,38	638,68	7,08	397,28	355,28	10,57
F2	636,09	589,23	7,36	350,18	324,35	7,37
F3	702,49	668,06	4,90	378,86	356,42	5,92
F4	681,28	670,06	1,64	362,91	344,38	5,11
F5	719,60	703,63	2,22	374,57	354,88	5,25
F6	637,65	604,16	5,25	324,21	293,59	9,44

**Πίνακας 4.10** Μέγιστες θερμοκρασίες, μέσες τιμές θερμοκρασιών και αντίστοιχες αποκλίσεις, για τις θερμοκρασίες στις θέσεις (F) στα πειράματα A1 και A2.





**Σχήμα 4.29** Συγκριτικό διάγραμμα των θερμοκρασιών στη θέση F1 των πειραμάτων A1 και A2.

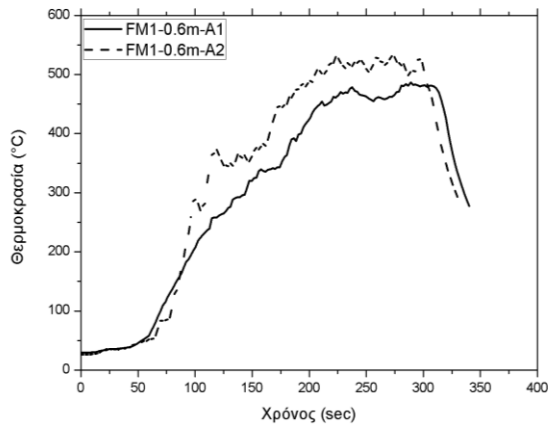


**Σχήμα 4.30** Συγκριτικό διάγραμμα των θερμοκρασιών στη θέση F5 των πειραμάτων A1 και A2.

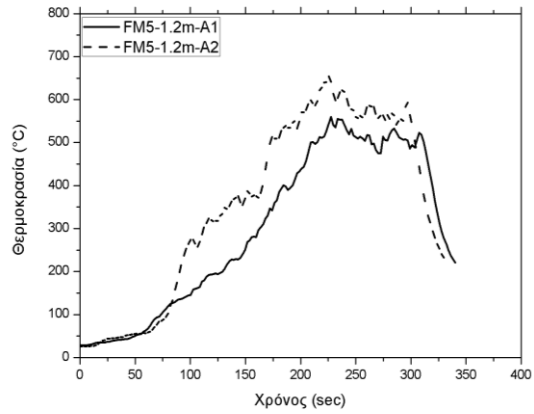
Θέση	Μέγιστη θερμοκρασία (°C)		Αποκλίσεις μέγιστων θερμοκρασιών (%)	Μέση τιμή θερμοκρασιών (°C)		Αποκλίσεις μέσων τιμών (%)
	A1	A2		A1	A2	
FM1	486,57	531,17	8,39	298,59	330,82	9,74
FM2	511,12	577,73	11,53	304,40	362,02	15,91
FM3	559,51	638,34	12,34	321,82	381,24	15,58
FM4	574,11	657,90	12,73	321,01	379,05	15,31
FM5	559,68	653,82	14,40	295,38	353,38	16,41
FM6	532,87	584,11	8,77	282,39	321,65	12,20

**Πίνακας 4.11** Μέγιστες θερμοκρασίες, μέσες τιμές θερμοκρασιών και αντίστοιχες αποκλίσεις, για τις θερμοκρασίες στις θέσεις (FM) στα πειράματα A1 και A2.

Από τον Πίνακα 4.11 παρατηρείται πως για τις θέσεις που βρίσκονται στο 1/4 του πλάτους της πρόσοψης οι αποκλίσεις είναι μεταξύ 8 και 16%, ομοίως πολύ μικρό ποσοστό στις διαφορές των μετρήσεων μεταξύ των δυο πειραμάτων. Επίσης, πρέπει να σχολιαστεί το γεγονός πως οι μικρότερες διαφορές παρουσιάστηκαν στις ακραίες θέσεις, δηλαδή στη χαμηλότερη (θερμοστοιχείο FM1, Σχήμα 4.31) και στην ψηλότερη, καθώς οι φλόγες έχουν μεγαλύτερο πλάτος στο μέσο του ύψους της πρόσοψης, με τα ακριανά σημεία δέχονται χαμηλότερη θερμότητα. Έτσι οι θερμοκρασίες είναι πιο χαμηλές στα σημεία αυτά, με τα περιθώρια απόκλισης να μειώνονται. Στο Σχήμα 4.32 φαίνονται οι καμπύλες του θερμοστοιχείου FM5 το οποίο βρίσκεται σε ύψος 1.2m από το δάπεδο του δωματίου και απόσταση 0.3m από το θερμοστοιχείο της ψηλότερης θέσης. Στο γράφημα είναι εμφανές πως παρουσιάζεται πολύ καλή σύγκλιση στα δυο πειράματα ακολουθώντας το μοτίβο όλων των θερμοστοιχείων στις θέσεις FM.



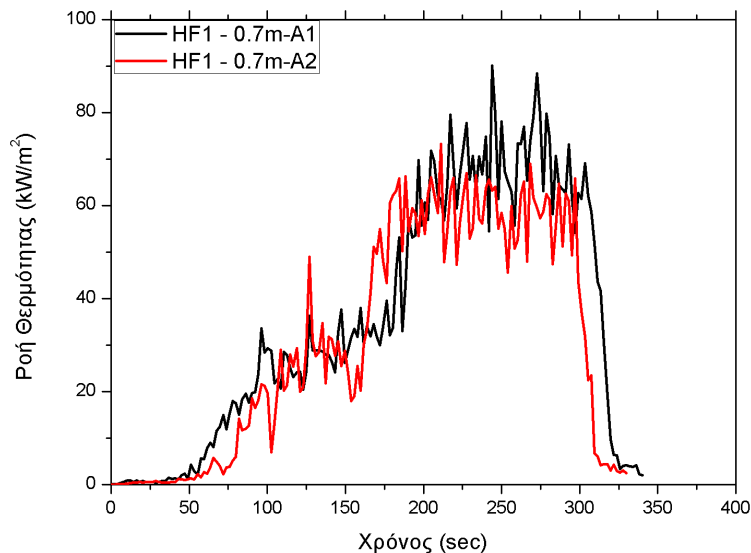
**Σχήμα 4.31** Συγκριτικό διάγραμμα των θερμοκρασιών στη θέση FM1 των πειραμάτων A1, A2.



**Σχήμα 4.32** Συγκριτικό διάγραμμα των θερμοκρασιών στη θέση FM5 των πειραμάτων A1, A2.

### 4.3.3.2 Ροή Θερμότητας

Η ροή θερμότητας στα πειράματα μετρήθηκε με το μετρητή ροής θερμότητας που ήταν τοποθετημένος πάνω στην πρόσοψη, σε ύψος 0.7m από το δάπεδο. Οι καμπύλες των μετρήσεων στα πειράματα A1 και A2 φαίνονται στο γράφημα του Σχήματος 4.33 που ακολουθεί. Η ροή θερμότητας στο πείραμα A1 (μαύρη καμπύλη στο Σχήμα 4.33) εμφάνισε μέγιστη τιμή 90 kW/m<sup>2</sup> τη χρονική στιγμή 244sec μετά την ανάφλεξη του καυσίμου, ενώ στο πείραμα A2 (κόκκινη καμπύλη στο Σχήμα 4.33) η μέγιστη τιμή ήταν 73.27758 kW/m<sup>2</sup> στα 212sec μετά την ανάφλεξη αντίστοιχα.

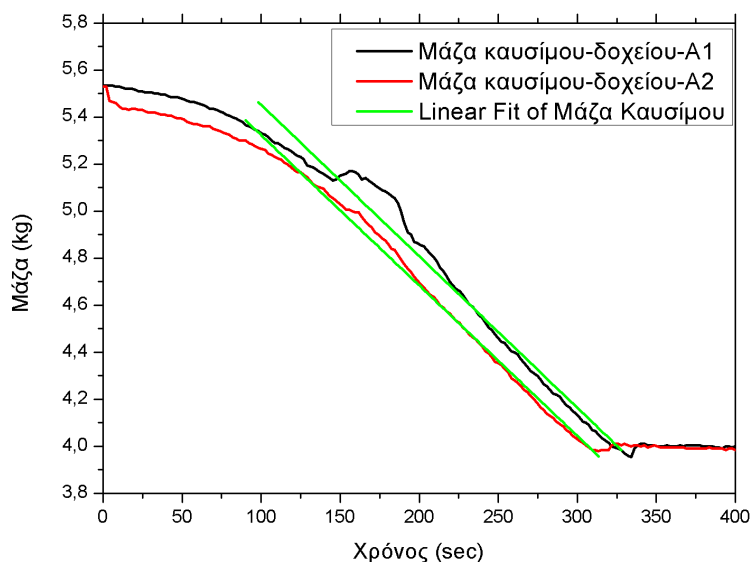


**Σχήμα 4.33** Συγκριτικό διάγραμμα των ροών θερμότητας στα πειράματα A1 και A2.

Από τις δυο καμπύλες παρατηρείται ιδιαίτερα καλή σύγκλιση ως προς τη μορφή τους, αφού πέραν των κάποιων διακυμάνσεων, η μορφή είναι παρόμοια και στις δυο περιπτώσεις. Ο ρυθμός με τον οποίο μειώνεται η ροή θερμότητας μετά το πέρας του πειράματος στο γράφημα είναι ακριβώς ίδιος στις δυο περιπτώσεις, ενώ και η ακολουθία στις διακυμάνσεις είναι ίδιας αντιστοιχίας. Τα στοιχεία αυτά είναι άκρως ενθαρρυντικά για τη θεώρηση πως οι μετρήσεις συγκλίνουν σε υψηλό ποσοστό.

### 4.3.3.3 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 4.34 φαίνονται οι καμπύλες της μάζας καυσίμου-δοχείου που μετρήθηκε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.



Σχήμα 4.34 Καμπύλες μάζας καυσίμου-δοχείου στα πειράματα A1 και A2.

Από τις καμπύλες της απώλειας μάζας του Σχήματος 4.34, 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 είναι με πράσινο χρώμα, ενώ τα αποτελέσματα της γραμμικής προσέγγισης φαίνονται στον Πίνακα 4.12 που ακολουθεί.

Πείραμα	Γραμμική Προσέγγιση (linefit)	Κλίση a (slope)	Σφάλμα (%)
A1	$y = ax + 5.626$	-0.00644	9,18686E-5
A2	$y = ax + 5.496$	-0.00639	4,58617 E-5

Πίνακας 4.12 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.

### 4.3.3.4 Συγκεντρώσεις $O_2$ , $CO$ , $CO_2$

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 ( $CO$ )

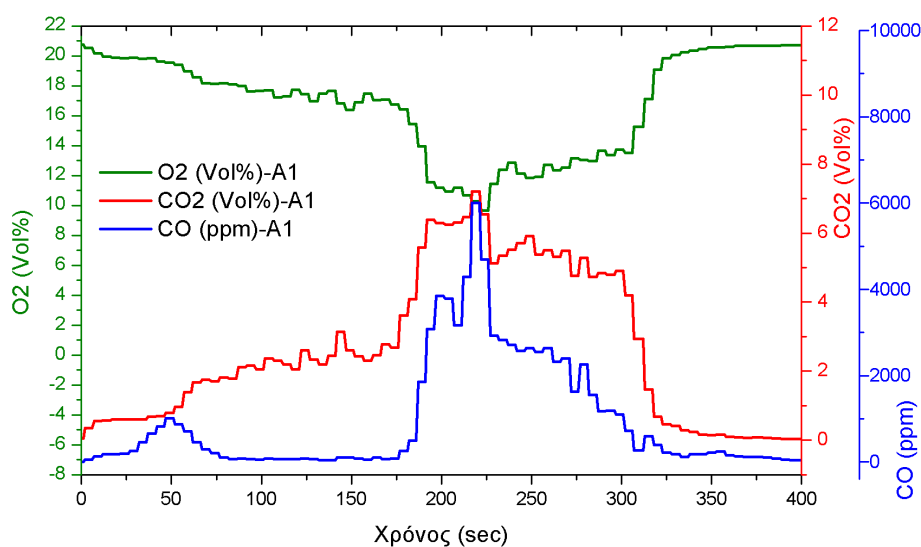
και διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ). Στον Πίνακα 4.13 φαίνονται οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές των συγκεντρώσεων στα πειράματα A1 και A2.

Πείραμα	$\text{O}_2$ (Vol%)		$\text{CO}_2$ (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

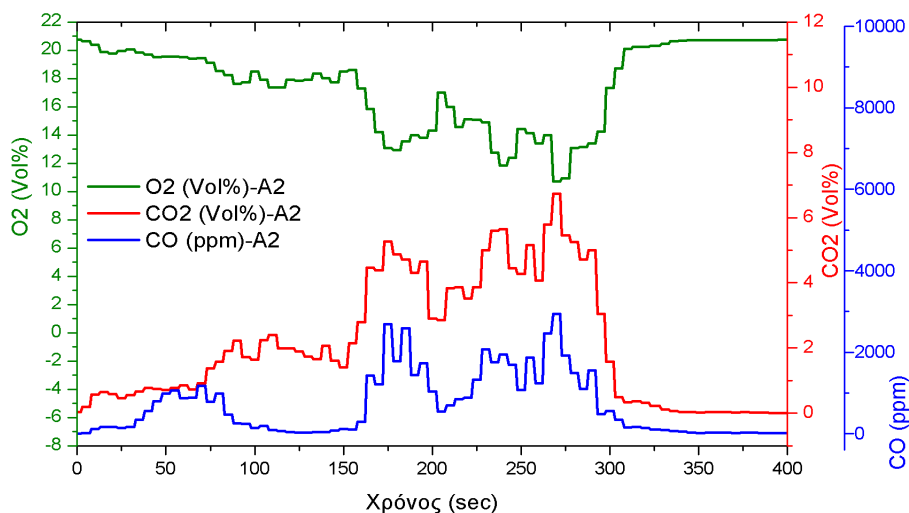
**Πίνακας 4.13** Μέγιστες-ελάχιστες τιμές των μετρήσεων  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ , CO στα πειράματα A1 και A2.

Από τον Πίνακα 4.13 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 Σχήματα 4.35-4.36 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 την έναυση, στο δε πείραμα A2 περίπου 275sec μετά την έναυση. 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 4.35** Γραφική αναπαράσταση των συγκεντρώσεων  $\text{O}_2$ , CO,  $\text{CO}_2$  στο πείραμα A1.



**Σχήμα 4.36** Γραφική αναπαράσταση των συγκεντρώσεων O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> 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.

#### 4.3.4 Συμπεράσματα

Τα πειράματα A1 και A2 έγιναν με σκοπό τον έλεγχο της επαναληψιμότητας στις μετρήσεις που έγιναν. Οι παράμετροι που μελετήθηκαν ήταν η διάρκεια κάθε πειράματος, ο ρυθμός καύσης, το θερμοκρασιακό προφίλ σε διάφορες θέσεις, οι συγκεντρώσεις αερίων.

Όσο αφορά τη διάρκεια κάθε πειράματος, υπήρξε σχεδόν ταύτιση, με το πείραμα A1 να διαρκεί 339sec και το πείραμα A2 331sec αντίστοιχα. Ο ρυθμός καύσης του καυσίμου ήταν πανομοιότυπος στις δυο περιπτώσεις.

Όσο αφορά τις θερμοκρασίες, σε γενικές γραμμές παρατηρείται ότι υπάρχει συμφωνία των μετρήσεων στα δυο πειράματα, παρά τις διαφοροποιήσεις που τυχόν υπάρχουν. Ειδικότερα, εντός του δωματίου και καθ' ύψος του ανοίγματος, οι μετρήσεις στα θερμοστοιχεία των θέσεων CB, CF και D συνέκλιναν σε μεγάλο βαθμό. Αυτό δημιουργεί ιδιαίτερη ικανοποίηση για την ορθότητα των μετρήσεων και τη γενίκευση συμπερασμάτων. Όσο αφορά τις μετρήσεις θερμοκρασίας εκτός του δωματίου, πάνω στην πρόσοψη και σε απόσταση από αυτή, οι τιμές των αποκλίσεων παρατηρήθηκαν αυξημένες σε σχέση με αυτές εντός του δωματίου. Φυσικά, σε καμία περίπτωση όπως αναλύθηκε στο αντίστοιχο εδάφιο, η απόκλιση αυτή δεν είναι τόσο σημαντική. Στις περιπτώσεις των θερμοστοιχείων επί της μεσοκαθέτου (F, T1C, T2C) εμφανίστηκαν μικρότερες αποκλίσεις στις τιμές σε σχέση με αυτές που μετρήθηκαν στο 1/4 του πλάτους της πρόσοψης (MF, T1M, T2M), δημιουργώντας καλή βάση για τη μελέτη του πλούμιου της φωτιάς και του κεντρικού άξονα του (center line). Δεν έλειψαν φυσικά αποκλίσεις αρκετά μεγάλες, όπως αναλύθηκαν, αλλά έγιναν μόλις σε 1-2 περιπτώσεις θερμοστοιχείων από το σύνολο των 54 θερμοστοιχείων, κάτι που δεν αλλοιώνει τη γενικότητα. Σημαντικό στοιχείο από την ανάλυση που προέκυψε είναι η ακολουθία των δυο πειραμάτων ως προς τις φάσεις της φωτιάς εντός του δωματίου. Οι αλλαγές από τη μια φάση στην επόμενη που παρατηρήθηκαν στα δυο πειράματα, έγιναν με διαφορά ελάχιστων δευτερολέπτων.

Ιδιαίτερα ενθαρρυντικό στοιχείο αποτέλεσε η μέτρηση της ροής θερμότητας στις δυο περιπτώσεις. Η καμπύλη της ροής θερμότητας και στις δυο περιπτώσεις είχε παρόμοια χαρακτηριστικά, με τις τιμές να μην απέχουν σε μεγάλο βαθμό.

Επίσης, στις συγκεντρώσεις του οξυγόνου και του διοξειδίου του άνθρακα οι τιμές που μετρήθηκαν συνέκλιναν κατά πολύ. Το προφίλ των συγκεντρώσεων αυτών των αερίων μοιάζει κοινό, σε αντίθεση με αυτό του μονοξειδίου του άνθρακα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, σημειώθηκαν μεγάλες διαφορές ως προς τις τιμές του μονοξειδίου του άνθρακα.

Με βάση τα παραπάνω, θα ήταν απολύτως φυσιολογικό να θεωρηθεί πως σημειώθηκε επίτευξη επαναληψιμότητας για τα πειράματα A1 και A2. Με διατήρηση ίδιων συνθηκών σε επόμενα πειράματα, δε θα χρειαστεί να μελετηθούν ξανά διάφοροι παράμετροι ως προς την επαναληψιμότητα των μετρήσεων και τα συμπεράσματα θα εξάγονται χωρίς αναφορά σε αυτή.

#### 4.4 Ισχύς φωτιάς

Ένας από τους πιο βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν μια πυρκαγιά και την εξέλιξη του εξωτερικού πλουμίου της φωτιάς είναι το πυροφορτίο [Babrauskas και Peacock, 1992]. 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.

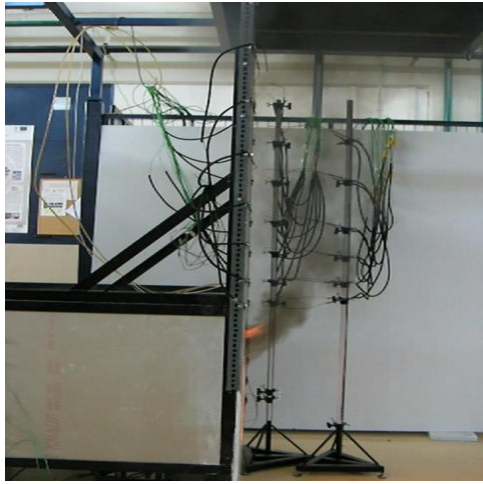
##### 4.4.1 Περιγραφή

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.14, στα πειράματα A3, A4, A5 χρησιμοποιήθηκε ως άνοιγμα πόρτα διαστάσεων 50cm(ύψος) x 20cm(πλάτος), με παράγοντα αερισμού 0.0707 και διαφορετικές ποσότητες καυσίμου.

Πείραμα	Όγκος καυσίμου (ml)	Ισχύς φωτιάς σε κλίμακα 1/4 (kW)	Ισχύς φωτιάς σε πραγματικές διαστάσεις (MW)
A3	1000	49	1.57
A4	2350	115	3.68
A5	4700	230	7.35

**Πίνακας 4.14** Ισχύς φωτιάς σε σχέση με τον όγκο καυσίμου που μελετήθηκε στα πειράματα A3, A4 και A5.

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 (Πίνακας 4.14). 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.

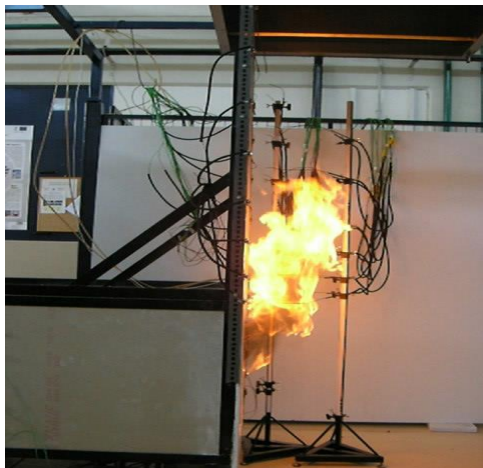


**Σχήμα 4.37** Εξερχόμενη φλόγα, 60sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A3).



**Σχήμα 4.38** Εξερχόμενη φλόγα, 60sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A3).

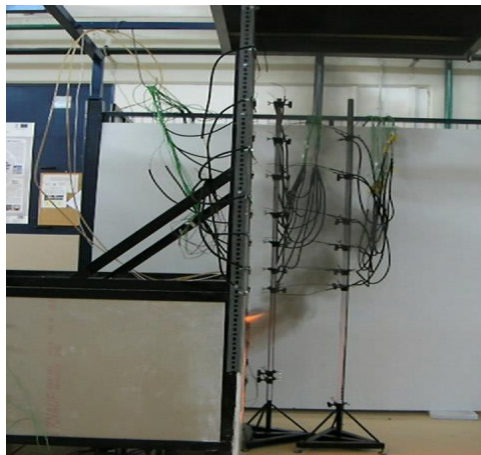
Περίπου 60sec μετά την ανάφλεξη του καυσίμου, έγιναν εμφανείς οι φλόγες εκτός του δωματίου, όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.37-4.38. Από το σημείο εκείνο και μετά οι φλόγες μένουν σταθερά εκτός δωματίου όντας ορατές στην πρόσοψη (Σχήματα 4.39-4.40). Μετά τα 340-350sec η πυρκαγιά έχει εισέλθει φανερά πλέον στη φάση της σβέσης (Σχήμα 4.41).



**Σχήμα 4.39** Εξερχόμενη φλόγα, 240sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A3).



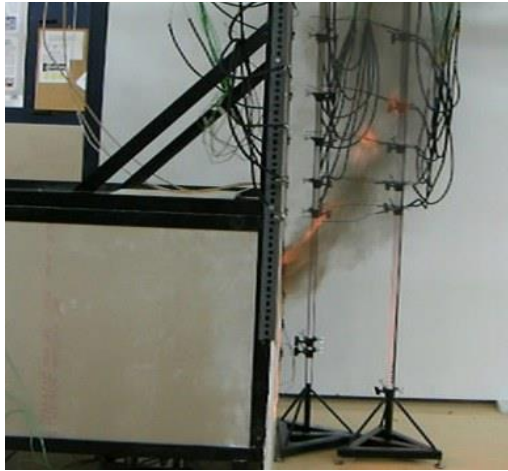
**Σχήμα 4.40** Εξερχόμενη φλόγα, 240sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A3).



**Σχήμα 4.41** Εξερχόμενη φλόγα 360sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A3).



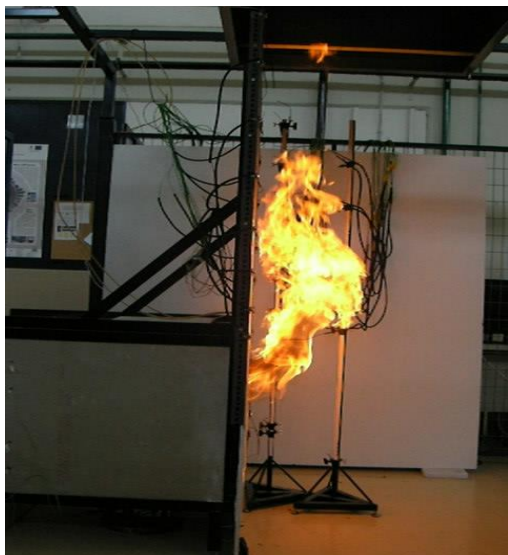
Το πείραμα A4 διεξήχθη με 2350ml εξανίου, προσομοιώνοντας πυρκαγιά 3.68MW σε δωμάτιο πραγματικών διαστάσεων. Στο πείραμα η ισχύς της φωτιάς έφτασε τα 115kW (Σχέση 4.3), ενώ το δοχείο καυσίμου βρισκόταν σε ύψος 7.5cm από το δάπεδο του δωματίου. Το πείραμα A4 είχε διάρκεια 525sec, με τις φλόγες να εξέρχονται δια μέσω του ανοίγματος μετά από 50sec, ενώ μετά από περίπου 65sec ήταν σταθερά εκτός δωματίου και ορατές στην πρόσοψη (Σχήμα 4.42-4.47). Η φάση της σβέσης φάνηκε μετά από 500sec περίπου, μέχρι τα 525sec όπου τελικά έσβησε.



**Σχήμα 4.42** Εξερχόμενη φλόγα, 65sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A4).



**Σχήμα 4.43** Εξερχόμενη φλόγα, 65sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A4).

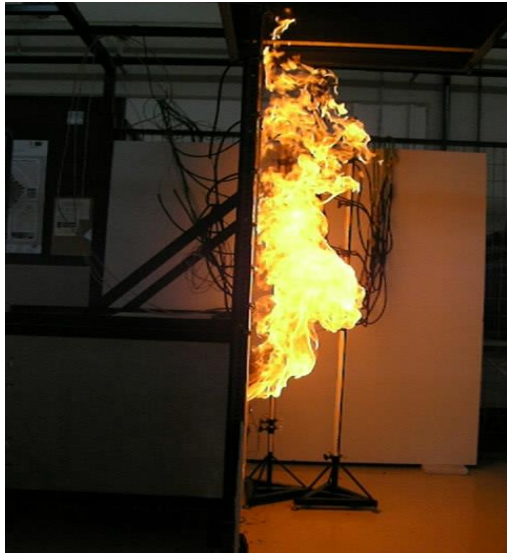


**Σχήμα 4.44** Εξερχόμενη φλόγα, 120sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A4).



**Σχήμα 4.45** Εξερχόμενη φλόγα, 120sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A4).





**Σχήμα 4.46** Εξερχόμενη φλόγα, 360sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A4).

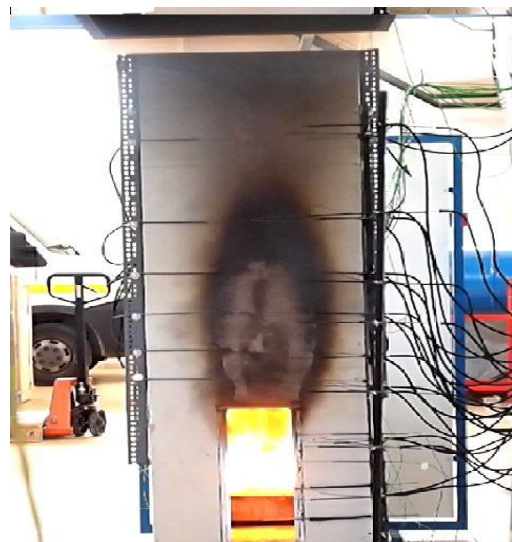


**Σχήμα 4.47** Εξερχόμενη φλόγα, 360sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A4).

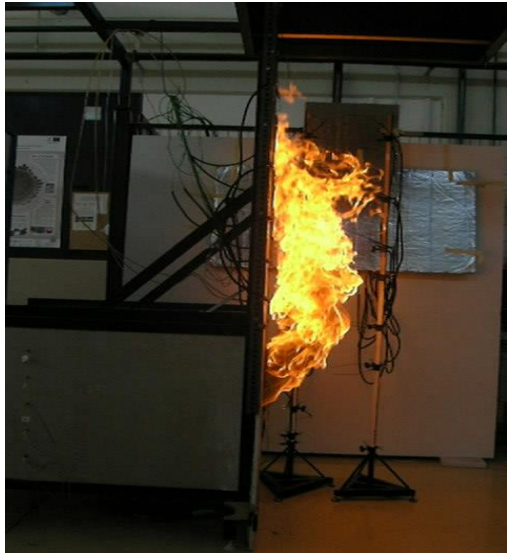
Στο πείραμα A5, έχοντας ως σκοπό την προσομοίωση φωτιάς 7.35MW, χρησιμοποιήθηκαν 4700ml εξανίου, τα οποία στην περίπτωση του μοντέλου έδωσαν φωτιά δύναμης 230kW (Σχέση 4.3). Το δοχείο τοποθετήθηκε σε ύψος 2cm από το δάπεδο του δωματίου, ενώ αυτή ήταν και η μεγαλύτερη ποσότητα καυσίμου που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη σειρά πειραμάτων, αποτελώντας το ανώτατο όριο ποσότητας καυσίμου για το δοχείο που χρησιμοποιήθηκε. Το πείραμα A5 διήρκησε 595sec, με τις φλόγες να εξέρχονται του δωματίου περίπου 30sec μετά την ανάφλεξη του καυσίμου (Σχήματα 4.48-4.57). Η φάση της σβέσης φάνηκε μετά τα 550sec. 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.



**Σχήμα 4.48** Εξερχόμενης φλόγας 30sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A5).



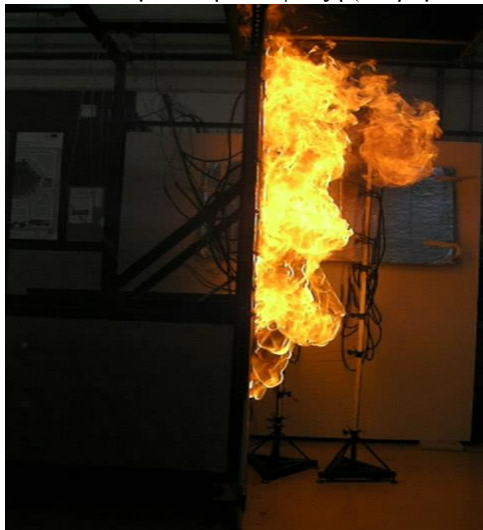
**Σχήμα 4.49** Εξερχόμενης φλόγας 30sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A5).



**Σχήμα 4.50** Εξερχόμενης φλόγας 120sec  
μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A5).



**Σχήμα 4.51** Εξερχόμενης φλόγας 120sec  
μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A5).



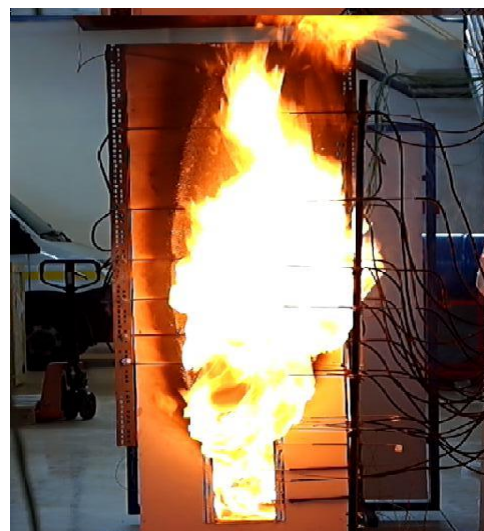
**Σχήμα 4.52** Εξερχόμενης φλόγας 240sec  
μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A5).



**Σχήμα 4.53** Εξερχόμενης φλόγας 240sec  
μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A5).

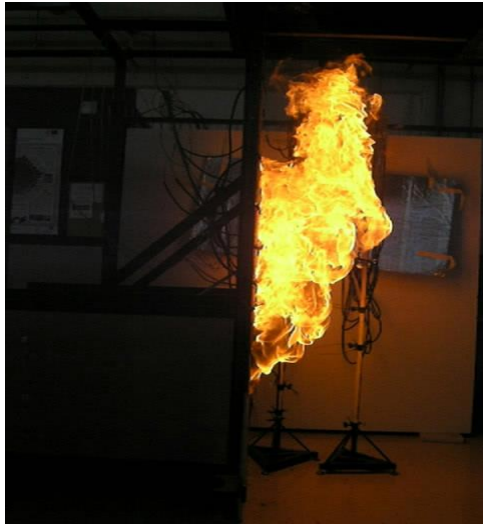


**Σχήμα 4.54** Εξερχόμενης φλόγας 360sec  
μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A5).

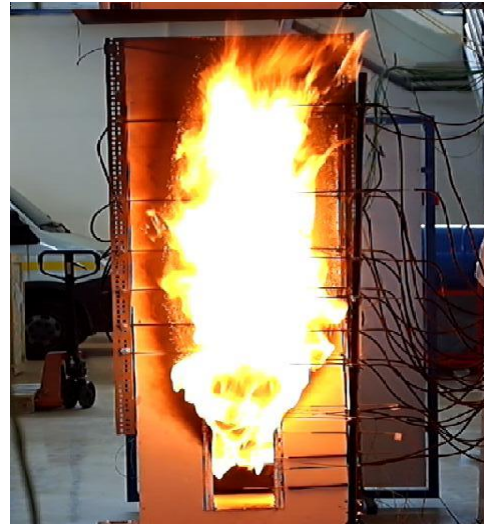


**Σχήμα 4.55** Εξερχόμενης φλόγας 360sec  
μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A5).





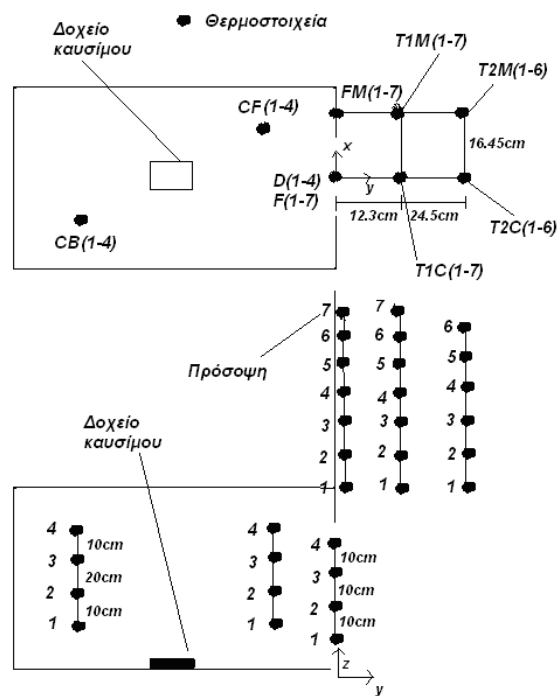
Σχήμα 4.56 Εξερχόμενη φλόγας 480sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A5).



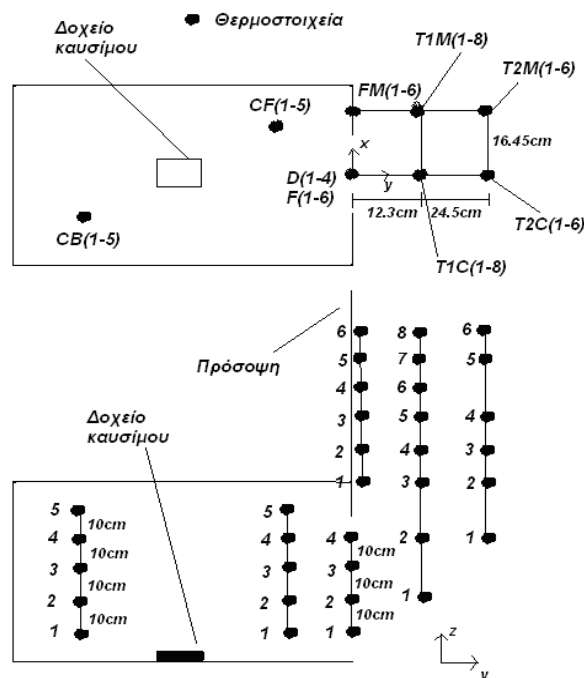
Σχήμα 4.57 Εξερχόμενη φλόγας 480sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A5).

#### 4.4.2 Διάταξη Μετρητικών Συσκευών

Στα πειράματα A3, A4 και A5 ως μετρητικές συσκευές χρησιμοποιήθηκαν α) θερμοστοιχεία β) μετρητής ροής θερμότητας, γ) αναλυτής αερίων (μόνο στο πείραμα A5) και δ) δυναμοκυψέλη. Αρχή μέτρησης θεωρήθηκε το σημείο της μεσοκαθέτου του ανοίγματος στο δάπεδο του δωματίου, ενώ οι μετρήσεις λαμβάνονταν ανά 2sec.



Σχήμα 4.58 Σχηματικό διάγραμμα των θέσεων των θερμοστοιχείων στα πειράματα A3 και A4.



Σχήμα 4.59 Σχηματικό διάγραμμα των θέσεων των θερμοστοιχείων στο πείραμα A5.

Ο μετρητής ροής θερμότητας τοποθετήθηκε πάνω στη μεσοκάθετο της πρόσοψης, σε ύψος 0.7m από το δάπεδο, ενώ η δυναμοκυψέλη ήταν κεντραρισμένη κάτω από το δάπεδο του δωματίου. Ο αναλυτής αερίων που χρησιμοποιήθηκε μόνο στο πείραμα A5, ήταν τοποθετημένος σε απόσταση 0.05m από την πρόσοψη και ύψος 1.65m. Στα Σχήματα 4.58-4.59 φαίνεται η διάταξη των θερμοστοιχείων στα πειράματα A3, A4 και A5, ενώ στο Παράρτημα A είναι καταγεγραμμένες οι συντεταγμένες των μετρητικών συσκευών για τα πειράματα αυτά.

#### 4.4.3 Ανάλυση Μετρήσεων

##### 4.4.3.1 Θερμοκρασίες εσωτερικά του δωματίου

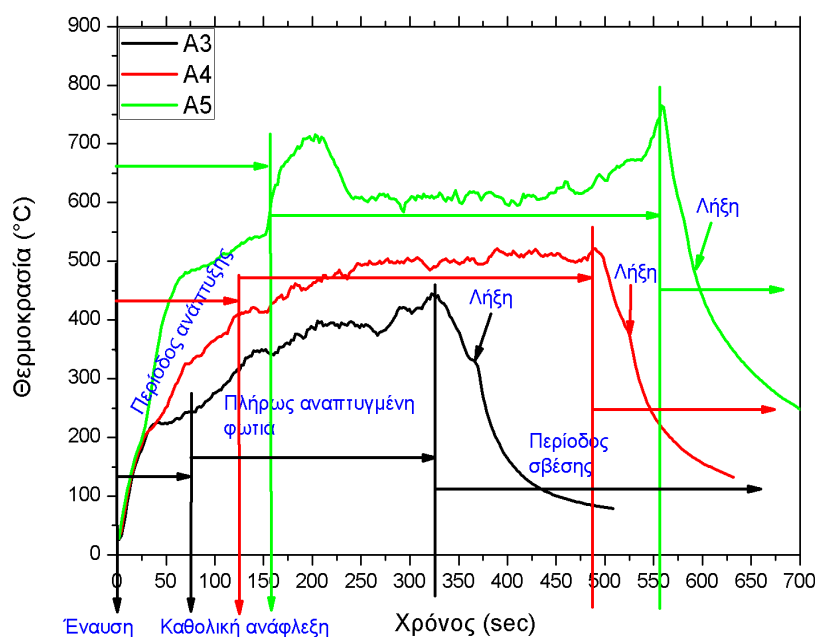
Με τα θερμοστοιχεία CB και CF έγινε μελέτη του θερμοκρασιακού προφίλ στο εσωτερικό του δωματίου σε κάθε περίπτωση. Στα πειράματα A3 και A4 τοποθετήθηκαν 4 θερμοστοιχεία κατά τον άξονα z στις θέσεις CB και 4 θερμοστοιχεία αντίστοιχα στις θέσεις CF. Στην περίπτωση του πειράματος A5 προστέθηκαν δυο ακόμα θερμοστοιχεία, από ένα σε κάθε θέση, με αποτέλεσμα να είναι 5 θερμοστοιχεία καθ' ύψος στις θέσεις CB ανά 10cm και 5 θερμοστοιχεία καθ' ύψος στις θέσεις CF (επίσης ανά 10cm) για καλύτερη απεικόνιση των θερμοκρασιών. Στον Πίνακα 4.15 φαίνονται οι μέγιστες και μέσες τιμές των θερμοκρασιών εσωτερικά του δωματίου, ενώ στον Πίνακα 4.16 αντίστοιχα του πειράματος A5.

Θέση	Μέγιστη θερμοκρασία (°C)		Μέση τιμή θερμοκρασιών (°C)	
	A3	A4	A3	A4
CB1	70,26	94,17	54,61	75,05
CB2	94,49	140,88	67,94	106,02
CB3	600,76	699,37	340,69	478,18
CB4	613,47	760,66	495,08	616,23
CF1	232,17	474,93	165,65	299,97
CF2	590,67	848,67	289,02	603,96
CF3	765,44	739,23	580,94	641,48
CF4	756,26	731,48	624,10	633,32

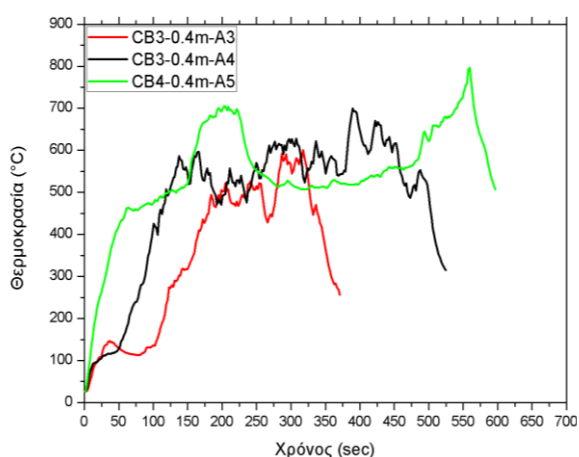
Πίνακας 4.15 Μέγιστες θερμοκρασίες και μέσες τιμές θερμοκρασιών, από τα θερμοστοιχεία στις θέσεις (CB) και (CF) στα πειράματα A3 και A4

Θέση	Μέγιστη θερμοκρασία (°C)	Μέση τιμή θερμοκρασιών (°C)
CB1	813,32	421,86
CB2	848,39	494,17
CB3	830,08	534,75
CB4	797,00	541,34
CB5	771,04	547,59
CF1	826,84	550,93
CF2	902,26	678,07
CF3	831,88	671,99
CF4	767,07	641,14
CF5	759,91	641,33

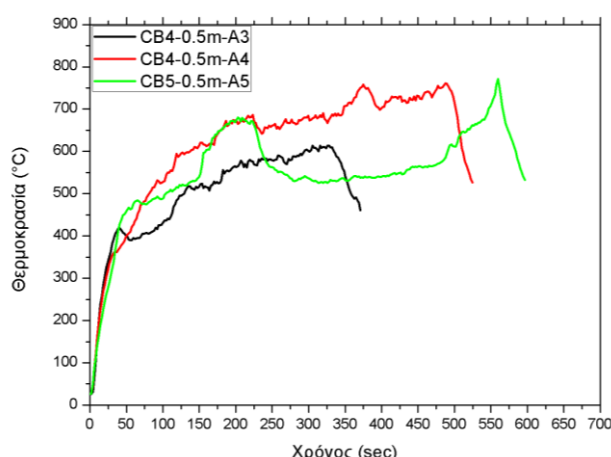
**Πίνακας 4.16** Μέγιστες θερμοκρασίες και μέσες τιμές θερμοκρασιών, από τα θερμοστοιχεία στις θέσεις (CB) και (CF) στο πείραμα A5.



**Σχήμα 4.60** Συγκριτικό διάγραμμα των μέσων θερμοκρασιών εντός του δωματίου για τα πειράματα A3, A4 και A5.



**Σχήμα 4.61** Συγκριτικό διάγραμμα των θερμοκρασιών στη θέση CB3-CB4 των πειραμάτων A3, A4 και A5.



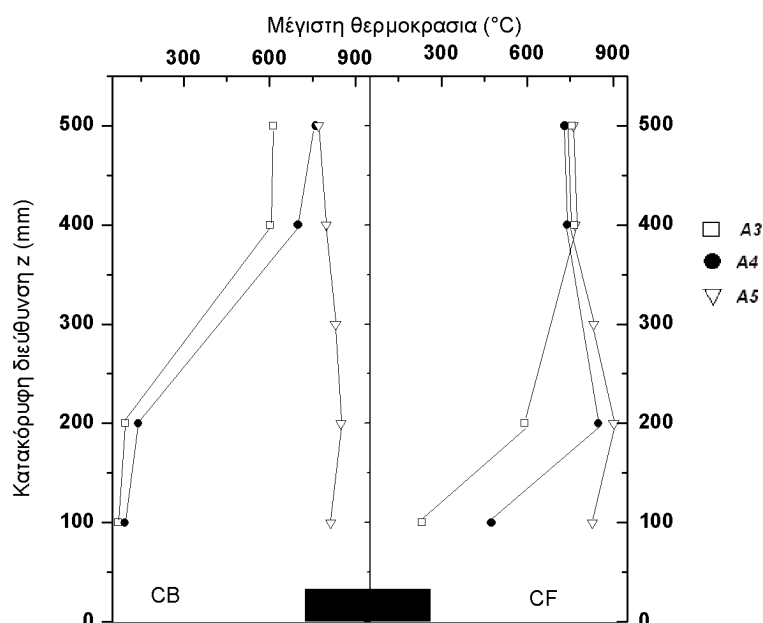
**Σχήμα 4.62** Συγκριτικό διάγραμμα των θερμοκρασιών στη θέση CB4-CB5 των πειραμάτων A3, A4 και A5.

Στο γράφημα του Σχήματος 4.60 περιγράφονται οι φάσεις της φωτιάς με βάση τις μέσες θερμοκρασίες από τα θερμοστοιχεία CF και CB εντός του δωματίου. Από τις καμπύλες είναι φανερό πως οι μέσες θερμοκρασίες των θερμοστοιχείων εντός του δωματίου συμφωνούν

ποιοτικά και στις τρεις περιπτώσεις, με τις διαφορές να παρατηρούνται μόνο σε ορισμένα σημεία στο πείραμα A5 των 4700ml καυσίμου. Αυτές οι διαφορές παρατηρούνται στο διάστημα 150-250sec όπου υπάρχει ραγδαία αύξηση στις θερμοκρασίες και αντιπροσωπεύει τη μετάβαση από τη φάση της ανάπτυξης στη φάση της πλήρους αναπτυγμένης φωτιάς.. Αντίστοιχα, στα πειράματα A4 και A5 παρατηρούνται ομοίως διακυμάνσεις στις θερμοκρασίες κατά την αντίστοιχη μετάβαση στην περίοδο της αναπτυγμένης φωτιάς, όπου όμως δεν έχουν τον τόσο ραγδαίο χαρακτήρα που έχουν στο πείραμα A5. Και στις τρεις περιπτώσεις οι ανώτερες τιμές στις μέσες τιμές των θερμοστοιχείων σηματοδότησαν την έναρξη της απόσβεσης στην καμπύλη για την περίοδο της αποσύνθεσης μέχρι το τελικό σβήσιμο της φωτιάς. Σε κάθε περίπτωση, η φάση της αποσύνθεσης διήρκησε περίπου 25-30sec, με τη μείωση των μέσων θερμοκρασιών να είναι όμοιου ρυθμού ανεξαρτήτου ποσότητας καυσίμου.

Στις τιμές των θερμοκρασιών του Πίνακα 4.15, παρατηρείται πως στις δυο χαμηλότερες θέσεις, CB1 και CB2, οι μέγιστες θερμοκρασίες είναι κατά πολύ χαμηλότερες σε σχέση με τις δυο υψηλότερες θέσεις στα πειράματα A3 και A4. Αυτό εξηγείται από το γεγονός πως τα θερμοστοιχεία CB1 και CB2 καλύπτουν την περιοχή του κατώτερου στρώματος εντός του δωματίου (lower layer). Αυτό δείχνει τη σημασία που έχει το ανώτερο στρώμα (upper layer), καθώς εκεί αναπτύσσονται σημαντικές διαφορές στις θερμοκρασίες σε σχέση με τα χαμηλότερα επίπεδα. Σε αντίθεση, στο πείραμα A5, από τον Πίνακα 4.16 οι διαφορές των μέγιστων θερμοκρασιών στο ανώτερο και κατώτερο στρώμα δε δείχνουν να έχουν μεγάλες αποκλίσεις, καθώς οι θερμοκρασίες είναι ιδιαίτερα υψηλές σε όλες τις θέσεις. Ενδεικτικά, δίνονται στα Σχήματα 4.61-4.62 οι καμπύλες των θερμοκρασιών για τα θερμοστοιχεία που καλύπτουν το ανώτερο στρώμα, σε ύψος 0.4m και 0.5m των πειραμάτων με το χρόνο στα γραφήματα, να είναι ο χρόνος διάρκειας κάθε πειράματος. Όπως φαίνεται, οι διακυμάνσεις σε όλα τα πειράματα είναι μεγαλύτερες σε ύψος 0.4m, μόλις λίγα εκατοστά πάνω από το ουδέτερο επίπεδο (υπολογίζεται θεωρητικά περίπου στα 0.26m από το δάπεδο), ενώ το θερμοστοιχείο που βρίσκεται στην υψηλότερη θέση δεν εμφανίζει παρόμοιες διακυμάνσεις στις τιμές του.

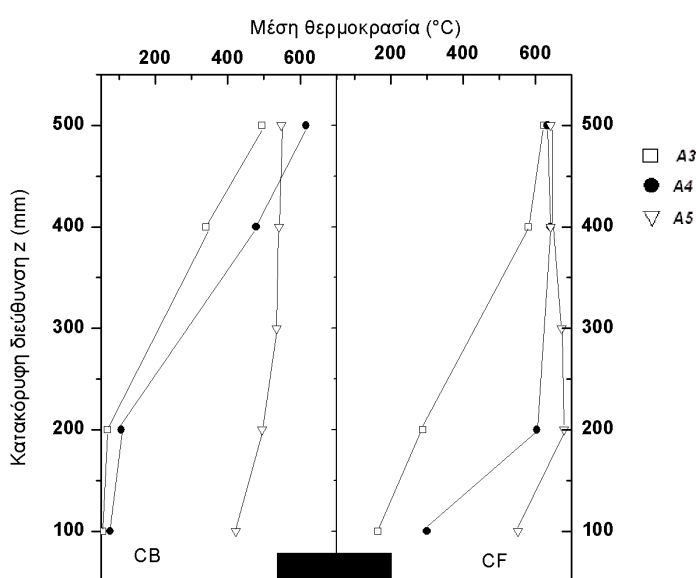
Στο Σχήμα 4.63 που ακολουθεί απεικονίζονται οι μέγιστες θερμοκρασίες των θερμοστοιχείων εντός του δωματίου (CB και CF), με βάση την κατακόρυφη διεύθυνση του άξονα z. Το γράφημα αυτό επιβεβαιώνει την παρατήρηση πως στα πειράματα A3 και A4 οι ανώτατες θερμοκρασίες στο ανώτερο στρώμα είναι κατά πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του χαμηλότερου στρώματος, δείχνοντας την ύπαρξη μεγαλύτερης θερμοκρασιακής διαστρωμάτωσης.



**Σχήμα 4.63** Διάγραμμα μέγιστων θερμοκρασιών εντός του δωματίου κατά την κατακόρυφη διεύθυνση του άξονα z.

Στις περιπτώσεις των θερμοστοιχείων της βορειο-δυτικής γωνίας (CB) στα πειράματα A3 και A4 η αύξηση στα μέγιστα είναι παρόμοια, σε αντίθεση με αυτή του πειράματος A5, όπου παρατηρείται μικρή μείωση από το χαμηλότερο στρώμα προς το υψηλότερο. Οι μέγιστες τιμές στα πειράματα A4 και A5 σχεδόν συμπίπτουν. Στις μέγιστες τιμές των θερμοστοιχείων στις θέσεις CF παρατηρείται σύγκλιση των τιμών σε όλα τα πειράματα όσο αυξάνει το ύψος των θερμοστοιχείων. Στο ανώτερο στρώμα, δηλαδή σε ύψη 0.4m και 0.5m, φαίνεται πως οι μέγιστες τιμές συγκλίνουν σε μεγάλο βαθμό, ανεξαρτήτως ποσότητας καυσίμου. Αυτά συντελούν στην παρατήρηση πως στη βόρειο-δυτική γωνία (CB) υπάρχει μεγαλύτερη διαστρωμάτωση, ενώ στη νότιο-ανατολική γωνία (CF) παρουσιάζονται μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Αυτό γίνεται διότι τα θερμοστοιχεία στις θέσεις CF είναι κοντά στο άνοιγμα, δηλαδή πολύ κοντά στο οξυγόνο που εισέρχεται. Στο πείραμα A5 δεν ισχύει το ίδιο όσο αφορά τη θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση, καθώς η μεγάλη ισχύς οδηγεί στη δημιουργία ενιαίου θερμοκρασιακού προφίλ εντός του δωματίου με αισθητά αυξημένες θερμοκρασίες.

Παρόμοιες παρατηρήσεις μπορούν να γίνουν και στην περίπτωση των μέσων θερμοκρασιών συναρτήσει του άξονα z, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.64



**Σχήμα 4.64** Διάγραμμα μέσων θερμοκρασιών εντός του δωματίου κατά την κατακόρυφη διεύθυνση του άξονα z.

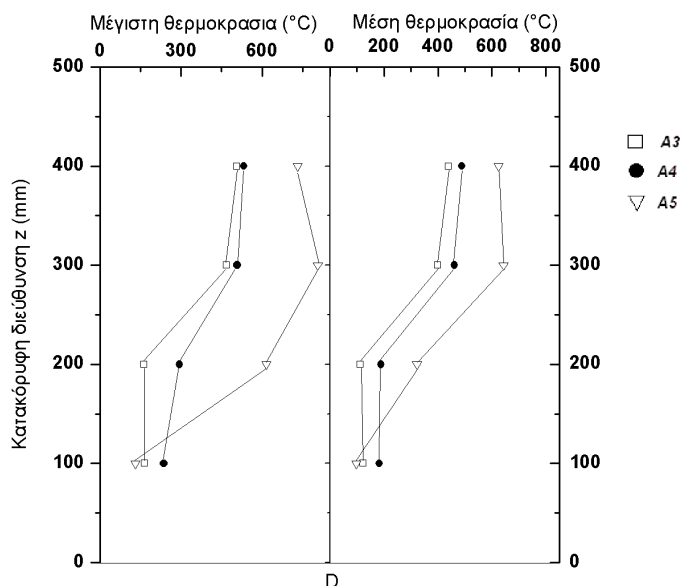
Στην περίπτωση των θερμοστοιχείων στην πλευρά απέναντι από το άνοιγμα (Βόρειο-δυτική γωνία) οι μέσες θερμοκρασίες στα πειράματα A3-A4 είναι πολύ κοντά στο επίπεδο του χαμηλότερου στρώματος, σε αντίθεση με του πειράματος A5, όπου παρουσιάζονται μέσες θερμοκρασίες περίπου τέσσερις φορές μεγαλύτερες. Στο ανώτερο στρώμα όμως, και κυρίως στη θέση 10cm από την οροφή, οι τιμές συγκλίνουν αρκετά, με τη μέση τιμή του πειράματος A4 των 2350ml να εμφανίζει υψηλότερη τιμή από τα άλλα δυο πειράματα. Στην περίπτωση των μέσων θερμοκρασιών εντός του δωματίου στην πλευρά της πόρτας (Νότιο-ανατολική γωνία) μπορούν να σημειωθούν αντίστοιχες παρατηρήσεις με αυτές των μέγιστων θερμοκρασιών στις θέσεις αυτές.

#### 4.4.3.2 Θερμοκρασίες στο άνοιγμα του δωματίου

Στο εδάφιο αυτό παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες που αναπτυχθήκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων A3, A4 και A5 στις θέσεις D κατακόρυφα του ανοίγματος. Στον Πίνακα 4.17 παρουσιάζονται οι μέγιστες και οι μέσες τιμές στις θέσεις αυτές, ενώ στο Σχήμα 4.65 φαίνεται το αντίστοιχο διάγραμμα των τιμών αυτών

Θέση	Μέγιστη θερμοκρασία (°C)			Μέση τιμή θερμοκρασιών (°C)		
	A3	A4	A5	A3	A4	A5
D1	165,08	236,45	131,72	123,24	182,74	98,21
D2	161,86	294,52	615,54	112,96	189,10	322,17
D3	467,26	508,32	805,98	398,98	460,57	642,49
D4	506,17	532,43	731,32	438,20	488,82	623,82

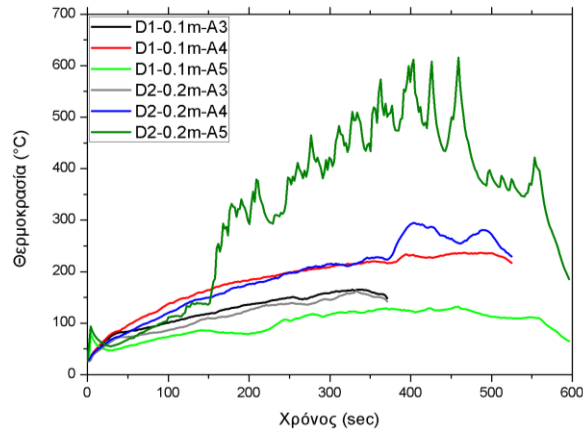
**Πίνακας 4.17** Μέγιστες και μέσες τιμές θερμοκρασιών, για τα θερμοστοιχεία στις θέσεις D του ανοίγματος στα πειράματα A3, A4 και A5.



**Σχήμα 4.65** Διάγραμμα μέγιστων-μέσων θερμοκρασιών στο άνοιγμα του δωματίου κατά την κατακόρυφη διεύθυνση του άξονα z.

Στα πειράματα A3-A4 οι μέγιστες και οι μέσες θερμοκρασίες είναι πολύ κοντά μεταξύ τους τόσο στο ανώτερο στρώμα, όσο και στο κατώτερο, με μεγαλύτερη απόκλιση να σημειώνεται στη μέγιστη θερμοκρασία της θέσης D2 που βρίσκεται 0.2m από το δάπεδο. Στην περίπτωση του πειράματος A5 φαίνεται πως οι μέγιστες-μέσες θερμοκρασίες στην κατώτερη θέση D1 παρουσιάζουν μικρότερες τιμές σε σχέση με τα πειράματα A3-A4. Στη θέση D2 όπου οι μέσες-μέγιστες θερμοκρασίες του A5 έχουν υποσκελίσει κατά πολύ τις αντίστοιχες των A3-A4, ενώ σε μεγαλύτερα ύψη από το σημείο αυτό παρατηρείται ποιοτική σύγκλιση. Στο Σχήμα 4. που ακολουθεί απεικονίζεται η χρονική εξάρτηση των θερμοκρασιών στις θέσεις D1 και D2 όπου εμφανίστηκαν ενδιαφέροντα στοιχεία από το γράφημα του Σχήματος 4.66. Στις θέσεις αυτές υπήρξαν οι μεγαλύτερες εναλλαγές στις τιμές που μετρήθηκαν, κάτι το οποίο είναι εμφανές από τις καμπύλες του Σχήματος 4.66. Στα πειράματα A3-A4 ο ρυθμός αύξησης των θερμοκρασιών είναι παρόμοιος στις θέσεις των θερμοστοιχείων D1, D2, με την εμφάνιση μικρών αποκλίσεων από τα 370sec μέχρι το τέλος του πειράματος A4 στη θέση που βρίσκεται 0.2m από το δάπεδο (μπλέ καμπύλη). Αντίθετα, στο πείραμα A5 παρατηρείται μεγάλη απόκλιση στις θερμοκρασίες στις δυο αυτές θέσεις, όπου στο ύψος 0.2m οι μετρήσεις θερμοκρασίας μεταβάλλονται συνεχώς. Σημειώνεται πως η θέση αυτή είναι μόλις λίγα εκατοστά χαμηλότερα από το ύψος του ουδέτερου επιπέδου. Αυτές οι μεταβολές δημιουργούνται από την περιοδική αστάθεια της φλόγας (puffing) η οποία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το άνοιγμα [Ασημακοπούλου, 2011].





**Σχήμα 4.66** Συγκριτικό διάγραμμα των θερμοκρασιών για τα θερμοστοιχεία στις θέσεις D1, D2 των πειραμάτων A3, A4 και A5.

#### 4.4.3.3 Θερμοκρασίες στο εξερχόμενο πλούμιο της φωτιάς

Στη συνέχεια μελετήθηκαν οι μετρήσεις των θερμοκρασιών στο εξωτερικό πλούμιο της φωτιάς. Οι μετρήσεις αυτές περιλαμβάνουν τα θερμοστοιχεία που ήταν τοποθετημένα στους δύο στύλους που βρίσκονταν σε απόσταση από το άνοιγμα. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η δημιουργία ενός πλέγματος από θερμοστοιχεία, όπου αναλόγως τις αποστάσεις μεταξύ των θερμοστοιχείων, μπορεί να μελετηθεί το εξερχόμενο πλούμιο ανά περίπτωση.

Στους Πίνακες 4.18-4.19 που ακολουθούν, παρουσιάζονται οι μέγιστες-μέσες τιμές των θερμοστοιχείων που τοποθετήθηκαν στο 1/4 του πλάτους της πρόσοψης και στη μεσοκάθετο αντίστοιχα, στους στύλους, για τα πειράματα A3, A4 και A5.

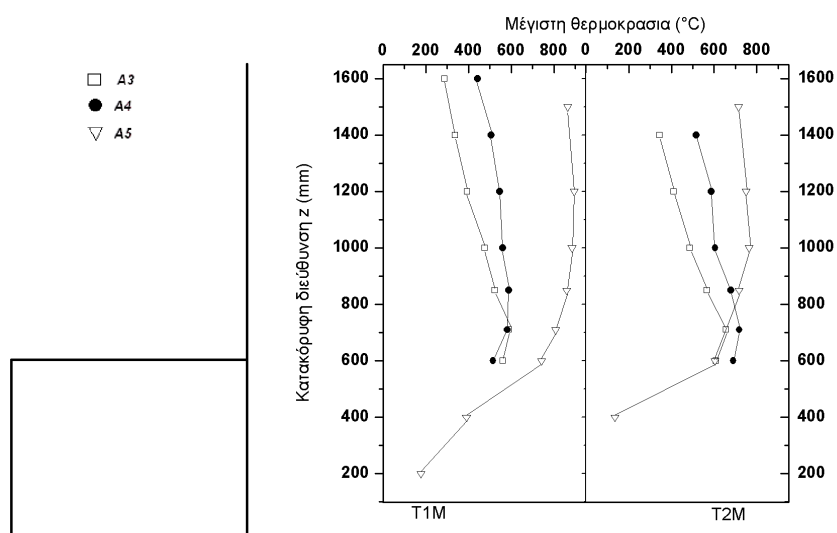
Με βάση τις τιμές από τους Πίνακες 4.18-4.19, στα Σχήματα 4.67-4.68 φαίνονται τα αντίστοιχα διαγράμματα συναρτήσεως του ύψους των θερμοστοιχείων.

Θέση	Μέγιστη θερμοκρασία (°C)			Μέση τιμή θερμοκρασιών (°C)		
	A3	A4	A5	A3	A4	A5
T1M1	560,24	514,88	176,69	198,86	328,20	129,71
T1M2	588,54	582,05	390,10	220,84	361,91	229,68
T1M3	523,60	588,31	742,28	220,30	360,69	569,40
T1M4	474,74	560,53	808,76	207,12	342,56	614,22
T1M5	392,71	546,71	860,57	184,16	310,45	625,01
T1M6	337,87	506,24	884,78	163,70	276,91	555,18
T1M7	288,24	442,82	894,69	147,76	245,95	421,66
T1M8	-	-	864,35	-	-	368,36
T2M1	607,20	689,29	136,66	302,34	472,73	90,15
T2M2	654,94	717,59	603,99	314,47	472,80	436,46
T2M3	566,50	679,16	716,56	284,65	447,56	538,94
T2M4	486,77	604,20	764,39	239,98	391,46	535,67
T2M5	411,66	586,92	750,35	207,34	350,85	496,02
T2M6	343,90	515,92	713,84	172,46	294,77	426,78

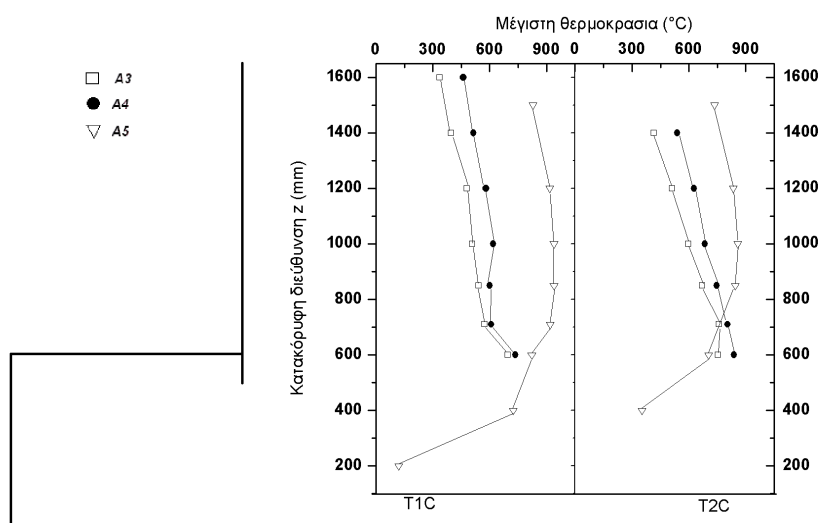
**Πίνακας 4.18** Μέγιστες και μέσες τιμές θερμοκρασιών, για τα θερμοστοιχεία στις θέσεις T1M και T2M εκτός του δωματίου στα πειράματα A3, A4 και A5.

Θέση	Μέγιστη θερμοκρασία (°C)			Μέση τιμή θερμοκρασιών (°C)		
	A3	A4	A5	A3	A4	A5
T1C1	695,72	734,97	120,40	302,32	490,77	93,04
T1C2	573,28	607,77	723,97	241,82	393,53	568,84
T1C3	540,45	600,75	821,42	241,05	387,02	691,44
T1C4	507,60	618,52	919,93	232,22	385,38	735,70
T1C5	478,26	580,20	938,53	214,28	364,48	729,87
T1C6	396,78	513,85	939,07	187,18	320,18	700,95
T1C7	336,80	461,30	916,24	163,85	277,26	657,74
T1C8	-	-	827,66	-	-	561,10
T2C1	751,91	838,03	351,67	451,77	670,49	175,71
T2C2	758,96	803,12	702,93	377,83	556,65	538,83
T2C3	669,15	746,96	843,80	324,36	492,82	652,83
T2C4	595,76	684,39	856,96	284,48	451,60	645,52
T2C5	511,10	626,93	834,89	241,59	407,18	600,82
T2C6	413,62	538,82	735,51	198,36	339,29	480,59

**Πίνακας 4.19** Μέγιστες και μέσες τιμές θερμοκρασιών, για τα θερμοστοιχεία στις κεντρικές θέσεις T1C και T2C εκτός του δωματίου στα πειράματα A3, A4 και A5.



**Σχήμα 4.67** Διάγραμμα μέγιστης θερμοκρασίας στο 1/4 του πλάτους της πρόσοψης του δωματίου συναρτήσει της κατακόρυφης διεύθυνσης του άξονα z.

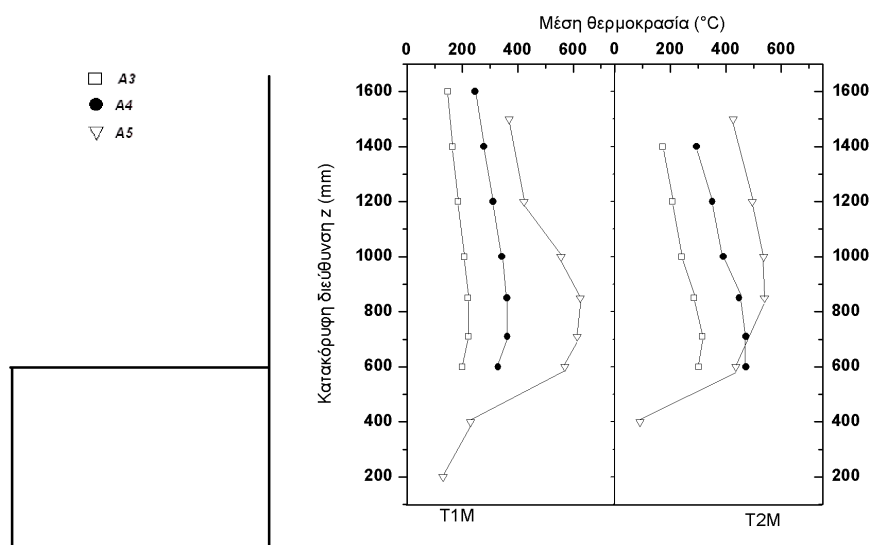


**Σχήμα 4.68** Διάγραμμα μέγιστης θερμοκρασίας στη μεσοκάθετο της πρόσοψης του δωματίου συναρτήσει της κατακόρυφης διεύθυνσης του άξονα z.

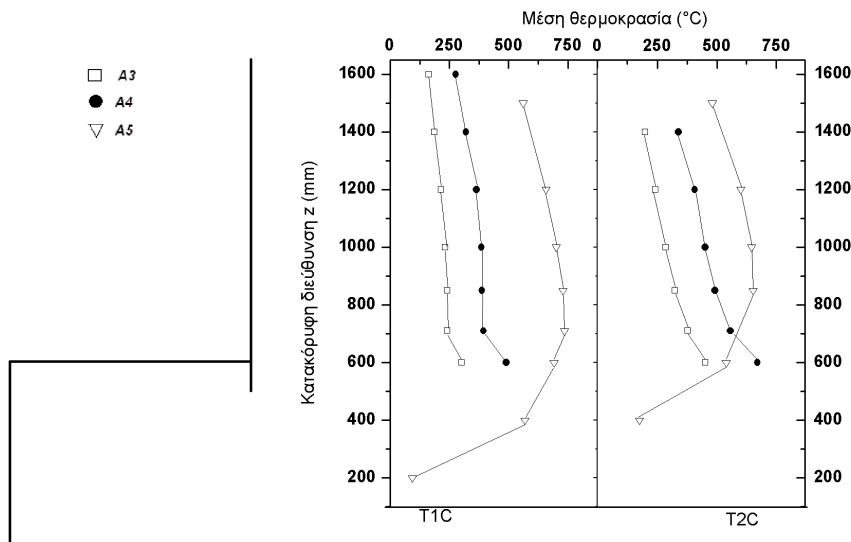
Στα Σχήματα 4.67-4.68 μπορεί να γίνει σύγκριση των μέγιστων τιμών θερμοκρασίας για τα θερμοστοιχεία στη μεσοκάθετο και για αυτά στο 1/4 του πλάτους της πρόσοψης, τα οποία

βρίσκονται τοποθετημένα σε απόσταση 12.3cm (στύλος T1) και 24.5cm (στύλος T2) από την πρόσοψη. Βασικό στοιχείο και στα δυο διαγράμματα είναι η κοινή μορφή των τιμών στις περιπτώσεις των δυο στύλων που περιγράφονται. Για κάθε πείραμα ξεχωριστά, ανεξαρτήτου πλάτους παρατηρείται μια συμφωνία ως προς τη διακύμανση των τιμών όσο αυξάνει το ύψος, φυσικά πάντα με ορισμένες μικρές αποκλίσεις. Να σημειωθεί πως στο πείραμα A5 οι μετρήσεις ξεκινούν σε ύψος 20cm (10cm χαμηλότερα από το μέσο του ύψους της πόρτας), ενώ στα πειράματα A3, A4 οι μετρήσεις ξεκινούν από ύψος 60cm. Αυτό μειώνει τη δυνατότητα καλύτερης ανάλυσης του εξερχόμενου πλουμίου, καθώς δε συμπεριλαμβάνει σημεία σε μικρή απόσταση από το άνοιγμα, πρόβλημα το οποίο εντοπίστηκε και για το λόγο αυτό έγινε η αναδιάταξη σε επόμενα πειράματα. Παρόλο αυτά, δίνεται μια καλή ποιοτικά εικόνα του εξερχόμενου πλουμίου σε κρίσιμες περιοχές. Στα θερμοστοιχεία στη μεσοκάθετο φαίνεται σε κάθε περίπτωση να σημειώνονται υψηλότερες μέγιστες τιμές σε σχέση με αυτά στο 1/4 του πλάτους, ενώ στο πείραμα A5 παρουσιάζεται σημαντική αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας από τη θέση σε ύψος 20cm σε αυτή των 40cm. Από το σημείο εκείνο και ψηλότερα οι μεταβολές είναι εμφανώς μικρότερες, κάτι που ισχύει και στα πειράματα A3 και A4.

Στα Σχήματα 4.69-4.70 των μέσων θερμοκρασιών συναρτήσει του ύψους για τους δυο στύλους που ακολουθούν, μπορούν να επισημανθούν παρόμοιες παρατηρήσεις με αυτές που σημειώθηκαν στις μέγιστες τιμές. Μόνη σημαντική διαφορά παρατηρείται στον στύλο T1 του πειράματος A5, στις τιμές από τα θερμοστοιχεία στο 1/4 του πλάτους της πρόσοψης, όπου μετά τη ραγδαία αλλαγή από το ύψος 20cm σε αυτό των 40cm, όπως επισημάνθηκε στις μέγιστες τιμές, ακολουθεί επίσης σημαντική διαφορά στις θερμοκρασίες στα ύψη 100-120cm. Τελικά, παρατηρείται πως όσο αυξάνεται η ισχύς της φωτιάς, τόσο πιο ανεπτυγμένο παρουσιάζεται το εξωτερικό πλούμιο της φωτιάς.



**Σχήμα 4.69** Διάγραμμα μέσων θερμοκρασιών του εξωτερικού πλουμίου στο 1/4 του πλάτους της πρόσοψης του δωματίου συναρτήσει της κατακόρυφης διεύθυνσης του άξονα z.



**Σχήμα 4.70** Διάγραμμα μέσων θερμοκρασιών του κεντρικού άξονα του εξωτερικού πλουμίου της φωτιάς συναρτήσει της κατακόρυφης διεύθυνσης του άξονα z.

#### 4.4.3.4 Θερμοκρασίες στην πρόσοψη του δωματίου

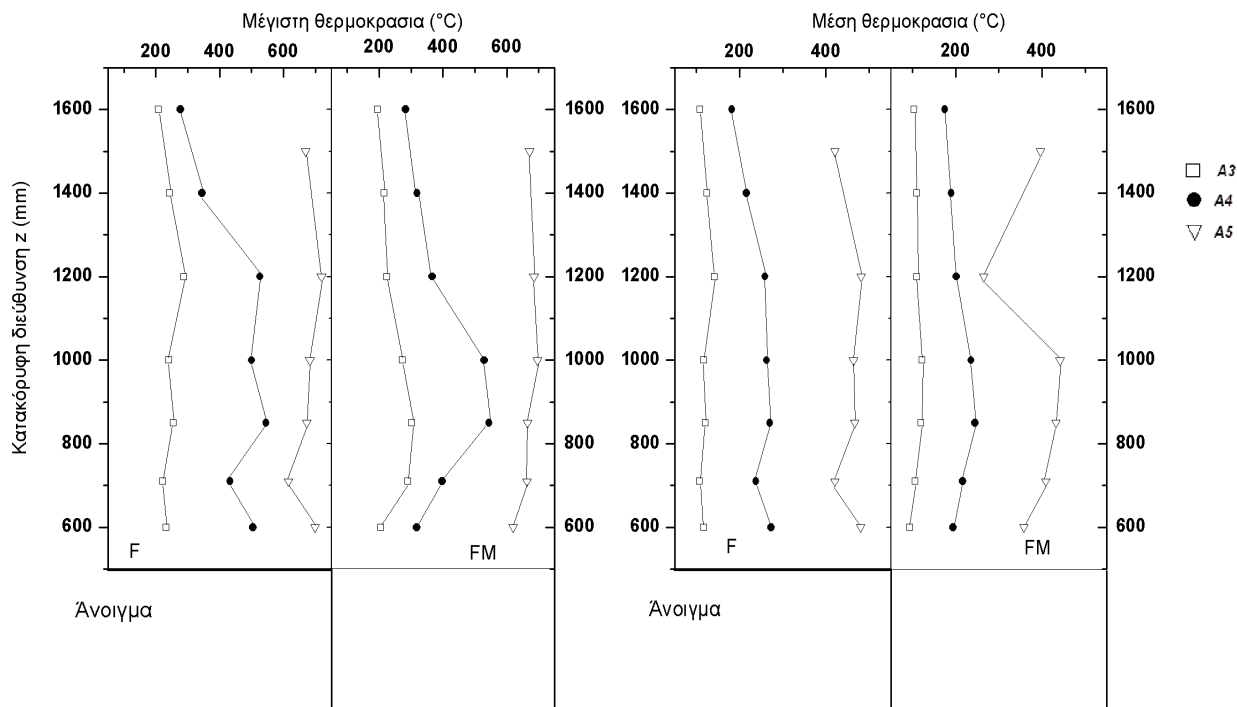
Για την επίδραση του εξερχόμενου πλούμιου τη φωτιάς στην πρόσοψη χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές από τις μετρήσεις των θερμοστοιχείων F και FM που τοποθετήθηκαν στη μεσοκάθετο και στο 1/4 αντίστοιχα του πλάτους της πρόσοψης. Στον Πίνακα 4.20 είναι καταγεγραμμένες οι μέγιστες και οι μέσες τιμές των θερμοστοιχείων αυτών για τα πειράματα A3, A4 και A5.

Θέση	Μέγιστη θερμοκρασία (°C)			Μέση τιμή θερμοκρασιών (°C)		
	A3	A4	A5	A3	A4	A5
F1	232,60	504,81	699,05	116,77	273,13	479,94
F2	222,72	432,54	616,59	107,77	237,98	420,63
F3	255,01	545,14	672,86	120,47	270,15	466,35
F4	240,62	500,09	682,82	116,70	262,81	463,57
F5	288,28	526,07	718,75	141,49	259,04	481,68
F6	242,10	344,91	669,81	124,41	216,29	420,56
F7	208,56	277,25	-	108,98	182,13	-
FM1	205,19	318,20	619,33	93,23	194,27	357,49
FM2	289,54	397,99	663,65	106,69	216,33	408,87
FM3	303,01	544,54	664,76	120,15	245,05	431,94
FM4	273,44	529,12	696,44	122,23	235,93	441,50
FM5	223,87	366,70	684,75	110,00	201,42	265,08
FM6	215,11	318,76	671,25	110,07	189,77	396,20
FM7	195,45	283,34	-	104,20	175,13	-

**Πίνακας 4.20** Μέγιστες και μέσες τιμές θερμοκρασιών, για τη θερμοκρασία στις θέσεις F και FM της πρόσοψης στα πειράματα A3, A4 και A5.

Σημειώνεται πως στο πείραμα A5 χρησιμοποιήθηκαν 12 θερμοστοιχεία στην πρόσοψη σε αντίθεση με τα 14 που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα A3 και A4. Αυτό έγινε με ανακατανομή στις θέσεις των θερμοστοιχείων, συγχωνεύοντας τις δυο υψηλότερες θέσεις (F6-F7 και FM6-FM7) σε μία.

Ακολουθούν τα Σχήματα 4.71-4.72 όπου απεικονίζονται οι μέγιστες και μέσες τιμές θερμοκρασίας στην πρόσοψη.

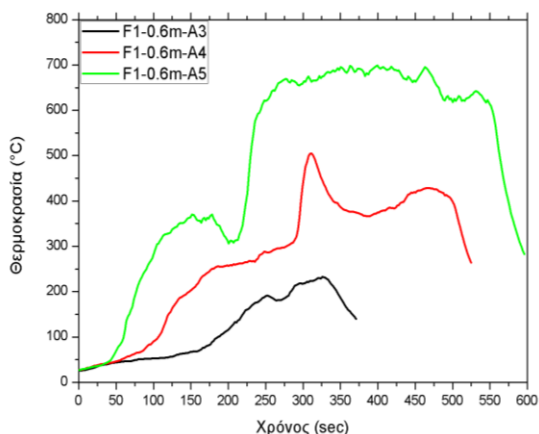


**Σχήμα 4.71** Διάγραμμα μέγιστων θερμοκρασιών των θερμοστοιχείων της πρόσοψης του δωματίου ως προς την κατακόρυφη διεύθυνση του άξονα z.

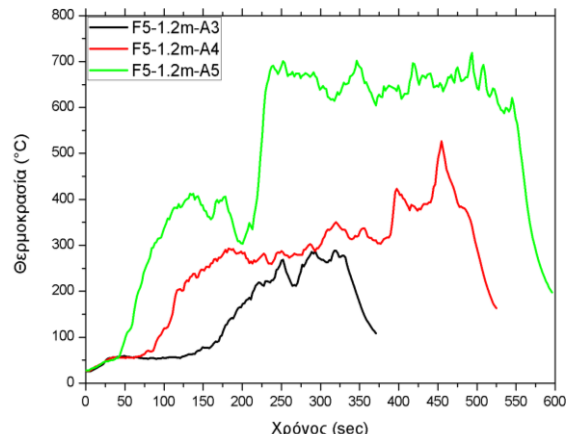
**Σχήμα 4.72** Διάγραμμα μέσων θερμοκρασιών των θερμοστοιχείων της πρόσοψης του δωματίου ως προς την κατακόρυφη διεύθυνση του άξονα z.

Από το διάγραμμα του Σχήματος 4.71 παρατηρείται πως οι μέγιστες θερμοκρασίες στο πείραμα A3 δε διαφέρουν κατά πολύ στις θέσεις στο κέντρο καθ' ύψος της πρόσοψης. Η υψηλότερη από αυτές εμφανίζεται σε ύψος 1.2m από το δάπεδο (Σχήματα 4.73-4.74), δηλαδή στο διπλάσιο ύψος από αυτό της οροφής του δωματίου. Αρκετές διακυμάνσεις εμφανίζονται στις μέγιστες θερμοκρασίες του πειράματος A4, με τις υψηλότερες τιμές να είναι σε ύψος 0.85m και 0.60m ακριβώς μετά την οροφή του δωματίου. Στις υψηλότερες θέσεις εμφανίζεται μεγάλη μείωση στα μέγιστα, κάτι που αναδεικνύει το λόγο για τη συγχώνευση των δυο υψηλότερων θέσεων στο πείραμα A5 που ακολούθησε, με χρησιμοποίηση ενός λιγότερου θερμοστοιχείου. Οι μέγιστες τιμές του πειράματος A5 συγκλίνουν αρκετά μεταξύ τους στις περισσότερες θέσεις καθ' ύψος, με σημαντική διαφορά να εμφανίζεται στη θέση 0.71m από το δάπεδο, δηλαδή στα 11cm από την οροφή. Η ανάγκη για μελέτη των θέσεων σε τέτοιο ύψος φαίνεται να είναι ιδιαιτέρως σημαντική, αφού και στο πείραμα A4 υπάρχουν διακυμάνσεις στις θερμοκρασίες σε τέτοιο ύψος. Αυτό και στα δυο πειράματα αναδεικνύεται και στο Σχήμα 4. όπου απεικονίζονται οι μέσες της θερμοκρασίας στις θέσεις αυτές, αφού παρόμοιες διακυμάνσεις φαίνονται και εκεί. Αυτή η κρίσιμη περιοχή μελετάται στα πειράματα, εκτός από τα θερμοστοιχεία, με χρήση του μετρητή ροής θερμότητας, ο οποίος είναι τοποθετημένος στη θέση αυτή. Όσο αφορά τις μέσες τιμές, παρατηρούνται διαφορές περίπου 100°C στα πειράματα A3 και A4, ενώ ανεξαρτήτου ύψους, οι μέσες τιμές παραμένουν σε ίδια επίπεδα, είτε είναι τα θερμοστοιχεία στις θέσεις F, είτε στις θέσεις FM. Στο πείραμα A5 υπάρχει μεγάλη διαφοροποίηση των τιμών στα ύψη 1-1.5m, όπου ενώ υπάρχει σταδιακή αύξηση στις τιμές των θερμοστοιχείων FM μέχρι το 1m, απότομα η μέση τιμή στα 1.2m μειώνεται και επανέρχεται ξανά σε αρχικά επίπεδα σε ύψος 1.5m. Στα θερμοστοιχεία της μεσοκαθέτου δεν υπάρχουν ιδιαίτερες μεταβολές στη μέση τιμή, με μικρές διαφορές να παρουσιάζονται στα χαμηλότερα θερμοστοιχεία, τα οποία είναι τα πρώτα που συναντά η φωτιά μετά την έξοδο δια μέσω του ανοίγματος, όπως άλλωστε παρατηρήθηκε στην περίπτωση των μέγιστων τιμών. Τέλος, είναι σημαντικό να παρατηρηθεί πως η επίδραση της ισχύς της φωτιάς είναι μεγαλύτερη στις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στην πρόσοψη του δωματίου σε σχέση με αυτές που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του αντίστοιχα, το οποίο οφείλεται στο εξωτερικό πλούμιο της φωτιάς. Το εξωτερικό πλούμιο,

όπως παρατηρήθηκε στο προηγούμενο εδάφιο, είναι πιο ανεπτυγμένο όσο αυξάνεται η ισχύς της φωτιάς, με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται υψηλότερες θερμοκρασίες στο εξωτερικό. Κάτι τέτοιο έχει άμεση επίδραση στην πρόσοψη, καθώς αυξάνεται η ακτινοβολία προς αυτήν.



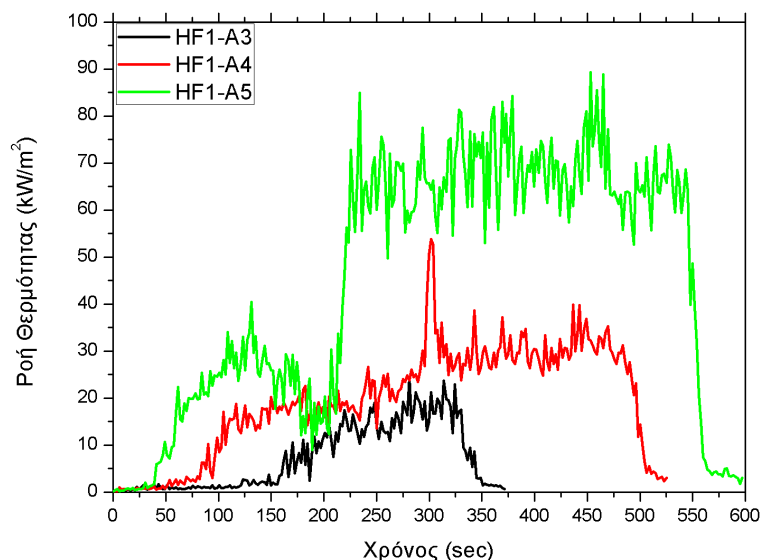
**Σχήμα 4.73** Συγκριτικό διάγραμμα των θερμοκρασιών στη θέση F1 των πειραμάτων A3, A4 και A5.



**Σχήμα 4.74** Συγκριτικό διάγραμμα των θερμοκρασιών στη θέση F5 των πειραμάτων A3, A4 και A5.

#### 4.4.3.5 Ροή Θερμότητας

Η ροή θερμότητας στα πειράματα μετρήθηκε με το μετρητή ροής θερμότητας που ήταν τοποθετημένος πάνω στην πρόσοψη, σε ύψος 0.7m από το δάπεδο. Οι καμπύλες των μετρήσεων στα πειράματα A3, A4 και A5 φαίνονται στο διάγραμμα του Σχήματος 4.75 που ακολουθεί.



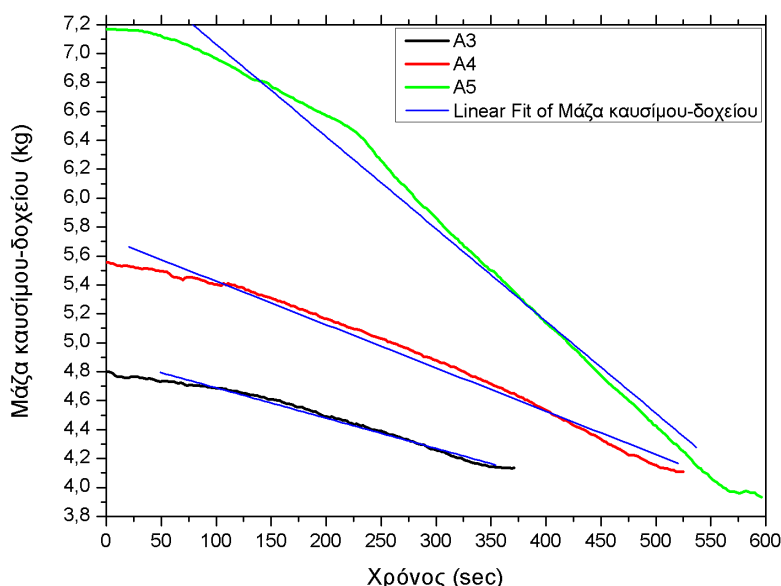
**Σχήμα 4.75** Συγκριτικό διάγραμμα των ροών θερμότητας στα πειράματα A3, A4 και A5.

Η ροή θερμότητας στο πείραμα A3 (μαύρη καμπύλη) εμφάνισε μέγιστη τιμή 24.32 kW/m<sup>2</sup> τη χρονική στιγμή 281sec μετά την ανάφλεξη του καυσίμου, ενώ στο πείραμα A4 (κόκκινη καμπύλη) η μέγιστη τιμή ήταν 53.79 kW/m<sup>2</sup> στα 301sec μετά την ανάφλεξη αντίστοιχα. Στο πείραμα A5 (πράσινη καμπύλη) η μέγιστη τιμή σημειώθηκε 453sec μετά την εκκίνηση του πειράματος, με τιμή 89.32 kW/m<sup>2</sup>. Χαρακτηριστικό της καμπύλης του πειράματος A4 είναι η απότομη αύξηση της τιμής που παρατηρείται στο χρονικό διάστημα 290-310sec, όπου από επίπεδα τιμών κοντά στα 35 kW/m<sup>2</sup>, οι μετρήσεις δείχνουν αύξηση μέχρι το επίπεδο κοντά στα 50 kW/m<sup>2</sup> για διάρκεια περίπου 20sec. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε κάποια ριπή αέρα

από άνοιγμα πόρτας στο χώρο διεξαγωγής των πειραμάτων. Αντίστοιχα στο γράφημα του πειράματος A5 παρατηρείται διπλασιασμός στις τιμές των μετρήσεων περίπου 210sec μετά την έναρξη του πειράματος, με τη διαφορά σε σχέση με την παρατήρηση του A4, ότι οι τιμές στο A5 παραμένουν σε υψηλά επίπεδα μετά την απότομη αύξηση όχι για μικρό χρονικό διάστημα, αλλά μέχρι τη φάση αποσύνθεσης της φωτιάς. Αυτό οφείλεται στην επισήμανση που έγινε και σε προηγούμενα, δηλαδή πως το εξωτερικό πλούμιο της φωτιάς είναι περισσότερο αναπτυγμένο στο πείραμα A5, κάτι που σημαίνει μεγαλύτερη έκθεση της πρόσοψης σε υψηλές θερμοκρασίες.

#### 4.4.3.6 Απώλεια μάζας καυσίμου

Με τη δυναμοκυψέλη η οποία ήταν τοποθετημένη στο κέντρο του δωματίου, κάτω από το δάπεδο, γίνονταν 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 4.76 φαίνονται οι καμπύλες της μάζας καυσίμου-δοχείου που μετρήθηκε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.



Σχήμα 4.76 Καμπύλες απώλειας μάζας καυσίμου-δοχείου στα πειράματα A3, A4 και A5.

Από τις καμπύλες του Σχήματος 4.76 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 4.21 που ακολουθεί.

Πείραμα	Γραμμική Προσέγγιση (linefit)	Κλίση a (slope)	Σφάλμα (%)
A3	$y=ax+4.8988$	-0.0021	2,03494E-5
A4	$y=ax+5.7244$	-0.00299	2,31801E-5
A5	$y=ax+7.70169$	-0.00638	4,93058E-5

Πίνακας 4.21 Γραμμική προσαρμογή για τις καμπύλες μάζας καυσίμου-δοχείου, πειραμάτων A3, A4 και A5

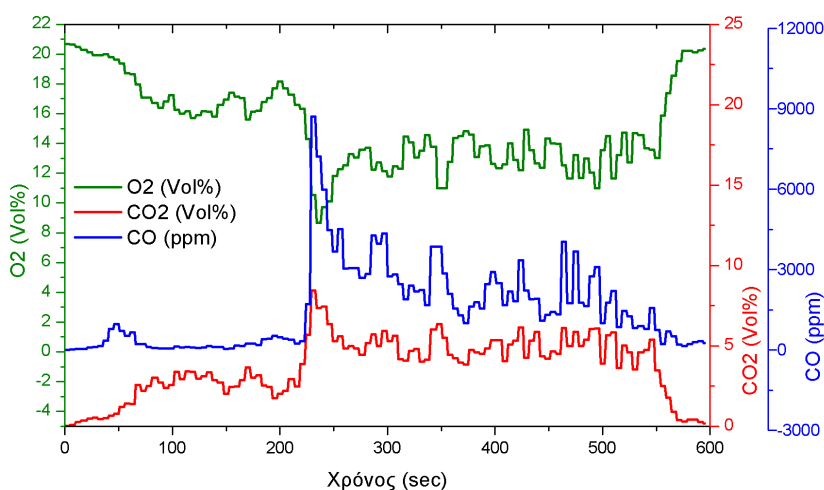
Από το λογισμικό MicrocalOrigin, όπου έγινε η γραμμική προσέγγιση, αποδεικνύεται ότι η καμπύλη της απώλειας μάζας του πειράματος A5 έχει τριπλάσια κλίση από αυτό του A3. Αντίστοιχα, το σφάλμα στην περίπτωση αυτή είναι αρκετά μεγαλύτερο σε σχέση με τα



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.

#### 4.4.3.7 Συγκεντρώσεις O<sub>2</sub>,CO,CO<sub>2</sub>

Όπως αναφέρθηκε στην περιγραφή των μετρητικών συσκευών, στα πειράματα A3 και A4 δε χρησιμοποιήθηκε αναλυτής αερίων. Για το λόγο αυτό, στο Σχήμα 4.77 που ακολουθεί φαίνονται οι μετρήσεις των συγκεντρώσεων O<sub>2</sub>,CO,CO<sub>2</sub> του πειράματος A5.



Σχήμα 4.77 Γραφική αναπαράσταση των συγκεντρώσεων αερίων του πειράματος A5.

Στη συνέχεια ακολουθεί ο Πίνακας 4.22 όπου καταγράφηκαν οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές των μετρήσεων για κάθε αέριο.

Πείραμα	O <sub>2</sub> (Vol%)		CO <sub>2</sub> (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 4.22 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.

#### 4.4.4 Συμπεράσματα

Σε όλα τα πειράματα που μελετήθηκαν στο εδάφιο αυτό παρουσιάστηκαν οι θερμοκρασίες που αναπτύχθηκαν τόσο εντός όσο και εκτός του δωματίου και η επίδραση της απώλειας μάζας του καυσίμου στην ανάπτυξη του εξωτερικού πλούμιου της φωτιάς.

Βασική παρατήρηση από τη σειρά αυτή των πειραμάτων ήταν πως όσο μεγαλύτερη μάζα καυσίμου, τόσο μεγαλύτερη η διάρκεια καύσης. Αυτό αποφέρει μεγαλύτερη ισχύ της φωτιάς με εμφάνιση υψηλότερων θερμοκρασιών εντός του δωματίου, κάτι που φάνηκε από τις μετρήσεις των θερμοκρασιών στη βόρειο-δυτική (CB) και νότιο-ανατολική (CF) γωνία. Σημαντικό στοιχείο, η μεγαλύτερη διαστρωμάτωση που παρατηρήθηκε στις θέσεις CF στα πειράματα λόγω της κοντινότερης απόστασης τους από το άνοιγμα. Παράλληλα έγινε αναγνώριση στις διαφορές ανώτερου και κατώτερου στρώματος εντός δωματίου, με τις τιμές

των θερμοκρασιών μεταξύ των δυο στρωμάτων, κυρίως στα πειράματα A3 και A4, να εμφανίζουν μεγάλες αποκλίσεις. Αντιθέτως στο πείραμα A5 οι διαφορές ήταν πολύ μικρότερες, καθώς λόγω πολύ μεγάλης ισχύος οι θερμοκρασίες ήταν ιδιαίτερος υψηλές.

Στις περιπτώσεις που μελετήθηκαν, ο αέρας εντός του δωματίου δεν επαρκούσε για την καύση, με συνέπεια μεγαλύτερη ποσότητα άκαυστων υδρογονανθράκων να εξέρχεται από το δωμάτιο. Η αντίδραση αυτών με το οξυγόνο στο εξωτερικό του δωματίου οδήγησε στη δημιουργία εξωτερικού πλούμιου της φωτιάς. Με τα θερμοστοιχεία στις θέσεις εξωτερικά του δωματίου έγινε προσπάθεια για την απεικόνιση του εξωτερικού πλούμιου. Με αύξηση της ισχύος της φωτιάς οι θερμοκρασίες στο εξωτερικό πλούμιο αυξάνονται. Ειδικότερα, στο πείραμα A5 παρατηρήθηκαν ιδιαίτερος αυξημένες θερμοκρασίες, καθώς το εξωτερικό πλούμιο εμφανίστηκε πιο ανεπτυγμένο στις μετρήσεις σε σχέση με τα πειράματα A3 και A4. Παράλληλα, το εξωτερικό πλούμιο είχε αντίκτυπο στις θερμοκρασίες που αναπτύχθηκαν στην πρόσοψη του δωματίου. Η πρόσοψη εκτέθηκε για περισσότερο χρόνο σε υψηλές θερμοκρασίες και ακτινοβολία λόγω του εξωτερικού πλούμιου, με αποτέλεσμα την εμφάνιση επίσης υψηλών θερμοκρασιών στην πρόσοψη του δωματίου.

Τέλος, έγινε γραμμική προσέγγιση στις καμπύλες της απώλειας μάζας καυσίμου, αναδεικνύοντας ιδιαίτερες διαφοροποιήσεις στις περιπτώσεις των πειραμάτων. Στο πείραμα A5 ο ρυθμός καύσης βρέθηκε κατά πολύ μεγαλύτερος από τους αντίστοιχους στα πειράματα A3 και A4, τα οποία και αυτά μεταξύ τους είχαν αποκλίσεις.

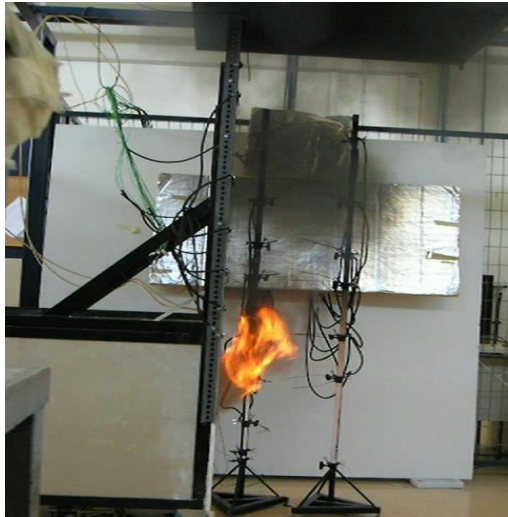
#### **4.5 Αερισμός μέσω ανοίγματος**

Ο αερισμός του εσωτερικού χώρου παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη μιας φωτιάς [Beji, et al., 2012], [Lock, et al., 2008] κάτι το οποίο μελετήθηκε με δυο διαφορετικά ανοίγματα στα πειράματα A6 και B7. 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.

##### **4.5.1 Περιγραφή**

Η ποσότητα εξανίου που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα A6 και B7 ήταν 2350ml, σε δοχείο το οποίο ήταν τοποθετημένο σε ύψος 2cm από το δάπεδο. Στο πείραμα A6, ως άνοιγμα επιλέχθηκε πόρτα διαστάσεων 50cm(ύψος) x 20cm(πλάτος) με παράγοντα αερισμού 0.0707, ενώ στο πείραμα B7 παράθυρο με διαστάσεις 30cm(ύψος) x 20cm(πλάτος) και παράγοντα αερισμού 0.329 (βλέπε Πίνακα 4.1). Και στις δυο περιπτώσεις η ανάφλεξη έγινε με μεταλλικό ραβδί που στη μια άκρη του υπήρχε τυλιγμένο μαντήλι ως προσάναμμα.

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. Στα Σχήματα 4.78-4.85 που ακολουθούν φαίνονται εικόνες της φωτιάς σε διάφορες χρονικές στιγμές. Οι φλόγες στο πείραμα A6 έκαναν την εμφάνισή τους εκτός δωματίου περίπου 60sec μετά την έναρξη του πειράματος, ενώ από το σημείο αυτό και μετά έμειναν σταθερά εκτός δωματίου, όντας εμφανείς στην πρόσοψη. Η φωτιά εισήλθε στη φάση της σβέσης περίπου 315sec μετά την έναρξη της, όπου τελικά υποχώρησε και έσβησε μετά από 20sec περίπου.



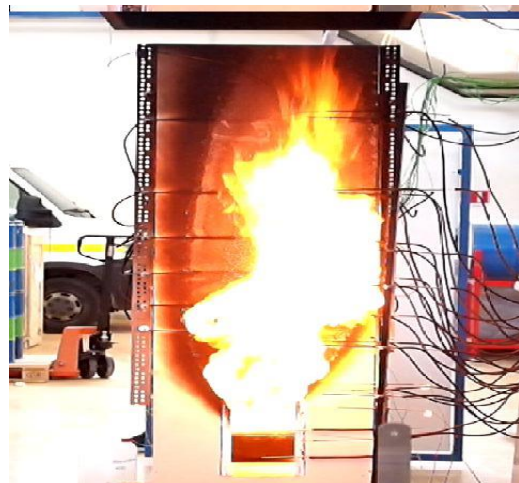
**Σχήμα 4.78** Εξερχόμενη φλόγα, 60sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα Α6).



**Σχήμα 4.79** Εξερχόμενη φλόγα, 60sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα Α6).



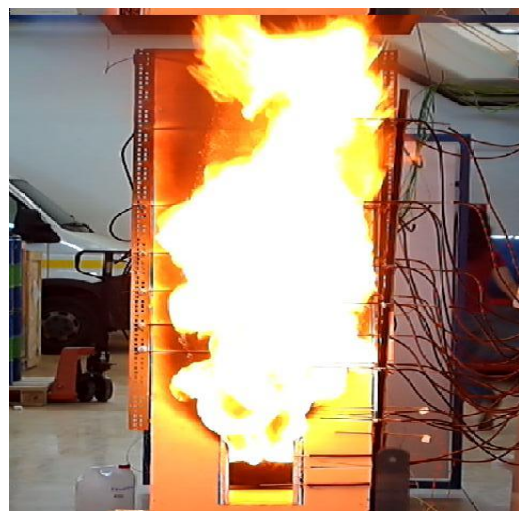
**Σχήμα 4.80** Εξερχόμενη φλόγα, 120sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα Α6).



**Σχήμα 4.81** Εξερχόμενη φλόγα, 120sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα Α6).



**Σχήμα 4.82** Εξερχόμενη φλόγα, 240sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα Α6).



**Σχήμα 4.83** Εξερχόμενη φλόγα, 240sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα Α6).



**Σχήμα 4.84** Εξερχόμενη φλόγα, 300sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα Α6).



**Σχήμα 4.85** Εξερχόμενη φλόγα, 300sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα Α6).

Το πείραμα Β7 ήταν το πρώτο από τα δυο πειράματα που έγιναν με παράθυρο ως άνοιγμα και η διάρκειά του ήταν 659sec. Στα Σχήματα 4.86-4.95 φαίνεται η φωτιά σε διάφορες χρονικά στιγμές, με τις φλόγες να γίνονται εμφανείς στην πρόσοψη του δωματίου περίπου 60sec μετά την έναρξη της φωτιάς (Σχήματα 4.86-4.87). Η φάση της σβέσης αποτελεί περίπου τα τελευταία 25sec της διάρκειας του πειράματος (Σχήμα 4.94-4.95) και η λήξη του πειράματος σημειώνεται 659sec μετά την έναρξη.

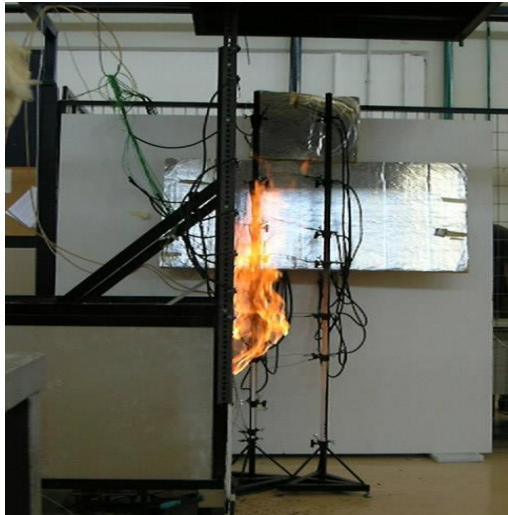


**Σχήμα 4.86** Εξερχόμενη φλόγα, 60sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα Β7).

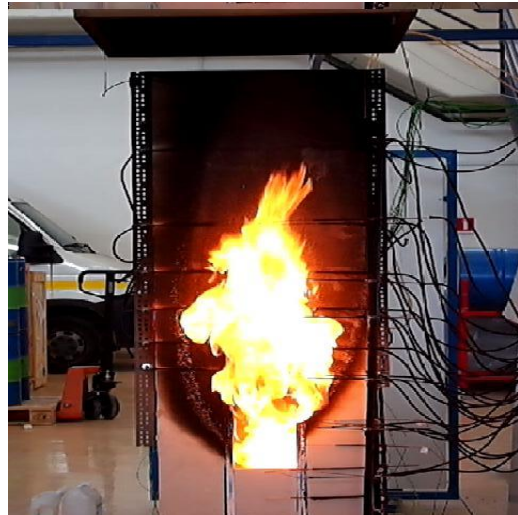


**Σχήμα 4.87** Εξερχόμενη φλόγα, 60sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα Β7).

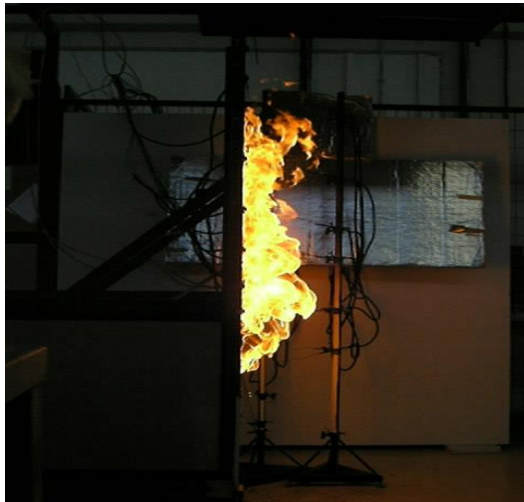




**Σχήμα 4.88** Εξερχόμενη φλόγα, 180sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα B7).



**Σχήμα 4.89** Εξερχόμενη φλόγα, 180sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα B7).



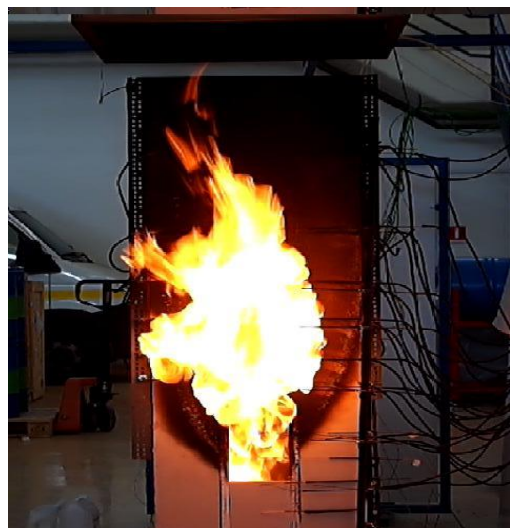
**Σχήμα 4.90** Εξερχόμενη φλόγα, 300sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα B7).



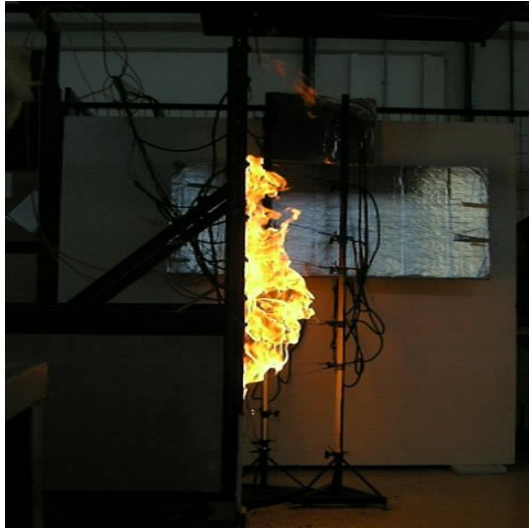
**Σχήμα 4.91** Εξερχόμενη φλόγα, 300sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα B7).



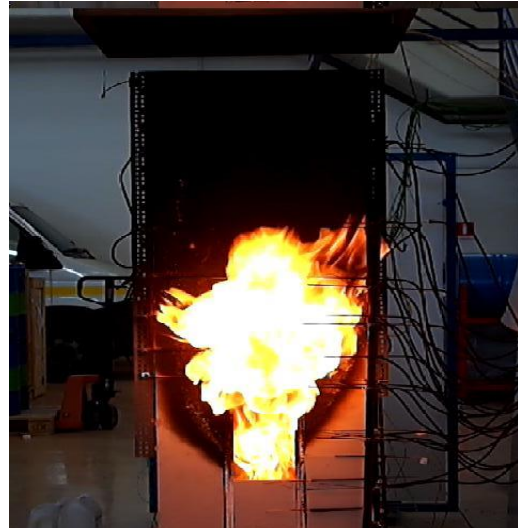
**Σχήμα 4.92** Εξερχόμενη φλόγα, 420sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα B7).



**Σχήμα 4.93** Εξερχόμενη φλόγα, 420sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα B7).



Σχήμα 4.94 Εξερχόμενη φλόγα, 600sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα Β7).



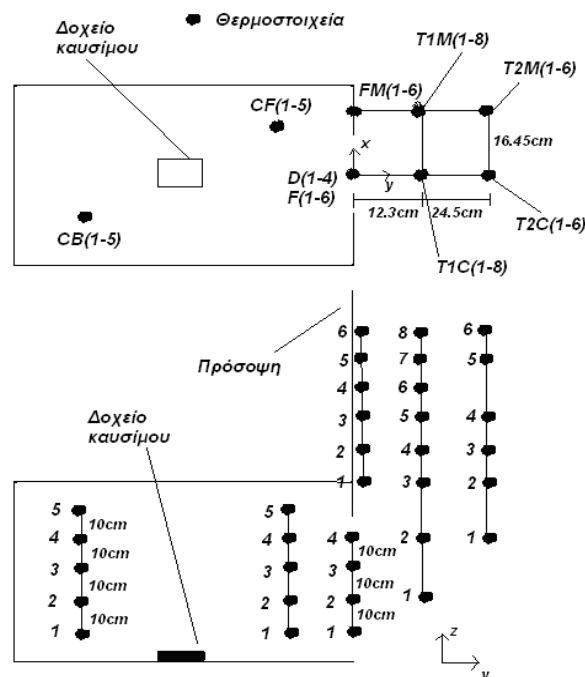
Σχήμα 4.95 Εξερχόμενη φλόγα, 600sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα Β7).

#### 4.5.2 Διάταξη Μετρητικών Συσκευών

Στα πειράματα Α6 και Β7, ως μετρητικές συσκευές χρησιμοποιήθηκαν

α) θερμοστοιχεία, β) μετρητής ροής θερμότητας, γ) αναλυτής αερίων και δ) δυναμοκυψέλη. Αρχή μέτρησης θεωρήθηκε το σημείο της μεσοκαθέτου του ανοίγματος στο δάπεδο του δωματίου, ενώ οι μετρήσεις λαμβάνονταν ανά 2sec.

Ο αναλυτής αερίων που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα, ήταν τοποθετημένος σε απόσταση 0.05m από την πρόσοψη και ύψος 1.65m. Ο μετρητής ροής θερμότητας τοποθετήθηκε πάνω στη μεσοκάθετο της πρόσοψης, σε ύψος 0.7m από το δάπεδο, ενώ η δυναμοκυψέλη ήταν κεντραρισμένη κάτω από το δάπεδο του δωματίου. Στο Σχήμα 4.96 φαίνεται η διάταξη των θερμοστοιχείων των πειραμάτων Α6 και Β7, ενώ στο Παράρτημα Α είναι καταγεγραμμένες οι συντεταγμένες των μετρητικών συσκευών στα πειράματα αυτά.



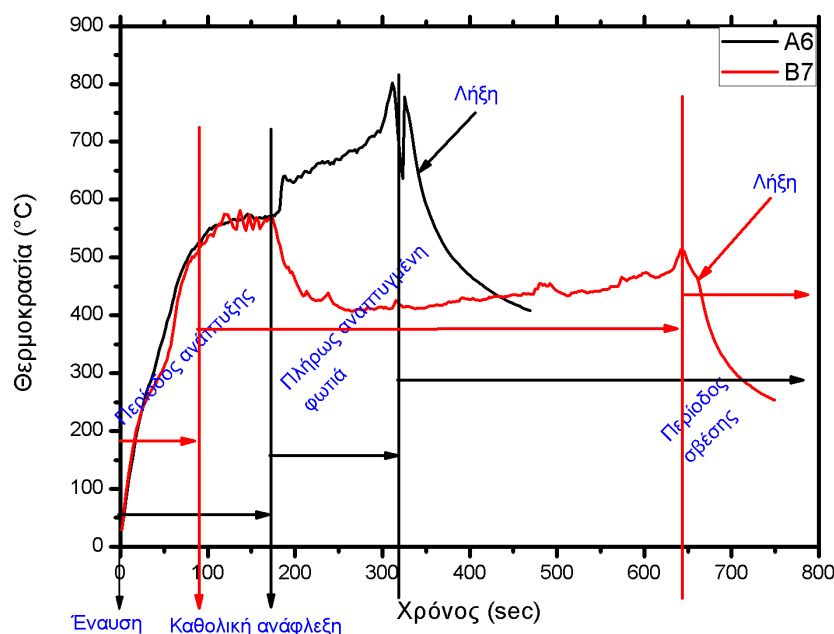
Σχήμα 4.96 Σχηματικό διάγραμμα των θέσεων των θερμοστοιχείων στα πειράματα Α6 και Β7.

### 4.5.3 Ανάλυση Μετρήσεων

#### 4.5.3.1 Θερμοκρασίες εσωτερικά του δωματίου

Οι θερμοκρασίες εντός του δωματίου μελετήθηκαν με τις μετρήσεις που ελήφθησαν από τα θερμοστοιχεία στις θέσεις CB και CF, της βόρειο-δυτικής και νότιο-ανατολικής γωνίας αντίστοιχα.

Με βάση τις μέσες θερμοκρασίες στις θέσεις αυτές δημιουργήθηκε το διάγραμμα του Σχήματος 4.97 στο οποίο φαίνονται οι φάσεις της φωτιάς για κάθε πείραμα. Οι θερμοκρασίες που ελήφθησαν υπόψη στο γράφημα είναι μεγαλύτερες από τη διάρκεια του πειράματος, ώστε να γίνει δυνατή η αναγνώριση της τελευταίας φάσης της φωτιάς. Όπως φαίνεται από το σχήμα, στην περίπτωση του B7, όπου το άνοιγμα είναι παράθυρο, η περίοδος ανάπτυξης είναι περίπου η μισή σε σχέση με το πείραμα A6. Στην προκειμένη περίπτωση η ποσότητα του αέρα που εισέρχεται εντός του δωματίου είναι μικρότερη και μεταβολές στις θερμοκρασίες παρουσιάζονται μετά τα πρώτα 100sec περίπου που διαρκεί η φάση της ανάπτυξης. Από το σημείο της καθολικής ανάφλεξης και έπειτα, παρουσιάζονται αρκετές μεταβολές στις μέσες θερμοκρασίες, ενώ στη συνέχεια εμφανίζεται μια μικρή μείωση σε αυτές, φτάνοντας σε τιμές όπου μένουν γενικά σε σταθερά επίπεδα μέχρι 640sec μετά την έναρξη του πειράματος. Η φάση αυτή είναι η φάση της πλήρους αναπτυγμένης φωτιάς, η οποία διαρκεί περίπου 460sec. Τέλος, αρχίζουν να μειώνονται με σταθερό ρυθμό οι θερμοκρασίες εντός του δωματίου, έχοντας μπει στη φάση της αποσύνθεσης, μέχρι την τελική απόσβεση. Οι φάσεις του πειράματος A6 ακολούθησαν με παρόμοιο τρόπο τις φάσεις αντίστοιχων πειραμάτων, όπως τα A1, A2, A4. Έτσι, μετά την περίοδο της ανάπτυξης, η οποία διαρκεί 170sec περίπου, εμφανίζεται ραγδαία αύξηση στις μέσες θερμοκρασίες εντός του δωματίου. Στο σημείο αυτό σηματοδοτείται η εμφάνιση καθολικής ανάφλεξης, με τις θερμοκρασίες να εμφανίζουν αύξηση μέχρι τις μέγιστες τιμές, περίπου 310sec μετά την έναρξη του πειράματος. Από το σημείο εκείνο οι θερμοκρασίες εμφανίζουν σταθερή μείωση όντας πλέον στη φάση της σβέσης της φωτιάς.



Σχήμα 4.97 Συγκριτικό διάγραμμα των μέσων θερμοκρασιών εντός του δωματίου για τα πειράματα A6 και B7.

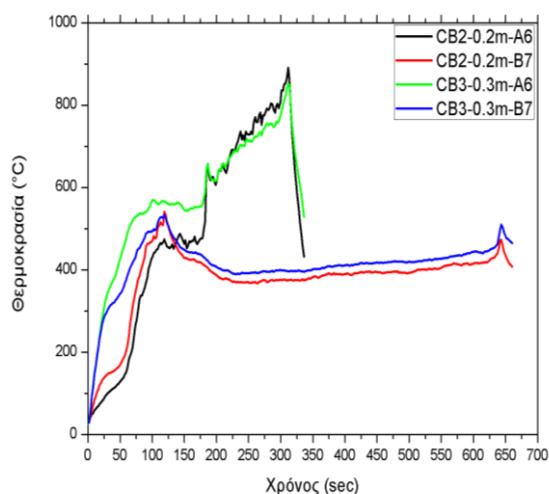
Στον Πίνακα 4.23 που ακολουθεί εμφανίζονται οι μέγιστες και οι μέσες τιμές των θερμοκρασιών από τα θερμοστοιχεία εντός του δωματίου για τα πειράματα A6 και B7.



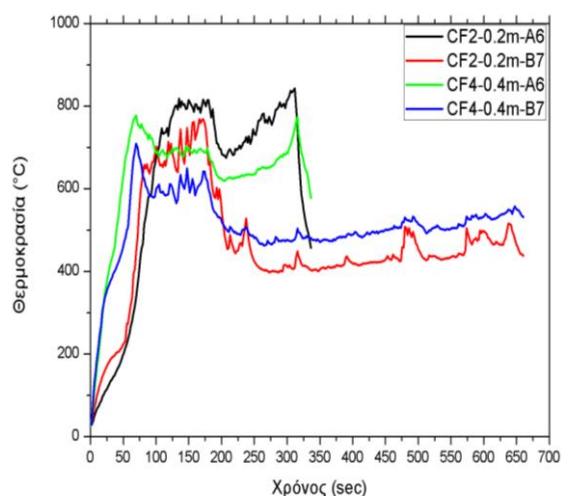
Θέση	Μέγιστη θερμοκρασία (°C)		Μέση τιμή θερμοκρασιών (°C)	
	A6	B7	A6	B7
CB1	851,86	543,96	388,15	324,75
CB2	890,43	541,65	490,10	376,35
CB3	851,85	532,98	572,82	411,12
CB4	813,25	545,85	572,01	428,34
CB5	782,73	586,53	634,88	448,04
CF1	741,68	807,15	412,04	408,08
CF2	842,83	768,40	598,61	458,91
CF3	799,94	738,75	627,93	488,56
CF4	776,94	708,34	625,80	506,98
CF5	757,41	674,98	620,33	519,76

**Πίνακας 4.23** Μέγιστες θερμοκρασίες και μέσες τιμές θερμοκρασιών, από τα θερμοστοιχεία στις θέσεις (CB) και (CF) στα πειράματα A6 και B7.

Στα γραφήματα του Σχήματος 4.98-4.99 φαίνονται οι διαφορές των μετρήσεων στις δυο περιπτώσεις, οι οποίες αντιστοιχούν στις φάσεις των πειραμάτων που περιγράφηκαν παραπάνω. Παρατηρείται πως οι μετρήσεις των θερμοστοιχείων CB2 και CB3 σε ύψη 0.2m και 0.3m αντίστοιχα, παρουσιάζουν κοινές μεταβολές όπως οι μέσες τιμές των θερμοκρασιών εντός δωματίου. Δηλαδή παρατηρείται σταδιακή αύξηση στις τιμές, μέχρι το σημείο της ραγδαίας αύξησης που σηματοδοτείται από την εμφάνιση καθολικής ανάφλεξης. Στη συνέχεια, στο πείραμα A6 εμφανίζουν σταθερά άνοδο με διάφορες διακυμάνσεις, φτάνοντας την ανώτερη τιμή και κατόπιν μειώνονται σταθερά. Αντιθέτως, στο πείραμα B7 μετά την καθολική ανάφλεξη οι θερμοκρασίες σταθεροποιήθηκαν σε ένα επίπεδο τιμών με ελάχιστες διακυμάνσεις, εμφανίζοντας μικρή άνοδο πριν τη φάση της σβέσης.



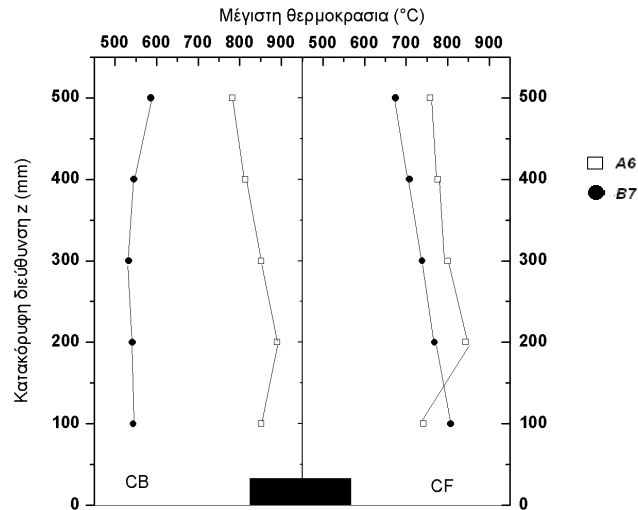
**Σχήμα 4.98** Συγκριτικό διάγραμμα των θερμοκρασιών στις θέσεις CB2 και CB3 των πειραμάτων A6 και B7.



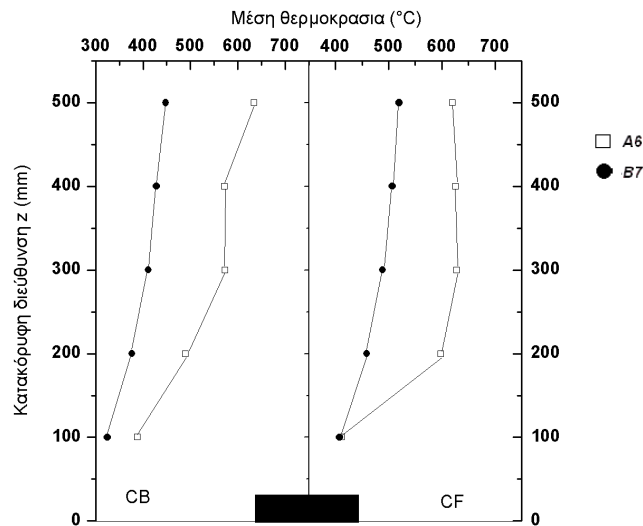
**Σχήμα 4.99** Συγκριτικό διάγραμμα των θερμοκρασιών στις θέσεις CF2 και CF4 των πειραμάτων A6 και B7.

Στην περίπτωση των θερμοστοιχείων της νότιο-ανατολικής γωνιάς παρατηρούνται μεγαλύτερες διακυμάνσεις στις τιμές και στα δύο πειράματα. Μετά την καθολική ανάφλεξη σε όλες τις περιπτώσεις εμφανίζονται διακυμάνσεις στις τιμές, φτάνοντας μέγιστες τιμές αμέσως μετά την καθολική ανάφλεξη και πριν τη φάση της αποσύνθεσης. Γενικά, οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι υψηλότερες στο πείραμα A6 σε κάθε αντίστοιχη θέση, παρόλο που το μοτίβο παραμένει ίδιο, φυσικά έχοντας υπόψη πως το πείραμα B7 διαρκεί σχεδόν το διπλάσιο χρόνο.

Στα Σχήματα 4.100-4.101 που ακολουθούν εμφανίζονται οι μέγιστες και οι μέσες θερμοκρασίες συναρτήσει της κατακόρυφης διεύθυνσης.



**Σχήμα 4.100** Διάγραμμα μέγιστων θερμοκρασιών εντός του δωματίου κατά την κατακόρυφη διεύθυνση του άξονα z.



**Σχήμα 4.101** Διάγραμμα μέσων θερμοκρασιών εντός του δωματίου κατά την κατακόρυφη διεύθυνση του άξονα z.

Αμφότερες οι περιπτώσεις των μέσων και μέγιστων θερμοκρασιών έχουν ένα σημαντικό στοιχείο. Οι θερμοκρασίες του πειράματος B7 είναι σε όλες τις θέσεις χαμηλότερες από αυτές του A6. Μοναδική εξαίρεση το θερμοστοιχείο CF1 σε ύψος 0.1m όπου παρουσίασε μέγιστη τιμή στο A6 μικρότερη από αυτή του B7. Φυσικά, στις μέσες τιμές αυτό αναδεικνύεται από το γεγονός πως οι τιμές στα δυο πειράματα στη θέση αυτή συμπίπτουν σχεδόν, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.101. Παράλληλα είναι κρίσιμο να σχολιαστεί η μεγάλη διαφορά που παρατηρείται στις μέγιστες θερμοκρασίες, καθώς στην περίπτωση του πειράματος A6 εμφανίζονται μέγιστες θερμοκρασίες περίπου 200°C υψηλότερες σε σχέση με το πείραμα B7 στις περισσότερες θέσεις CB, με τη διαφορά αυτή να είναι περίπου στο μισό στις θέσεις CF.

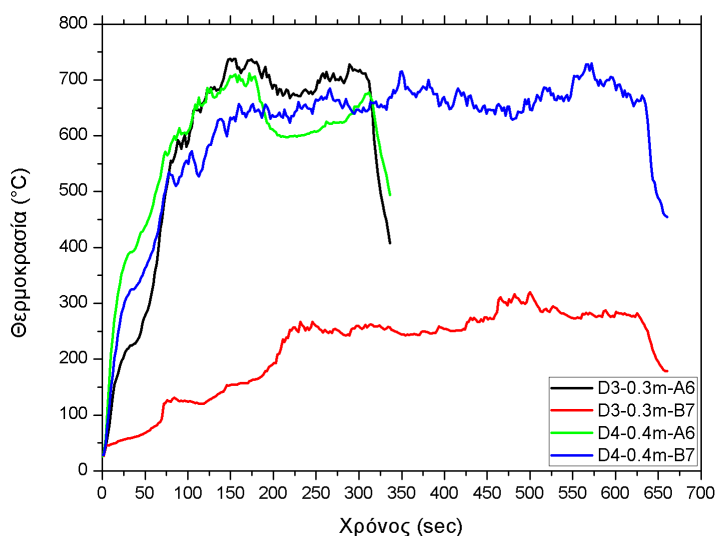
### 4.5.3.2 Θερμοκρασίες στο άνοιγμα του δωματίου

Στο άνοιγμα του δωματίου (είτε παράθυρο, είτε πόρτα) χρησιμοποιήθηκαν 4 θερμοστοιχεία καθ' ύψος, με τις μέγιστες και μέσες τιμές να φαίνονται στον Πίνακα 4.24 που ακολουθεί.

Θέση	Μέγιστη θερμοκρασία (°C)		Μέση τιμή θερμοκρασιών (°C)	
	A6	B7	A6	B7
D1	112,10	50,59	80,65	39,62
D2	368,81	69,55	232,15	54,28
D3	737,80	319,80	570,99	217,78
D4	711,56	729,36	574,21	605,58

**Πίνακας 4.24** Μέγιστες θερμοκρασίες και μέσες τιμές θερμοκρασιών, για τα θερμοστοιχεία στις θέσεις (D) στα πειράματα A6 και B7.

Στο Σχήμα 4.102 παρουσιάζονται οι καμπύλες των μετρήσεων στις θέσεις 0.3m και 0.4m στα ανοίγματα των δυο πειραμάτων. Όπως φαίνεται, οι θερμοκρασίες που αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος A6 ήταν γενικά υψηλότερες από αυτές στο πείραμα B7, με ορισμένες αλλαγές στην περίπτωση του θερμοστοιχείου D4, τοποθετημένο 10cm χαμηλότερα από το τελικό ύψος του ανοίγματος. Άλλο στοιχείο που είναι εμφανές, είναι πως οι θερμοκρασίες στις δυο θέσεις που φαίνονται, στο πείραμα A6 είναι σχετικά κοντά με ελαφρώς υψηλότερες στη θέση 0.3m. Αντιθέτως η διαφορά στις τιμές των δυο θερμοστοιχείων στο πείραμα B7 είναι πολύ μεγάλη, κάτι που εξηγείται από το γεγονός πως το θερμοστοιχείο στη θέση 0.3m από το δάπεδο ήταν σε σημείο που ξεκινάει το κάτω μέρος του παραθύρου. Για το λόγο αυτό το θερμοστοιχείο δεν ήρθε άμεσα σε μεγάλη επαφή με τις φλόγες, μετρώντας μικρότερες τιμές από ότι στη θέση D4 σε ύψος 0.4m. Παρά το γεγονός αυτό, το θερμοκρασιακό προφίλ στις θέσεις αυτές για το πείραμα B7 είναι παρόμοιο.



**Σχήμα 4.102** Συγκριτικό διάγραμμα των θερμοκρασιών στις θέσεις D3 και D4 των πειραμάτων A6 και B7.

### 4.5.3.3 Θερμοκρασίες στο εξερχόμενο πλούμιο της φωτιάς

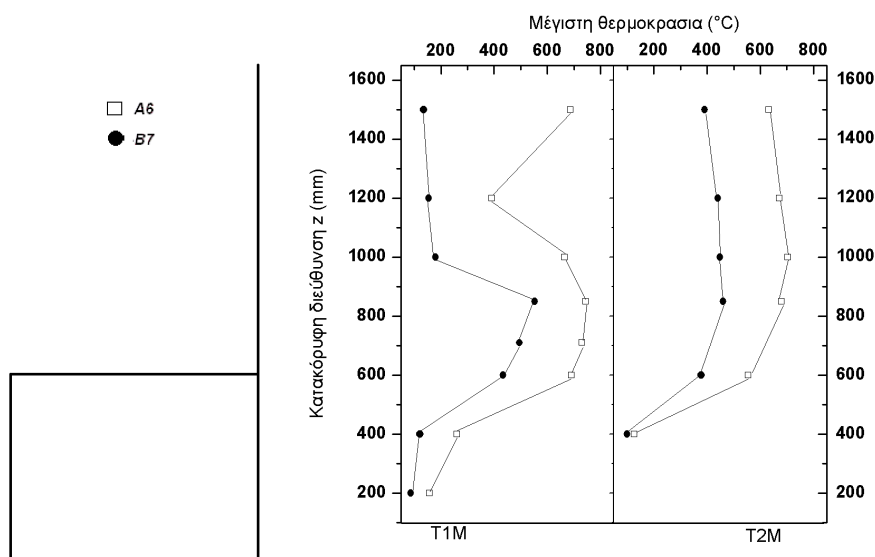
Στην περίπτωση του εξερχόμενου πλούμιου της φωτιάς χρησιμοποιήθηκαν 28 θερμοστοιχεία στους δυο στύλους δημιουργώντας ένα πλαίσιο για την όσο το δυνατό καλύτερη απεικόνιση του θερμοκρασιακού προφίλ της εξερχόμενης φωτιάς.

Στον Πίνακα 4.25 που ακολουθεί καταγράφονται οι μέγιστες και οι μέσες τιμές των θερμοστοιχείων T1M, T2M.

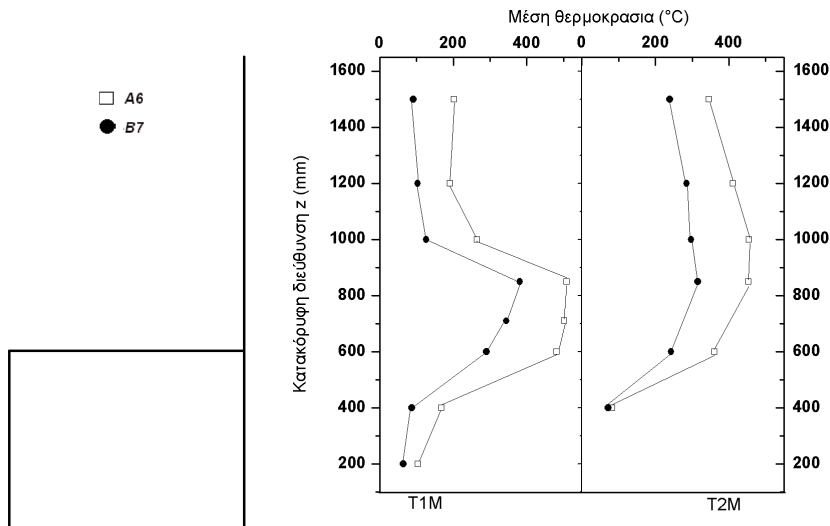
Θέση	Μέγιστη θερμοκρασία (°C)		Μέση τιμή θερμοκρασιών (°C)	
	A3	A4	A3	A4
T1M1	158,13	87,69	103,26	64,22
T1M2	259,91	122,09	167,71	87,09
T1M3	689,79	433,52	481,78	290,43
T1M4	731,05	494,93	502,08	344,45
T1M5	743,84	553,27	509,10	381,01
T1M6	665,40	180,34	264,63	125,98
T1M7	391,39	154,70	190,67	103,09
T1M8	686,73	135,84	201,89	91,19
T2M1	127,04	100,30	82,47	71,50
T2M2	555,09	378,00	360,25	242,49
T2M3	679,36	460,07	453,50	315,29
T2M4	703,45	448,05	454,66	297,03
T2M5	671,11	440,21	410,91	284,44
T2M6	632,59	390,30	345,42	239,00

**Πίνακας 4.25** Μέγιστες και μέσες τιμές θερμοκρασιών, για τα θερμοστοιχεία στις θέσεις T1M και T2M στα πειράματα A6 και B7.

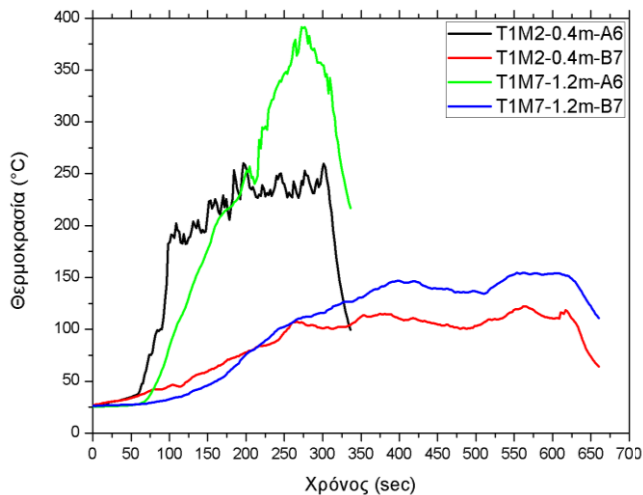
Αρχική παρατήρηση από τα Σχήματα 4.103-4.104 που παρουσιάζονται οι μέγιστες και μέσες τιμές θερμοκρασίας στους δύο στύλους των θέσεων T1M, T2M, είναι πως ακολουθείται ίδια κτανομή τόσο στις μέγιστες όσο και στις μέσες τιμές των θερμοκρασιών και στα δυο πειράματα. Οι διακυμάνσεις στην περίπτωση του πρώτου στύλου, δηλαδή σε απόσταση 12.3cm από την πρόσοψη είναι αρκετές, με τις θερμοκρασίες στις θέσεις μετά το ύψος της οροφής να εμφανίζουν μεγάλη άνοδο, μέχρι τα 40cm από την οροφή, όπου επανέρχονται σε τιμές που είχαν στα χαμηλότερα ύψη. Στο δεύτερο στύλο, σε απόσταση 24.5cm από την πρόσοψη, οι διακυμάνσεις δεν είναι μεγάλες, καθώς από το ύψος των 60cm (ύψος οροφής) οι θερμοκρασίες σταθεροποιούνται μέχρι το ύψος των 120cm και κατόπιν εμφανίζουν μείωση. Όπως σε άλλες περιπτώσεις, έχει σημασία να τονιστεί πως οι θερμοκρασίες του πειράματος B7 είναι χαμηλότερες από αυτές στο πείραμα A6.



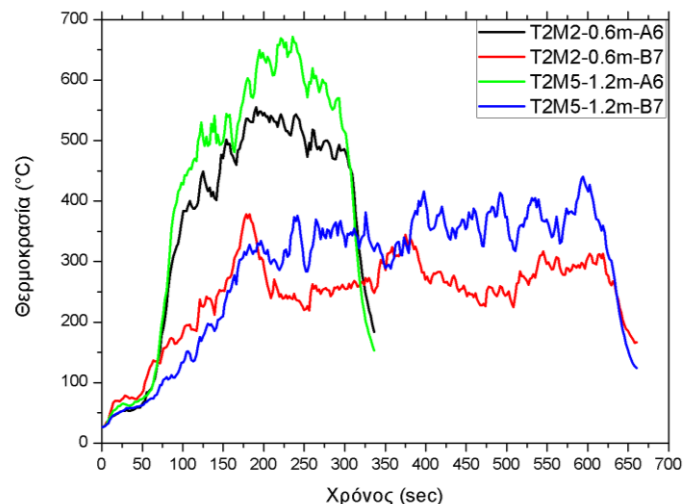
**Σχήμα 4.103** Διάγραμμα μέγιστων θερμοκρασιών των θερμοστοιχείων στους δυο στύλους στο 1/4 του πλάτους της πρόσοψης του δωματίου συναρτήσει της κατακόρυφης διεύθυνσης του άξονα z.



**Σχήμα 4.104** Διάγραμμα μέσων θερμοκρασιών των θερμοστοιχείων στους δυο στύλους στο 1/4 του πλάτους της πρόσοψης του δωματίου συναρτήσει της κατακόρυφης διεύθυνσης του άξονα z.



**Σχήμα 4.105** Συγκριτικό διάγραμμα των θερμοκρασιών στις θέσεις T1M2 και T1M7 των πειραμάτων A6 και B7.



**Σχήμα 4.106** Συγκριτικό διάγραμμα των θερμοκρασιών στις θέσεις T2M2 και T2M5 των πειραμάτων A6 και B7.

Όπως σε άλλες περιπτώσεις, έτσι και στα διαγράμματα των Σχημάτων 4.105-4.106 οι θερμοκρασίες στο πείραμα A6 εμφανίζουν υψηλότερες τιμές σε σχέση με αυτές του πειράματος B7, με το θερμοκρασιακό προφίλ του θερμοστοιχείου T1M7 του πειράματος B7 να εμφανίζει χαρακτηριστικές ομοιότητες. Παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζει και το θερμοστοιχείο T2M5 σε ύψος 1.2m του πειράματος B7, ενώ οι μεγαλύτερες διαφορές εμφανίζονται μεταξύ των θέσεων 0.4m και 1.2m όπου οι θερμοκρασίες είναι ιδιαίτερα αυξημένες στο πείραμα A6 στο ύψος των 1.2m. Γενικά παρατηρείται πιο ανεπτυγμένο πλούμιο στην περίπτωση του πειράματος A6 σε σχέση με του πειράματος B7.

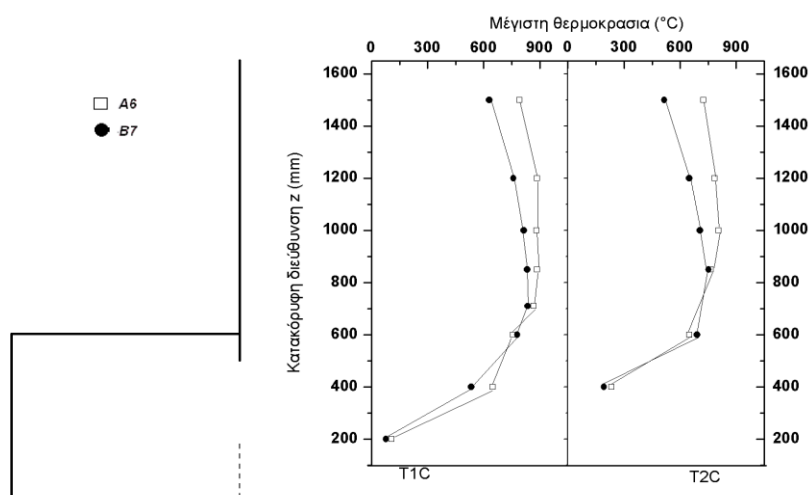
Στον Πίνακα 4.26 που ακολουθεί φαίνονται οι μέγιστες και οι μέσες τιμές για τα θερμοστοιχεία T1C και T2C των πειραμάτων A6 και B7. Στη συνέχεια, στα Σχήματα 4.107-4.108 τα αντίστοιχα διαγράμματα συναρτήσει του κάθετου άξονα z.

Θέση	Μέγιστη θερμοκρασία (°C)		Μέση τιμή θερμοκρασιών (°C)	
	A3	A4	A3	A4
T1C1	106,20	77,42	74,01	61,51
T1C2	647,57	533,90	466,21	412,58
T1C3	757,68	779,94	592,94	612,72
T1C4	867,93	835,12	626,30	647,04
T1C5	885,91	833,52	603,28	643,48
T1C6	883,05	814,48	564,30	608,16
T1C7	885,95	759,21	525,69	536,40
T1C8	791,41	629,68	437,60	416,45
T2C1	233,82	192,59	139,69	132,40
T2C2	648,24	690,01	453,50	564,24
T2C3	764,15	751,22	537,81	568,26
T2C4	804,44	706,70	541,70	522,52
T2C5	785,30	648,89	486,44	447,48
T2C6	725,05	514,44	399,15	337,93

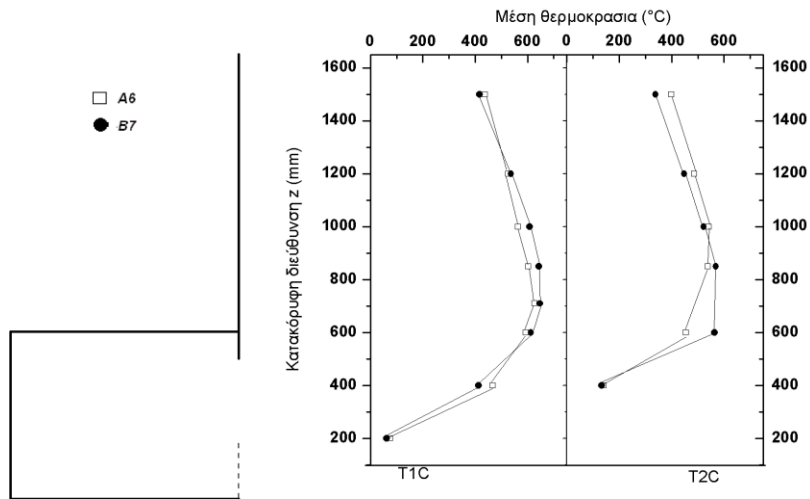
**Πίνακας 4.26** Μέγιστες και μέσες τιμές θερμοκρασιών, για τα θερμοστοιχεία στις κεντρικές θέσεις T1C και T2C στα πειράματα A6 και B7.

Όπως και στην περίπτωση των θερμοστοιχείων T1M, T2M στο 1/4 του πλάτους της πρόσοψης, έτσι και σε αυτά στη μεσοκάθετο του ανοίγματος παρατηρείται ίδια μορφή στα μέγιστα και στις μέσες τιμές. Στον πρώτο στύλο στα 12.3cm από την πρόσοψη υπάρχει ισχυρή αύξηση στις τιμές από το ύψος των 40cm, δηλαδή 20cm χαμηλότερα από την οροφή του δωματίου, όπου σημειώνονται μέσες τιμές κοντά στους 500°C, με μεγαλύτερη αύξηση στα 71-120cm όπου παρατηρούνται τιμές κοντά στους 700°C. Στα ύψη αυτά σημειώνονται οι μέγιστες τιμές, του θερμοκρασιακού προφίλ, φτάνοντας τιμές κοντά στους 900°C, όπως μπορεί να φανεί από τα γραφήματα των αντίστοιχων θερμοστοιχείων στα Σχήματα 4.109-4.110

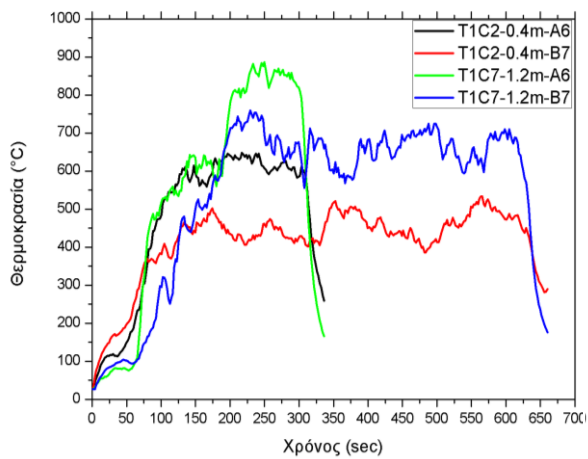
Στην περίπτωση του δεύτερου στύλου, υπάρχει αντίστοιχη διακύμανση στις τιμές των μέσων θερμοκρασιών, εμφανίζοντας όμως χαμηλότερες αριθμητικά τιμές. Πρέπει να τονιστεί πως και στην περίπτωση αυτή το εξωτερικό πλούμιο της φωτιάς εμφανίζει πιο ανεπτυγμένη μορφή στο πείραμα A6 σε σχέση με το αντίστοιχο στο B7.



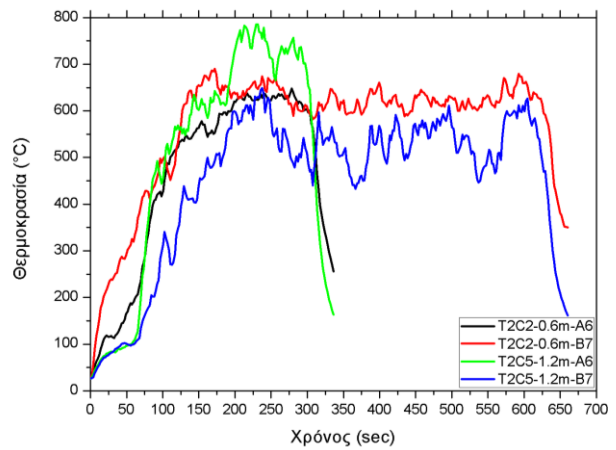
**Σχήμα 4.107** Διάγραμμα μέγιστων θερμοκρασιών των θερμοστοιχείων στους δυο στύλους, στη μεσοκάθετο της πρόσοψης του δωματίου συναρτήσει της κατακόρυφης διεύθυνσης του άξονα z.



**Σχήμα 4.108** Διάγραμμα μέσων θερμοκρασιών των θερμοστοιχείων στους δυο στύλους, στη μεσοκάθετο της πρόσοψης του δωματίου συναρτήσει της κατακόρυφης διεύθυνσης του άξονα z.



**Σχήμα 4.109** Συγκριτικό διάγραμμα των θερμοκρασιών στις θέσεις T1C2 και T1C7 των πειραμάτων A6 και B7.



**Σχήμα 4.110** Συγκριτικό διάγραμμα των θερμοκρασιών στις θέσεις T2C2 και T2C5 των πειραμάτων A6 και B7.

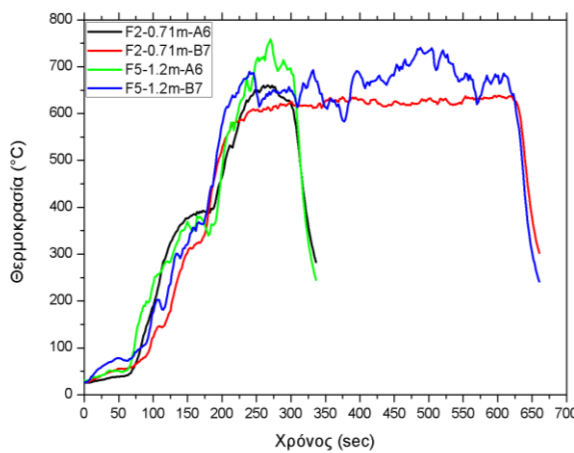
#### 4.5.3.4 Θερμοκρασίες στην πρόσοψη του δωματίου

Οι θερμοκρασίες στην πρόσοψη του δωματίου μελετήθηκαν με συνολικά 12 θερμοστοιχεία, εκ των οποίων τα μισά στη μεσοκάθετο του πλάτους της πρόσοψης και τα υπόλοιπα στο 1/4 του πλάτους, με τις μέσες και μέγιστες θερμοκρασίες των θερμοστοιχείων αυτών φαίνονται στον Πίνακα 4.27 που ακολουθεί.

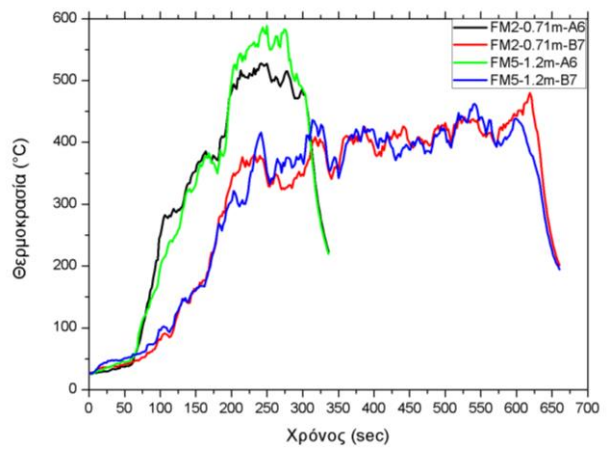


Θέση	Μέγιστη θερμοκρασία (°C)		Μέση τιμή θερμοκρασιών (°C)	
	A6	B7	A6	B7
F1	680,25	695,35	389,74	503,07
F2	660,08	637,81	351,34	475,22
F3	728,81	694,68	377,53	511,84
F4	721,20	666,36	363,16	481,94
F5	758,11	740,29	368,58	510,97
F6	629,62	557,09	310,62	376,31
FM1	491,91	387,54	292,77	245,36
FM2	527,49	479,51	310,20	304,50
FM3	579,89	494,07	333,59	333,89
FM4	607,44	502,50	339,29	336,99
FM5	588,25	461,98	315,51	302,78
FM6	565,35	413,01	293,65	266,32

**Πίνακας 4.27** Μέγιστες θερμοκρασίες και μέσες τιμές θερμοκρασιών, για τα θερμοστοιχεία στις θέσεις F και FM της πρόσοψης στα πειράματα A6 και B7.

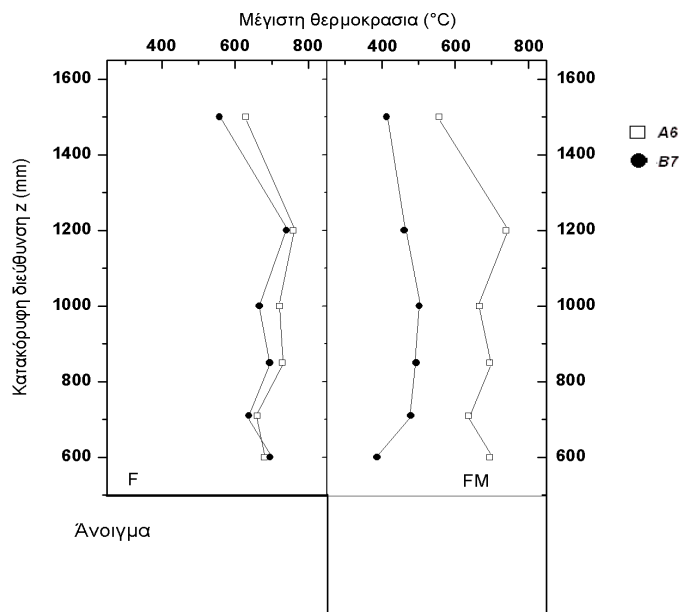


**Σχήμα 4.111** Συγκριτικό διάγραμμα των θερμοκρασιών στις θέσεις F2 και F5 των πειραμάτων A6 και B7.

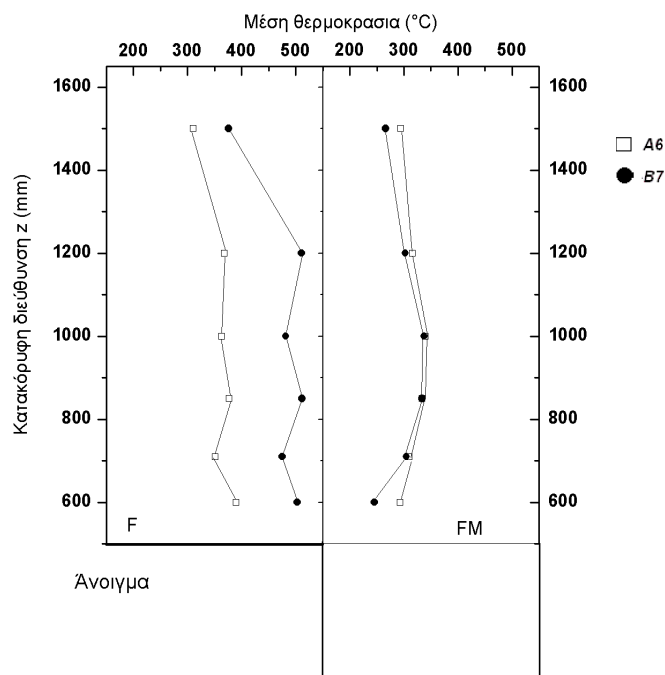


**Σχήμα 4.112** Συγκριτικό διάγραμμα των θερμοκρασιών στις θέσεις FM2 και FM5 των πειραμάτων A6 και B7.

Με βάση τις τιμές αυτές, στα Σχήματα 4.113-4.114 φαίνονται τα διαγράμματα θερμοκρασιών με βάση την καθ' ύψος απόσταση των θερμοστοιχείων.



**Σχήμα 4.113** Διάγραμμα μέγιστων θερμοκρασιών των θερμοστοιχείων της πρόσοψης του δωματίου κατά την κατακόρυφη διεύθυνση του άξονα z.



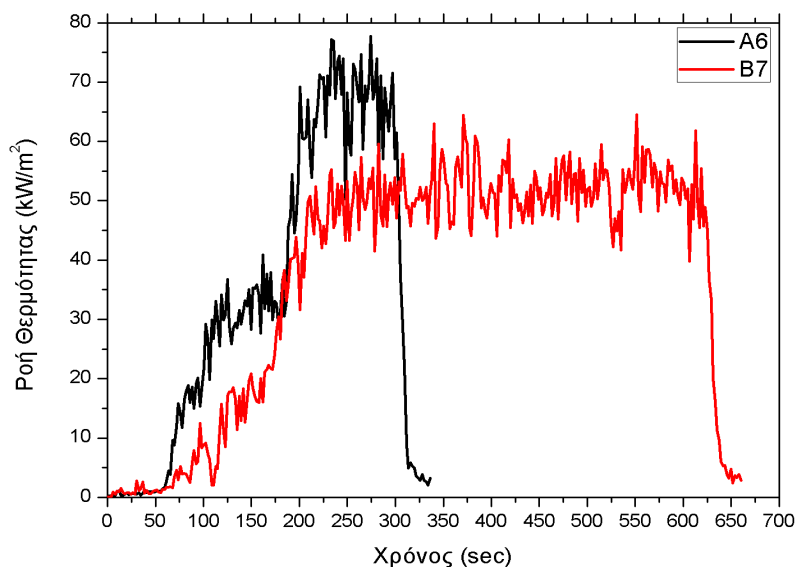
**Σχήμα 4.114** Διάγραμμα μέσων θερμοκρασιών των θερμοστοιχείων της πρόσοψης του δωματίου κατά την κατακόρυφη διεύθυνση του άξονα z.

Παρατηρείται, πως στην περίπτωση των θέσεων στη μεσοκάθετο της πρόσοψης, οι μέγιστες θερμοκρασίες στα δυο πειράματα είναι πολύ κοντά σε τιμές, εμφανίζοντας παράλληλα ίδια κατανομή. Οι θερμοκρασίες αυτές έφτασαν μέχρι τους 780°C περίπου σε ύψος 1.2m από το έδαφος. Στην τελευταία θέση δείχνουν και στα δυο πειράματα να μειώνονται αισθητά, κάτι το οποίο έχει να κάνει με το ύψος που έφτασαν οι φλόγες. Στην περίπτωση των μέσων τιμών οι αποκλίσεις είναι μεγαλύτερες, με το πείραμα B7 να έχει αρκετά υψηλότερες μέσες θερμοκρασίες σε κάθε θέση (περίπου 200°C), παρά το γεγονός πως οι διακυμάνσεις είναι παρόμοιες και στα δυο πειράματα. Στην περίπτωση των θερμοστοιχείων στο 1/4 του πλάτους της πρόσοψης εμφανίζεται σχεδόν ίδια διακύμανση και τιμές στις μέσες θερμοκρασίες, με τα σημεία των τιμών για τα δυο πειράματα σχεδόν να συμπίπτουν στο γράφημα, δείχνοντας μικρή αύξηση στις τιμές των θερμοστοιχείων σε ύψη 0.85m και 1m. Από την άλλη οι μέγιστες τιμές διαφέρουν αρκετά, με το πείραμα A6 να εμφανίζει παντού υψηλότερα μέγιστα με αρκετές διακυμάνσεις, εν αντιθέσει με το B7 όπου εμφανίζει στις θέσεις 0.85m και 1m υψηλότερα μέγιστα, μα όχι μεγάλης διαφοράς από τις άλλες θέσεις.

Στα γραφήματα των Σχημάτων 4.111-4.112 συγκρίνονται τα θερμοκρασιακά προφίλ των θερμοστοιχείων F και FM σε ύψη 0.71m και 1.2m. Παρατηρείται πως σε όλες τις περιπτώσεις οι θερμοκρασίες στο ύψος 1.2m (θερμοστοιχεία F5 και FM5) είναι ελάχιστα αυξημένες από αυτές που μετρήθηκαν στο ύψος 0.7m, ενώ παρουσιάζουν πολλές διακυμάνσεις.

#### 4.5.3.5 Ροή Θερμότητας

Η ροή θερμότητας στα πειράματα A6 και B7 μετρήθηκε με μετρητή ροής θερμότητας ο οποίος ήταν τοποθετημένος πάνω στην πρόσοψη, σε ύψος 0.7m από το δάπεδο. Οι καμπύλες των μετρήσεων για τα πειράματα αυτά φαίνονται στο διάγραμμα του Σχήματος 4.115 που ακολουθεί.



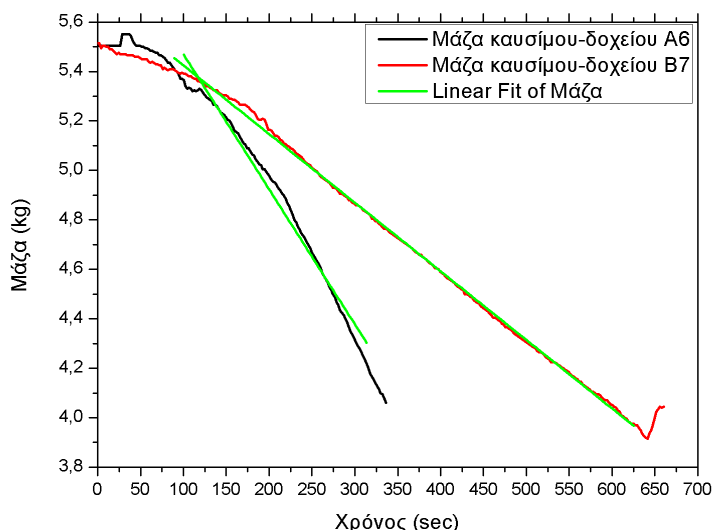
**Σχήμα 4.115** Συγκριτικό διάγραμμα των ροών θερμότητας στα πειράματα A6 και B7.

Η ροή θερμότητας στο πείραμα A6 (μαύρη καμπύλη) εμφάνισε μέγιστη τιμή  $77.70 \text{ kW/m}^2$  τη χρονική στιγμή  $275 \text{ sec}$  μετά την ανάφλεξη του καυσίμου, ενώ στο πείραμα B7 (κόκκινη καμπύλη) η μέγιστη τιμή ήταν  $64.47 \text{ kW/m}^2$  στα  $551 \text{ sec}$  μετά την ανάφλεξη αντίστοιχα. Παρατηρείται από τα γραφήματα, πως και στις δυο περιπτώσεις μετά από χρονικό διάστημα  $170 \text{ sec}$  περίπου, η ροή θερμότητας αυξάνει με μεγάλο ρυθμό. Από το σημείο αυτό και μέχρι τη φάση σβέσης της φωτιάς, οι διακυμάνσεις στις τιμές είναι από  $40 \text{ kW/m}^2$  έως  $60 \text{ kW/m}^2$  περίπου για το πείραμα B7. Σε αντίθεση, στο πείραμα A6, μετά τη ραγδαία αύξηση που παρατηρείται και πάλι μετά από  $170 \text{ sec}$  περίπου, οι διακυμάνσεις είναι σε εμφανώς υψηλότερα επίπεδα, της τάξης των  $55-75 \text{ kW/m}^2$  περίπου. Τελικά, στη φάση της σβέσης η ροή θερμότητας μειώνεται με ίδιο ρυθμό στις δυο αυτές περιπτώσεις, μέχρι την απόσβεση της φωτιάς.

#### 4.5.3.6 Απώλεια μάζας καυσίμου

Με τη δυναμοκυψέλη η οποία ήταν τοποθετημένη στο κέντρο του δωματίου, κάτω από το δάπεδο, γινόταν μέτρηση του βάρους καυσίμου κάθε  $2 \text{ sec}$ . Η αρχική μάζα καυσίμου μαζί με το δοχείο στα πειράματα A6 και B7 ήταν  $5.55 \text{ kg}$  ενώ το δοχείο είχε βάρος  $4 \text{ kg}$ . Στο Σχήμα 4.116 φαίνονται οι καμπύλες της μάζας καυσίμου-δοχείου που μετρήθηκε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

Ο χρόνος διεξαγωγής του πειράματος A6 ήταν σχεδόν ο μισός από αυτόν του πειράματος B7 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 A6 είναι πολύ πιο μεγάλη σε σχέση με την αντίστοιχη του πειράματος B7 (σχεδόν διπλάσια). Και στις δυο περιπτώσεις έγινε γραμμική προσέγγιση, με τα αποτελέσματα να φαίνονται στον Πίνακα 4.28.



Σχήμα 4.116 Καμπύλες μάζας καυσίμου-δοχείου στα πειράματα Α6 και Β7.

Πείραμα	Γραμμική Προσέγγιση (linefit)	Κλίση a (slope)	Σφάλμα (%)
A6	$y = ax + 6.168$	-0.00546	7,50101E-5
B7	$y = ax + 5.702$	-0.00277	3,88642E-19

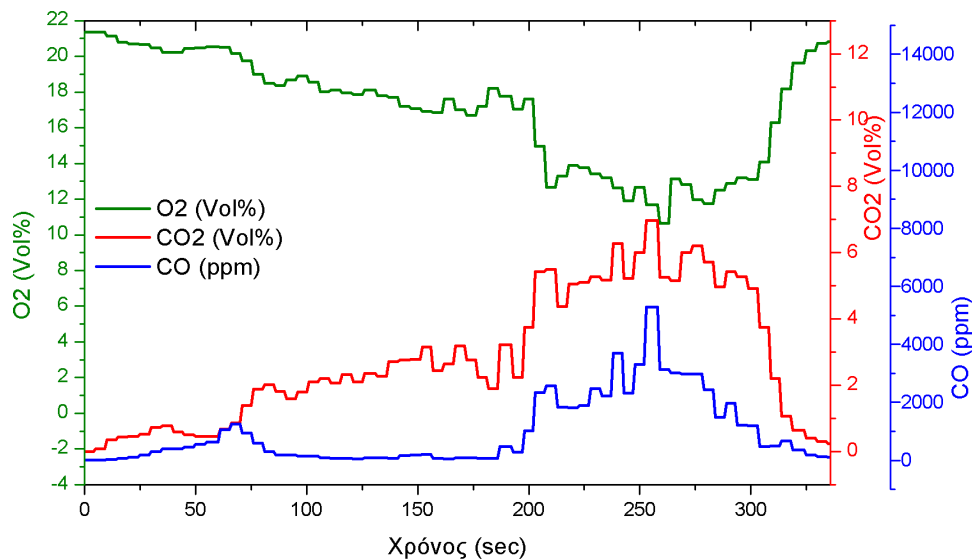
Πίνακας 4.28 Γραμμική προσαρμογή για τις καμπύλες μάζας καυσίμου-δοχείου πειραμάτων Α6, Β7.

#### 4.5.3.7 Συγκεντρώσεις $O_2$ , CO, $CO_2$

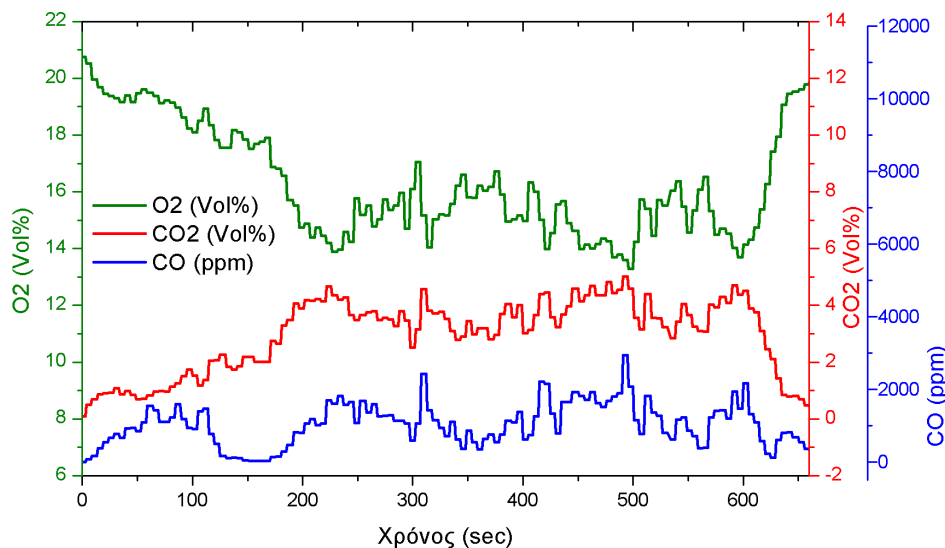
Με τον αναλυτή αερίων μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις αερίων σε ύψος 1.65m από το δάπεδο του δωματίου και σε απόσταση 0.05m από την πρόσοψη. Οι μετρήσεις περιλάμβαναν συγκέντρωση οξυγόνου ( $O_2$ ), μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και διοξειδίου του άνθρακα ( $CO_2$ ). Τα γραφήματα των συγκεντρώσεων για κάθε πείραμα εμφανίζονται στα Σχήματα 4.117-4.118 που ακολουθούν, ενώ στον Πίνακα 4.29 φαίνονται οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές των συγκεντρώσεων στα πειράματα Α6 και Β7.

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 4.29 Μέγιστες-ελάχιστες τιμές των μετρήσεων  $O_2$ ,  $CO_2$ , CO στα πειράματα Α6 και Β7.



**Σχήμα 4.117** Γραφική αναπαράσταση των συγκεντρώσεων αερίων του πειράματος Α6.



**Σχήμα 4.118** 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.

#### 4.5.4 Συμπεράσματα

Η παράμετρος του αερισμού που μελετήθηκε στο εδάφιο αυτό έγινε με σύγκριση των πειραμάτων Α6 και Β7, τα οποία ως άνοιγμα είχαν πόρτα και παράθυρο αντίστοιχα, με ίδια ποσότητα καυσίμου.

Ο χρόνος διάρκειας του πειράματος B7 ήταν σχεδόν διπλάσιος από το χρόνο διάρκειας του πειράματος A6, καταδεικνύοντας το πόσο ενεργεί στην ταχύτητα της καύσης ο αερισμός και η εισαγωγή οξυγόνου εντός του δωματίου καύσης. Έτσι, μεγαλύτερες διαστάσεις ανοίγματος (Σχέσεις 1.20-1.21) αποφέρουν ταχύτερη καύση του καυσίμου εντός του δωματίου. Αυτό είχε ως επακόλουθο αυξημένη περίοδο αναπτυσσόμενης φωτιάς για το B7, με την περίοδο της σβέσης όμως να διαρκεί το ίδιο περίπου και στα δυο πειράματα.

Εντός του δωματίου καύσης σημειώθηκαν μεγαλύτερες θερμοκρασίες στην περίπτωση του A6 το οποίο οφείλεται στην πολύ μικρότερη διάρκειά του. Στην περίπτωση αυτή ο ρυθμός απώλειας μάζας καυσίμου ήταν πολύ ταχύτερος σε σχέση με του πειράματος B7. Αυτή η διαφορά στο ρυθμό καύσης επέφερε τις αυξημένες θερμοκρασίες του πειράματος A6. Σημαντικό στοιχείο αποτελεί η εμφάνιση υψηλότερων θερμοκρασιών στην νότιο-ανατολική γωνία (CF) η οποία βρίσκεται πιο κοντά στο άνοιγμα.

Για το εξερχόμενο πλούμιο πρέπει να τονιστεί πως οι μεγαλύτερες διακυμάνσεις, όπως ήταν φυσικό, παρατηρήθηκαν στον πρώτο στύλο σε απόσταση 12.3m. από την πρόσοψη, με κρίσιμα ύψη να αναδεικνύονται αυτά των 0-60cm πάνω από την οροφή του δωματίου. Εκεί παρατηρήθηκαν πολύ αυξημένες τιμές, οι οποίες ακολουθούν το μοτίβο των θερμοκρασιών σε ίδια ύψη πάνω στην πρόσοψη. Έγινε φανερό πως το εξωτερικό πλούμιο της φωτιάς στην περίπτωση του πειράματος A6 είναι πιο ανεπτυγμένο σε σχέση με αυτό του πειράματος B7. Οι μεγαλύτερες διαστάσεις του ανοίγματος στο πείραμα A6 επέφεραν πιο ανεπτυγμένο πλούμιο της φωτιάς με αποτέλεσμα να υπάρχει ανάλογος αντίκτυπος στο θερμοκρασιακό προφίλ της πρόσοψης. Η πρόσοψη εκτέθηκε σε υψηλότερες θερμοκρασίες στην περίπτωση αυτή και κυρίως στο 1/4 του πλάτους της, συναρτήσει του ανεπτυγμένου εξωτερικού πλούμιου της φωτιάς, εμφανίστηκαν ιδιαίτερος υψηλές θερμοκρασίες στο πείραμα A6.

Όπως αναλύθηκε, ο ρυθμός μείωσης του καυσίμου στην περίπτωση της πόρτας (πείραμα A6) ήταν πολύ μεγαλύτερος, κάτι που οφείλεται στην μεγαλύτερη ποσότητα οξυγόνου που εισέρχεται στο δωμάτιο μέσω του ανοίγματος κάνοντας ταχύτερη την καύση. Βασικό στοιχείο στα δυο πειράματα η δυνατότητα για γραμμική προσέγγιση στις καμπύλες μείωσης μάζας καυσίμου, κάτι που ανέδειξε την παραπάνω παρατήρηση.

Στις συγκεντρώσεις αερίων εμφανίζεται σύγκλιση στις ακραίες τιμές του οξυγόνου και του διοξειδίου του άνθρακα με σημαντικές όμως διαφορές να εμφανίζονται στις συγκεντρώσεις του μονοξειδίου του άνθρακα. Το εύρος των τιμών μονοξειδίου του άνθρακα βρέθηκε αρκετά μεγαλύτερο στο πείραμα A6 σε σχέση με το εύρος στην περίπτωση του B7.

## **4.6 Κεντρικός Άξονας Εξωτερικού Πλούμιου Φωτιάς**

Στα πειράματα A8 και B9, έγινε προσπάθεια για τον καθορισμό του κεντρικού άξονα του εξωτερικού πλούμιου 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 [Tang, et al., 2012], [Lock, et al., 2008].

### **4.6.1 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 Πίνακα 4.30). Και στις δυο περιπτώσεις η ανάφλεξη έγινε με μεταλλικό ραβδί που στη μια άκρη του υπήρχε τυλιγμένο μαντήλι εμποτισμένο με καύσιμο λειτουργώντας ως προσάναμμα.



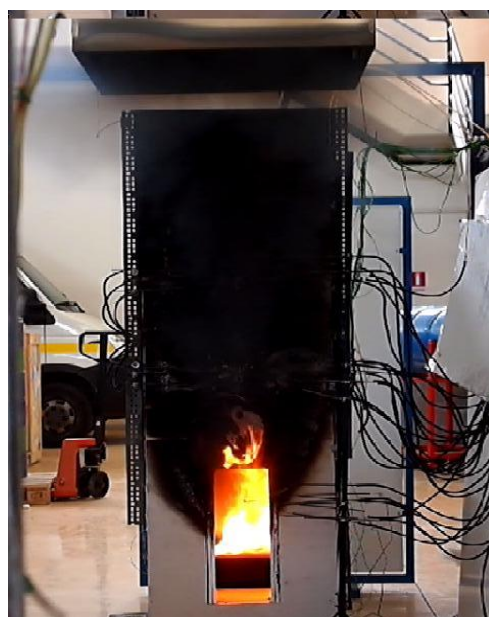
Πείραμα	Ισχύς φωτιάς σε κλίμακα 1/4 (kW)	Διαστάσεις Ανοίγματος [ύψος x πλάτος] (cm)	Παράγοντας Αερισμού $A_v \sqrt{H_v}$
A8	115	50x20	0.0707
B9	115	30x20	0.0329

**Πίνακας 4.30** Χαρακτηριστικά πειραμάτων A8 και B9.

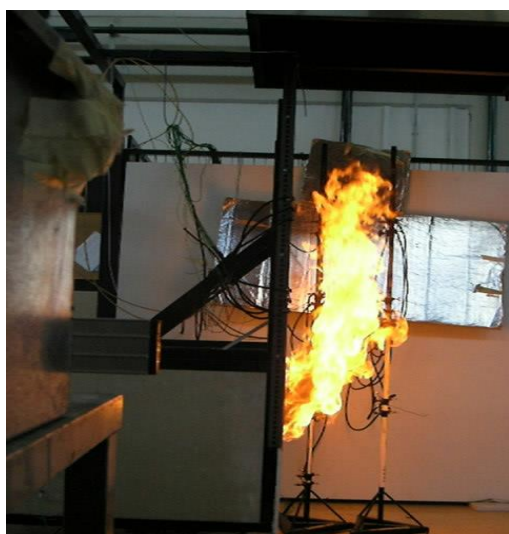
Το πείραμα A8 είχε διάρκεια 356sec και στα Σχήματα 4.119-4.126 που ακολουθούν φαίνονται εικόνες της φωτιάς σε διάφορες χρονικές στιγμές. Οι φλόγες εμφανίστηκαν εκτός δωματίου περίπου 50sec μετά την έναρξη του πειράματος, μένοντας σταθερά εκτός μετά από 60sec (Σχήματα 4.119-4.120). Η φωτιά εισήλθε στη φάση της σβέσης περίπου 320sec από την έναρξη της (Σχήματα 4.125-4.126).



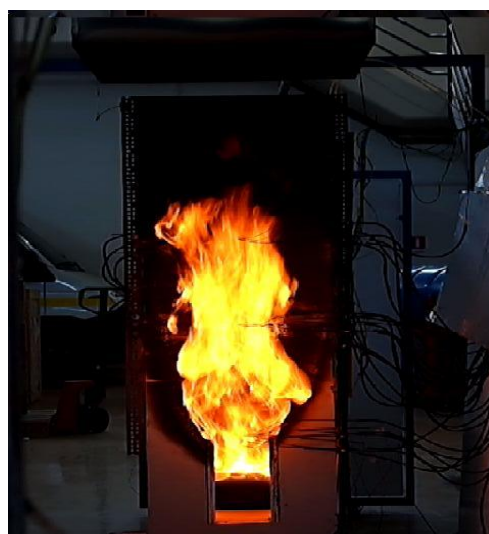
**Σχήμα 4.119** Εξερχόμενη φλόγα, 60sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A8).



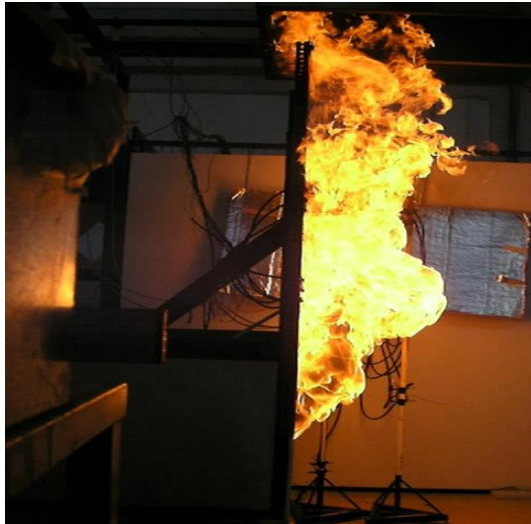
**Σχήμα 4.120** Εξερχόμενη φλόγα, 60sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A8).



**Σχήμα 4.121** Εξερχόμενη φλόγα, 120sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A8).



**Σχήμα 4.122** Εξερχόμενη φλόγα, 120sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A8).



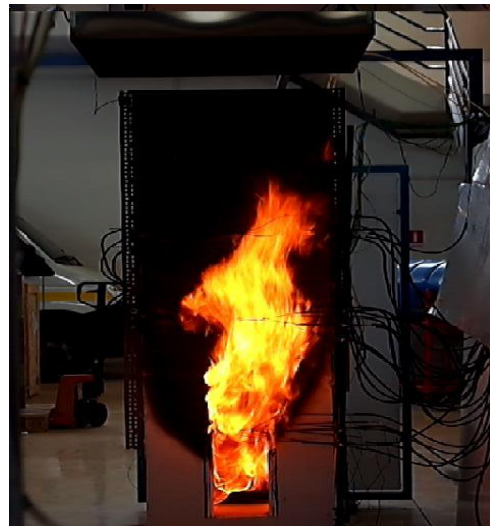
**Σχήμα 4.123** Εξερχόμενη φλόγα, 240sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A8).



**Σχήμα 4.124** Εξερχόμενη φλόγα, 240sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A8).



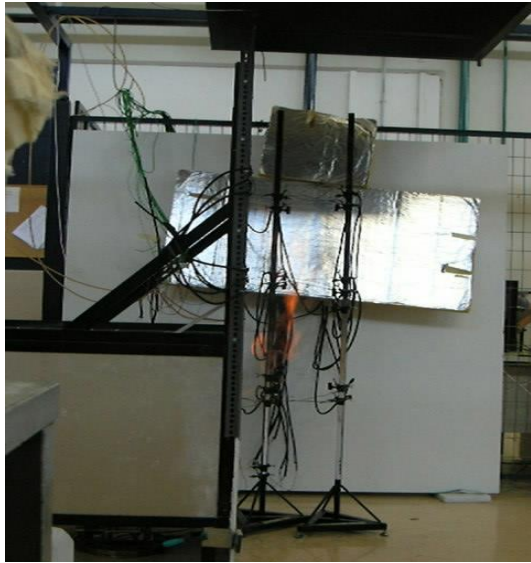
**Σχήμα 4.125** Εξερχόμενη φλόγα, 330sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A8).



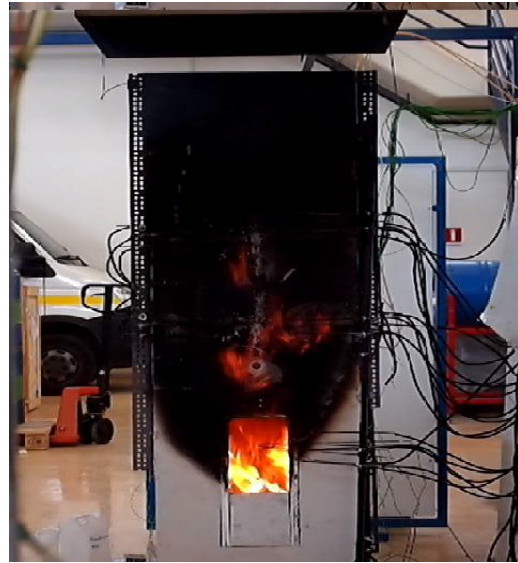
**Σχήμα 4.126** Εξερχόμενη φλόγα, 330sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα A8).

Το πείραμα B9 ήταν το τελευταίο από τα πειράματα που έγιναν με παράθυρο ως άνοιγμα και η διάρκειά του ήταν 663sec. Στα Σχήματα 4.127-4.136 φαίνεται η φωτιά σε διάφορες χρονικά στιγμές, με τη φάση της σβέσης να αποτελεί περίπου τα τελευταία 25sec της διάρκειας του πειράματος (Σχήματα 4.135-4.136), ενώ οι φλόγες είχαν εμφανιστεί στην πρόσοψη περίπου 80sec μετά την έναρξη (Σχήματα 4.127-4.128).

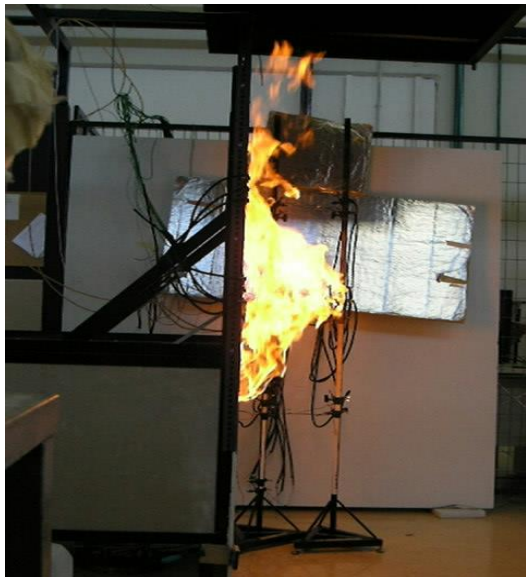




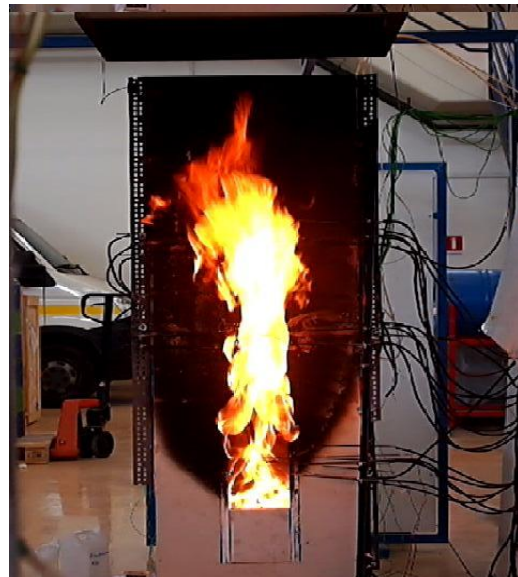
**Σχήμα 4.127** Εξερχόμενη φλόγα, 90sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα B9).



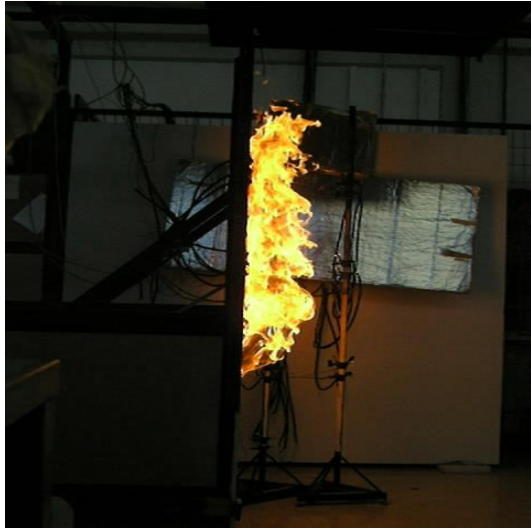
**Σχήμα 4.128** Εξερχόμενη φλόγα, 90sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα B9).



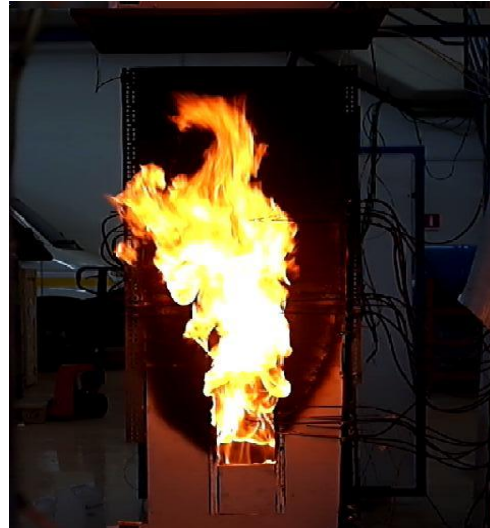
**Σχήμα 4.129** Εξερχόμενη φλόγα, 180sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα B9).



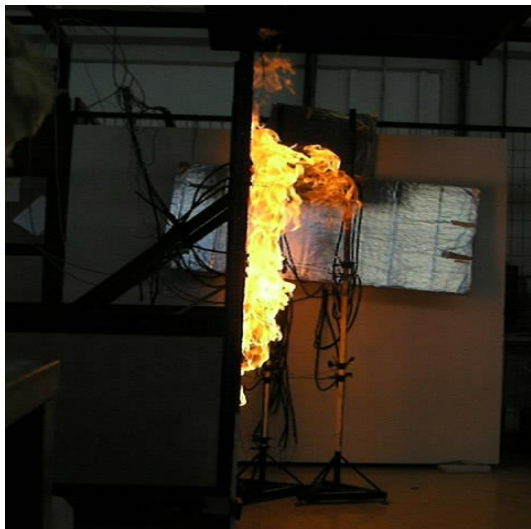
**Σχήμα 4.130** Εξερχόμενη φλόγα, 180sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα B9).



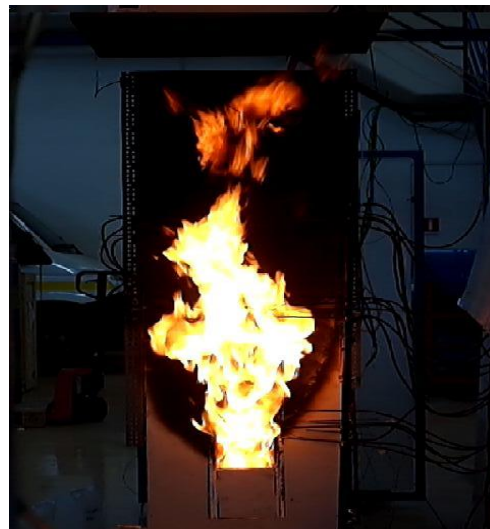
**Σχήμα 4.131** Εξερχόμενη φλόγα, 330sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα B9).



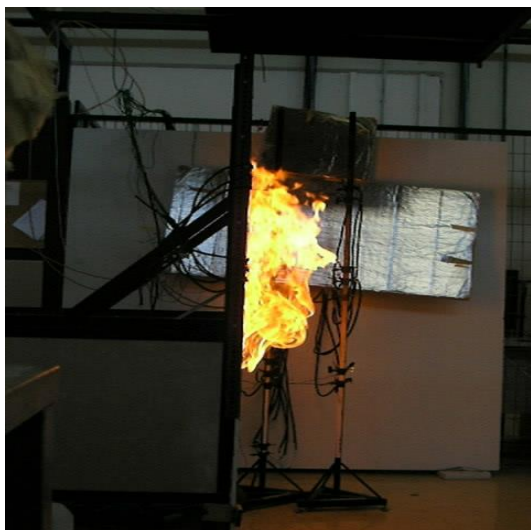
**Σχήμα 4.132** Εξερχόμενη φλόγα, 330sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα B9).



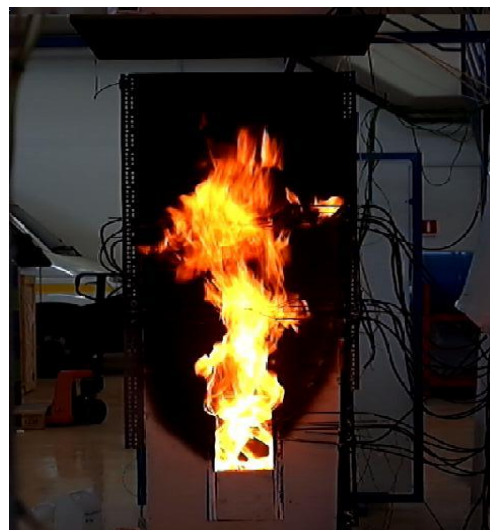
**Σχήμα 4.133** Εξερχόμενη φλόγα, 480sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα B9).



**Σχήμα 4.134** Εξερχόμενη φλόγα, 480sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα B9).



**Σχήμα 4.135** Εξερχόμενη φλόγα, 640sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα B9).



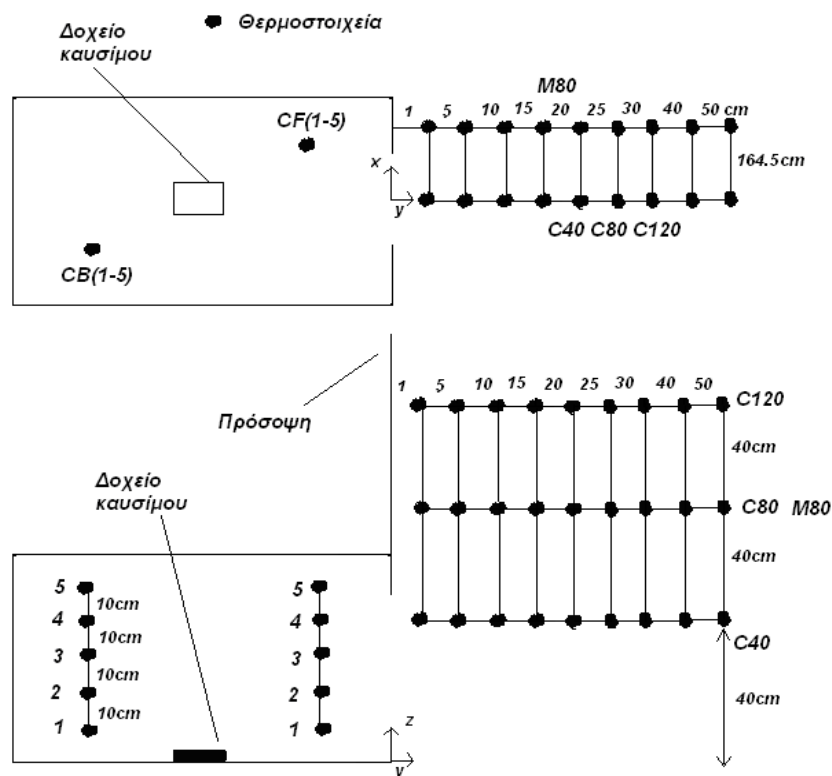
**Σχήμα 4.136** Εξερχόμενη φλόγα, 640sec μετά την ανάφλεξη (Πείραμα B9).

#### 4.6.2 Διάταξη Μετρητικών Συσκευών

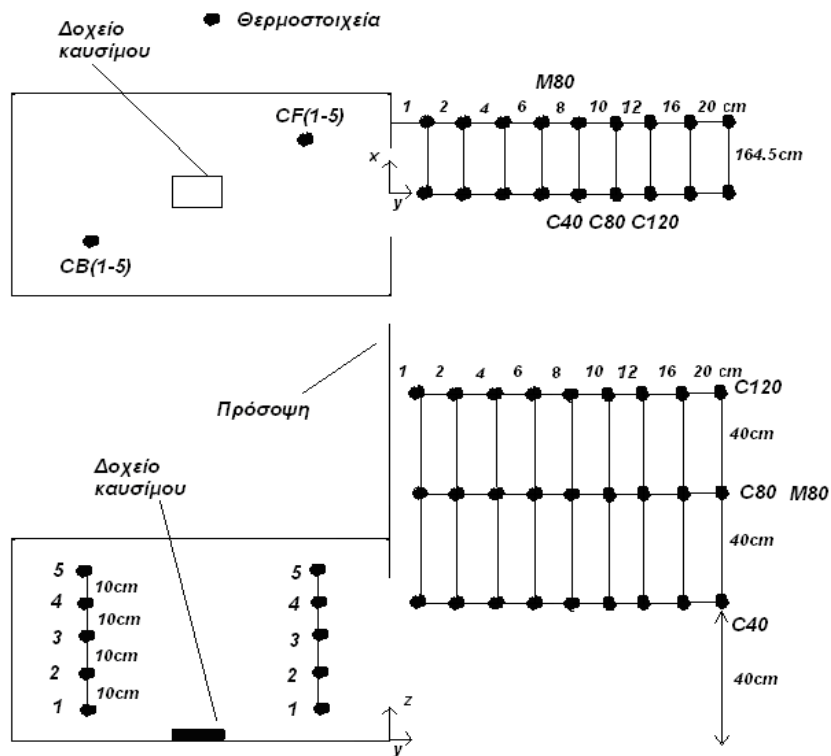
Στα πειράματα A8 και B9, ως μετρητικές συσκευές χρησιμοποιήθηκαν

α) θερμοστοιχεία, β) μετρητής ροής θερμότητας, γ) αναλυτής αερίων και δ) δυναμοκυψέλη. Αρχή μέτρησης θεωρήθηκε το σημείο της μεσοκαθέτου του ανοίγματος στο δάπεδο του δωματίου, ενώ οι μετρήσεις λαμβάνονταν ανά 2sec.

Ο αναλυτής αερίων που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα, ήταν τοποθετημένος σε απόσταση 0.05m από την πρόσοψη και ύψος 1.65m. Ο μετρητής ροής θερμότητας τοποθετήθηκε πάνω στη μεσοκάθετο της πρόσοψης, σε ύψος 0.7m από το δάπεδο, ενώ η δυναμοκυψέλη ήταν κεντραρισμένη κάτω από το δάπεδο του δωματίου. Στα Σχήματα 4.137-4.138 φαίνονται οι διατάξεις των θερμοστοιχείων των πειραμάτων A8 και B9 αντίστοιχα, ενώ στο Παράρτημα Α είναι καταγεγραμμένες οι συντεταγμένες όλων των μετρητικών συσκευών στα πειράματα αυτά. Σημειώνεται πως στα πειράματα αυτά έγινε ριζική αναδιάταξη των θερμοστοιχείων εκτός του δωματίου, καθώς ο σκοπός των πειραμάτων ήταν ο καθορισμός του κεντρικού άξονα του εξωτερικού πλούμιου της φωτιάς. Για το λόγο αυτό θεωρήθηκε σημαντικό να υπάρχει διάταξη η οποία να πετυχαίνει απεικόνιση του θερμοκρασιακού προφίλ κατά τον οριζόντιο άξονα εκτός του δωματίου. Με βάση τα αποτελέσματα για το εξωτερικό πλούμιο της φωτιάς κατά τον κάθετο άξονα στα πειράματα A6 και B7 που αναλύθηκαν σε προηγούμενο εδάφιο, το πλούμιο στην περίπτωση όπου για άνοιγμα υπάρχει πόρτα βρέθηκε πιο αναπτυγμένο. Για το λόγο αυτό, τα θερμοστοιχεία του πειράματος A8 εκτός δωματίου τοποθετήθηκαν ανά μεγαλύτερες αποστάσεις από την πρόσοψη σε σχέση με τα αντίστοιχα του πειράματος B9. Τέλος, όσο αφορά την ονομασία των θερμοστοιχείων, τα C40 αντιστοιχούν σε αυτά που βρίσκονται σε ύψος 40cm, τα C80 σε ύψος 80cm κοκ, ενώ μετά την ‘-’ ακολουθεί η απόσταση (σε cm) από την πρόσοψη κατά τον οριζόντιο άξονα.



Σχήμα 4.137 Σχηματικό διάγραμμα των θέσεων των θερμοστοιχείων στο πείραμα A8.



Σχήμα 4.138 Σχηματικό διάγραμμα των θέσεων των θερμοστοιχείων στο πείραμα B9.

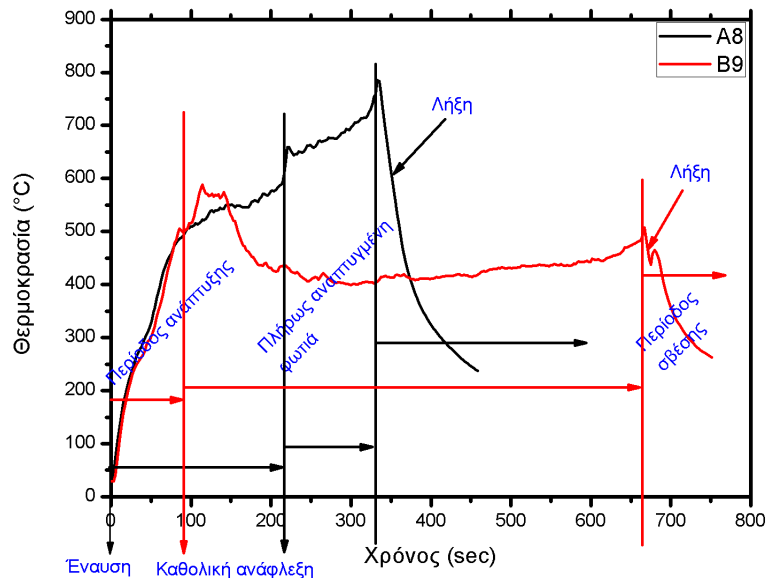
## 4.6.3 Ανάλυση Μετρήσεων

### 4.6.3.1 Θερμοκρασίες εσωτερικά του δωματίου

Οι θερμοκρασίες εντός του δωματίου μελετήθηκαν με τις μετρήσεις που ελήφθησαν από τα θερμοστοιχεία στις θέσεις CB και CF, της βόρειο-δυτικής και νότιο-ανατολικής γωνίας αντίστοιχα.

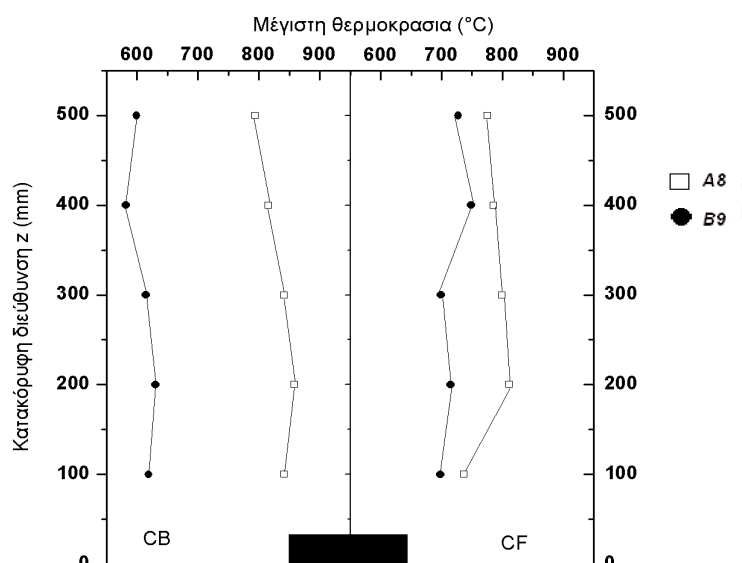
Στο Σχήμα 4.139 φαίνονται οι φάσεις της φωτιάς με βάση τις μέσες θερμοκρασίες που μετρήθηκαν στις θέσεις CB και CF που βρίσκονται εντός δωματίου. Όπως φαίνεται από το σχήμα, στην περίπτωση του A8, όπου το άνοιγμα είναι πόρτα, η περίοδος ανάπτυξης είναι περίπου η διπλάσια σε σχέση με το πείραμα B9. Στην περίπτωση όπου το άνοιγμα είναι παράθυρο με μικρότερο παράγοντα αερισμού, η ποσότητα του αέρα που εισέρχεται εντός του δωματίου είναι μικρότερη και μεταβολές στις θερμοκρασίες παρουσιάζονται μετά τα πρώτα 100sec περίπου που διαρκεί η φάση της ανάπτυξης. Από το σημείο της καθολικής ανάφλεξης και έπειτα, παρουσιάζονται αρκετές μεταβολές στις μέσες θερμοκρασίες μέχρι τα 200sec περίπου, ενώ στη συνέχεια οι θερμοκρασίες σταθεροποιούνται μέχρι τα 660sec. Στο σημείο αυτό λήγει η φάση της πλήρους αναπτυσσόμενης φωτιάς, η οποία διαρκεί περίπου 460sec. Τέλος, αρχίζουν να μειώνονται με σταθερό ρυθμό οι θερμοκρασίες εντός του δωματίου, έχοντας μπει στη φάση της σβέσης, μέχρι την τελική απόσβεση. Οι φάσεις του πειράματος A8 ακολούθησαν με παρόμοιο τρόπο τις φάσεις αντίστοιχων πειραμάτων, όπως τα A1, A2, A4. Έτσι, μετά την περίοδο της ανάπτυξης, η οποία διαρκεί 210sec περίπου, εμφανίζεται ραγδαία αύξηση στις μέσες θερμοκρασίες εντός του δωματίου. Στο σημείο αυτό σηματοδοτείται η εμφάνιση καθολικής ανάφλεξης, με τις θερμοκρασίες να εμφανίζουν αύξηση μέχρι τις μέγιστες τιμές, περίπου 340sec μετά την έναρξη του πειράματος. Από το σημείο εκείνο οι θερμοκρασίες εμφανίζουν σταθερή μείωση όντας πλέον στη φάση της σβέσης της φωτιάς.



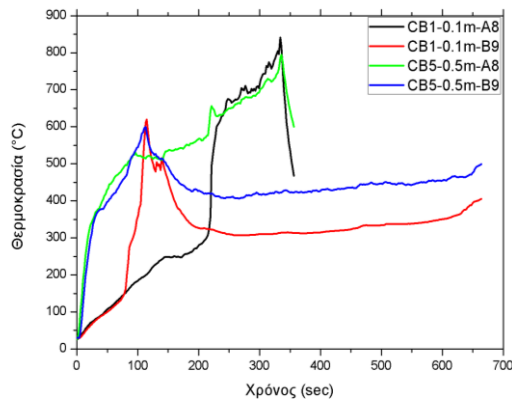


**Σχήμα 4.139** Συγκριτικό διάγραμμα μέσων θερμοκρασιών εντός του δωματίου των πειραμάτων A8 και B9

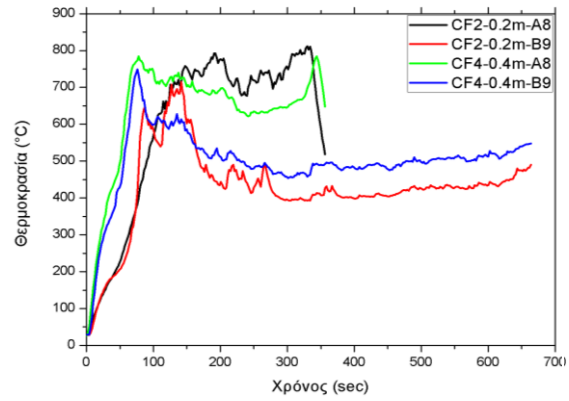
Από το διάγραμμα του Σχήματος 4.140 παρατηρείται μεγάλη διαφορά στις μέγιστες θερμοκρασίες της βορειο-δυτικής γωνίας (CB). Στις θέσεις αυτές οι μέγιστες θερμοκρασίες του πειράματος A8 βρέθηκαν υψηλότερες κατά 200°C σε σχέση με τις αντίστοιχες του πειράματος B9, με τη μέγιστη τιμή να παρατηρείται σε ύψος 0.2m από το δάπεδο του δωματίου και στα δυο πειράματα. Στο ανώτερο στρώμα μετρήθηκαν χαμηλότερες μέγιστες τιμές σε σχέση με το κατώτερο στρώμα εντός του δωματίου. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.141, οι τιμές που μετρήθηκαν στις ακριανές θέσεις CB (CB1 και CB5 σε ύψη 0.1m και 0.5m αντίστοιχα) αναδεικνύουν τη διαφορά στις μέγιστες τιμές των δυο στρωμάτων, όπου και στα δυο πειράματα οι καμπύλες του θερμοστοιχείου CB1 που ανήκει στο χαμηλότερο στρώμα εμφανίζουν υψηλότερα μέγιστα. Η μεγάλη διαφορά στις μέγιστες τιμές των δυο πειραμάτων δεν παρατηρείται στον ίδιο βαθμό στην περίπτωση της νότιο-ανατολικής γωνίας που είναι δίπλα στο άνοιγμα. Εκεί οι διαφορές είναι εμφανώς μικρότερες, όμως και πάλι οι μέγιστες τιμές στο πείραμα A8 είναι υψηλότερες. Εδώ, η μέγιστη τιμή στις θέσεις CF για το πείραμα A8 μετρήθηκε επίσης σε ύψος 0.2m, εν αντιθέσει με το πείραμα B9 όπου μετρήθηκε σε ύψος 0.4m (Σχήμα 4.142).



**Σχήμα 4.140** Διάγραμμα μέγιστων θερμοκρασιών εντός του δωματίου κατά την κατακόρυφη διεύθυνση του άξονα z.



**Σχήμα 4.141** Διάγραμμα θερμοκρασιών για τα θερμοστοιχεία στις θέσεις CB1 και CB5 των πειραμάτων A8 και B9.



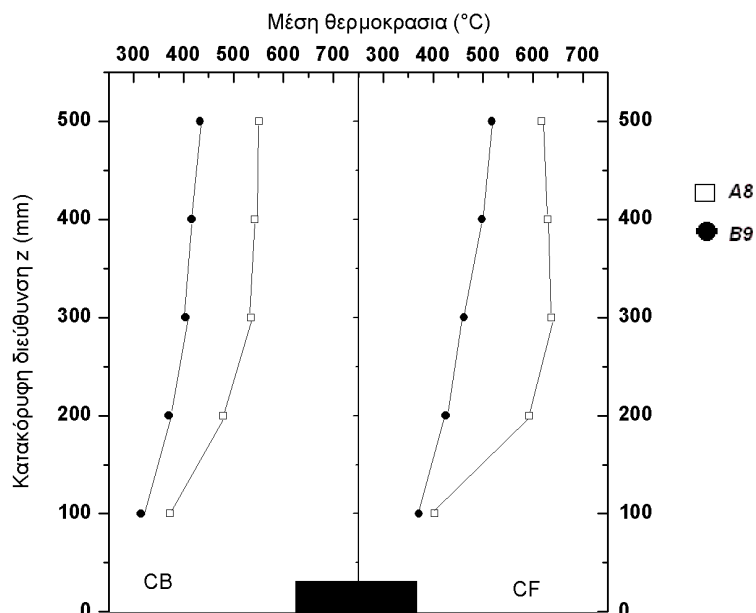
**Σχήμα 4.142** Διάγραμμα θερμοκρασιών για τα θερμοστοιχεία στις θέσεις CF2 και CF4 των πειραμάτων A8 και B9.

Στη συνέχεια φαίνεται ο Πίνακας 4.31 στον οποίο απεικονίζονται οι μέγιστες και οι μέσες θερμοκρασίες για τα θερμοστοιχεία στις θέσεις CB και CF.

Θέση	Μέγιστη θερμοκρασία (°C)		Μέση τιμή θερμοκρασιών (°C)	
	A8	B9	A8	B9
CB1	841,24	619,16	373,15	314,46
CB2	858,64	630,44	479,92	370,45
CB3	841,22	614,78	535,40	404,01
CB4	815,58	581,74	542,89	415,98
CB5	794,10	598,97	551,40	433,20
CF1	736,26	698,19	403,17	371,13
CF2	811,44	714,69	592,44	425,02
CF3	799,30	699,09	637,58	461,93
CF4	784,84	748,64	630,14	497,62
CF5	774,97	727,29	617,51	517,58

**Πίνακας 4.31** Μέγιστες και μέσες τιμές θερμοκρασιών, από τα θερμοστοιχεία στις θέσεις (CB) και (CF) στα πειράματα A8 και B9.

Στο Σχήμα 4.143 που ακολουθεί φαίνονται οι μέσες θερμοκρασίες από τα θερμοστοιχεία εντός του δωματίου. Είναι εμφανές πως οι θερμοκρασίες στο πείραμα B9 είναι αρκετά μικρότερες σε σχέση με τις αντίστοιχες του πειράματος A8, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4.30. Στις θέσεις της βόρειο-δυτικής γωνίας CB οι μεγαλύτερες διαφορές παρατηρούνται στις θέσεις όπου περιγράφουν το ανώτερο στρώμα (CB4 και CB5), ενώ αντίθετα, στις θέσεις CF παρατηρούνται στις θέσεις CF2 και CF3 σε ύψη 0.2m και 0.3m από το έδαφος. Η θέση CF2 βρίσκεται λίγο πάνω από το ύψος του δοχείου του καυσίμου, με τη φωτιά να έρχεται ταχύτατα σε επαφή με το εισερχόμενο οξυγόνο στην περίπτωση του πειράματος A8, καθώς με την πόρτα δεν υπάρχει εμπόδιο για τον εισερχόμενο αέρα. Αντιθέτως, στο πείραμα B9 το παράθυρο ξεκινάει από το ύψος των 0.3m από το έδαφος, με τον εισερχόμενο αέρα να ανακόπτεται από το τοίχωμα μέχρι το ύψος του παραθύρου.



Σχήμα 4.143 Διάγραμμα μέσων θερμοκρασιών εντός του δωματίου κατά την κατακόρυφη διεύθυνση του άξονα z.

#### 4.6.3.2 Θερμοκρασίες στο εξερχόμενο πλούμιο της φωτιάς

Οι θερμοκρασίες στο εξερχόμενο πλούμιο της φωτιάς μετρήθηκαν με θερμοστοιχεία κατά την οριζόντια κυρίως διεύθυνση. Τα θερμοστοιχεία τοποθετήθηκαν σε τρία ύψη από το δάπεδο του δωματίου, στα 0.4m (θέση C40), στα 0.8m (θέση C80) και στα 1.2m (θέση C120). Οι μέγιστες και οι μέσες τιμές από τις μετρήσεις των θερμοστοιχείων σε ύψος 0.4m φαίνονται στον Πίνακα 4.32 ο οποίος ακολουθεί.

A8			B9		
Θέση	Μέγιστη θερμοκρασία (°C)	Μέση τιμή θερμοκρασιών (°C)	Θέση	Μέγιστη θερμοκρασία (°C)	Μέση τιμή θερμοκρασιών (°C)
C40-01	752,68	600,87	C40-01	694,49	594,57
C40-05	775,33	595,74	C40-02	673,39	562,62
C40-10	827,96	580,28	C40-04	598,29	509,99
C40-15	679,39	431,35	C40-06	407,01	328,80
C40-20	477,82	240,97	C40-08	281,11	213,44
C40-25	294,26	154,20	C40-10	216,56	167,73
C40-30	138,50	89,24	C40-12	131,42	102,39
C40-40	127,88	80,72	C40-16	112,31	87,15
C40-50	89,96	59,97	C40-20	84,07	66,37

Πίνακας 4.32 Μέγιστες και μέσες τιμές θερμοκρασιών, από τα θερμοστοιχεία στις θέσεις C40 στα πειράματα A8 και B9.

Ομοίως, στους Πίνακες 4.33-4.34 φαίνονται οι μέγιστες και μέσες θερμοκρασίες από τα θερμοστοιχεία στις θέσεις C80 και C120.

A8			B9		
Θέση	Μέγιστη θερμοκρασία (°C)	Μέση τιμή θερμοκρασιών (°C)	Θέση	Μέγιστη θερμοκρασία (°C)	Μέση τιμή θερμοκρασιών (°C)
C80-01	824,44	421,60	C80-01	865,70	670,54
C80-05	890,90	495,53	C80-02	870,78	688,38
C80-10	914,66	552,77	C80-04	868,86	686,70
C80-15	917,06	612,32	C80-06	864,75	669,79
C80-20	855,97	604,22	C80-08	847,25	643,19
C80-25	847,78	565,56	C80-10	819,66	622,14
C80-30	739,23	458,02	C80-12	750,17	573,77
C80-40	568,99	289,29	C80-16	633,91	477,50
C80-50	336,31	138,46	C80-20	534,06	404,54

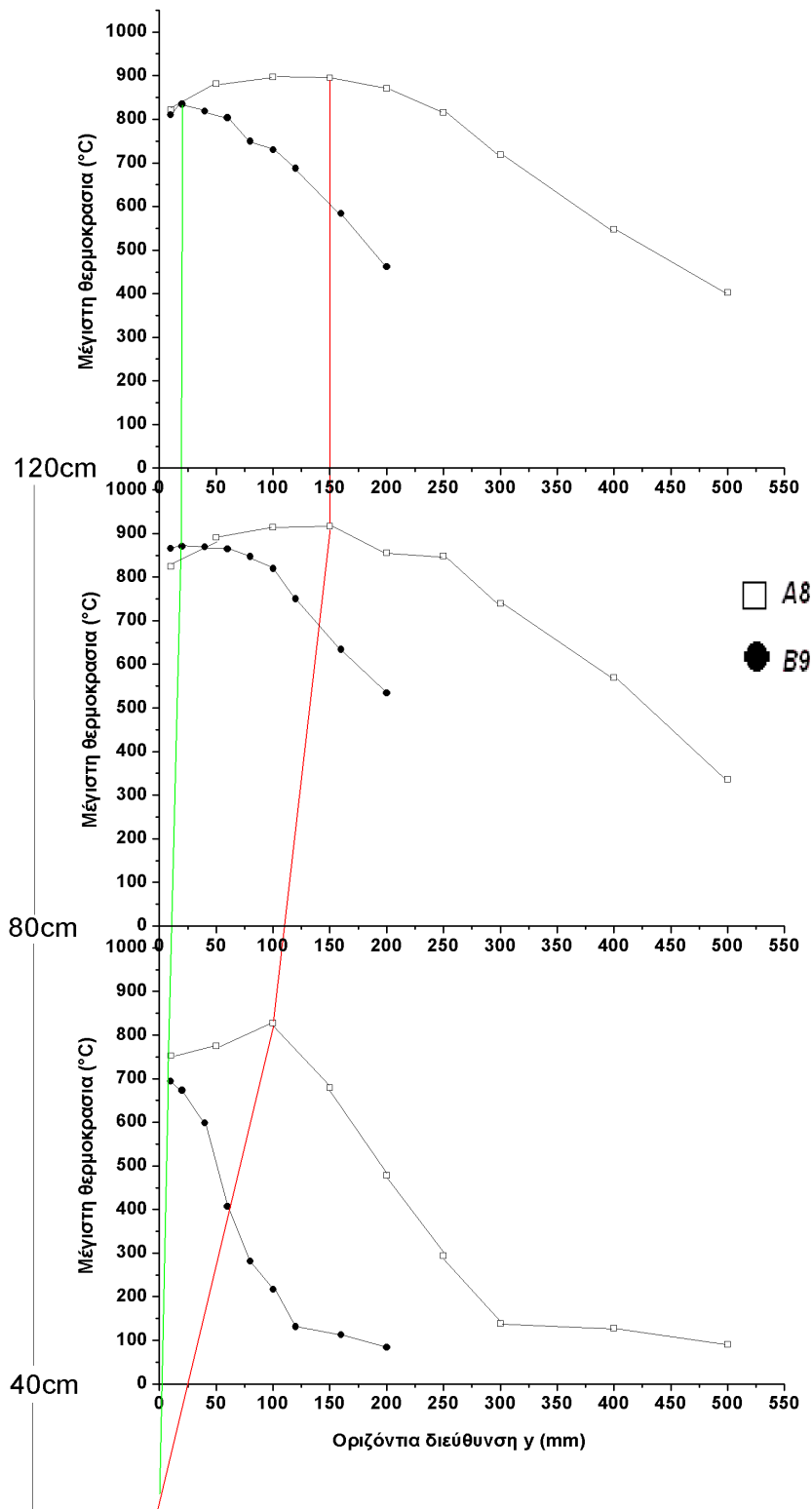
**Πίνακας 4.33** Μέγιστες και μέσες τιμές θερμοκρασιών, από τα θερμοστοιχεία στις θέσεις C80 στα πειράματα A8 και B9.

A8			B9		
Θέση	Μέγιστη θερμοκρασία (°C)	Μέση τιμή θερμοκρασιών (°C)	Θέση	Μέγιστη θερμοκρασία (°C)	Μέση τιμή θερμοκρασιών (°C)
C120-01	821,82	414,50	C120-01	809,86	584,93
C120-05	881,35	472,69	C120-02	834,51	606,77
C120-10	897,04	503,27	C120-04	818,25	595,18
C120-15	894,91	523,47	C120-06	803,82	574,22
C120-20	870,61	525,97	C120-08	749,81	529,18
C120-25	815,30	476,62	C120-10	730,27	511,42
C120-30	718,88	412,79	C120-12	687,50	457,78
C120-40	547,25	282,87	C120-16	584,12	389,94
C120-50	402,76	173,48	C120-20	462,14	311,10

**Πίνακας 4.34** Μέγιστες και μέσες τιμές θερμοκρασιών, από τα θερμοστοιχεία στις θέσεις C120 στα πειράματα A8 και B9.

Με βάση τις μέγιστες και μέσες θερμοκρασίες από τους Πίνακες 4.32-4.34 φαίνονται τα αντίστοιχα διαγράμματα στα Σχήματα 4.144-4.145.

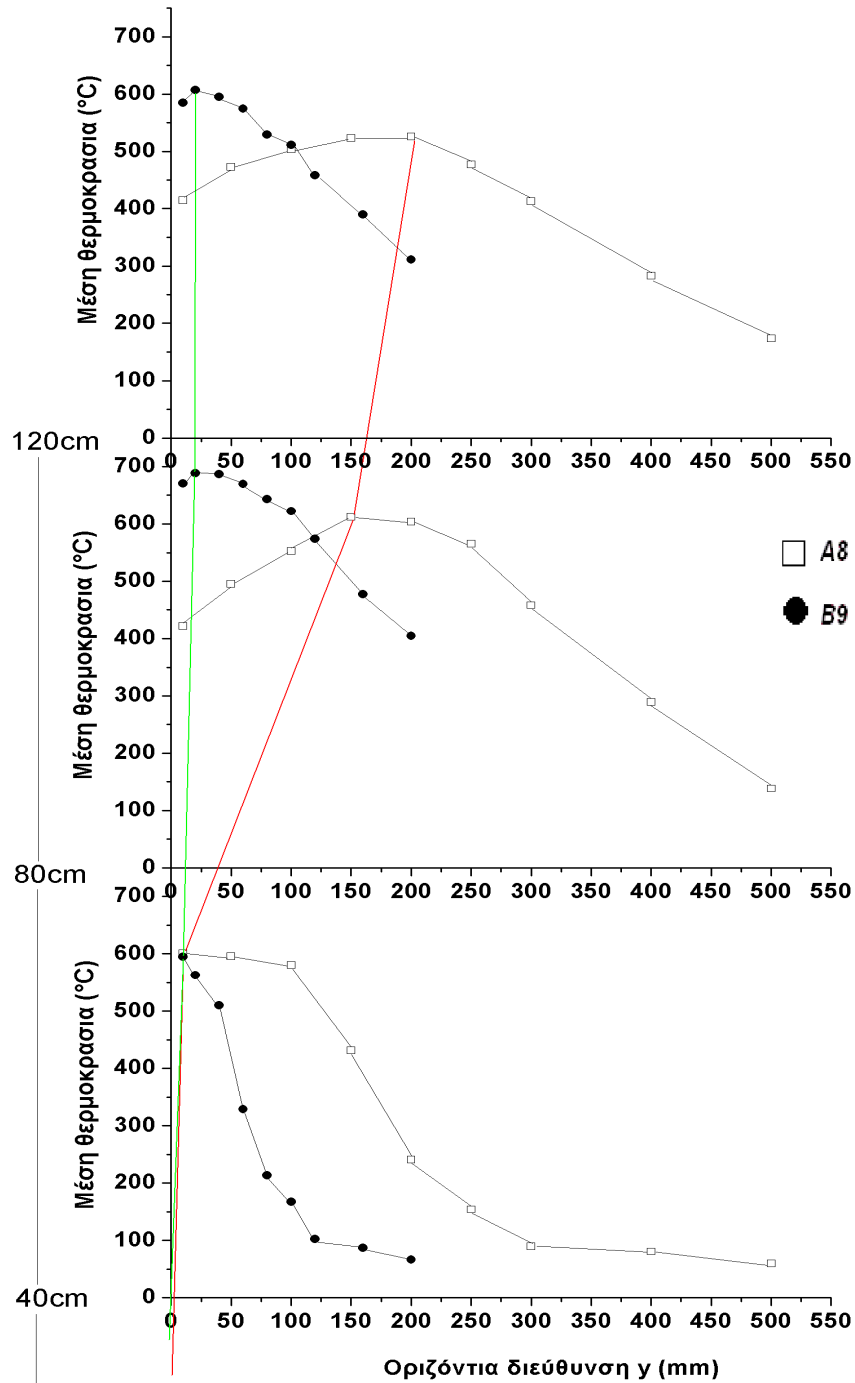
Στο πείραμα A8 οι μέγιστες τιμές των θέσεων C40 μετρήθηκαν αρκετά χαμηλότερες σε σχέση με τις μέγιστες τιμές στις θερμοκρασίες σε μεγαλύτερα ύψη, διαφορά που έφτανε συνήθως τους 100°C. Στην περίπτωση των θέσεων C80 και C120 το θερμοκρασιακό προφίλ καταδεικνύει πιο αναπτυγμένο πλούμιο σε σχέση με το ύψος των 0.4m, εκεί όπου οι θέσεις των θερμοστοιχείων βρίσκονται 10cm χαμηλότερα του ανώτερου σημείου του ανοίγματος. Αυτό δείχνει πως η φωτιά είναι πλήρως σχηματισμένη λίγο πάνω από την οροφή του δωματίου, εκεί όπου το πλούμιο είναι ιδιαίτερος αναπτυγμένο. Οι υψηλότερες μέγιστες θερμοκρασίες παρατηρήθηκαν σε απόσταση 15cm από την πρόσοψη για τα δυο υψηλότερα ύψη, ενώ στο επίπεδο του ανοίγματος η υψηλότερη μέγιστη θερμοκρασία μετρήθηκε σε απόσταση 10cm από την πρόσοψη. Από τα σημεία αυτά και έπειτα οι θερμοκρασίες εμφανίζουν σταθερή πτώση όσο απομακρύνονται από την πρόσοψη, φτάνοντας σε απόσταση 50cm όπου οι θερμοκρασίες μειώνονται, ενώ και πάλι παρουσιάζονται υψηλότερα μέγιστα σε μεγάλα ύψη. Αντίστοιχες παρατηρήσεις γίνονται στο πείραμα B9, όπου και πάλι οι μέγιστες θερμοκρασίες στα μεγαλύτερα ύψη είναι αρκετά υψηλότερες σε σχέση με αυτές σε θέσεις στο ύψος του ανοίγματος. Συγκρίνοντας τις μέγιστες θερμοκρασίες των δυο πειραμάτων πρέπει να τονιστεί πως το πλούμιο της φωτιάς στο εξωτερικό του δωματίου στο πείραμα A8 είναι πιο αναπτυγμένο σε σχέση με αυτό του πειράματος B9. Στο πείραμα B9 οι θερμοκρασίες σε απόσταση 20cm από την πρόσοψη συγκλίνουν στις θερμοκρασίες σε απόσταση 50cm του πειράματος A8, καταδεικνύοντας πλούμιο ισχνότερο σε σχέση με το αντίστοιχο του πειράματος A8. Παράλληλα, ενώνοντας τα υψηλότερα μέγιστα σε κάθε ύψος απεικονίζεται ποιοτικά ο κεντρικός άξονας του πλούμιου της φωτιάς. Ο κεντρικός άξονας δείχνει να βρίσκεται πολύ πιο κοντά στην πρόσοψη στην περίπτωση του πειράματος B9, εν αντιθέσει με το πείραμα A8 στο οποίο είναι ιδιαίτερα απομακρυσμένος.



**Σχήμα 4.144** Διάγραμμα μέγιστων θερμοκρασιών στο εξωτερικό πλούμιο της φωτιάς των πειραμάτων A8 και B9.

Όσο αφορά τις μέσες θερμοκρασίες στο πείραμα A8, στις θέσεις C80 και C120 δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες μεταβολές, έχοντας παρόμοιες διακυμάνσεις σε σχέση με την απόσταση από την πρόσοψη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.145. Αντίθετα, οι τιμές στη θέση C40, εμφανίζουν ιδιαίτερα αυξημένες τιμές πολύ κοντά στην πρόσοψη, ενώ σε απόσταση 10cm από αυτή παρατηρείται ταχύτερη μείωση μέχρι τα 30cm από την πρόσοψη και στη συνέχεια σταθεροποιούνται σε χαμηλά επίπεδα. Ανάλογη εικόνα και στο πείραμα B9, με τις μέσες τιμές να μετρώνται μέχρι τα 20cm. Στην περίπτωση αυτή η μείωση είναι εμφανής σε

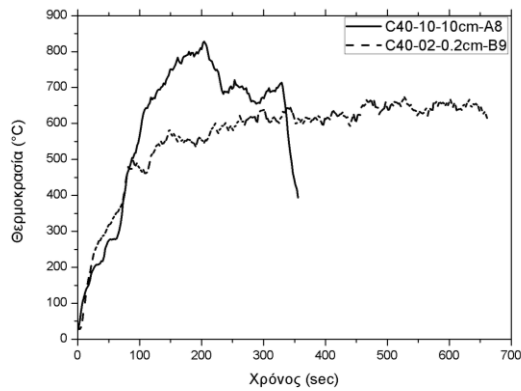
απόσταση 2cm από την πρόσοψη και συνεχίζεται μέχρι την απόσταση των 12cm από την πρόσοψη.



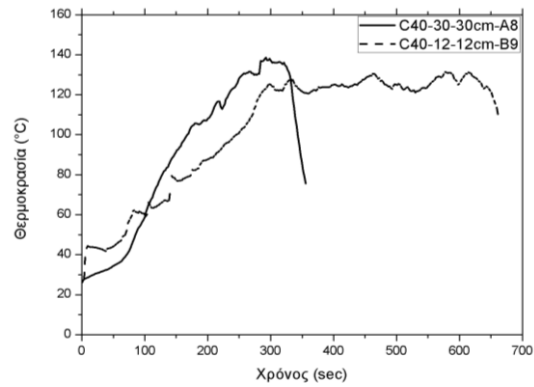
Σχήμα 4.145 Διάγραμμα μέσων θερμοκρασιών στο εξωτερικό πλούμιο της φωτιάς των πειραμάτων A8 και B9.

Στα διαγράμματα των Σχημάτων 4.146-4.147 συγκρίνονται τα προφίλ των θερμοκρασιών στις θέσεις C40-10 και C4030 του πειράματος A8 με τα αντίστοιχα προφίλ των θερμοκρασιών στις θέσεις C40-02 και C40-12 του πειράματος B9. Η εμφάνιση των θερμοκρασιών στα σχήματα αυτά έγινε βάση της παρατήρησης πως μεταξύ των θέσεων αυτών παρατηρήθηκε μείωση της θερμοκρασίας όπως αποτυπώθηκε στα προηγούμενα σχήματα.



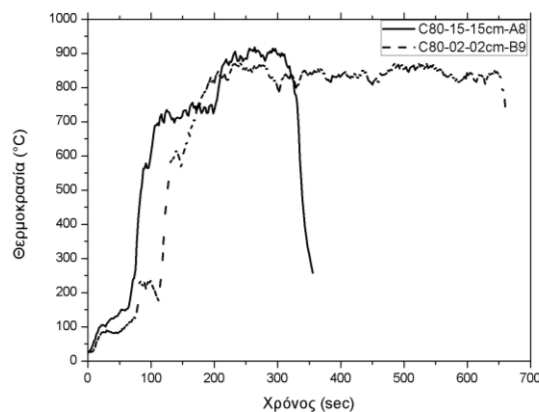


**Σχήμα 4.146** Διάγραμμα θερμοκρασιών για τα θερμοστοιχεία στις θέσεις C40-10 και C40-02 των πειραμάτων A8 και B9.



**Σχήμα 4.147** Διάγραμμα θερμοκρασιών για τα θερμοστοιχεία στις θέσεις C40-30 και C40-12 των πειραμάτων A8 και B9.

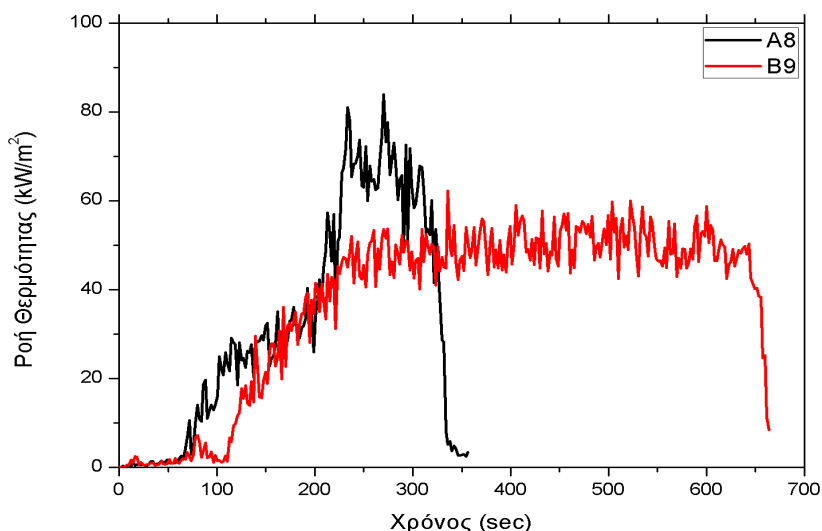
Στη συνέχεια, στο Σχήμα 4.148 δίνεται το συγκριτικό διάγραμμα του θερμοκρασιακού προφίλ στις θέσεις C80-15 του πειράματος A8 και της C80-02 του πειράματος B9. Στις θέσεις αυτές παρατηρήθηκαν οι μέγιστες θερμοκρασίες σε ύψος 0.8m από το δάπεδο του δωματίου για τα δυο πειράματα και παρατηρείται πως παρουσιάζουν παρόμοιο προφίλ, παρά τη χρονική διαφορά που είχαν τα πειράματα



**Σχήμα 4.148** Διάγραμμα θερμοκρασιών για τα θερμοστοιχεία στις θέσεις C80-15 και C80-02 των πειραμάτων A8 και B9.

#### 4.6.3.3 Ροή Θερμότητας

Η ροή θερμότητας στα πειράματα A8 και B9 μετρήθηκε με μετρητή ροής θερμότητας ο οποίος ήταν τοποθετημένος πάνω στην πρόσοψη, σε ύψος 0.7m από το δάπεδο. Οι καμπύλες των μετρήσεων φαίνονται στο διάγραμμα του Σχήματος 4.149 που ακολουθεί.

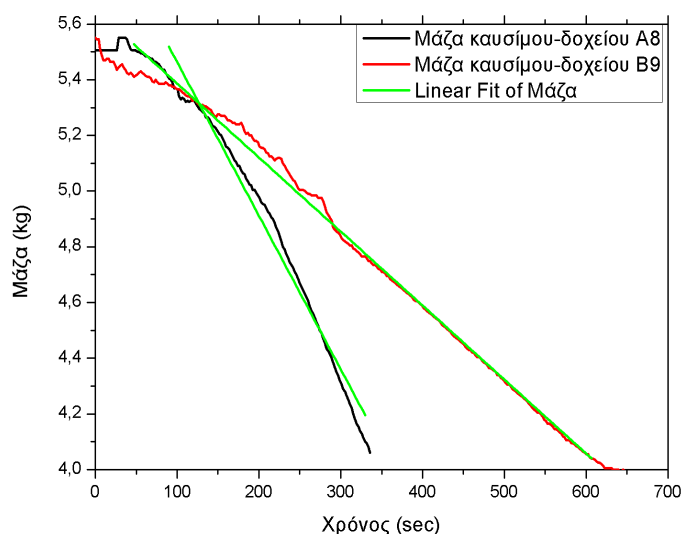


**Σχήμα 4.149** Συγκριτικό διάγραμμα των ροών θερμότητας στα πειράματα A8 και B9.

Η ροή θερμότητας στο πείραμα A8 (μαύρη καμπύλη) εμφάνισε μέγιστη τιμή 88.87 kW/m<sup>2</sup> τη χρονική στιγμή 270sec μετά την ανάφλεξη του καυσίμου, ενώ στο πείραμα B9 (κόκκινη καμπύλη) η μέγιστη τιμή ήταν 62.17 kW/m<sup>2</sup> στα 336sec μετά την ανάφλεξη αντίστοιχα. Και στις δυο περιπτώσεις μετά από χρονικό διάστημα 200sec περίπου, η ροή θερμότητας αυξάνει με μεγάλο ρυθμό. Από το σημείο αυτό και μέχρι τη φάση σβέσης της φωτιάς, οι διακυμάνσεις στις τιμές είναι από 40 kW/m<sup>2</sup> έως 60 kW/m<sup>2</sup> περίπου για το πείραμα B9. Σε αντίθεση, στο πείραμα A8, οι διακυμάνσεις είναι σε εμφανώς υψηλότερα επίπεδα, της τάξης των 50-80 kW/m<sup>2</sup> περίπου. Τελικά, στη φάση της αποσύνθεσης η ροή θερμότητας μειώνεται με ίδιο ρυθμό στις δυο αυτές περιπτώσεις, μέχρι την απόσβεση της φωτιάς.

#### 4.6.3.4 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 5.55 kg ενώ το δοχείο είχε βάρος 4kg (Σχήμα 4.150).



**Σχήμα 4.150** 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 ιδιαίτερος 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 4.34.

Με τη γραμμική προσέγγιση του Πίνακα 4.35 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.

Πείραμα	Γραμμική Προσέγγιση (linefit)	Κλίση a (slope)	Σφάλμα (%)
A8	$y = ax + 6.015$	-0.00552	7,46324E-5
B9	$y = ax + 5.652$	-0.00266	1,14326E-5

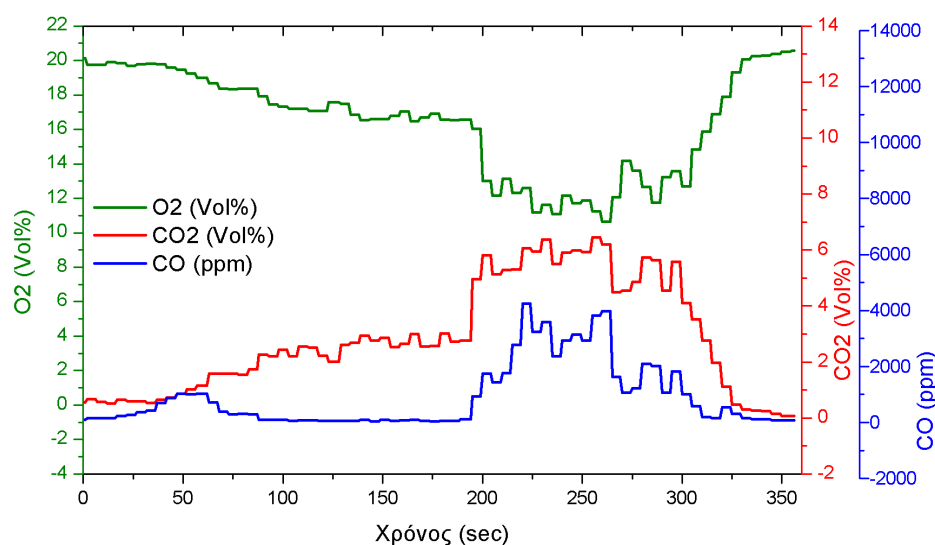
Πίνακας 4.35 Γραμμική προσαρμογή για τις καμπύλες μάζας καυσίμου-δοχείου πειραμάτων A8, B9.

#### 4.6.3.5 Συγκεντρώσεις O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>

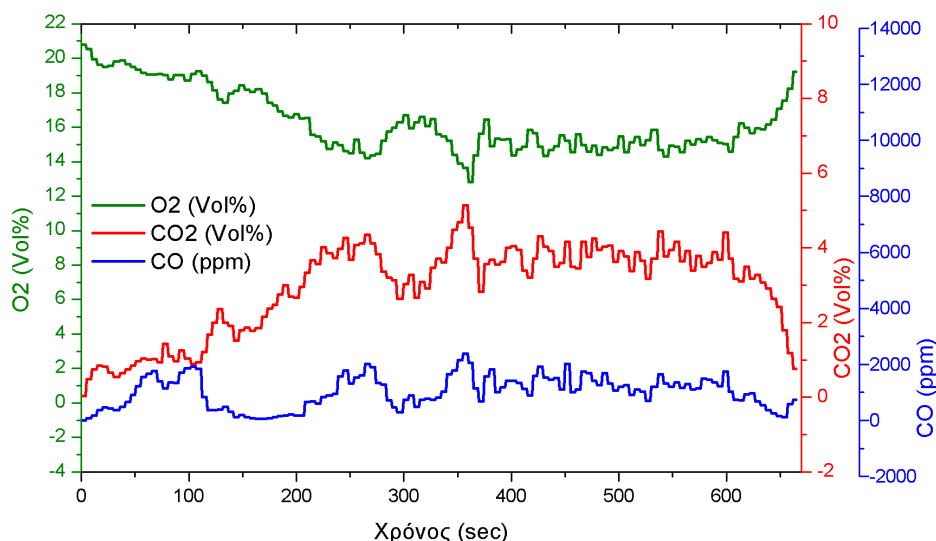
Με τον αναλυτή αερίων μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις αερίων σε ύψος 1.65m από το δάπεδο του δωματίου και σε απόσταση 0.05m από την πρόσοψη. Οι μετρήσεις περιλάμβαναν συγκέντρωση οξυγόνου (O<sub>2</sub>), μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>). Τα γραφήματα των συγκεντρώσεων για κάθε πείραμα εμφανίζονται στα Σχήματα 4.151-4.152 που ακολουθούν, ενώ στον Πίνακα 4.36 φαίνονται οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές των συγκεντρώσεων στα πειράματα A8 και B9.

Πείραμα	O <sub>2</sub> (Vol%)		CO <sub>2</sub> (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 4.36 Μέγιστες-ελάχιστες τιμές των μετρήσεων O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO στα πειράματα A6 και B7.



Σχήμα 4.151 Γραφική αναπαράσταση των συγκεντρώσεων αερίων του πειράματος A8.



**Σχήμα 4.152** 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.

#### 4.6.4 Συμπεράσματα

Η εύρεση του κεντρικού άξονα του πλούμιου της φωτιάς στα πειράματα A8 και B9 έγινε με μέτρηση θερμοκρασιών σε τρία ύψη στο εξωτερικό του δωματίου.

Εντός του δωματίου παρατηρήθηκαν υψηλότερες θερμοκρασίες στο πείραμα A8, τόσο στις θέσεις CB, όσο και στις θέσεις CF σε σχέση με το πείραμα B9. Οι διαφορές κυμαίνονταν στους 100-200°C, με τις μεγαλύτερες να εμφανίζονται στη βόρειο-δυτική γωνία, απέναντι από το άνοιγμα. Στις θέσεις CF παρατηρήθηκαν μικρότερες διαφορές, ενώ αξίζει να σημειωθεί η τάση για υψηλές μέγιστες θερμοκρασίες σε ύψη λίγο πάνω από το χείλος του δοχείου καυσίμου, τόσο στο πείραμα A8, όσο και στο πείραμα B9.

Για τον καθορισμό του κεντρικού άξονα του πλουμίου της φωτιάς σε κάθε πείραμα έγινε σύγκριση και απεικόνιση των μέγιστων και μέσων θερμοκρασιών στο εξωτερικό πλούμιο φωτιάς των δυο πειραμάτων. Στην περίπτωση του πειράματος A8 το εξωτερικό πλούμιο ήταν πιο ανεπτυγμένο σε σχέση με του πειράματος B9, κάτι που παρατηρήθηκε και σε προηγούμενο εδάφιο. Ο κεντρικός άξονας του εξωτερικού πλούμιου της φωτιάς στο πείραμα B9 βρέθηκε ιδιαίτερος κοντά στην πρόσοψη, σε αντίθεση με τον αντίστοιχο του πειράματος A8 που ήταν πιο απομακρυσμένος. Αυτό αναδεικνύει την επίδραση στην πρόσοψη, αφού στην περίπτωση του πειράματος B9 αναπτύχθηκαν υψηλότερες θερμοκρασίες κοντά στην πρόσοψη, ενώ στο πείραμα A8 η ακτινοβολία από το πιο ανεπτυγμένο εξωτερικό πλούμιο προς την πρόσοψη ήταν σαφώς μεγαλύτερη, κάτι το οποίο κατέδειξε ο μετρητής ροής θερμότητας επάνω στην πρόσοψη.

Τέλος, στο πείραμα B9 παρουσιάστηκαν μικρότερες συγκεντρώσεις μονοξειδίου του άνθρακα σε σχέση με το πείραμα A8, εν αντιθέσει με τις συγκεντρώσεις οξυγόνου και διοξειδίου του άνθρακα που δεν παρουσίασαν ιδιαίτερες διαφορές.

## 4.7 Θέση Δοχείου στο Εσωτερικό του Δωματίου

Σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη μιας φωτιάς στο εσωτερικό του δωματίου, καθώς και στην επίδραση στο εξωτερικό πλούμιο της φωτιάς, κατέχει η θέση του δοχείου του καυσίμου εντός του δωματίου [Parkes, 2009]. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων η θέση του δοχείου του καυσίμου μελετήθηκε με αλλαγή της απόστασης του δοχείου από το δάπεδο του δωματίου.

### 4.7.1 Περιγραφή

Για την επίδραση της θέσης του δοχείου του καυσίμου ακολουθεί σύγκριση των πειραμάτων A1 και A4, με τον πυθμένα του δοχείου του καυσίμου στο πείραμα A1 να είναι σε ύψος 20mm από το δάπεδο του δωματίου, ενώ ο πυθμένας του δοχείου καυσίμου του πειράματος A4 να βρίσκεται σε ύψος 75mm από το δάπεδο του δωματίου. Στη συνέχεια, στον Πίνακα 4.37 φαίνονται τα χαρακτηριστικά των δυο πειραμάτων.

Πείραμα	Όγκος καυσίμου (ml)	Παράγοντας Αερισμού $A_v \sqrt{H_v}$	Απόσταση πυθμένα δοχείου καυσίμου από δάπεδο δωματίου (mm)	Διάρκεια φωτιάς (sec)
A1	2350	0.0707	20	339
A4	2350	0.0707	75	525

Πίνακας 4.37 Χαρακτηριστικά των πειραμάτων A1 και A4.

### 4.7.2 Διάταξη Μετρητικών Συσκευών

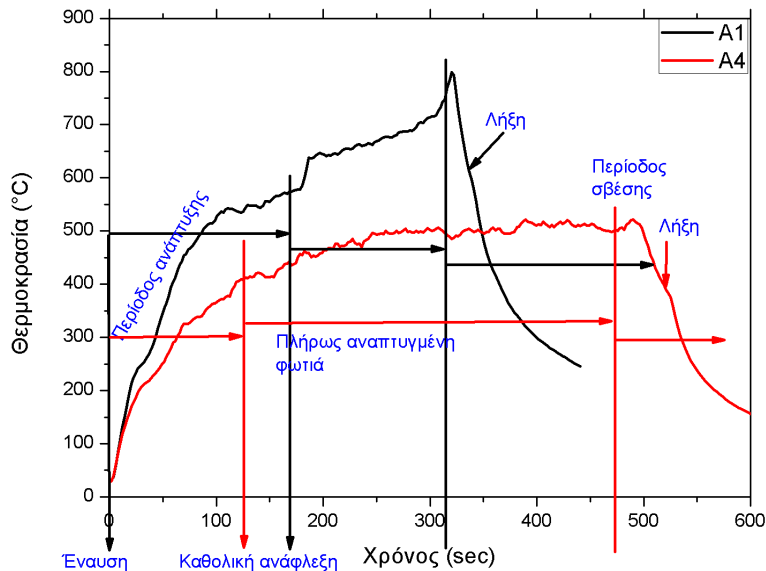
Στα πειράματα A1 και A2 χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες μετρητικές συσκευές α) θερμοστοιχεία τύπου K, β) μετρητής ροής θερμότητας, γ) αναλυτής αερίων και δ) δυναμοκουνέλη. Η λήψη μετρήσεων από τις συσκευές ανάκτησης δεδομένων γινόταν ανά 2sec. Οι συντεταγμένες των μετρητικών συσκευών δίνονται στο Παράρτημα Α, ενώ η διάταξή τους έχει περιγραφεί σε προηγούμενα εδάφια (βλέπε εδάφια 4.3 και 4.4).

### 4.7.3 Ανάλυση Μετρήσεων

#### 4.7.3.1 Θερμοκρασίες

Οι θερμοκρασίες εντός του δωματίου μετρήθηκαν με θερμοστοιχεία στη βόρειο-δυτική και στην νότιο-ανατολική γωνία του δωματίου, στις θέσεις CB και CF αντίστοιχα.

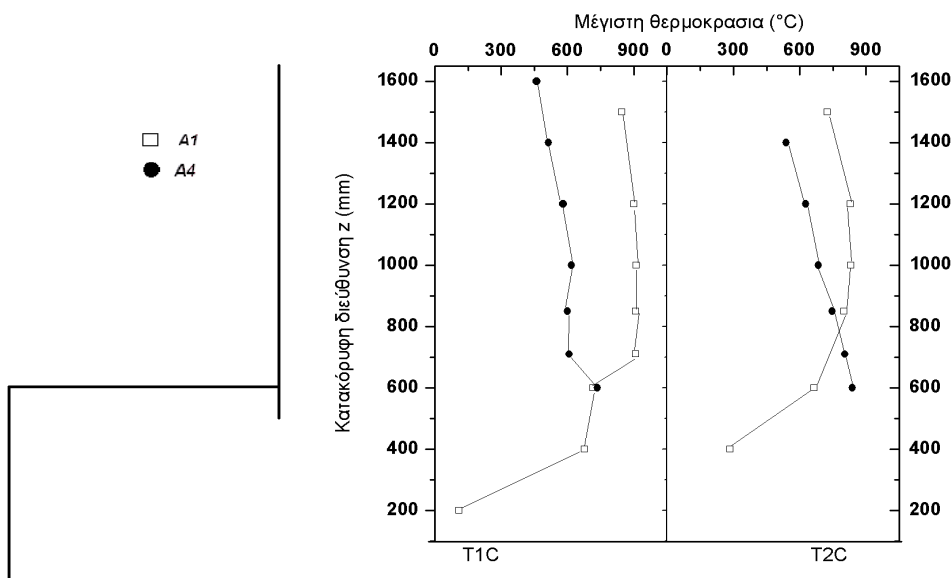
Στο Σχήμα 4.153 απεικονίζονται οι μέσες θερμοκρασίες εντός του δωματίου από τις μετρήσεις στις θέσεις CB και CF, ενώ παράλληλα γίνεται διάκριση των φάσεων της φωτιάς εντός του δωματίου. Βασικό χαρακτηριστικό είναι η διαφορά στη διάρκεια της φωτιάς κάθε πειράματος. Στο πείραμα A1 όπου το δοχείο του καυσίμου ήταν σε χαμηλότερο ύψος σε σχέση με το αντίστοιχο του πειράματος A4 παρατηρείται μικρότερος χρόνος διάρκειας της φωτιάς. Αυτό οδηγεί στη μεγάλη διαφορά που έχει η φάση κυρίως της αναπτυγμένης φωτιάς στα πειράματα, με αυτή του πειράματος A4 να είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του πειράματος A1. Η έναρξη της φάσης αυτής παρατηρείται ταχύτερα στο πείραμα A4, ενώ και στις δυο περιπτώσεις, η μείωση των μέσων θερμοκρασιών κατά την περίοδο σβέσης γίνεται με παρόμοιο ρυθμό.



**Σχήμα 4.153** Συγκριτικό διάγραμμα των μέσων θερμοκρασιών εντός του δωματίου για τα πειράματα A1 και A4.

Οι θερμοκρασίες στο εξωτερικό πλούμιο της φωτιάς αποτέλεσαν σημαντικό στοιχείο για τη σύγκριση των δυο πειραμάτων, με τις μέγιστες θερμοκρασίες στο εξωτερικό πλούμιο της φωτιάς να απεικονίζονται στα διαγράμματα των Σχημάτων 4.154-4.155.

Στο Σχήμα 4.154 φαίνονται οι μέγιστες θερμοκρασίες στο εξωτερικό πλούμιο της φωτιάς στις θέσεις T1C και T2C για τα πειράματα A1 και A4. Παρατηρείται πως το εξωτερικό πλούμιο της φωτιάς στο πείραμα A1 είναι πιο ανεπτυγμένο σε σχέση με το αντίστοιχο του πειράματος A4. Στο πείραμα A1 οι μέγιστες θερμοκρασίες που μετρήθηκαν είναι κατά πολύ μεγαλύτερες από του πειράματος A4, με τις διαφορές να αγγίζουν ακόμα και τους 400°C στις θέσεις T1C. Από το ύψος των 0.71m στο πείραμα A1 παρατηρείται μια σταθεροποίηση στις μέγιστες θερμοκρασίες όσο αυξάνεται το ύψος, με τη θερμοκρασία σε ύψος 1.5m να παρουσιάζει μια ελαφρά μείωση. Παρόμοια εικόνα παρουσιάζει στις θέσεις T1C και το πείραμα A4, σε σαφώς μικρότερα επίπεδα τιμών.

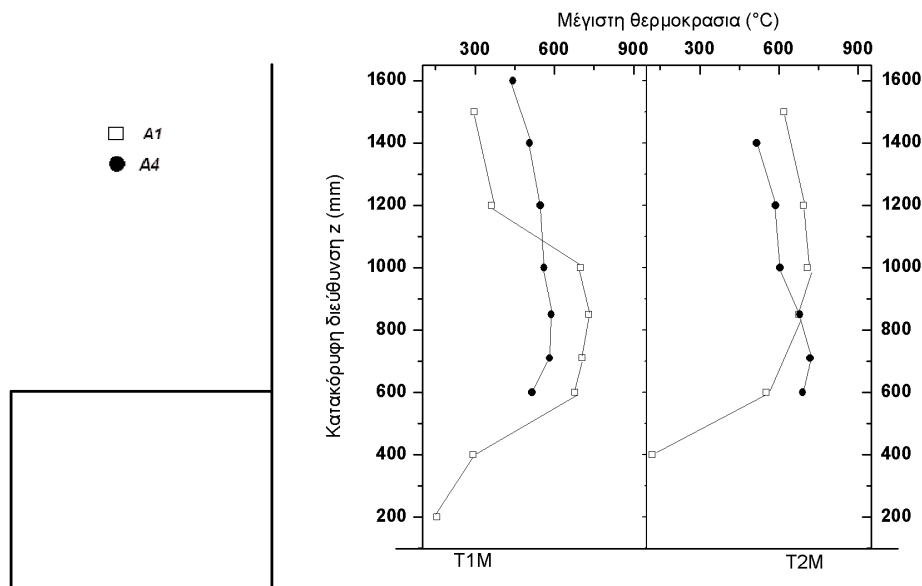


**Σχήμα 4.154** Διάγραμμα μέγιστων θερμοκρασιών των θερμοστοιχείων στις θέσεις T1C και T2C κατά την κατακόρυφη διεύθυνση του άξονα z.

Στο Σχήμα 4.155 φαίνονται οι μέγιστες θερμοκρασίες στις θέσεις T1M και T2M του εξωτερικού πλούμιου της φωτιάς. Στο πείραμα A1 το πλούμιο της φωτιάς είναι πιο

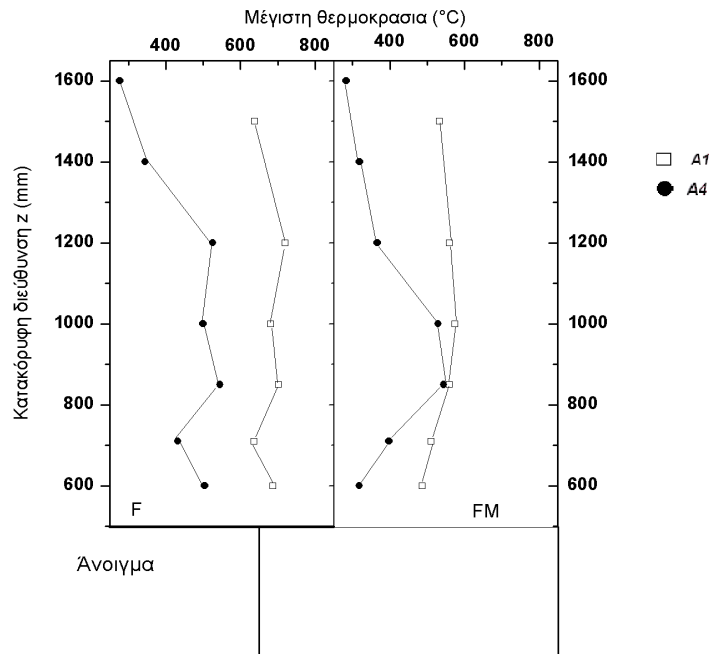


ανεπτυγμένο μέχρι το ύψος του 1m στις θέσεις T1M, ενώ από το σημείο εκείνο και όσο αυξάνει το ύψος οι μέγιστες θερμοκρασίες παρουσιάζουν ραγδαία μείωση. Αντιθέτως, στο πείραμα A4 δεν υπάρχουν ιδιαίτερες μεγάλες μεταβολές στις μέγιστες θερμοκρασίες των θέσεων T1M, με το πλούμιο να είναι σαφώς λιγότερο ανεπτυγμένο στις θέσεις μέχρι το ύψος του 1m ενώ σε μεγαλύτερα ύψη παρουσιάζεται πιο ανεπτυγμένο σε σχέση με το αντίστοιχο του πειράματος A1. Ανάστροφη πορεία ακολουθούν τα πλούμια της φωτιάς στις περιπτώσεις των θέσεων T2M. Παρατηρείται πως κρίσιμη θέση είναι στο ύψος 0.85m όπου εκεί παρουσιάζονται αλλαγές στο πλούμιο κάθε πειράματος. Ενώ μέχρι το ύψος αυτό το πλούμιο του πειράματος A4 είναι πιο ανεπτυγμένο από αυτό του πειράματος A1, σε μεγαλύτερα ύψη το πλούμιο του A1 εμφανίζεται πιο ανεπτυγμένο. Οι μέγιστες θερμοκρασίες εμφανίζουν διαφορές κοντά στους 150°C, με αυτές του πειράματος A1 να εμφανίζουν τις μεγαλύτερες μεταβολές.



**Σχήμα 4.155** Διάγραμμα μέγιστων θερμοκρασιών των θερμοστοιχείων στις θέσεις T1M και T2M κατά την κατακόρυφη διεύθυνση του άξονα z.

Στο Σχήμα 4.156 που ακολουθεί παρουσιάζεται διάγραμμα μέγιστων θερμοκρασιών που μετρήθηκαν στις θέσεις F και FM της πρόσοψης για τα πειράματα A1 και A4. Βασική παρατήρηση από το διάγραμμα αυτό είναι πως το εξωτερικό πλούμιο πάνω στην πρόσοψη του πειράματος A1 δείχνει σαφώς πιο ανεπτυγμένο από το αντίστοιχο του πειράματος A4. Αυτό περιγράφει τις θέσεις F, αλλά και τις θέσεις FM πάνω στην πρόσοψη. Στην περίπτωση των θέσεων στη μεσοκάθετο της πρόσοψης (F) οι διαφορές που παρουσιάζονται στις μέγιστες θερμοκρασίες είναι ιδιαίτερα υψηλές, γεγονός που οφείλεται στις διαφορές που παρατηρήθηκαν στις θέσεις T1C και T2C. Στην περίπτωση του πειράματος A1 οι θερμοκρασίες που αναπτύχθηκαν εκτός του δωματίου ήταν σαφώς υψηλότερες σε σύγκριση με τις αντίστοιχες του πειράματος A4, το οποίο είχε άμεση επίδραση στις θερμοκρασίες που αναπτύχθηκαν στην πρόσοψη του δωματίου. Έτσι στο πείραμα A1 η πρόσοψη εκτέθηκε σε πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες, με αποτέλεσμα την μέτρηση υψηλών θερμοκρασιών πάνω σε αυτήν. Παρά την παρόμοια εικόνα που παρουσιάζουν οι μέγιστες θερμοκρασίες στις θέσεις F, το επίπεδο των τιμών στα δυο πειράματα παρουσιάζει σημαντικές διαφορές. Ανάλογες παρατηρήσεις μπορούν να γίνουν στην περίπτωση των θέσεων FM. Εκεί οι διαφορές είναι ιδιαίτερες σημαντικές ως προς το επίπεδο των τιμών, με το εξωτερικό πλούμιο της φωτιάς να επιδρά σημαντικά στην πρόσοψη. Όπως παρατηρήθηκε, το πιο ανεπτυγμένο πλούμιο του πειράματος A1 στις θέσεις T1M και T2M επιδρά στην πρόσοψη με τις θερμοκρασίες σε αυτήν στις θέσεις FM, οι οποίες είναι ιδιαίτερες υψηλές. Η εναλλαγή που παρατηρήθηκε στο ύψος 0.85-1m στις θέσεις T1M και T2M φαίνεται κυρίως στην περίπτωση των θερμοκρασιών στις θέσεις FM. Στα ύψη αυτά οι μέγιστες θερμοκρασίες συγκλίνουν σε μεγάλο βαθμό, αναδεικνύοντας την εναλλαγή που περιγράφηκε προηγουμένως και στην οποία οφείλεται κυρίως αυτή η σύγκλιση.

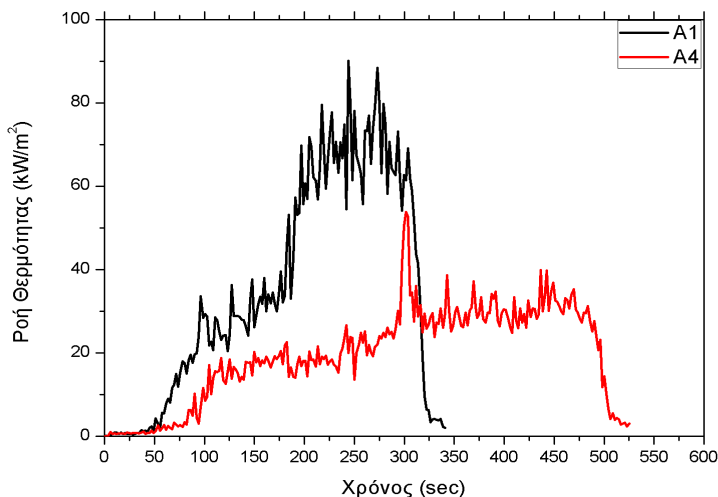


**Σχήμα 4.156** Διάγραμμα μέγιστων θερμοκρασιών των θερμοστοιχείων της πρόσοψης του δωματίου κατά την κατακόρυφη διεύθυνση του άξονα z.

#### 4.7.3.2 Ροή Θερμότητας

Η ροή θερμότητας στα πειράματα A1 και A4 μετρήθηκε με μετρητή ροής θερμότητας ο οποίος ήταν τοποθετημένος πάνω στην πρόσοψη, σε ύψος 0.7m από το δάπεδο. Οι καμπύλες των μετρήσεων για τα πειράματα αυτά φαίνονται στο διάγραμμα του Σχήματος 4.157

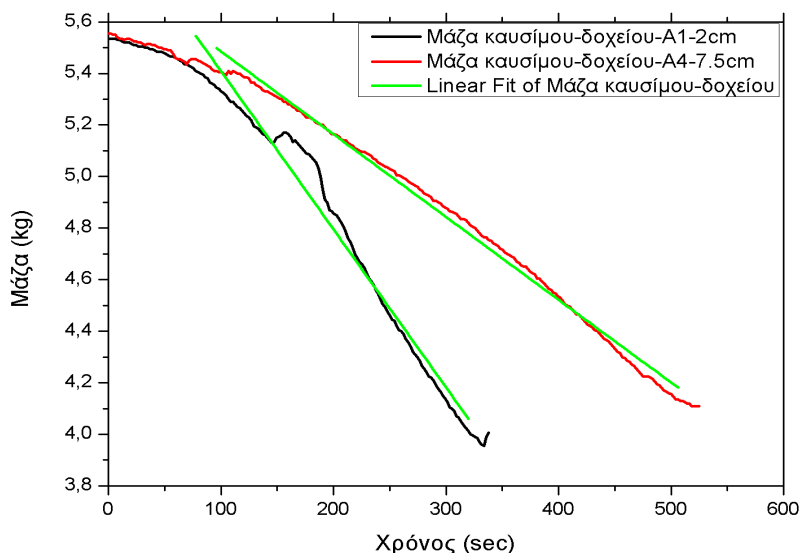
Η ροή θερμότητας στο πείραμα A1 (μαύρη καμπύλη) εμφάνισε μέγιστη τιμή 90 kW/m<sup>2</sup> τη χρονική στιγμή 244sec μετά την ανάφλεξη του καυσίμου, ενώ στο πείραμα A4 (κόκκινη καμπύλη) η μέγιστη τιμή ήταν 53.79 kW/m<sup>2</sup> στα 301sec μετά την ανάφλεξη αντίστοιχα. Στο πείραμα A1 μετά από χρονικό διάστημα 170sec περίπου, η ροή θερμότητας αυξάνει με μεγάλο ρυθμό φτάνοντας τιμές από 60 kW/m<sup>2</sup> έως 90 kW/m<sup>2</sup>. Σε αντίθεση, στο πείραμα A4, οι διακυμάνσεις είναι σε εμφανώς χαμηλότερα επίπεδα, της τάξης των 10-45 kW/m<sup>2</sup> περίπου. Τη χρονική στιγμή 301sec εμφανίζεται απότομα η μέγιστη τιμή του πειράματος A4, η οποία είναι αρκετά μεγαλύτερη από τις τιμές στο διάστημα εκείνο. Αυτό ίσως οφείλεται σε στιγμιαία ριπή αέρα λόγω ανοίγματος κάποιας πόρτας του εργαστηρίου. Τελικά, στη φάση της σβέσης η ροή θερμότητας μειώνεται με ίδιο ρυθμό στις δυο αυτές περιπτώσεις, μέχρι τη σβέση της φωτιάς.



**Σχήμα 4.157** Συγκριτικό διάγραμμα των ροών θερμότητας στα πειράματα A1 και A4.

### 4.7.3.3 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 και A4 ήταν 5.55 kg ενώ το δοχείο είχε βάρος 4kg. Ο ρυθμός απώλειας μάζας καυσίμου για τα πειράματα αυτά φαίνεται στο διάγραμμα του Σχήματος 4.158 που ακολουθεί.



Σχήμα 4.158 Καμπύλες μάζας καυσίμου-δοχείου στα πειράματα A1 και A4.

Από το διάγραμμα φαίνεται η διαφορά στο χρόνο διάρκειας κάθε πειράματος, με το A4 να διαρκεί κοντά στα 200sec παραπάνω. Το γεγονός ότι μόνη διαφορά στα πειράματα είναι η απόσταση του δοχείου από το έδαφος του δωματίου αναδεικνύει πόσο σημαντικό ρόλο παίζει η θέση του δοχείου στο ρυθμό καύσης του καυσίμου. Στο πείραμα A1 όπου η απόσταση ήταν στα 2cm από το έδαφος, ο ρυθμός καύσης είναι κατά πολύ μεγαλύτερος, με το καύσιμο να έρχεται σε άμεση επαφή με περισσότερη ποσότητα αέρα που εισέρχεται από το άνοιγμα. Αντιθέτως, όσο πιο ψηλά βρίσκεται το δοχείο καυσίμου, όπως στο πείραμα A4, ο όγκος του αέρα που έρχεται σε άμεση επαφή από το άνοιγμα είναι μικρότερος, αφού η επιφάνεια του καυσίμου βρίσκεται σε μεγαλύτερο ύψος μέσα στο δωμάτιο. Με τον τρόπο αυτό, ο αέρας που εισέρχεται μέσω του ανοίγματος δεν έρχεται άμεσα σε επαφή με την επιφάνεια του καυσίμου, αλλά κυκλοφορεί μέρος αυτού κάτω από το δοχείο και η καύση καθυστερεί. Στο διάγραμμα φαίνονται επίσης οι γραμμικές προσεγγίσεις που έγιναν στις δυο καμπύλες, με τον Πίνακα 4.38 να δείχνει τα χαρακτηριστικά τους.

Πείραμα	Γραμμική Προσέγγιση (linefit)	Κλίση a (slope)	Σφάλμα (%)
A1	$y = ax+6.022$	-0.00614	9,63708E-5
A4	$y = ax+5.806$	-0.00321	1,86939E-5

Πίνακας 4.38 Γραμμική προσαρμογή για τις καμπύλες μάζας καυσίμου-δοχείου πειραμάτων A8, B9.

### 4.7.4 Συμπεράσματα

Μέσω των πειραμάτων A1 και A4 επιχειρήθηκε να γίνει αντιληπτός ο ρόλος της θέσης της επιφάνειας του καυσίμου στην καύση εντός του δωματίου αλλά και στο εξωτερικό πλούμιο της φωτιάς.

Μεταβάλλοντας το ύψος του δοχείου του καυσίμου από το δάπεδο και παράλληλα διατηρώντας τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά εμφανίστηκε μεγάλη διαφορά στο χρόνο διάρκειας

κάθε πειράματος. Παρατηρήθηκε πως όσο χαμηλότερα είναι η επιφάνεια του καυσίμου τόσο ταχύτερα πραγματοποιείται η καύση εντός του δοχείου. Αυτό συνεπάγεται ταχύτερο ρυθμό απώλειας μάζας καυσίμου, κάτι το οποίο οφείλεται στο λιγότερο ποσοστό αέρα που κυκλοφορεί κάτω από το δοχείο. Έτσι το καύσιμο έρχεται άμεσα σε επαφή με το εισερχόμενο οξυγόνο και η μάζα του καυσίμου μειώνεται ταχύτερα. Αντιθέτως, στην περίπτωση όπου το ύψος του δοχείου αυξάνεται, παρατηρείται πιο αργή καύση εντός του δοματίου, με τον αέρα να κυκλοφορεί περισσότερο κάτω από το δοχείο χωρίς να έρχεται σε επαφή με το καύσιμο. Οι θερμοκρασίες στην περίπτωση αυτή παρατηρήθηκαν αρκετά χαμηλότερες εντός του δοματίου από ότι στην πρώτη περίπτωση, με τη φάση της πλήρως αναπτυγμένης φωτιάς να διαρκεί πολύ περισσότερο.

Η σύγκριση των πειραμάτων συνεχίστηκε στο εξωτερικό πλούμιο της φωτιάς. Το εξωτερικό πλούμιο της φωτιάς φάνηκε ιδιαίτερα ανεπτυγμένο στην περίπτωση όπου το δοχείο τοποθετήθηκε σε χαμηλό ύψος μέσα στο δωμάτιο (Πείραμα A1), αντίθετα με την περίπτωση του πειράματος A4 οι θερμοκρασίες που μετρήθηκαν εκτός δοματίου ήταν σαφώς χαμηλότερες, με το εξωτερικό πλούμιο της φωτιάς να δείχνει ισχνότερο. Αυτό ανέδειξε τη διαφορά που παρατηρήθηκε στα δυο πειράματα στις θερμοκρασίες που αναπτύχθηκαν στην πρόσοψη του δοματίου. Το πιο ανεπτυγμένο εξωτερικό πλούμιο της φωτιάς στην περίπτωση της χαμηλότερης απόστασης του δοχείου από το δάπεδο, επέφερε υψηλότερες θερμοκρασίες πάνω στην πρόσοψη του δοματίου. Στην περίπτωση αυτή, η έκθεση της πρόσοψης σε υψηλότερες θερμοκρασίες αύξησε τη ροή θερμότητας εμφανίζοντας σχεδόν διπλάσιο μέγιστο σε σχέση με την περίπτωση όπου το δοχείο καυσίμου τοποθετήθηκε σε μεγαλύτερο ύψος.

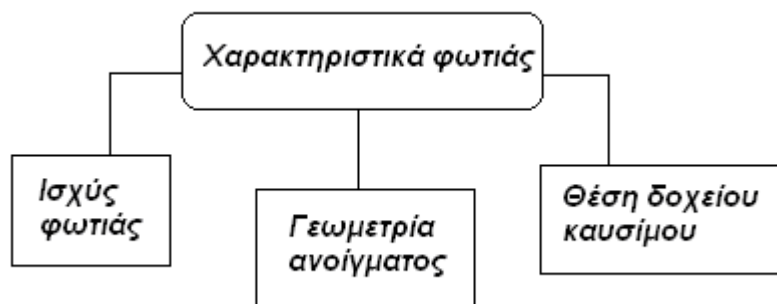
## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>

### Γενικά Συμπεράσματα

Η μελέτη των χαρακτηριστικών της φωτιάς έχει απασχολήσει και συνεχίζει να απασχολεί αρκετούς ερευνητές [Kawagoe, 1958], [Quintiere, 2006] σε θεωρητικό και πειραματικό επίπεδο. Παρά τις πειραματικές μελέτες οι οποίες έχουν γίνει, τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα δεν επαρκούν για την κάλυψη διαφόρων περιπτώσεων φωτιάς και του εξωτερικού πλουμίου που δημιουργείται. Στην παρούσα μελέτη ερευνώνται τα χαρακτηριστικά φωτιάς σε διάταξη δωματίου-πρόσοψης υπό κλίμακα και οι παράγοντες που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά του πλουμίου της φωτιάς που εξέρχεται από ανοίγματα διαφορετικής γεωμετρίας. Οι μελέτες επικεντρώθηκαν σε περιπτώσεις μη εξαναγκασμένου, μη επαρκούς αερισμού σε δωμάτιο 1/4 κλίμακας ενός δωματίου κανονικών διαστάσεων σύμφωνα με το πρότυπο ISO9705.

Βασικός άξονας για την εξαγωγή συμπερασμάτων αποτέλεσε η επαναληψιμότητα των μετρήσεων στα πειράματα. Τα δεδομένα από τα πρώτα πειράματα αποτέλεσαν τη βάση σύγκρισης ώστε να εκτιμηθεί κατά πόσο τα όποια συμπεράσματα μπορούν να γενικευτούν στα επόμενα πειράματα. Οι παράμετροι που μελετήθηκαν ήταν η διάρκεια κάθε πειράματος, ο ρυθμός καύσης, το θερμοκρασιακό προφίλ σε διάφορες θέσεις εντός και εκτός του δωματίου και οι συγκεντρώσεις αερίων στο πλούμιο της φωτιάς εκτός του δωματίου. Ιδιαίτερα ενθαρρυντικά αποτελέσματα ήταν οι παρόμοιοι ρυθμοί καύσης, οδηγώντας σε διάρκεια πειραμάτων με ελάχιστες αποκλίσεις. Κατόπιν, το θερμοκρασιακό προφίλ παρουσίασε ελάχιστες αποκλίσεις χωρίς να υπάρχουν γενικευμένες διαφορές. Τόσο στο εσωτερικό του δωματίου, όσο στο εξωτερικό και στην πρόσοψη, εμφανίστηκαν ελάχιστες διαφορές σε αντίστοιχες θέσεις με αποτέλεσμα εξαιρετική σύγκλιση στα αποτελέσματα. Τέλος, το ίδιο παρατηρήθηκε στις συγκεντρώσεις αερίων που μετρήθηκαν κοντά στην πρόσοψη, δηλαδή του οξυγόνου, του μονοξειδίου και του διοξειδίου του άνθρακα. Με βάση τα παραπάνω στοιχεία πιστοποιήθηκε η ύπαρξη επαναληψιμότητας των μετρήσεων μεταξύ πειραμάτων

Στη συνέχεια μελετήθηκε η επίδραση τριών παραγόντων στα χαρακτηριστικά της φωτιάς στο εσωτερικό του δωματίου, στην θερμοκρασία και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εξερχόμενου πλουμίου της φωτιάς και στις θερμοκρασίες που αναπτύχθηκαν στην πρόσοψη. Οι παράγοντες που μελετήθηκαν και μεταβάλλονταν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων φαίνονται στο Σχήμα 5.1 και ήταν η ισχύς της φωτιάς, η γεωμετρία του ανοίγματος και η θέση του δοχείου καυσίμου εντός του δωματίου.



**Σχήμα 5.1** Παράγοντες που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά της φωτιάς και μελετήθηκαν στα πειράματα.

Χρησιμοποιώντας διαφορετικές ποσότητες καυσίμου μελετήθηκαν οι θερμοκρασίες και οι φάσεις της φωτιάς εντός του δωματίου. Παρατηρήθηκε πως όσο μεγαλύτερη η ισχύς της φωτιάς τόσο αυξάνονταν οι θερμοκρασίες στο εσωτερικό του δωματίου. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες που εμφανίστηκαν εντός δωματίου ήταν γύρω στους 800°C για ποσότητα καυσίμου 4700ml εξανίου. Σε μισή ποσότητα καυσίμου, δηλαδή στα 2350ml, οι θερμοκρασίες άγγιζαν τους 500°C, ενώ στα 1000ml δεν ξεπέρασαν τους 450°C. Η αύξηση

της ποσότητας του καυσίμου δεν είναι ανάλογη της αύξησης θερμοκρασιών, καθώς παρατηρείται μεγαλύτερος ρυθμός αύξησης στις θερμοκρασίες όσο τα επίπεδα μάζας καυσίμου είναι υψηλά. Επίσης, οι θερμοκρασίες στις θέσεις που βρίσκονταν πιο κοντά στο άνοιγμα εμφάνισαν μέγιστες τιμές ταχύτερα σε σχέση με τις θέσεις που ήταν πιο απομακρυσμένες από το άνοιγμα. Ο παράγοντας αερισμού καθόρισε τα επίπεδα των θερμοκρασιών μέσα στο δωμάτιο, με την περίπτωση μεγαλύτερου ανοίγματος να συνεπάγεται υψηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με αυτές που αναπτύχθηκαν στις περιπτώσεις όπου το άνοιγμα ήταν νικρότερου εμβαδού. Το μεγαλύτερο άνοιγμα επέφερε ταχύτερη καύση λόγω μεγαλύτερου ρυθμού εισερχόμενης μάζας οξυγόνου. Τέλος, όσο χαμηλότερο ήταν το ύψος τοποθέτησης του δοχείου σε σχέση με το δάπεδο του δωματίου, τόσο υψηλότερες ήταν οι θερμοκρασίες εντός του δωματίου. Στην περίπτωση όπου το δοχείο τοποθετήθηκε υψηλότερα η καύση καθυστέρησε με αποτέλεσμα να μην εμφανιστούν ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες.

Η μελέτη του βαθμού ανάπτυξης του εξωτερικού πλουμίου της φωτιάς ανέδειξε σημαντικά συμπεράσματα που αφορούν τους παράγοντες που εξετάστηκαν. Η αύξηση της ισχύος καυσίμου, όπως και στο εσωτερικό, επέφερε μεγαλύτερη ανάπτυξη του εξωτερικού πλουμίου της φωτιάς, αφού όσο μεγαλύτερη μάζα καυσίμου, τόσο πιο ανεπτυγμένο εμφανίστηκε το πλούμιο της φωτιάς στο εξωτερικό του δωματίου. Αντίστοιχα, ο μεγαλύτερος παράγοντας αερισμού επέφερε μικρότερη μεταβολή στα χαρακτηριστικά του εξερχόμενου πλουμίου της φωτιάς σε σχέση με την περίπτωση μικρότερων διαστάσεων ανοίγματος. Τέλος, η θέση του δοχείου του καυσίμου έπαιξε σημαντικό ρόλο στα χαρακτηριστικά του εξωτερικού πλουμίου της φωτιάς, καθώς με το δοχείο να βρίσκεται πιο ψηλά μέσα στο δωμάτιο το εξωτερικό πλούμιο εμφανίστηκε ισχνότερο σε σχέση με την περίπτωση όπου το δοχείο ήταν σε χαμηλό ύψος.

Στην συνέχεια μελετήθηκαν οι θερμοκρασίες στην πρόσοψη ως άμεση συνάρτηση της μελέτης των χαρακτηριστικών του εξερχόμενου πλουμίου της φωτιάς.

Στις περιπτώσεις όπου οι θερμοκρασίες εμφανίζονταν αυξημένες στο εξωτερικό του δωματίου και το πλούμιο της φωτιάς πιο ανεπτυγμένο, η πρόσοψη εκτέθηκε σε υψηλότερες θερμοκρασίες και ακτινοβολία. Αυτό είχε ως συνέπεια πιο αυξημένες θερμοκρασίες πάνω στην πρόσοψη του δωματίου, ενώ αντίστοιχα αποτελέσματα μπόρεσαν να εξαχθούν από τις μετρήσεις της ροής θερμότητας, οι οποίες βρέθηκαν συνακόλουθες των θερμοκρασιών.

Τέλος, δόθηκε έμφαση στον καθορισμό του κεντρικού άξονα του εξωτερικού πλουμίου της φωτιάς συναρτήσει του εμβαδού του ανοίγματος. Βρέθηκε πως σε περίπτωση μεγαλύτερης επιφάνειας του ανοίγματος, ο κεντρικός άξονας του εξωτερικού πλουμίου είναι αρκετά απομακρυσμένος από την πρόσοψη, ενώ στην περίπτωση μικρότερου ανοίγματος πλησίαζε την πρόσοψη. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες στην περίπτωση αυτή βρέθηκαν πολύ κοντά στην πρόσοψη, το οποίο οφείλεται στο ισχνότερο εξωτερικό πλούμιο της φωτιάς, όπως παρατηρήθηκε παραπάνω. Η μελέτη του κεντρικού άξονα είναι ιδιαίτερος σημαντικός παράγοντας στη μελέτη της μεταφοράς θερμότητας στην πρόσοψη ενός δωματίου και τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή εμπειρικών σχέσεων για τα χαρακτηριστικά του εξωτερικού πλουμίου της φωτιάς.

Υπάρχει η δυνατότητα επέκτασης της παρούσας μελέτης με υλοποίηση ορισμένων προτάσεων. Θα ήταν ιδιαίτερος χρήσιμο να μελετηθεί η επίδραση του εξωτερικού πλουμίου της φωτιάς σε διαφορετικά κατασκευαστικά υλικά πρόσοψης (καύσιμα και μη) και κυρίως σε αυτά που χρησιμοποιούνται για την εξωτερική μόνωση κτιρίων. Η γεωμετρία του ανοίγματος είναι ένας ακόμα παράγοντας που επιδρά σε μεγάλο βαθμό στις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του δωματίου και ενώ έχει μελετηθεί σε μεγάλο βαθμό από προηγούμενες μελέτες αξίζει τον κόπο να διερευνηθεί περαιτέρω η επίδρασή της στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εξωτερικού πλουμίου της φωτιάς. Τα πειραματικά δεδομένα της παρούσας μελέτης θα ήταν πολύ χρήσιμο να χρησιμοποιηθούν για την πιστοποίηση των προλέξεων εργαλείων υπολογιστικής ρευστομηχανικής, όπως ο κώδικας FDS, που χρησιμοποιούνται ευρέως για την μελέτη πυρκαγιών.



## Βιβλιογραφία

Agilent 34970A/34972A, Data Acquisition / Switch Unit User's Guide, Agilent Technologies Inc., 2012.

Babrauskas V. and Williamson R.B., Post-Flashover Compartment Fires: Basis of a Theoretical Model, *Fire and Materials*, 2:39-53, 1978.

Babrauskas V. and Wickström U.G., Thermoplastic Pool Compartment Fires, *Combustion and Flame*, 34:195-201, 1979.

Babrauskas V., Estimating Room Flashover Potential, *Fire Tech.*, 16: 94–104, 1980.

Babrauskas V., A Closed-form Approximation for Post-Flashover Compartment Fire Temperatures., *Fire Safety Journal*, 4:63-73, 1981.

Babrauskas V., Free-Burning Fires, *Fire Safety Journal*, 11:33–51, July/September 1986.

Babrauskas V. and Peacock R. D. Heat Release Rate: The Single Most Important Variable in Fire Hazard, *Fire Safety Journal*, 18:255-272, 1992.

Beji T., Ukleja S., Zhang J., and Delichatsios M. A., Fire behaviour and external flames in corridor and tunnel-like enclosures., *Fire and Materials*, 2012.

Bryner N.P., Johnson E.L., Pitts W.M., Carbon Monoxide Production in Compartment Fires - Reduced-Scale Enclosure Test Facility, National Institute of Standards and Technology (NIST), 1994.

Bullen, M. L., and Thomas, P. H., Compartment fires with non-cellulosic fuels., 17th Symposium (International) on Combustion., The Combustion Institute, Pittsburgh, 1139-1148, 1979.

Bundy M., Hamins A., Johnsson A.E., Kim S.C., Ko G.H., Lenhart D.B., Measurements of Heat and Combustion Products in Reduced-Scale Ventilation-Limited Compartment Fires, National Institute of Standards and Technology (NIST), Technical Note 1483, 2007.

Chen A., Yang S., Dong X., Studies of the combined effects of some important factors on the likelihood of flashover., *Fire and Materials*, 35:105–114, 2011.

Chen A., Zhou L., Liu B., Chen W., Theoretical analysis and experimental study on critical conditions of backdraft., *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 24:632-637, 2011.

Chow W.K., Han S.S., Chow C.L., So A.K.W., Experimental Measurement on Air Temperature in a Glass Facade Fire., *International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes.*, 9:78-86, 2007.

Cooper L.Y., Smoke and Heat Venting, *Handbook of Fire Protection Engineering (SFPE) Third Edition*, Section 3, Chapter 9, 2002.

Drysdale D., *An introduction to fire dynamics.*, John Wiley and Sons Ltd, Sussex, England, 1999.

Emmons H.W., Vent Flows., *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Third Edition, Section 2, Chapter 3, 2002.

Guigay G., Eliasson J., Karlsson B., Hervat A., Sinai Y., A different approach to vent flow calculations in fire compartments using the critical flow., *Journal of Fire Sciences*, 28:409-439, 2010.

- Hamins A., Maranghides A., McGrattan K., Johnsson E., Ohlemiller T., Donnelly M., Jang G., Mulholland G., Prasad K., Kukuck S., Anleitner R., McAllister T., Experiments and Modelling of Structural Steel Elements Exposed to Fire., National Institute of Standards and Technology (NIST), 2005.
- Hayasaka H., Kudo Y., Kojima H., Hashigami T., Ito J., Ueda T., Backdraft Experiments in a Small Compartment., Progress in Scale Modeling, 2008.
- Hu L. Lu K., Delichatsios M.A., He L., Tang F., An experimental investigation and statistical characterization of intermittent flame ejecting behavior of enclosure fires with an opening., Combustion and Flame, 159:1178–1184, 2012.
- International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, ISO 9705, Fire Tests-Full-Scale Room Test for Surface Products, First Edition, 1993.
- Iqbal N., Salley M.H. Fire Dynamics Tools (FDTs) Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program, Office of Nuclear Reactor Regulation U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, 2003.
- Kanury, A.M. Chapter 7 Simple Cases of Heat Release Rates- (a) Burning of Liquid Fuel Surfaces., In: Heat Release In Fires. Eds: Babrauskas V. and Grayson S.J., Elsevier Applied Science, London, 175-200, 1992.
- Kasap S.O., Αρχές ηλεκτρονικών υλικών και διατάξεων, εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2004.
- Kawagoe K., Fire Behaviour in Rooms., Report No 27, Building Research Institute, Tokyo, Japan, 1958.
- Klopovic S., Turan O.F., Flames venting externally during full-scale flashover fires: two sample ventilation cases., Fire Safety Journal, 31:117-142, 1998.
- Ko G.H, Hummins A., Bundy M., Johnsson E.L., Kim S.C., Lenhert D., Mixture fraction analysis of combustion products in the upper layer of reduced-scale compartment fires., Combustion and Flame, 156:467-476, 2009.
- Lock A., Bundy M., Johnsson E., Hamins A., Ko G.H., Hwang C., Fuss P., Harris R., Experimental Study of the Effects of Fuel Type, Fuel Distribution, and Vent Size on Full-Scale Underventilated Compartment Fires in an ISO 9705 Room., National Institute of Standards and Technology (NIST), 2008.
- Makhviladze G.M., Shamshin A.V., Yakush S.E. and Zykov A.P. Experimental and Numerical Study of Transient Compartment Fires., Combustion, Explosion, and Shock Waves, 42:723–730, 2006.
- Nakos, J.T., Uncertainty analysis of thermocouple measurements used in normal and abnormal thermal environment experiments at Sandia's radiant heat facility and Lurance Canyon burn site., Technical Report SAND2004-1023, Sandia National Laboratories, Albuquerque, 2004.
- NI cDAQ-9172, User Guide and Specifications, National Instruments Corporation, 2008.
- Oleszkiewicz I., Heat Transfer from a Window Fire Plume to a Building Façade., Collected Papers in Heat Transfer., American Society of Mechanical Engineers, 123:163-170, 1989. OMEGA Engineering, Inc. The Temperature Handbook., 21<sup>st</sup> century, Second edition, Stamford, 2000.
- Parkes A.R., The Impact of Size and Location of Pool Fires on Compartment Fire Behaviour, PhD Thesis, University of Canterbury, New Zealand, 2009.

Prahl J. and Emmons H.W., Fire Induced Flow Through an Opening., *Combustion and Flame*, 25:369-385, 1975.

Quintiere J., McCaffrey B.J., Den Braven K., Experimental and Theoretical Analysis of Quasi-Steady Small Scale Enclosure Fires., National Bureau of Standards, Center for Fire Research, NBSIR 78-1511, Washington, 1978.

Quintiere J.G., *Fundamentals of Fire Phenomena*, John Wiley and Sons Ltd, 2006.

Rockett J.A., Fire Induced Gas Flow in an Enclosure, *Combustion Science and Technology*, 12:165-175, 1976.

Steckler K.D., Baum H.R. and Quintiere J.G., Fire Induced Flows Through Room Openings-Flow Coefficients., Twentieth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, 1591-1600, 1984.

Tang F., Hu L.H., Delichatsios M.A., Lu K.H., Zhu W. Experimental study on flame height and temperature profile of buoyant window spill plume from an under-ventilated compartment fire., *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55:93–101, 2012.

Utiskul Y., Theoretical and Experimental Study on Fully-Developed Compartment Fires., National Institute of Standards and Technology (NIST), 2007.

Wang M., Perricone J., Quintiere G., Chang P., Scale Modeling of Compartment Fires for Structural Fire Testing., *Journal of Fire Protection Engineering*, 18: 223, 2008.

Warnatz J., Maas U., Dibble R.W., *Combustion-Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation.*, Fourth Edition, Springer, Berlin, 2006.

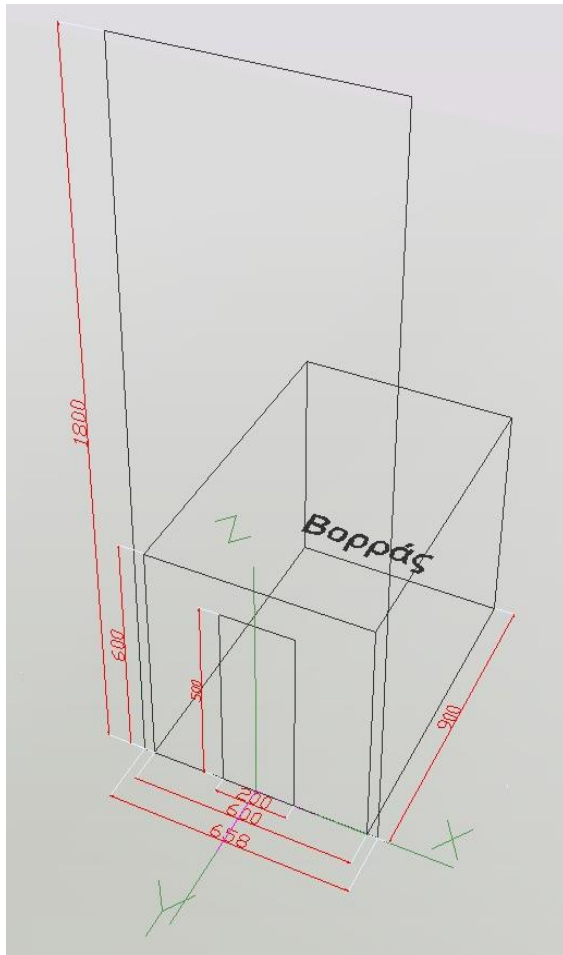
Yii E.H., Modelling the Effects of Fuel Types and Ventilation Openings on Post-flashover Compartment Fires, PhD Thesis, University of Canterbury, New Zealand, 2002.

Ασημακοπούλου Ε.Μ Υπολογιστική Προσομοίωση Διάδοση Φωτιάς σε Κτήριο με Συστήματα Ξηράς Δόμησης και με Υλικά Αλλαγής Φάσης, Μεταπτυχιακή Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2011.

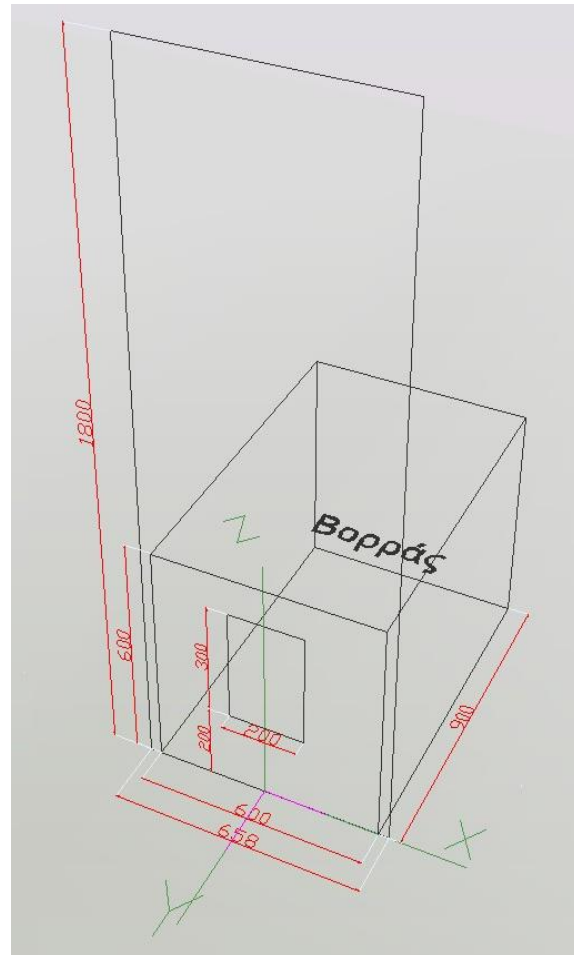
## Παράρτημα

Πείραμα	Θερμοκρασία Περιβάλλοντος (°C)	Υγρασία Εργαστηρίου (%)	Ταχύτητα Ανέμου (m/s)	Πίεση παροχής νερού HeatFlux1 (bar)	Θερμοκρασία παροχής νερού HeatFlux1 (°C)
A1	28	45	0-0.3	1.2	25.9
A2	25.6	52	0-0.3	1.2	25.8
A3	25.8	42	0	1.5	24.9
A4	26	45	0	1.3	25.1
A5	26.3	48	0	1.2	25.4
A6	25.5	40	0-0.3	1.4	24.5
B7	26.4	36	0-0.3	1.5	25.2
A8	24.8	50.4	0-0.3	1.4	25.5
B9	26.3	37.2	0-0.3	1.2	26

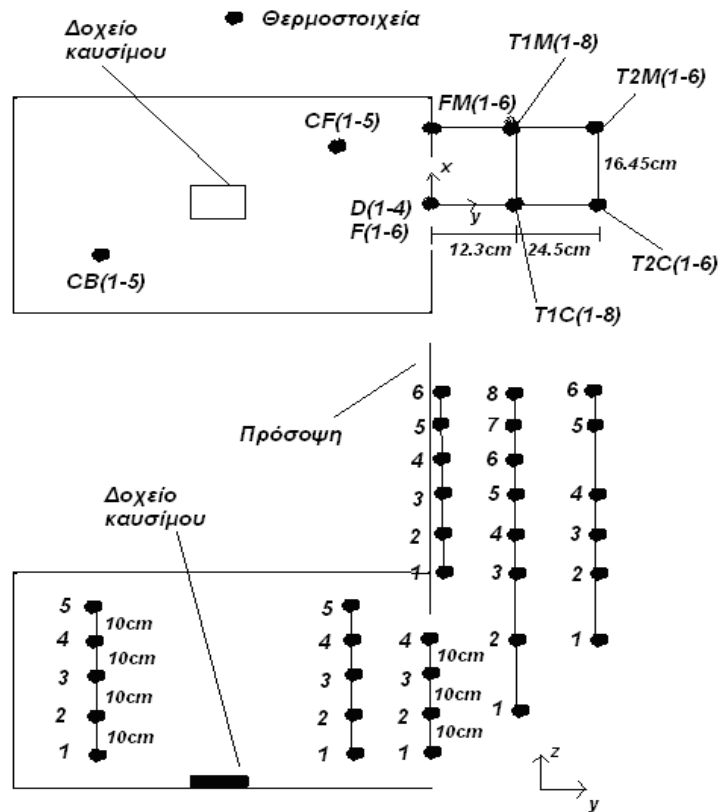
Πίνακας A.1 Συνθήκες περιβάλλοντος κατά την εκκίνηση των πειραμάτων.



Σχήμα A.1 Σχέδιο Κατασκευής-Διαστάσεις-Αρχή αξόνων-Προσανατολισμός Δωματίου στα πειράματα A1, A2, A3, A4, A5, A6, και A8.



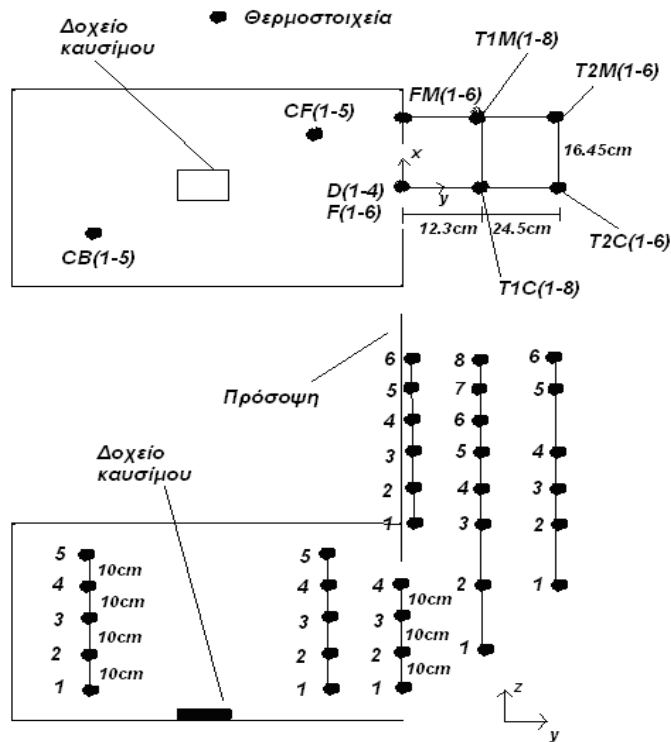
Σχήμα A.2 Σχέδιο Κατασκευής-Διαστάσεις-Αρχή αξόνων-Προσανατολισμός Δωματίου στα πειράματα B7 και B9.



Α.3 Σχηματικό διάγραμμα των θέσεων των θερμοστοιχείων στο πείραμα Α1.

Θέση	X (m)	Y(m)	Z (m)	Θέση	X (m)	Y(m)	Z (m)
CB1	-0,175	-0,7165	0,1	T1M3	0,1645	0,123	0,6
CB2	-0,175	-0,7165	0,2	T1M4	0,1645	0,123	0,71
CB3	-0,175	-0,7165	0,3	T1M5	0,1645	0,123	0,85
CB4	-0,175	-0,7165	0,4	T1M6	0,1645	0,123	1
CB5	-0,175	-0,7165	0,5	T1M7	0,1645	0,123	1,2
CF1	0,175	-0,2665	0,1	T1M8	0,1645	0,123	1,5
CF2	0,175	-0,2665	0,2	T1C1	0	0,123	0,2
CF3	0,175	-0,2665	0,3	T1C2	0	0,123	0,4
CF4	0,175	-0,2665	0,4	T1C3	0	0,123	0,6
CF5	0,175	-0,2665	0,5	T1C4	0	0,123	0,71
D1	0	0	0,1	T1C5	0	0,123	0,85
D2	0	0	0,2	T1C6	0	0,123	1
D3	0	0	0,3	T1C7	0	0,123	1,2
D4	0	0	0,4	T1C8	0	0,123	1,5
F1	0	0	0,6	T2M1	0,1645	0,245	0,4
F2	0	0	0,71	T2M2	0,1645	0,245	0,6
F3	0	0	0,85	T2M3	0,1645	0,245	0,85
F4	0	0	1	T2M4	0,1645	0,245	1
F5	0	0	1,2	T2M5	0,1645	0,245	1,2
F6	0	0	1,5	T2M6	0,1645	0,245	1,5
FM1	0,1645	0	0,6	T2C1	0	0,245	0,4
FM2	0,1645	0	0,71	T2C2	0	0,245	0,6
FM3	0,1645	0	0,85	T2C3	0	0,245	0,85
FM4	0,1645	0	1	T2C4	0	0,245	1
FM5	0,1645	0	1,2	T2C5	0	0,245	1,2
FM6	0,1645	0	1,5	T2C6	0	0,245	1,5
T1M1	0,1645	0,123	0,2	Μετρητής Ροής Θερμότητας	0	0	0,7
T1M2	0,1645	0,123	0,4	Αναλυτής Αερίων	0	0,05	1,65

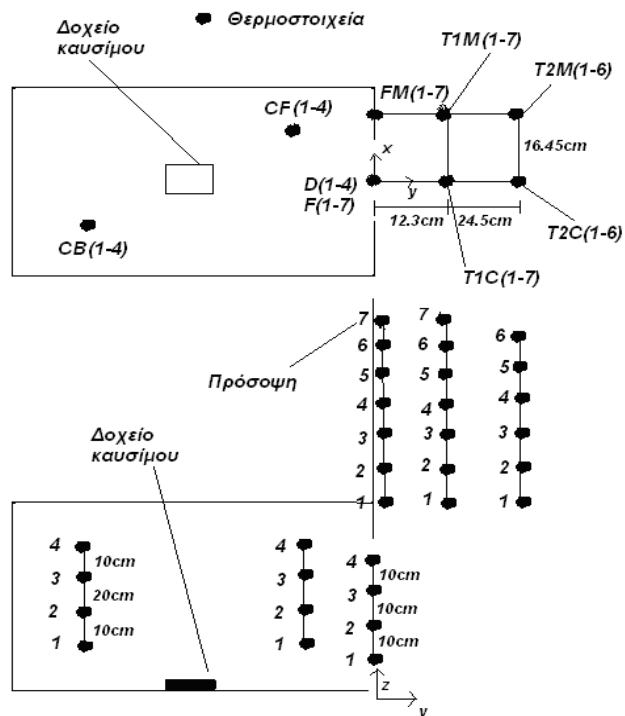
Πίνακας Α.2 Συντεταγμένες μετρητικών διατάξεων του πειράματος Α1.



Α.4 Σχηματικό διάγραμμα των θέσεων των θερμοστοιχείων στο πείραμα Α2.

Θέση	X (m)	Y(m)	Z (m)	Θέση	X (m)	Y(m)	Z (m)
CB1	-0,175	-0,7165	0,1	T1M3	0,1645	0,123	0,6
CB2	-0,175	-0,7165	0,2	T1M4	0,1645	0,123	0,71
CB3	-0,175	-0,7165	0,3	T1M5	0,1645	0,123	0,85
CB4	-0,175	-0,7165	0,4	T1M6	0,1645	0,123	1
CB5	-0,175	-0,7165	0,5	T1M7	0,1645	0,123	1,2
CF1	0,175	-0,2665	0,1	T1M8	0,1645	0,123	1,5
CF2	0,175	-0,2665	0,2	T1C1	0	0,123	0,2
CF3	0,175	-0,2665	0,3	T1C2	0	0,123	0,4
CF4	0,175	-0,2665	0,4	T1C3	0	0,123	0,6
CF5	0,175	-0,2665	0,5	T1C4	0	0,123	0,71
D1	0	0	0,1	T1C5	0	0,123	0,85
D2	0	0	0,2	T1C6	0	0,123	1
D3	0	0	0,3	T1C7	0	0,123	1,2
D4	0	0	0,4	T1C8	0	0,123	1,5
F1	0	0	0,6	T2M1	0,1645	0,245	0,4
F2	0	0	0,71	T2M2	0,1645	0,245	0,6
F3	0	0	0,85	T2M3	0,1645	0,245	0,85
F4	0	0	1	T2M4	0,1645	0,245	1
F5	0	0	1,2	T2M5	0,1645	0,245	1,2
F6	0	0	1,5	T2M6	0,1645	0,245	1,5
FM1	0,1645	0	0,6	T2C1	0	0,245	0,4
FM2	0,1645	0	0,71	T2C2	0	0,245	0,6
FM3	0,1645	0	0,85	T2C3	0	0,245	0,85
FM4	0,1645	0	1	T2C4	0	0,245	1
FM5	0,1645	0	1,2	T2C5	0	0,245	1,2
FM6	0,1645	0	1,5	T2C6	0	0,245	1,5
T1M1	0,1645	0,123	0,2	Μετρητής Ροής Θερμότητας	0	0	0,7
T1M2	0,1645	0,123	0,4	Αναλυτής Αερίων	0	0,05	1,65

Πίνακας Α.3 Συντεταγμένες μετρητικών διατάξεων του πειράματος Α2.

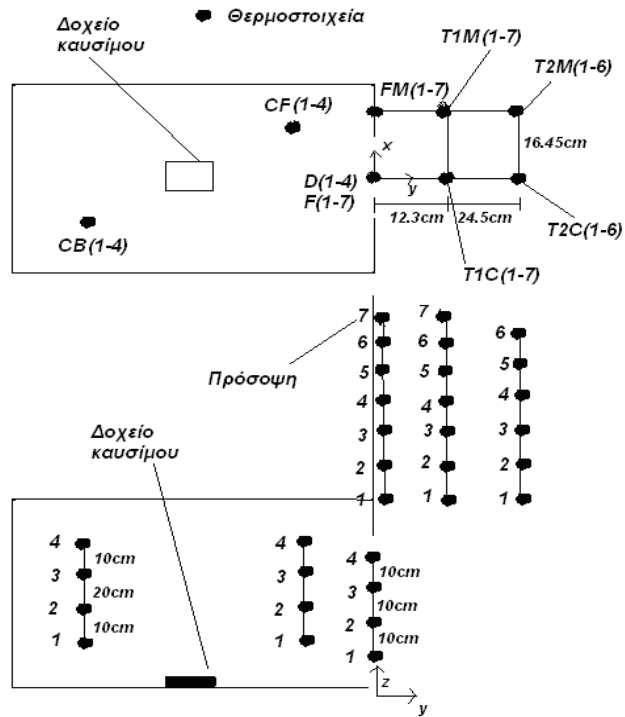


Α.5 Σχηματικό διάγραμμα των θέσεων των θερμοστοιχείων στο πείραμα Α3.

Θέση	X (m)	Y(m)	Z (m)	Θέση	X (m)	Y(m)	Z (m)
CB1	-0,175	-0,7165	0,1	T1M3	0,1645	0,05	0,85
CB2	-0,175	-0,7165	0,2	T1M4	0,1645	0,05	1
CB3	-0,175	-0,7165	0,4	T1M5	0,1645	0,05	1,2
CB4	-0,175	-0,7165	0,5	T1M6	0,1645	0,05	1,4
CF1	0,175	-0,2665	0,1	T1M7	0,1645	0,05	1,6
CF2	0,175	-0,2665	0,2	T1C1	0	0,05	0,6
CF3	0,175	-0,2665	0,4	T1C2	0	0,05	0,71
CF4	0,175	-0,2665	0,5	T1C3	0	0,05	0,85
D1	0	0	0,1	T1C4	0	0,05	1
D2	0	0	0,2	T1C5	0	0,05	1,2
D3	0	0	0,3	T1C6	0	0,05	1,4
D4	0	0	0,4	T1C7	0	0,05	1,6
F1	0	0	0,6	T2M1	0,1645	0,1	0,6
F2	0	0	0,71	T2M2	0,1645	0,1	0,71
F3	0	0	0,85	T2M3	0,1645	0,1	0,85
F4	0	0	1	T2M4	0,1645	0,1	1
F5	0	0	1,2	T2M5	0,1645	0,1	1,2
F6	0	0	1,4	T2M6	0,1645	0,1	1,4
F7	0	0	1,6	T2C1	0	0,1	0,6
FM1	0,1645	0	0,6	T2C2	0	0,1	0,71
FM2	0,1645	0	0,71	T2C3	0	0,1	0,85
FM3	0,1645	0	0,85	T2C4	0	0,1	1
FM4	0,1645	0	1	T2C5	0	0,1	1,2
FM5	0,1645	0	1,2	T2C6	0	0,1	1,4
FM6	0,1645	0	1,4	Μετρητής Ροής Θερμότητας	0	0	0,7
FM7	0,1645	0	1,6				
T1M1	0,1645	0,05	0,6				
T1M2	0,1645	0,05	0,71				

Πίνακας Α.4 Συντεταγμένες μετρητικών διατάξεων του πειράματος Α3.

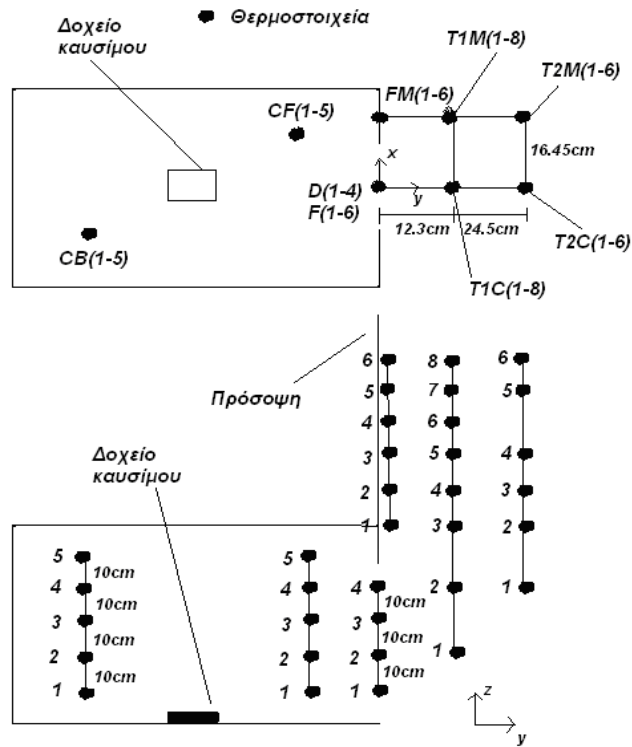




Α.6 Σχηματικό διάγραμμα των θέσεων των θερμοστοιχείων στο πείραμα Α4.

Θέση	X (m)	Y(m)	Z (m)	Θέση	X (m)	Y(m)	Z (m)
CB1	-0,175	-0,7165	0,1	T1M3	0,1645	0,05	0,85
CB2	-0,175	-0,7165	0,2	T1M4	0,1645	0,05	1
CB3	-0,175	-0,7165	0,4	T1M5	0,1645	0,05	1,2
CB4	-0,175	-0,7165	0,5	T1M6	0,1645	0,05	1,4
CF1	0,175	-0,2665	0,1	T1M7	0,1645	0,05	1,6
CF2	0,175	-0,2665	0,2	T1C1	0	0,05	0,6
CF3	0,175	-0,2665	0,4	T1C2	0	0,05	0,71
CF4	0,175	-0,2665	0,5	T1C3	0	0,05	0,85
D1	0	0	0,1	T1C4	0	0,05	1
D2	0	0	0,2	T1C5	0	0,05	1,2
D3	0	0	0,3	T1C6	0	0,05	1,4
D4	0	0	0,4	T1C7	0	0,05	1,6
F1	0	0	0,6	T2M1	0,1645	0,1	0,6
F2	0	0	0,71	T2M2	0,1645	0,1	0,71
F3	0	0	0,85	T2M3	0,1645	0,1	0,85
F4	0	0	1	T2M4	0,1645	0,1	1
F5	0	0	1,2	T2M5	0,1645	0,1	1,2
F6	0	0	1,4	T2M6	0,1645	0,1	1,4
F7	0	0	1,6	T2C1	0	0,1	0,6
FM1	0,1645	0	0,6	T2C2	0	0,1	0,71
FM2	0,1645	0	0,71	T2C3	0	0,1	0,85
FM3	0,1645	0	0,85	T2C4	0	0,1	1
FM4	0,1645	0	1	T2C5	0	0,1	1,2
FM5	0,1645	0	1,2	T2C6	0	0,1	1,4
FM6	0,1645	0	1,4	Μετρητής Ροής Θερμότητας	0	0	0,7
FM7	0,1645	0	1,6				
T1M1	0,1645	0,05	0,6				
T1M2	0,1645	0,05	0,71				

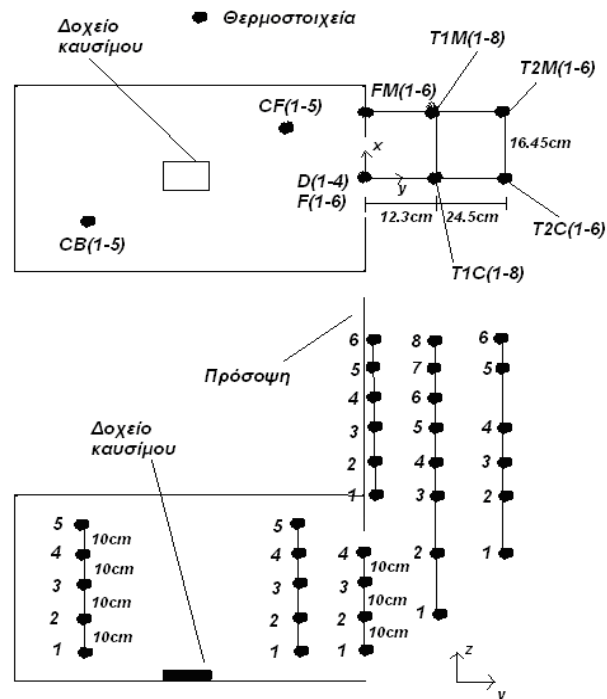
Πίνακας Α.5 Συντεταγμένες μετρητικών διατάξεων του πειράματος Α4



Σχήμα Α.7 Σχηματικό διάγραμμα των θέσεων των θερμοστοιχείων στο πείραμα Α5.

Θέση	X (m)	Y(m)	Z (m)	Θέση	X (m)	Y(m)	Z (m)
CB1	-0,175	-0,7165	0,1	T1M3	0,1645	0,123	0,6
CB2	-0,175	-0,7165	0,2	T1M4	0,1645	0,123	0,71
CB3	-0,175	-0,7165	0,3	T1M5	0,1645	0,123	0,85
CB4	-0,175	-0,7165	0,4	T1M6	0,1645	0,123	1
CB5	-0,175	-0,7165	0,5	T1M7	0,1645	0,123	1,2
CF1	0,175	-0,2665	0,1	T1M8	0,1645	0,123	1,5
CF2	0,175	-0,2665	0,2	T1C1	0	0,123	0,2
CF3	0,175	-0,2665	0,3	T1C2	0	0,123	0,4
CF4	0,175	-0,2665	0,4	T1C3	0	0,123	0,6
CF5	0,175	-0,2665	0,5	T1C4	0	0,123	0,71
D1	0	0	0,1	T1C5	0	0,123	0,85
D2	0	0	0,2	T1C6	0	0,123	1
D3	0	0	0,3	T1C7	0	0,123	1,2
D4	0	0	0,4	T1C8	0	0,123	1,5
F1	0	0	0,6	T2M1	0,1645	0,245	0,4
F2	0	0	0,71	T2M2	0,1645	0,245	0,6
F3	0	0	0,85	T2M3	0,1645	0,245	0,85
F4	0	0	1	T2M4	0,1645	0,245	1
F5	0	0	1,2	T2M5	0,1645	0,245	1,2
F6	0	0	1,5	T2M6	0,1645	0,245	1,5
FM1	0,1645	0	0,6	T2C1	0	0,245	0,4
FM2	0,1645	0	0,71	T2C2	0	0,245	0,6
FM3	0,1645	0	0,85	T2C3	0	0,245	0,85
FM4	0,1645	0	1	T2C4	0	0,245	1
FM5	0,1645	0	1,2	T2C5	0	0,245	1,2
FM6	0,1645	0	1,5	T2C6	0	0,245	1,5
T1M1	0,1645	0,123	0,2	Μετρητής Ροής Θερμότητας	0	0	0,7
T1M2	0,1645	0,123	0,4	Αναλυτής Αερίων	0	0,05	1,65

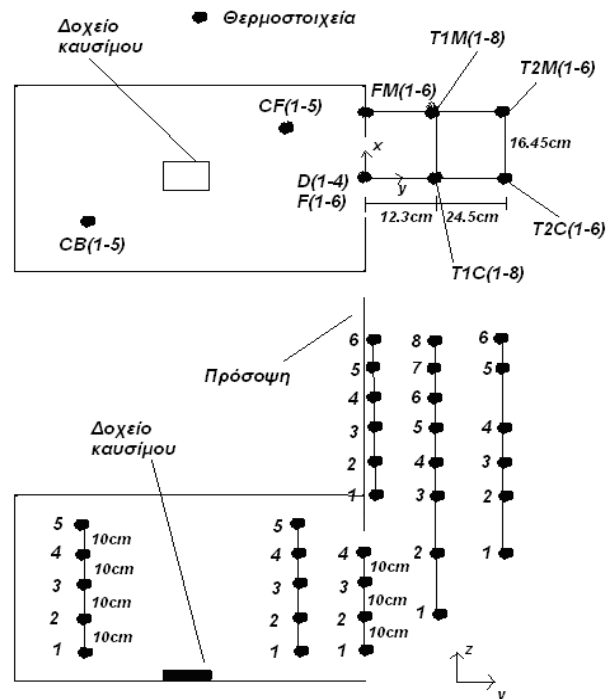
Πίνακας Α.6 Συντεταγμένες μετρητικών διατάξεων του πειράματος Α5.



Σχήμα Α.8 Σχηματικό διάγραμμα των θέσεων των θερμοστοιχείων στο πείραμα Α6.

Θέση	X (m)	Y(m)	Z (m)	Θέση	X (m)	Y(m)	Z (m)
CB1	-0,175	-0,7165	0,1	T1M3	0,1645	0,123	0,6
CB2	-0,175	-0,7165	0,2	T1M4	0,1645	0,123	0,71
CB3	-0,175	-0,7165	0,3	T1M5	0,1645	0,123	0,85
CB4	-0,175	-0,7165	0,4	T1M6	0,1645	0,123	1
CB5	-0,175	-0,7165	0,5	T1M7	0,1645	0,123	1,2
CF1	0,175	-0,2665	0,1	T1M8	0,1645	0,123	1,5
CF2	0,175	-0,2665	0,2	T1C1	0	0,123	0,2
CF3	0,175	-0,2665	0,3	T1C2	0	0,123	0,4
CF4	0,175	-0,2665	0,4	T1C3	0	0,123	0,6
CF5	0,175	-0,2665	0,5	T1C4	0	0,123	0,71
D1	0	0	0,1	T1C5	0	0,123	0,85
D2	0	0	0,2	T1C6	0	0,123	1
D3	0	0	0,3	T1C7	0	0,123	1,2
D4	0	0	0,4	T1C8	0	0,123	1,5
F1	0	0	0,6	T2M1	0,1645	0,245	0,4
F2	0	0	0,71	T2M2	0,1645	0,245	0,6
F3	0	0	0,85	T2M3	0,1645	0,245	0,85
F4	0	0	1	T2M4	0,1645	0,245	1
F5	0	0	1,2	T2M5	0,1645	0,245	1,2
F6	0	0	1,5	T2M6	0,1645	0,245	1,5
FM1	0,1645	0	0,6	T2C1	0	0,245	0,4
FM2	0,1645	0	0,71	T2C2	0	0,245	0,6
FM3	0,1645	0	0,85	T2C3	0	0,245	0,85
FM4	0,1645	0	1	T2C4	0	0,245	1
FM5	0,1645	0	1,2	T2C5	0	0,245	1,2
FM6	0,1645	0	1,5	T2C6	0	0,245	1,5
T1M1	0,1645	0,123	0,2	Μετρητής Ροής Θερμότητας	0	0	0,7
T1M2	0,1645	0,123	0,4	Αναλυτής Αερίων	0	0,05	1,65

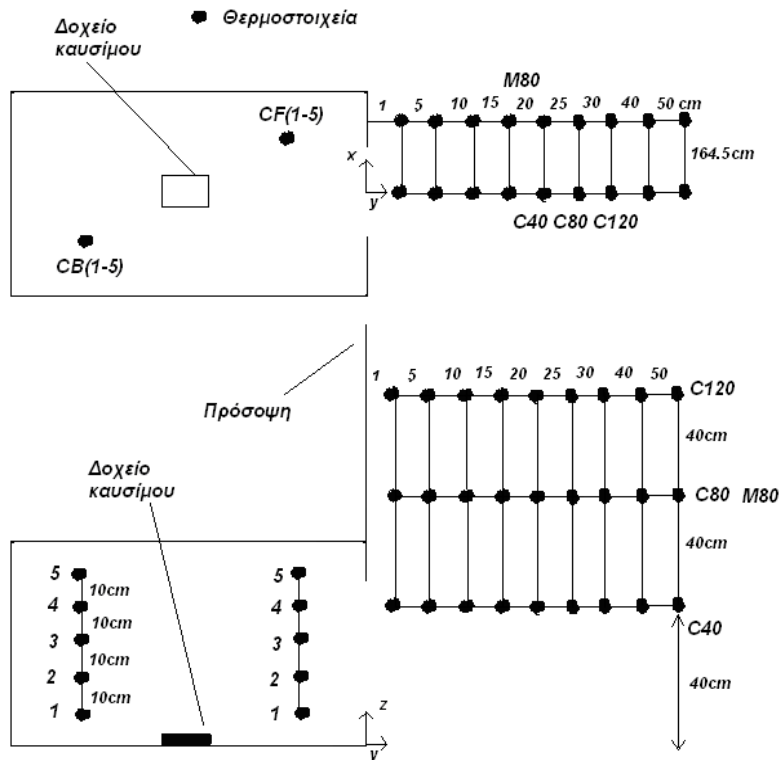
Πίνακας Α.7 Συντεταγμένες μετρητικών διατάξεων του πειράματος Α6.



Σχήμα Α.9 Σχηματικό διάγραμμα των θέσεων των θερμοστοιχείων στο πείραμα Β7.

Θέση	X (m)	Y(m)	Z (m)	Θέση	X (m)	Y(m)	Z (m)
CB1	-0,175	-0,7165	0,1	T1M3	0,1645	0,123	0,6
CB2	-0,175	-0,7165	0,2	T1M4	0,1645	0,123	0,71
CB3	-0,175	-0,7165	0,3	T1M5	0,1645	0,123	0,85
CB4	-0,175	-0,7165	0,4	T1M6	0,1645	0,123	1
CB5	-0,175	-0,7165	0,5	T1M7	0,1645	0,123	1,2
CF1	0,175	-0,2665	0,1	T1M8	0,1645	0,123	1,5
CF2	0,175	-0,2665	0,2	T1C1	0	0,123	0,2
CF3	0,175	-0,2665	0,3	T1C2	0	0,123	0,4
CF4	0,175	-0,2665	0,4	T1C3	0	0,123	0,6
CF5	0,175	-0,2665	0,5	T1C4	0	0,123	0,71
D1	0	0	0,1	T1C5	0	0,123	0,85
D2	0	0	0,2	T1C6	0	0,123	1
D3	0	0	0,3	T1C7	0	0,123	1,2
D4	0	0	0,4	T1C8	0	0,123	1,5
F1	0	0	0,6	T2M1	0,1645	0,245	0,4
F2	0	0	0,71	T2M2	0,1645	0,245	0,6
F3	0	0	0,85	T2M3	0,1645	0,245	0,85
F4	0	0	1	T2M4	0,1645	0,245	1
F5	0	0	1,2	T2M5	0,1645	0,245	1,2
F6	0	0	1,5	T2M6	0,1645	0,245	1,5
FM1	0,1645	0	0,6	T2C1	0	0,245	0,4
FM2	0,1645	0	0,71	T2C2	0	0,245	0,6
FM3	0,1645	0	0,85	T2C3	0	0,245	0,85
FM4	0,1645	0	1	T2C4	0	0,245	1
FM5	0,1645	0	1,2	T2C5	0	0,245	1,2
FM6	0,1645	0	1,5	T2C6	0	0,245	1,5
T1M1	0,1645	0,123	0,2	Μετρητής Ροής Θερμότητας	0	0	0,7
T1M2	0,1645	0,123	0,4	Αναλυτής Αερίων	0	0,05	1,65

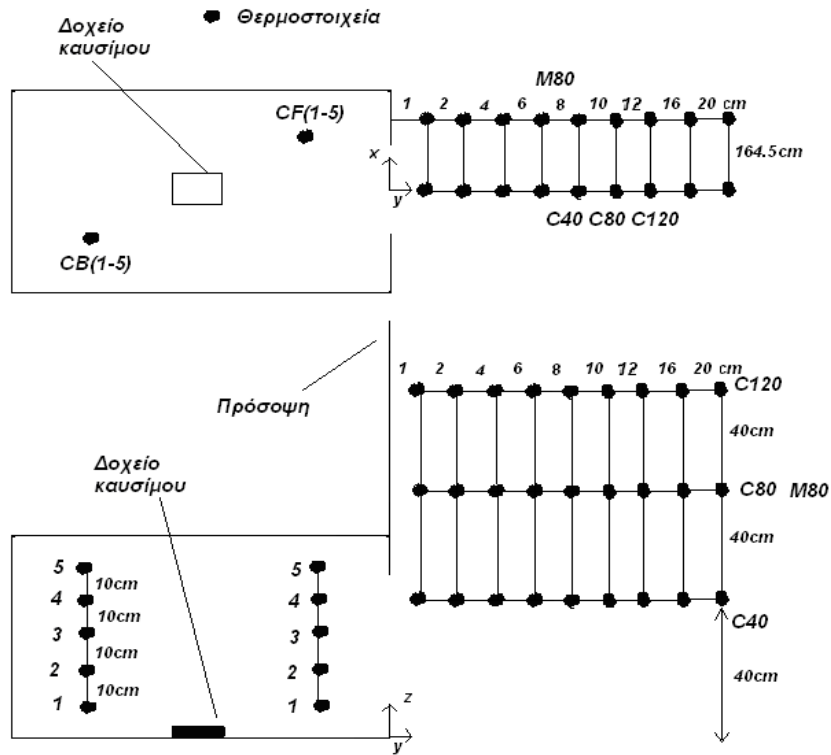
Πίνακας Α.8 Συντεταγμένες μετρητικών διατάξεων του πειράματος Β7.



Σχήμα Α.10 Σχηματικό διάγραμμα των θέσεων των θερμοστοιχείων στο πείραμα Α8.

Θέση	X (m)	Y(m)	Z (m)	Θέση	X (m)	Y(m)	Z (m)
CB1	-0,175	-0,7165	0,1	C80-25	0	0,25	0,8
CB2	-0,175	-0,7165	0,2	C80-30	0	0,3	0,8
CB3	-0,175	-0,7165	0,3	C80-40	0	0,4	0,8
CB4	-0,175	-0,7165	0,4	C80-50	0	0,5	0,8
CB5	-0,175	-0,7165	0,5	C120-01	0	0,01	1,2
CF1	0,175	-0,2665	0,1	C120-05	0	0,05	1,2
CF2	0,175	-0,2665	0,2	C120-10	0	0,1	1,2
CF3	0,175	-0,2665	0,3	C120-15	0	0,15	1,2
CF4	0,175	-0,2665	0,4	C120-20	0	0,2	1,2
CF5	0,175	-0,2665	0,5	C120-25	0	0,25	1,2
C40-01	0	0,01	0,4	C120-30	0	0,3	1,2
C40-05	0	0,05	0,4	C120-40	0	0,4	1,2
C40-10	0	0,1	0,4	C120-50	0	0,5	1,2
C40-15	0	0,15	0,4	M80-01	0	0,01	0,8
C40-20	0	0,2	0,4	M80-05	0	0,05	0,8
C40-25	0	0,25	0,4	M80-10	0	0,1	0,8
C40-30	0	0,3	0,4	M80-15	0	0,15	0,8
C40-40	0	0,4	0,4	M80-20	0	0,2	0,8
C40-50	0	0,5	0,4	M80-25	0,1645	0,25	0,8
C80-01	0	0,01	0,8	M80-30	0,1645	0,3	0,8
C80-05	0	0,05	0,8	M80-40	0,1645	0,4	0,8
C80-10	0	0,1	0,8	M80-50	0,1645	0,5	0,8
C80-15	0	0,15	0,8	Μετρητής Ροής Θερμότητας	0	0	0,4
C80-20	0	0,2	0,8	Αναλυτής Αερίων	0	0,05	1,65

Πίνακας Α.9 Συντεταγμένες μετρητικών διατάξεων του πειράματος Α8.



Σχήμα Α.11 Σχηματικό διάγραμμα των θέσεων των θερμοστοιχείων στο πείραμα Β9.

Θέση	X (m)	Y(m)	Z (m)	Θέση	X (m)	Y(m)	Z (m)
CB1	-0,175	-0,7165	0,1	C80-04	0	0,04	0,8
CB2	-0,175	-0,7165	0,2	C80-06	0	0,06	0,8
CB3	-0,175	-0,7165	0,3	C80-08	0	0,08	0,8
CB4	-0,175	-0,7165	0,4	C80-10	0	0,1	0,8
CB5	-0,175	-0,7165	0,5	C80-12	0	0,12	0,8
CF1	0,175	-0,2665	0,1	C80-16	0	0,16	0,8
CF2	0,175	-0,2665	0,2	C80-20	0	0,2	0,8
CF3	0,175	-0,2665	0,3	C120-01	0	0,01	1,2
CF4	0,175	-0,2665	0,4	C120-02	0	0,02	1,2
CF5	0,175	-0,2665	0,5	C120-04	0	0,04	1,2
C40-01	0	0,01	0,4	C120-06	0	0,06	1,2
C40-02	0	0,02	0,4	C120-08	0	0,08	1,2
C40-04	0	0,04	0,4	C120-10	0	0,1	1,2
C40-06	0	0,06	0,4	C120-12	0	0,12	1,2
C40-08	0	0,08	0,4	C120-16	0	0,16	1,2
C40-10	0	0,1	0,4	C120-20	0	0,2	1,2
C40-12	0	0,12	0,4	M80-01	0,1645	0,01	0,8
C40-16	0	0,16	0,4	M80-04	0,1645	0,04	0,8
C40-20	0	0,2	0,4	M80-06	0,1645	0,06	0,8
C80-01	0	0,01	0,8	Μετρητής Ροής Θερμότητας	0	0	0,4
C80-02	0	0,02	0,8	Αναλυτής Αερίων	0	0,05	1,65

Πίνακας Α.10 Συντεταγμένες μετρητικών διατάξεων του πειράματος Β9.