

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΤΕΡΟΓΕΝΩΝ ΜΕΙΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΥΣΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ
ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ
ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ**

ΚΟΥΤΟΥΖΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΚΟΛΑΪΤΗΣ ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ (ΕΔΙΠ)

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2022

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πρώτα απ' όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, κ. Διονύση Κολαΐτη, για την πολύτιμη βοήθεια και την καθοδήγησή του σε όλα τα στάδια εκπόνησης της εργασίας. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Ανδριανό Κόκλα για την συνεργασία μας και την χρήσιμη βοήθεια για όλο το διάστημα της διεξαγωγής και προετοιμασίας των πειραμάτων. Ιδιαίτερως, θέλω να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο κατασκευών Χαράλαμπο Μαυράκη για την πολύτιμη βοήθεια στη σύνθεση της πειραματικής εγκατάστασης για όλες τις πειραματικές δοκιμές. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω και όλο το προσωπικό του Εργαστηρίου Συστημάτων Καύσης και Ετερογενών Μειγμάτων για την υποστήριξη που μου προσέφερε ο καθένας ξεχωριστά.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	8
ABSTRACT	9
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ	10
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	15
1.1 Φωτιά σε διαμέρισμα	15
1.1.1 Στατιστικά στοιχεία	16
1.1.2 Γενικά χαρακτηριστικά.....	18
1.1.3 Παράμετροι επίδρασης.....	20
1.2 Σκοπός της εργασίας	20
2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ.....	21
2.1 Φυσικά φαινόμενα.....	21
2.1.1 Αναπτυσσόμενο ροϊκό πεδίο	21
2.1.2 Αναπτυσσόμενο θερμικό πεδίο	25
2.2 Πρότυπες καμπύλες.....	27
2.2.1 Φυσική φωτιά.....	27
2.2.2 Καμπύλη ISO 834	28
2.2.3 Καμπύλες Ευρωκώδικα	29
2.3 Νόμοι ομοιότητας.....	35
2.3.1 Ομοιότητα διαστάσεων	36
2.3.2 Ομοιότητα χρόνου	37
2.3.3 Ομοιότητα θερμικής ισχύος	40
3. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	43
3.1 Πειραματικές μελέτες	43
3.1.1 Μελέτες μεγάλης κλίμακας	43
3.1.2 Μελέτες μικρής κλίμακας	46
3.2 Εξισώσεις προσδιορισμού φυσικών μεγεθών	49
3.2.1 Θερμοκρασία αερίου μείγματος	49
3.2.2 Θερμοκρασία στο άνοιγμα	54
3.2.3 Ταχύτητα ροής στο άνοιγμα.....	55

Διέγραψε: 15

Διέγραψε: 20

Διέγραψε: 21

Διέγραψε: 27

Διέγραψε: 35

Διέγραψε: 43

Διέγραψε: 49

3.2.4 Παροχή μάζας στο άνοιγμα.....	56
4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ.....	60
4.1 Βασικά χαρακτηριστικά πειραματικής εγκατάστασης.....	60
4.2 Χαρακτηριστικά του διαμερίσματος	60
4.2.1 Διαστάσεις διαμερίσματος.....	60
4.2.1 Τα δομικά υλικά.....	61
4.3 Μετρητικές διατάξεις.....	63
4.3.1 Θερμοστοιχεία	63
4.3.2 Σωλήνες Pitot - Static	64
4.3.3 Δικατευθυντικοί μετρητές ταχύτητας.....	65
4.3.4 Μετρητής ροής θερμότητας	67
4.3.5 Αναλυτής καυσαερίων	67
4.3.6 Παροχόμετρο καυσαερίων	68
4.4 Σύστημα παροχής καυσίμου.....	69
4.4.1 Παροχόμετρα καυσίμου	70
4.4.2 Πορώδης καυστήρας	70
4.5 Διάταξη μετρητικών συσκευών	71
4.5.1 Θερμοστοιχεία	73
4.5.2 Θερμορόμετρα	85
4.5.3 Δικατευθυντικοί μετρητές ταχύτητας.....	86
4.5.4 Σωλήνες Pitot - Static.....	86
4.6 Σύστημα δειγματοληψίας - Θερμιδομετρία	87
4.6.1 Θερμιδομετρία κατανάλωσης οξυγόνου	87
4.6.2 Εφαρμογή της Μεθόδου Κατανάλωσης του Οξυγόνου ..	89
4.7 Σύστημα συλλογής δεδομένων	94
4.7.1 Συσκευές συλλογής δεδομένων	94
4.7.2 Λογισμικό LabVIEW.....	96
4.8 Εκτίμηση πειραματικών σφαλμάτων	97
4.8.1 Το μοντέλο ASME	98
4.8.1 Θερμοστοιχεία	100
4.8.2 Αισθητήρες μέτρησης ταχύτητας	101

Διέγραψε: 60

Διέγραψε: 60

Διέγραψε: 63

Διέγραψε: 69

Διέγραψε: 71

Διέγραψε: 87

Διέγραψε: 94

Διέγραψε: 97

4.8.3 Μετρητές ροής θερμότητας.....	102
4.8.4 Ψηφιακά παροχόμετρα καυσίμου.....	102
4.8.5 Ψηφιακά παροχόμετρα καυσαερίων	103
4.9 Διόρθωση θερμοκρασιών.....	105
4.9.1 Σφάλματα λόγω ακτινοβολίας.....	105
4.9.2 Μεθοδολογία διόρθωσης θερμοκρασιών	106
4.9.3 Πρόγραμμα σε προγραμματιστικό περιβάλλον	109
5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ	111
5.1 Παραμετρικές μελέτες.....	112
5.1.2 Ισχύς φωτιάς	112
5.1.2 Υλικό τοιχωμάτων	113
5.1.3 Επαναληψιμότητα	114
5.2 Πειράματα σταθερής ισχύος.....	121
5.2.1 Επίδραση ισχύος φωτιάς	122
5.2.2 Επίδραση υλικού τοιχωμάτων	133
5.2.3 Συνέπειες στη δομή των τοιχωμάτων	139
5.3 Πειράματα πρότυπης καμπύλης θερμοκρασίας – χρόνου ISO834.....	142
5.3.1 Αέριο περιβάλλον.....	145
5.3.2 Τοιχώματα	151
6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ	163
6.1 Θερμοκρασίες αερίου περιβάλλοντος.....	163
6.1.1 Φωτιές πριν την καθολική ανάφλεξη.....	164
6.1.2 Φωτιές μετά την καθολική ανάφλεξη	168
6.2 Ταχύτητες στο άνοιγμα	171
6.3 Παροχή μάζας στο άνοιγμα	173
6.3.1 Παροχή μάζας καυσαερίων στο άνοιγμα	173
6.3.2 Παροχή μάζας αέρα στο άνοιγμα	175
7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	181
8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	187
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	197

Διέγραψε: 105

Διέγραψε: 112

Διέγραψε: 121

Διέγραψε: 142

Διέγραψε: 163

Διέγραψε: 171

Διέγραψε: 173

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η επίδραση της θερμικής ισχύος, του υλικού των τοιχωμάτων και πρότυπων καμπυλών θερμοκρασίας – χρόνου στα θερμικά και ροϊκά χαρακτηριστικά της φωτιάς σε διαμέρισμα. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν συνολικά 11 πειράματα με χρήση πειραματικής διάταξης διαμερίσματος μικρής κλίμακας σύμφωνα με το πρότυπο ISO 9705, κλίμακας 1/3, το οποίο κατασκευάστηκε στο Εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης. Χρησιμοποιήθηκαν μετρητικά όργανα, κατάλληλα τοποθετημένα σε διάφορες θέσεις στο εσωτερικό του πυροδιαμερίσματος, στο άνοιγμα και στο εσωτερικό των τοιχωμάτων (75 θερμοστοιχεία, 4 δικατευθυντικοί μετρητές ταχύτητας, 2 σωλήνες pitot-static, 3 μετρητές ροής θερμότητας, 2 ψηφιακά παροχόμετρα, 1 αναλυτής καυσαερίων και 1 μετρητής παροχής καυσαερίων). Οι μετρητικές διατάξεις συνδέθηκαν έπειτα με κατάλληλο τρόπο με Η/Υ για την καταγραφή, επεξεργασία και την αξιολόγηση των πειραματικών τιμών. Μελετήθηκαν τέσσερα διαφορετικά επίπεδα ισχύος (34kW, 68 kW, 102 kW και 136 kW), δύο διαφορετικά υλικά τοιχωμάτων (πυράντοχη γυψοσανίδα, σανίδα πυριτικού ασβεστίου) και μία πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας – χρόνου (ISO 834) προκειμένου να μελετηθεί πώς ο κάθε ένας από αυτούς τους παράγοντες επηρεάζει τελικά τα χαρακτηριστικά της φλόγας. Στη συνέχεια, οι πειραματικές τιμές της θερμοκρασίας καυσαερίων, της ταχύτητας και παροχής μάζας στο άνοιγμα συγκρίθηκαν με υπολογιστικές τιμές με τη χρήση εμπειρικών σχέσεων από τη βιβλιογραφία και αξιολογήθηκε η ακρίβεια τους.

ABSTRACT

In this thesis the influence of thermal power, wall material and standard temperature-time curves on the thermal and flow characteristics of a compartment fire was studied. For this purpose, a total of 11 experiments were carried out using a 1/3 scale experimental compartment of the standard ISO 9705 compartment, which was constructed in the Laboratory of Heterogeneous Mixtures and Combustion Systems. Measuring instruments were used, suitably positioned at various locations inside the fire compartment, at the opening and inside the walls (75 thermocouples, 4 bi-directional velocity probes, 2 Pitot - static tubes, 3 heat flow meters, 2 digital flow meters, 1 exhaust gas analyser and 1 exhaust gas flow meter). The measuring devices were connected to a computer for recording, processing and evaluation of the experimental values. Four different constant power levels (34kW, 68 kW, 102 kW and 136 kW), two different wall materials (fire-resistant plasterboard, calcium silicate board) and a standard temperature-time curve (ISO 834) were studied in order to investigate how each of these factors ultimately affects the flame characteristics. The experimental values of gas temperature, velocity and mass flow rate at the opening were compared against predictions of relevant fire safety engineering correlations from the literature and their accuracy was evaluated.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

Σύμβολο	Μέγεθος	Μονάδες
A	Εμβαδόν διατομής	m ²
A _r	Εμβαδόν δαπέδου	m ²
A _o	Εμβαδόν ανοίγματος	m ²
A _T	Συνολική εσωτερική επιφάνεια του πυροδιαμερίσματος	m ²
A _{duct}	Διατομή αγωγού καυσαερίων	m ²
B _T	Συστηματική πηγή σφάλματος	-
C _d	Συντελεστής εκροής	-
c _p	Ειδική θερμοχωρητικότητα	J/kg·K
E	Ευαισθησία μετρητή ροής θερμότητας	m ² ·Volt/kW
E _{CO}	Εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα μάζας καταναλισκόμενου μονοξειδίου του άνθρακα	J/kg
E _{CO2}	Εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα μάζας καταναλισκόμενου διοξειδίου του άνθρακα	J/kg
E _{O2}	Εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα μάζας καταναλισκόμενου οξυγόνου	J/kg
F	Δύναμη	N
F _L	Πυκνότητα πυροθερμικού φορτίου	MJ/m ²
g	Επιτάχυνση της βαρύτητας	m/s ²
h _k	Ενεργός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας	kW/m ² ·K
h _{TC}	Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής	W/m ² /K
H _D	Ύψος δέσμης καυσαερίων στο εσωτερικό του πυροδιαμερίσματος	m
H _N	Ύψος ουδέτερου επιπέδου στο άνοιγμα	m
H _o	Ύψος ανοίγματος	m
H _u	Κατώτερη θερμογόνος δύναμη	kJ/kg

k	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας	$W/m^2 \cdot K$
k_p	Σταθερά του αισθητήρα μέτρησης πίεσης	m
l	Κλίμακα μήκους	m
l_m	Κλίμακα μήκους μοντέλου	m
l_p	Κλίμακα μήκους πρωτότυπου	m
L_i	Συνολική απόσταση από το θερμοστοιχείο ενδιαφέροντος	m
M_a	Μοριακή μάζα αέρα	$kg/kmol$
M_{O_2}	Μοριακή μάζα οξυγόνου	$kg/kmol$
\dot{m}_a	Παροχή μάζας αέρα καύσης	kg/s
\dot{m}_e	Παροχή μάζας προϊόντων καύσης	kg/s
\dot{m}_{fuel}	Παροχή μάζας καυσίμου	kg/s
\dot{m}_g	Παροχή μάζας καυσαερίων	kg/s
N	Δείγμα	-
Nu	Αριθμός Nusselt	-
p	Πίεση	Pa
Pr	Αριθμός Prandtl	-
p_s	Τάση ατμών	Pa
\dot{Q}	Θερμική ισχύς	W
\dot{Q}_{max}	Μέγιστη θερμική ισχύς	W
\dot{q}''	Θερμορροή	W/m^2
\dot{q}_{net}''	Συνολική θερμορροή	W/m^2
\dot{q}_{conv}''	Θερμορροή λόγω συναγωγής	W/m^2
\dot{q}_{rad}''	Θερμορροή λόγω ακτινοβολίας	W/m^2
q_{loss}	Ρυθμός απωλειών θερμότητας	W
R	Παγκόσμια σταθερά αερίων	J/mol
r	Στοιχειομετρικός λόγος μάζας καυσίμου αέρα	-

r	Συντελεστής χαλάρωσης	-
Re	Αδιάστατος αριθμός Reynolds	-
RFR _f	Μέγιστη ανηγμένη θερμορροή στο δάπεδο	W/m ²
RH	Σχετική υγρασία του αέρα	-
S	Επιφάνεια ελέγχου	m ²
S _T	Τυχαία πηγή σφάλματος	-
t	Χρόνος	s
t _a	Χρόνος έως την επίτευξη ρυθμού έκλυσης θερμότητας 1 MW	s
t _{max}	Χρόνος έως την επίτευξη μέγιστου ρυθμού έκλυσης θερμότητας	s
t _p	Χρόνος θερμικής διείσδυσης	s
t _{70%}	Χρόνος επίτευξης 70% της διάρκειας φωτιάς σε διαμέρισμα	s
t _{100%}	Χρόνος επίτευξης 100% της διάρκειας φωτιάς σε διαμέρισμα	s
t*	Τροποποιημένος χρόνος	s
t _{max} *	Τροποποιημένος χρόνος έως την επίτευξη μέγιστου ρυθμού έκλυσης θερμότητας	s
T _a	Θερμοκρασία αέρα	K
T _b	Θερμοκρασία βρασμού	°C
T _{ex}	Θερμοκρασίας εκτεθειμένης επιφάνειας	K
T _g	Θερμοκρασία δέσμης καυσαερίων	K
T _{g,up}	Θερμοκρασία ανώτερων στρωμάτων καυσαερίων	K
T _{out}	Θερμοκρασία καυσαερίων εξερχόμενων από το άνοιγμα	K
T _s	Θερμοκρασία επιφάνειας	K
T _{TC}	Μετρούμενη θερμοκρασία θερμοστοιχείου	K
T _{un}	Θερμοκρασία μη εκτεθειμένης επιφάνειας	K
T _∞	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	K

T_g^*	Θερμοκρασία καυσαερίων για μηδενικές θερμικές απώλειες από το άνοιγμα του διαμερίσματος	K
U_a	Ταχύτητα αέρα στο άνοιγμα	m/s
U_{a1}	Ταχύτητα αέρα στο άνω τμήμα του ανοίγματος	m/s
U_{a2}	Ταχύτητα αέρα στο κάτω τμήμα του ανοίγματος	m/s
U_g	Ταχύτητα καυσαερίων στο άνοιγμα	m/s
U_{ASME}	Ολικό σφάλμα κατά ASME	-
V_i	Ταχύτητα διάχυσης	m/s ²
V	Παροχή όγκου καυσαερίων	m ³ /s
W_i	Συντελεστής στάθμισης	-
W_o	Πλάτος ανοίγματος	m
W_s	Αξονικό έργο	W
x	Απόσταση κατά τον άξονα μήκους του πυροδιαμερίσματος	mm
$X_{H_2O}^a$	Πραγματικό γραμμομοριακό κλάσμα υδρατμών στον αέρα καύσης	-
$X_{CO_2}^a$	Πραγματικό γραμμομοριακό κλάσμα διοξειδίου του άνθρακα στον αέρα καύσης	-
$X_{O_2}^{A^a}$	Μετρούμενο γραμμομοριακό κλάσμα οξυγόνου στον αέρα καύσης	-
$X_{O_2}^{A^e}$	Μετρούμενο γραμμομοριακό κλάσμα οξυγόνου στα καυσαέρια	-
$X_{O_2}^{A^a}$	Μετρούμενο γραμμομοριακό κλάσμα διοξειδίου του άνθρακα στον αέρα καύσης	-
$X_{O_2}^{A^e}$	Μετρούμενο γραμμομοριακό κλάσμα διοξειδίου του άνθρακα στα καυσαέρια	-
$X_{CO}^{A^e}$	Μετρούμενο γραμμομοριακό κλάσμα μονοξειδίου του άνθρακα στα καυσαέρια	-
X_i	Τιμή μέτρησης	-
\bar{x}	Μέση τιμή του δείγματος	-
y	Απόσταση κατά τον άξονα πλάτους του πυροδιαμερίσματος	mm

$\gamma_{O_2}^a$	Κλάσμα μάζας του οξυγόνου στον αέρα καύσης	-
$\gamma_{O_2}^e$	Κλάσμα μάζας του οξυγόνου στα προϊόντα της καύσης	-
z	Απόσταση κατά τον άξονα ύψους του πυροδιαμερίσματος	-
α	Συντελεστής ογκομετρικής μεταβολής	-
δ	Πάχος τοιχωμάτων διαμερίσματος	m
Δh_c	Θερμότητα καύσης	J/kg
ΔL_i	Απόσταση ευθείας διαδρομής μεταξύ θερμοστοιχείου ενδιαφέροντος και θερμοστοιχείου i	m
Δp	Διαφορά πίεσης	Pa
ϵ_{TC}	Συντελεστής εκπομπής θερμοστοιχείου	-
μ	Δυναμική συνεκτικότητα	Pa·s
ν	Κινηματική συνεκτικότητα	m/s ²
ρ	Πυκνότητα υλικού τοιχωμάτων	kg/m ³
ρ_∞	Πυκνότητα αέρα περιβάλλοντος	kg/m ³
ρ_a	Πυκνότητα αέρα περιβάλλοντος	kg/m ³
ρ_g	Πυκνότητα καυσαερίων	kg/m ³
σ	Σταθερά Boltzmann	W/m ² K ⁴
σ_x	Τυπική απόκλιση μέσης τιμής	-
τ	Διατμητική τάση	Pa
φ	Συντελεστής διαμόρφωσης	-

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Φωτιά σε διαμέρισμα

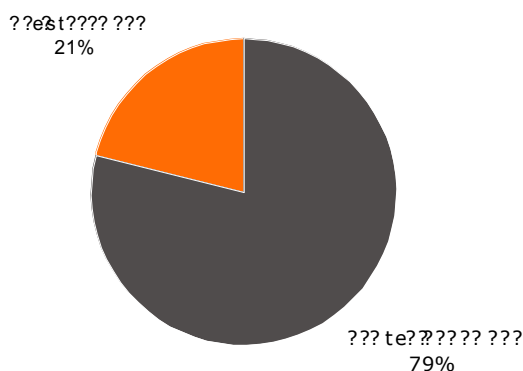
Οι φωτιές σε κλειστό χώρο αναφέρονται στη βιβλιογραφία και ως φωτιές διαμερισμάτων (compartment fires) και περιγράφουν την ανεξέλεγκτη καύση σε οποιοδήποτε χώρο πεπερασμένων διαστάσεων (Σχήμα 1.1). Ο χώρος αυτός ονομάζεται και διαμέρισμα ή πυροδιαμέρισμα (compartment) και τα χαρακτηριστικά του καθορίζουν την παροχή αέρα και το θερμικό περιβάλλον της φωτιάς (Quintiere, 2006). Ένα πυροδιαμέρισμα περιλαμβάνει όχι μόνο απλές διαμορφώσεις δωματίων, όπως για παράδειγμα κτίρια διαμερισμάτων, αλλά και πολύπλοκα κτίρια, όπως θέατρα, εμπορικά κέντρα και βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Η μελέτη των φωτιών κλειστού χώρου περιλαμβάνει κατά κύριο λόγο τέσσερις επιστημονικούς τομείς: τη δυναμική των ρευστών, τη μεταφορά θερμότητας, τη συμπεριφορά των καυσίμων και τη συμπεριφορά των υλικών. Στόχος της είναι η κατανόηση των θερμικών και ροϊκών φαινομένων της φωτιάς σε διαμέρισμα και με απώτερο σκοπό την πρόληψη και την αντιμετώπιση της σε πραγματικό επίπεδο.



Σχήμα 1.1: Φωτιά σε διαμέρισμα, Colton Fire Department (2022)

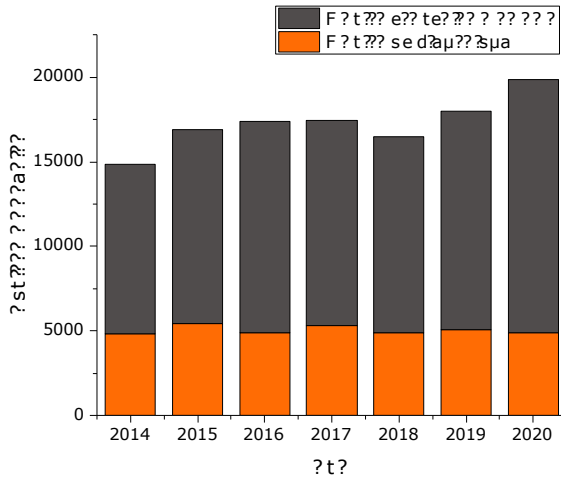
1.1.1 Στατιστικά στοιχεία

Στην Ελλάδα, υπεύθυνο για την καταγραφή και τη δημοσιοποίηση των πυρκαγιών είναι το Πυροσβεστικό Σώμα Ελλάδος. Σύμφωνα με τη βάση δεδομένων του Πυροσβεστικού Σώματος, Hellenic Fire Service (2022): Αστικά Συμβάντα, τις χρονολογίες 2014 έως και 2020 καταγράφηκαν 120.908 πυρκαγιές, από τις οποίες 35.417 σε εσωτερικούς χώρους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2.

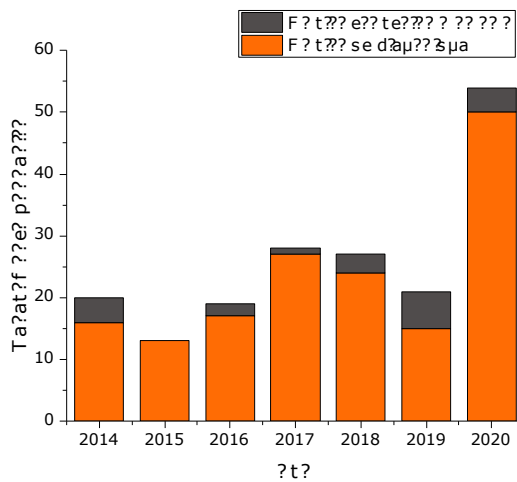


Σχήμα 1.2: Ποσοστό συνολικών δελτίων πυρκαγιάς αστικών συμβάντων για τις χρονολογίες 2014-2020

Παρόλο που ο αριθμός των πυρκαγιών ακολουθεί μία μικρή ανοδική πορεία ανά τα έτη, οι φωτιές σε διαμέρισμα έχουν σχετικά σταθερή διακύμανση (Σχήμα 1.3). Παρόλα αυτά, το ποσοστό των θανατηφόρων πυρκαγιών σε διαμέρισμα παραμένει χρονικά σταθερό και ανέρχεται σε 90% των συνολικών θανατηφόρων συμβάντων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.4. Σημαντική αύξηση (270%) παρουσιάστηκε το έτος 2020 στον αριθμό των θανατηφόρων πυρκαγιών σε σχέση με το μέσο όρο των ετών 2014 – 2019.

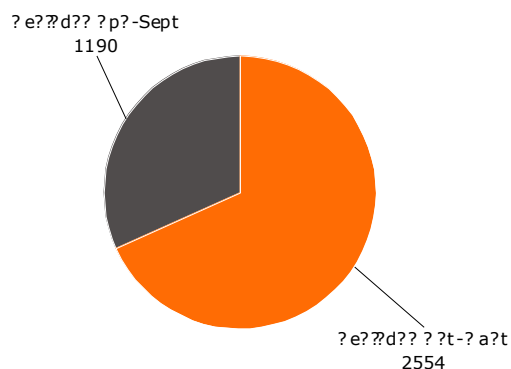


Σχήμα 1.3: Διακύμανση αριθμού φωτιών σε διαμέρισμα και εξωτερικών χώρων την περίοδο 2014-2020.



Σχήμα 1.4: Διακύμανση θανατηφόρων πυρκαγιών την περίοδο 2014-2020.

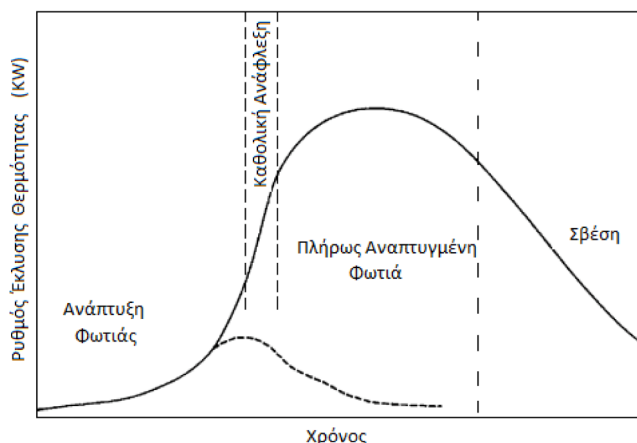
Παρατηρήθηκε, επίσης, ότι ο αριθμός των συνολικών φωτιών σε διαμέρισμα, κατά την περίοδο Οκτώβριο – Μάρτιο, είναι κατά μέσο όρο υψηλότερος κατά 115% σε σχέση με την περίοδο Απρίλιο – Σεπτέμβριο (Σχήμα 1.5). Αυτό πιθανώς να οφείλεται στη χρήση τζακιών και ηλεκτρικών συσκευών θέρμανσης, οι οποίες φέρουν αυξημένους κινδύνους για ανάπτυξη φωτιάς σε κλειστούς χώρους. Επομένως, καθίσταται αντιληπτό ότι, παρόλο που οι δασικές πυρκαγιές μαστίζουν την Ελλάδα κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, οι φωτιές σε διαμέρισμα ευθύνονται για το μεγαλύτερο μέρος των θανάτων σε ετήσια βάση.



Σχήμα 1.5: Μέσος όρος φωτιών σε διαμέρισμα ανά περιόδους Απρ-Σεπτ και Οκτ-Μαρτ για τα έτη 2014 έως 2020.

1.1.2 Γενικά χαρακτηριστικά

Η φωτιά σε διαμέρισμα αποτελείται από δύο βασικά στάδια, το στάδιο πριν (pre-flashover) και το στάδιο μετά (post-flashover) την καθολική ανάφλεξη (flashover), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.6.



Σχήμα 1.6: Στάδια ανάπτυξης φλόγας

Κατά τη διάρκεια του πρώτου σταδίου, οι θερμοκρασίες εντός του διαμερίσματος είναι σχετικά χαμηλές και δεν αποτελούν απειλή για τα δομικά στοιχεία, ενώ κύριο μέλημα, σε πραγματικές συνθήκες, αποτελεί η διάσωση των ανθρώπινων ζώων και η εκκένωση του κτιρίου. Τα χαρακτηριστικά της φωτιάς καθορίζονται από την ποσότητα των πυρολυτικών αερίων της καύσιμης ύλης και η φωτιά έχει συνήθως χαρακτηριστικά υπερ-αεριζόμενης φωτιάς (fuel controlled). Εφόσον υπάρχει επαρκής ποσότητα καυσίμου και οξειδωτικού μέσου, η φωτιά μπορεί να εξελιχθεί από αναπτυσσόμενη σε πλήρως αναπτυγμένη (fully developed fire). Η μετάβαση αυτή περιγράφεται ως καθολική ανάφλεξη (flashover).

Κατά τη διάρκεια του σταδίου μετά την καθολική ανάφλεξη, η φωτιά αποκτά τη μέγιστη θερμική ισχύ της, άμεσα εξαρτώμενη από τη διαθέσιμη ποσότητα του αέρα και συνήθως χαρακτηρίζεται ως υπο-αεριζόμενη (ventilation controlled). Κατά το στάδιο της πλήρως αναπτυγμένης φωτιάς, οι αναπτυσσόμενες υψηλές θερμοκρασίες αποτελούν άμεση απειλή για την αντοχή των φερόντων δομικών στοιχείων του κτιρίου. Για το λόγο αυτό, σε αυτό το στάδιο το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στη μελέτη της αντοχής των δομικών υλικών του διαμερίσματος, με κύριο στόχο την αποφυγή κατάρρευσης κατά τη διάρκεια της φωτιάς.

1.1.3 Παράμετροι επίδρασης

Το είδος, η ποσότητα και η τοποθεσία των καύσιμων υλών εντός του διαμερίσματος, η γεωμετρία του χώρου και των ανοιγμάτων, οι φυσικές ιδιότητες των δομικών υλικών και η αρχική εστία της φωτιάς επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό:

- Το ρυθμό εξάπλωσης της φωτιάς
- Το μέγιστο ρυθμό καύσης
- Τη διάρκεια της φωτιάς

1.2 Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η πειραματική μελέτη των ροϊκών και θερμικών χαρακτηριστικών φωτιάς σε διαμέρισμα κάτω από διαφορετικές συνθήκες. Μελετάται ο τρόπος με τον οποίο η θερμική ισχύς της φωτιάς και το υλικό των τοιχωμάτων του πυροδιαμερίσματος επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά της φλόγας. Πραγματοποιείται παραμετρική μελέτη κατά την οποία μεταβάλλοντας τους προαναφερθέντες παράγοντες εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με τις θερμοκρασίες εντός του διαμερίσματος, των τοιχωμάτων και του ανοίγματος. Μελετάται επίσης η θερμορροή στα τοιχώματα, οι ταχύτητες αερίων στο άνοιγμα καθώς και ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας. Επιπλέον, πραγματοποιείται πειραματική προσομοίωση, με σύστημα αυτόματου ελέγχου, της πρότυπης καμπύλης ISO 834. Οι μετρήσεις βασικών μεγεθών της φωτιάς (π.χ. θερμοκρασία, ταχύτητα) συγκρίνονται με τα αποτελέσματα εμπειρικών συσχετίσεων και εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με την ακρίβεια με την οποία οι τελευταίες περιγράφουν τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα σε μία φωτιά σε διαμέρισμα.

2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ

2.1 Φυσικά φαινόμενα

2.1.1 Αναπτυσσόμενο ροϊκό πεδίο

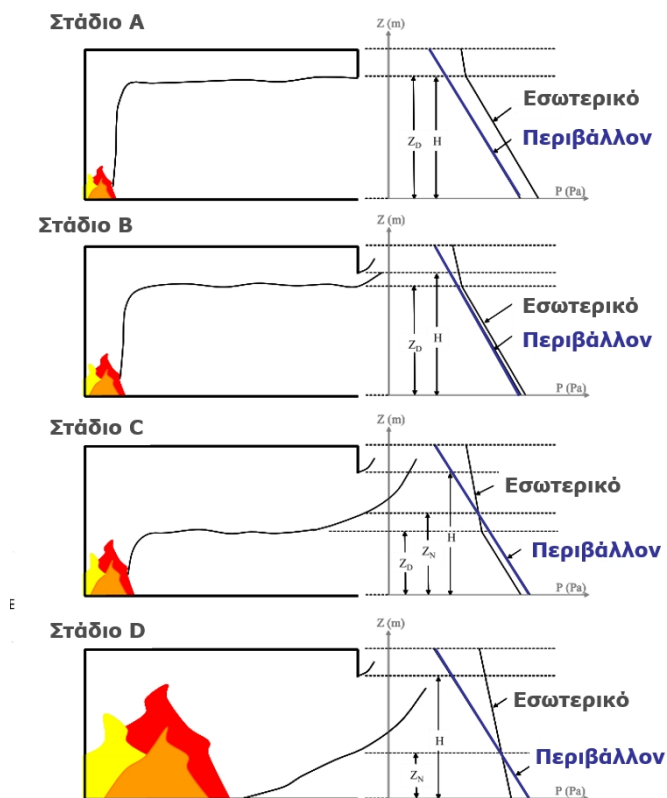
Το Σχήμα 2.1 απεικονίζει τα χαρακτηριστικά ενός τυπικού ροϊκού πεδίου σε ένα πυροδιαμέρισμα στο οποίο έχει εκδηλωθεί φωτιά.



Σχήμα 2.1: Τυπικό ροϊκό πεδίο φωτιάς σε πυροδιαμέρισμα

Η φωτιά σε διαμέρισμα διακρίνεται σε τέσσερα στάδια (A,B,C,D) με κριτήριο τη ροή καυσαερίων και αέρα μέσω των ανοιγμάτων, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2.

Κατά το πρώτο στάδιο (A), τα θερμά καυσαέρια που παράγονται από τη φωτιά στο εσωτερικό του διαμερίσματος κινούνται προς τα πάνω λόγω της θερμικής άνωσης, διότι η πυκνότητα των θερμών καυσαερίων είναι μικρότερη από αυτήν του περιβάλλοντος ψυχρότερου αέρα. Όταν τα καυσαέρια φτάσουν στην οροφή, αλλάζουν κατεύθυνση και αρχίζουν να κινούνται ακτινικά, δημιουργώντας ένα θερμό στρώμα καυσαερίων ακριβώς κάτω από την οροφή (ceiling jet).



Σχήμα 2.2: Στάδια εξέλιξης ροϊκού πεδίου φωτιάς σε διαμέρισμα

Εάν δεν υπάρχει κάποιο άνοιγμα από το οποίο μπορούν να διαφύγουν τα καυσαέρια, το πάχος του θερμού στρώματος καυσαερίων αυξάνεται συνεχώς, με αποτέλεσμα η βάση του να διευρύνεται προς τα κάτω. Σε αυτή την περίπτωση υπάρχει υψηλή πιθανότητα σβέσης.

Εάν υπάρχει κάποιο άνοιγμα στο διαμέρισμα στο οποίο εκδηλώνεται η φωτιά, τα θερμά καυσαέρια κατά το δεύτερο στάδιο (B) ξεκινούν να διαφεύγουν από την επάνω πλευρά του ανοίγματος.

Στη συνέχεια, κατά το τρίτο στάδιο (C), φρέσκος αέρας εισέρχεται από την κάτω πλευρά του ανοίγματος και στο ύψος διαχωρισμού των δύο στρωμάτων, θερμών καυσαερίων και ψυχρού αέρα, στο άνοιγμα δημιουργείται ένα ουδέτερο επίπεδο (neutral plane) όπου η διαφορά

2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ, ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Μορφοποίηση: Γραμματοσειρά: Verdana, 10 στ.

Διεύθυνση: 2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ

πίεσης είναι μηδενική. Λόγω της θερμικής άνωσης εμφανίζεται το φαινόμενο της θερμικής διαστρωμάτωσης (stratification).

Κατά το τέταρτο στάδιο (D), η δέσμη θερμών καυσαερίων καταλαμβάνει την οροφή και ο ψυχρός αέρας το κάτω μέρος του διαμερίσματος. Ανάμεσα στο άνω θερμό στρώμα και το κάτω ψυχρό στρώμα αναπτύσσεται ροή με έντονη ανακυκλοφορία. Η μετάβαση από το τρίτο στο τέταρτο στάδιο ονομάζεται και καθολική ανάφλεξη (flashover).

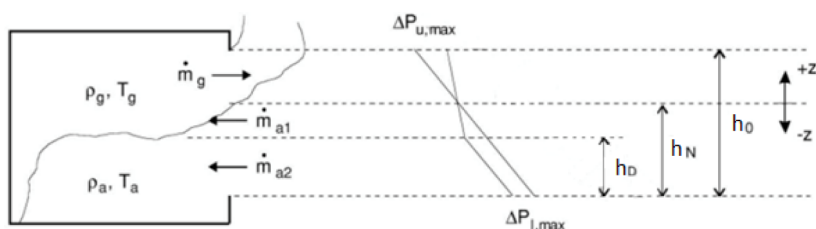
Η ροή μέσω ενός ανοίγματος και, κατ' επέκταση, η ταχύτητα του αέριου μίγματος καθορίζεται από τη διαφορά πιέσεων εκατέρωθεν του ανοίγματος. Η ροή έχει πάντα κατεύθυνση από την περιοχή υψηλής πίεσης προς την περιοχή χαμηλής πίεσης. Οι διαφορές πίεσης που παρατηρούνται κατά τη φωτιά σε διαμέρισμα οφείλονται κυρίως σε τρεις λόγους:

- **Διαφορά πίεσης λόγω θερμικής διαστολής των καυσαερίων.** Η θέρμανση ενός αερίου προκαλεί τη θερμική διαστολή του. Σε ένα κλειστό διαμέρισμα, το γεγονός αυτό οδηγεί στην αύξηση της πίεσης σε επίπεδα υψηλότερα της ατμοσφαιρικής.
- **Διαφορά πίεσης λόγω θερμικής άνωσης.** Η μεταβολή της θερμοκρασίας ενός αερίου προκαλεί την μεταβολή της πυκνότητάς του, με αποτέλεσμα την εμφάνιση διαφοράς πίεσης μεταξύ της θερμής (άνω) και της ψυχρής (κάτω) πλευράς του.
- **Διαφορά πίεσης λόγω διαφοράς θερμοκρασίας.** Οι διαφορετικές θερμοκρασίες στο εσωτερικό και το εξωτερικό του διαμερίσματος οδηγούν στην εμφάνιση διαφοράς πίεσης μεταξύ των δύο πλευρών του ανοίγματος.

Με στόχο την επίλυση των βασικών εξισώσεων διατήρησης σε ένα κλειστό χώρο χρησιμοποιούνται δύο μοντέλα ζωνών, το διζωνικό μοντέλο που αντιστοιχεί στο στάδιο πριν την καθολική ανάφλεξη (pre-flashover fire) και το μονοζωνικό μοντέλο που αντιστοιχεί στο στάδιο της πλήρους αναπτυγμένης φωτιάς (fully developed fire).

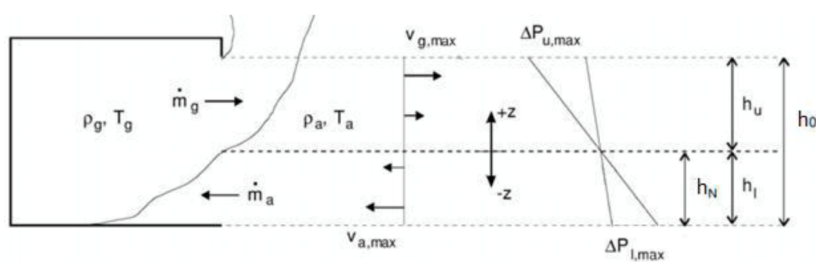
Διζωνικό μοντέλο: Το πυροδιαμέρισμα χωρίζεται σε δύο ζώνες όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.3.

- την άνω πλευρά, όπου υπάρχει η δέσμη οροφής θερμών καυσαερίων
- την κάτω πλευρά, την ζώνη εισερχόμενου ψυχρού αέρα.



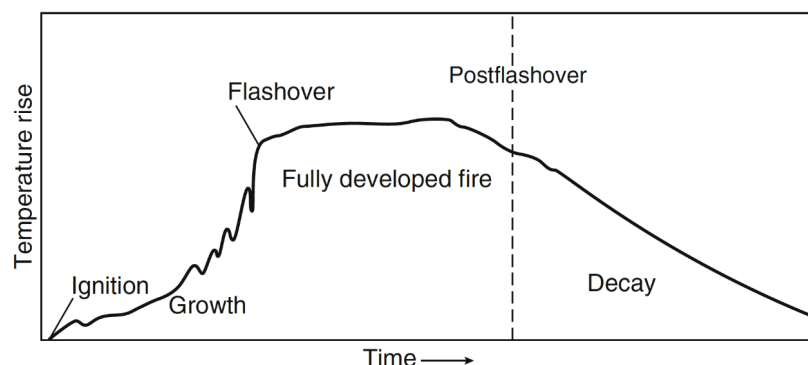
Σχήμα 2.3: Διζωνικό μοντέλο κατά την περίοδο προ καθολικής ανάφλεξης σε πυροδιαμέρισμα

Μονοζωνικό μοντέλο: Το διαμέρισμα χωρίζεται σε μία ζώνη (Σχήμα 2.4) καθώς θεωρείται ότι η δέσμη οροφής θερμών καυσαερίων καταλαμβάνει ολόκληρο το εσωτερικό του πυροδιαμερίσματος. 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. Η αντίδραση μεταξύ του αερίου καυσίμου και του εισερχόμενου αέρα γίνεται απείρως γρήγορα.



Σχήμα 2.4: Μονοζωνικό μοντέλο κατά το στάδιο πλήρους ανεπτυγμένης φωτιάς

2.1.2 Αναπτυσσόμενο θερμικό πεδίο



Σχήμα 2.5: Στάδια ανάπτυξης φωτιάς σε διαμέρισμα με κριτήριο την θερμοκρασία.

Συνήθως οι φωτιές σε διαμερίσματα μελετώνται με κριτήριο τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του διαμερίσματος συναρτήσει του χρόνου και ταξινομούνται σε πέντε στάδια σύμφωνα με τους Walton et al. (2016), το στάδιο ανάφλεξης, στάδιο ανάπτυξης, την καθολική ανάφλεξη, στάδιο πλήρους ανεπτυγμένης φωτιάς και το στάδιο απόσβεσης. Στο Σχήμα 2.5 απεικονίζεται μία εξιδανικευμένη μεταβολή της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο σε μία τυπική φωτιά σε διαμέρισμα. Τα στάδια είναι τα εξής:

- i. **Στάδιο ανάφλεξης (ignition)** : Η ανάπτυξη της φωτιάς σε διαμέρισμα εκκινεί κατά το στάδιο ανάφλεξης (ignition). Η θερμοκρασία ανάφλεξης - αυτανάφλεξης καθώς και η περιοχή αναφλεξιμότητας του καύσιμου υλικού εντός του διαμερίσματος καθορίζουν την ύπαρξη της ανάφλεξης.
- ii. **Στάδιο ανάπτυξης της φωτιάς (growth stage) ή στάδιο πριν την καθολική ανάφλεξη (pre-flashover)** : Κατά τη διάρκεια του σταδίου αυτού, η μέση θερμοκρασία εντός του διαμερίσματος είναι σχετικά χαμηλή. Ωστόσο, οι θερμοκρασίες κοντά στην οροφή αποκτούν υψηλές τιμές σε γρήγορο χρονικό διάστημα. Η φλόγα αυξάνεται σε μέγεθος και αναπτύσσεται δέσμη καυσαερίων στην οροφή, τα οποία εξέρχονται από το

πάνω μέρος του ανοίγματος. Τα χαρακτηριστικά της φωτιάς καθορίζονται από την ποσότητα των πυρολυτικών αερίων της καύσιμης ύλης και η φωτιά συνήθως χαρακτηρίζεται ως υπερ-αεριζόμενη (fuel controlled). Σε αυτό το σημείο υπάρχουν τρία πιθανά σενάρια εξέλιξης της φωτιάς:

- Η φωτιά σβένει, χωρίς την περαιτέρω καύση άλλων καυσίμων υλικών, ειδικά στην περίπτωση που η έναυση γίνεται σε απομονωμένη καύσιμη ύλη.
 - Εάν υπάρχει ανεπαρκής αερισμός, είναι δυνατόν να παρατηρηθεί σβέση ή καύση με πολύ αργό ρυθμό ανάλογα την διαθέσιμη ποσότητα οξυγόνου.
 - Σε συνθήκες επαρκούς αερισμού, η φωτιά μπορεί να εξαπλωθεί σε ολόκληρο το διαμέρισμα, με την ανάφλεξη όλων των καυσίμων υλών (flashover).
- iii. **Καθολική ανάφλεξη (flashover)** : Στην περίπτωση του τρίτου σεναρίου πραγματοποιείται απότομη ανάφλεξη της εκτεθειμένης επιφάνειας όλων των καυσίμων υλών που βρίσκονται στο εσωτερικό του διαμερίσματος. Η εμφάνιση της καθολικής ανάφλεξης (flashover) οφείλεται κυρίως στην θερμική ακτινοβολία από το θερμό στρώμα καυσαερίων στην οροφή προς την άκαυστη ύλη. Το φαινόμενο αυτό συνοδεύεται από την απότομη αύξηση της θερμοκρασίας, ρυθμού έκλυσης θερμότητας και παραγωγής καυσαερίων. Συνήθως, η καθολική ανάφλεξη αποτελεί και την μετάβαση από υπερ-αεριζόμενη (fuel controlled) σε υπο-αεριζόμενη (ventilation controlled) φωτιά. Αυτό δεν ισχύει στην περίπτωση που το καύσιμο είναι περιορισμένο και το διαμέρισμα υπερ-αερίζεται, όποτε και η φωτιά παραμένει υπερ-αεριζόμενη (fuel controlled).
- iv. **Στάδιο πλήρως ανεπτυγμένης φωτιάς (fully developed fire)** : Σε αυτό το στάδιο επιτυγχάνεται ο μέγιστος ρυθμός έκλυσης θερμότητας (Heat Release Rate) και η μέγιστη θερμοκρασία αερίου (τυπικά 700-1200 °C). Γίνεται ανάφλεξη όλων των καυσίμων υλών στο διαμέρισμα και οι φλόγες μπορεί να εξέλθουν από τα ανοίγματα του. Η διάρκεια του σταδίου αυτού εξαρτάται από την διαθέσιμη ποσότητα καυσίμου και οξυγόνου, την γεωμετρία του χώρου καθώς και την αντοχή των δομικών υλικών του διαμερίσματος.

- v. **Στάδιο απόσβεσης (decay)** : Κατά αυτό το στάδιο, ο ρυθμός καύσης μειώνεται σταδιακά λόγω εξάντλησης του καυσίμου. Η καύση μπορεί να συνεχιστεί σε μικρή ένταση για μεγάλο χρονικό διάστημα, διατηρώντας υψηλές θερμοκρασίες στο διαμέρισμα. Η φωτιά μπορεί να μετατραπεί σε υπερ-αεριζόμενη (fuel controlled) λόγω της μείωσης του διαθέσιμου καυσίμου.

Σε μία φωτιά σε διαμέρισμα η αναπτυσσόμενη φλόγα μεταφέρει θερμότητα σε γειτονικές επιφάνειες (τοιχώματα, οροφή, άλλα στερεά σώματα εντός του διαμερίσματος) κυρίως μέσω της συναγωγής και της ακτινοβολίας. Η θερμική ακτινοβολία παίζει κυρίαρχο ρόλο στην διαμόρφωση του θερμικού πεδίου και επηρεάζεται από την γεωμετρική διάταξη του χώρου, τα σωματίδια αιθάλης (καπνού), την θερμοκρασία καθώς και από το είδος των επιφανειών. Πηγές θερμικής ακτινοβολίας σε μια τυπική φωτιά σε διαμέρισμα είναι η φλόγα, τα θερμά καυσαέρια και οι θερμές επιφάνειες (τοιχώματα, καύσιμες ύλες).

2.2 Πρότυπες καμπύλες

2.2.1 Φυσική φωτιά

Μία τυπική φωτιά σε διαμέρισμα μπορεί να περιγράψει ποιοτικά σε πέντε βασικά στάδια, όπως αναφέρθηκαν και στην Παράγραφο 2.1.2. Ωστόσο, η εξέλιξη των θερμικών και ροϊκών φαινομένων μίας πραγματικής – φυσικής φωτιάς μπορεί να είναι απρόβλεπτη. Σε ερευνητικό επίπεδο έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για την μοντελοποίηση των φυσικών φωτιών, π.χ. Feasey and Buchanan (2002), Ma and Mäkeläinen (2000) και Barnett (2002), οι οποίες έχουν μικρό εύρος εφαρμογής λόγω της φύσης των πειραματικών αποτελεσμάτων τους.

Με σκοπό τον έλεγχο όλων των πιθανών σεναρίων μίας τυπικής φωτιάς σε διαμέρισμα και την δοκιμή της αντοχής δομικών υλικών στην φωτιά, έχουν δημιουργηθεί διάφορες «πρότυπες» καμπύλες θερμικής ισχύος-χρόνου και θερμοκρασίας – χρόνου. Οι καμπύλες αυτές έχουν ως βάση ένα σύνολο πειραματικών δοκιμών από τις οποίες, με κάποιες παραδοχές, έχουν προκύψει οι σχετικοί εμπειρικοί τύποι.

Μορφοποίηση: Γραμματοσειρά: Verdana, 10 στ.

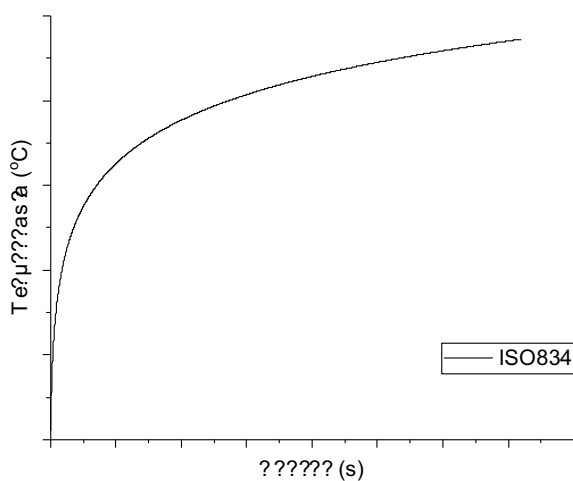
Διεύθυνση: 2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ

2.2.2 Καμπύλη ISO 834

Η ανάγκη για την ανάπτυξη κατασκευών ανθεκτικών στη φωτιά ώθησε τους ερευνητές να συλλέξουν δεδομένα από ένα σύνολο πυρκαγιών με σκοπό τον ορισμό μιας μεθοδολογίας για τη δοκιμή διαφόρων στοιχείων κατασκευής σε τυπικές συνθήκες φωτιάς. Έτσι δημιουργήθηκε το πρότυπο ISO 834 στις αρχές του 1930. Στα πλαίσια του προτύπου αυτού δημιουργήθηκε και η πρότυπη καμπύλη ISO 834 (Σχήμα 2.6), θερμοκρασίας - χρόνου ($T - t$), η οποία αναφέρεται στο στάδιο πλήρους ανεπτυγμένης φωτιάς (post flashover fire) και εκφράζεται μέσω της εμπειρικής Εξίσωσης (2.1), όπου T_g ($^{\circ}\text{C}$) η θερμοκρασία και t (min) ο χρόνος.

Διεύθυνση: (2.1)

$$T_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (2.1)$$



Σχήμα 2.6: Καμπύλη ISO 834

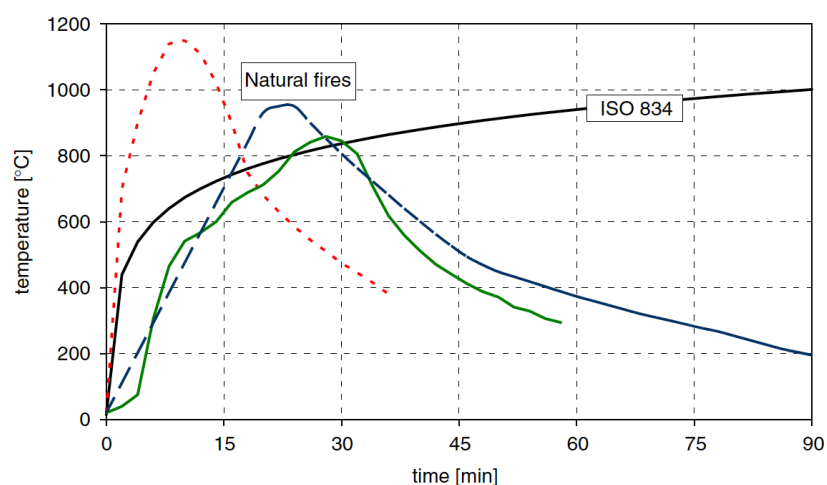
Η καμπύλη ISO 834 δεν λαμβάνει υπόψη την φάση απόσβεσης, την γεωμετρία του διαμερίσματος και των ανοιγμάτων, το καύσιμο καθώς και τις ιδιότητες των τοιχωμάτων. Δεδομένου ότι η θερμοκρασία

2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ, ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Μορφοποίηση: Γραμματοσειρά: Verdana, 10 στ.

Διεύθυνση: 2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ

ακολουθεί συνεχώς μία ανοδική πορεία, η καμπύλη φαίνεται να αποτελεί μία ασφαλή μέθοδο για τον προσδιορισμό όλων των πιθανών σεναρίων σε φωτιές σε συνήθεις κατασκευές. Ωστόσο, σύμφωνα με τους Zehlfuss and Hosser (2006), πειραματικές μελέτες έχουν δείξει ότι η μέγιστη θερμοκρασία μιας φυσικής φωτιάς μπορεί να ξεπεράσει την αντίστοιχη της ISO 834 για μικρά χρονικά διαστήματα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7.



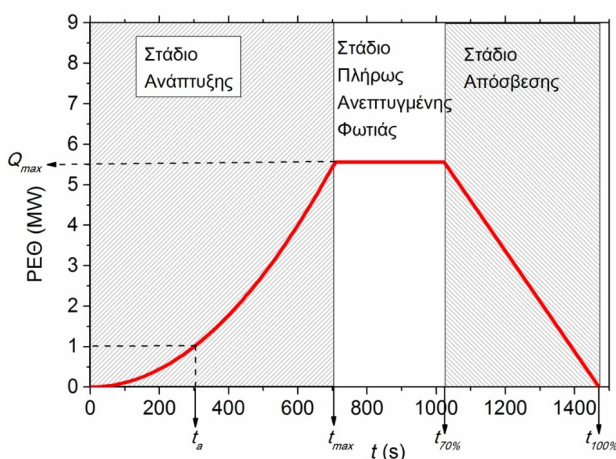
Σχήμα 2.7: Σύγκριση φυσικών φωτιών με την καμπύλη ISO 834, Zehlfuss and Hosser (2006)

2.2.3 Καμπύλες Ευρωκώδικα

Η επανεξέταση της μεθοδολογίας για την αντίσταση κατασκευών στη φωτιά στα πλαίσια της Ευρωπαϊκής Ένωσης, έγινε με τη δημοσίευση του προτύπου Eurocode 1: Actions on Structures – Part 1-2 (EN1991:1-2, 2002). Στα πλαίσια αυτού του προτύπου δημιουργήθηκαν διάφορες πρότυπες καμπύλες, οι οποίες χωρίζονται σε καμπύλες θερμικής ισχύος συναρτήσεως του χρόνου ($Q - t$) και καμπύλες θερμοκρασίας συναρτήσεως του χρόνου ($T - t$). Για την μελέτη της φωτιάς σε διαμέρισμα παρουσιάζονται δύο καμπύλες, η καμπύλη θερμικής ισχύος – χρόνου ($Q - t$) και η παραμετρική καμπύλη θερμοκρασίας χρόνου ($T - t$) όπως φαίνονται στα Σχήματα 2.8 και 2.9 αντίστοιχα.

2.2.3.1 Καμπύλη θερμικής ισχύος - χρόνου ($Q - t$)

Η καμπύλη θερμικής ισχύος - χρόνου (Παράρτημα Ε, EN 1991-1-2, 2002) περιγράφει την εξέλιξη του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (Heat Release Rate) και χωρίζεται σε τρία μέρη, καθένα από τα οποία αναφέρεται στα τρία βασικά στάδια (στάδιο ανάπτυξης, στάδιο πλήρως ανεπτυγμένης φωτιάς και στάδιο απόσβεσης) μιας τυπικής φωτιάς σε διαμέρισμα:



Σχήμα 2.8: Καμπύλη θερμικής ισχύος - χρόνου (Παράρτημα Ε, EN 1991-1-2, 2002)

1) Κατά το στάδιο ανάπτυξης ($t < t_{max}$) ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας ακολουθεί παραβολική πορεία και υπολογίζεται από την Εξίσωση (2.2)

Διέγγραψε: (2.2)

$$\dot{Q} = 10^6 \left(\frac{t}{t_a} \right)^2 \quad (2.2)$$

Όπου:

- \dot{Q} (W): Ρυθμός έκλυσης θερμότητας
- t (s): Χρόνος

2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ, ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

- t_a (s): Χρόνος έως την επίτευξη ρυθμού έκλυσης θερμότητας 1 MW (Πίνακας 2.1)

Πίνακας 2.1: Ρυθμός ανάπτυξης φωτιάς και μέγιστη ανηγμένη θερμορροή για διαφορετικές χρήσεις κλειστών χώρων, χρόνου (Παράρτημα Ε, EN 1991-1-2, 2002)

Χρήση	t_a (s)	RFR _f (W / m ²)
Κατοικία	300	250.000
Νοσοκομείο	300	250.000
Ξενοδοχείο	300	250.000
Βιβλιοθήκη	150	500.000
Γραφείο	300	250.000
Σχολική αίθουσα	300	250.000
Εμπορικό κέντρο	150	250.000
Θέατρο	150	500.000

2) Στο δεύτερο στάδιο ($t_{\max} < t < t_{70\%}$), όπου η φωτιά είναι πλήρως ανεπτυγμένη, η θερμική ισχύς προσδιορίζεται μέσω της Εξίσωσης (2.3).

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{\max} \quad (2.3)$$

Η μεταβλητή \dot{Q}_{\max} και υπολογίζεται από την Εξίσωση (2.4):

$$\dot{Q}_{\max} = \text{RFR}_f \cdot A_f \quad (2.4)$$

Όπου:

- RFR_f (W/m²): Μέγιστη ανηγμένη θερμορροή στο δάπεδο
- A_f (m²): Εμβαδόν δαπέδου
- t_{\max} (s) : Χρόνος έως την επίτευξη μέγιστου ρυθμού έκλυσης θερμότητας, οποίος υπολογίζεται από την Εξίσωση (2.5).

Μορφοποίηση: Γραμματοσειρά: Verdana, 10 στ.

Διέγραψε: 2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ

Διέγραψε: (2.3)

Διέγραψε: (2.5)

2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ, ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Μορφοποίηση: Γραμματοσειρά: Verdana, 10 στ.

Διεύθυνση: 2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ

$$t_{\max} = t_a \sqrt{\frac{\dot{Q}_{\max}}{10^6}} \quad (2.5)$$

3) Στο στάδιο απόσβεσης ($t > t_{70\%}$) η καμπύλη της θερμικής ισχύος ακολουθεί γραμμική πορεία και υπολογίζεται από την Εξίσωση (2.6):

Διεύθυνση: (2.6)

$$\dot{Q} = \frac{\dot{Q}_{\max}}{t_{70\%} - t_{100\%}} (t - t_{100\%}) \quad (2.6)$$

Όπου:

- $t_{70\%}$ (s): Χρόνος έως την κατανάλωση του 70% του πυροθερμικού φορτίου
- $t_{100\%}$ (s): Χρόνος έως την πλήρη κατανάλωση του πυροθερμικού φορτίου

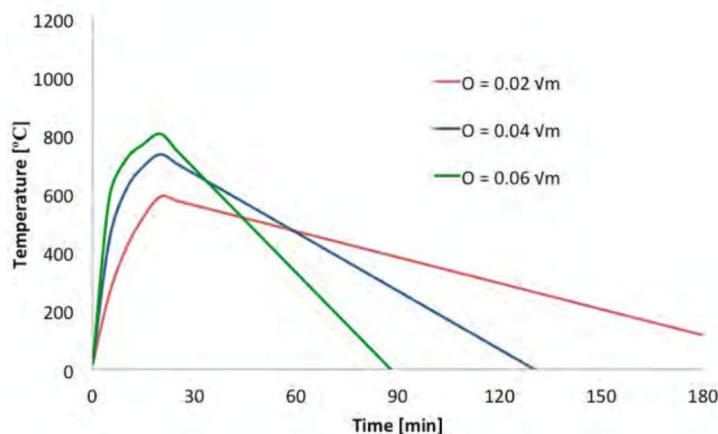
2.2.3.2 Παραμετρική καμπύλη θερμοκρασίας - χρόνου ($T - t$)

Οι Magnusson et al. (1970) δημοσίευσαν μία σειρά καμπυλών θερμοκρασίας - χρόνου, οι οποίες περιγράφουν την εξέλιξη της θερμοκρασίας στις φυσικές φωτιές στο πλαίσιο των αρχών διατήρησης της μάζας και της ενέργειας. Οι καμπύλες αυτές, γνωστές και ως Swedish Curves, αργότερα αποτέλεσαν τη βάση για την παραμετρική καμπύλη θερμοκρασίας - χρόνου που αναλύεται στο Παράρτημα Α (Annex A) του πρότυπου EN 1991-1-2 (2002). Η καμπύλη διακρίνεται σε δύο μέρη (Σχήμα 2.9), το στάδιο θέρμανσης (πλήρως ανεπτυγμένης φωτιάς) και αυτό της ψύξης (απόσβεσης).

2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ, ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Διέγγραψε: 2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ

Μορφοποίηση: Γραμματοσειρά: Verdana, 10 στ.



Σχήμα 2.9: Παραμετρική καμπύλη θερμοκρασίας – χρόνου για τρεις διαφορετικούς συντελεστές ανοίγματος O.

- Κατά το στάδιο θέρμανσης ($t < t_{max}$), η καμπύλη περιγράφεται από την Εξίσωση (2.7):

$$T_g = 20 + 1325 \cdot (1 - 0,324 \cdot e^{-0,2t^*} - 0,204 \cdot e^{-1,7t^*} - 0,472 \cdot e^{-19t^*}) \quad (2.7)$$

Η μεταβλητή t^* (hr) συμβολίζει τον τροποποιημένο χρόνο και υπολογίζεται από την Εξίσωση (2.8):

$$t^* = 8,41 \cdot 10^8 \cdot \frac{A_o^2 \cdot H_o}{A_t^2 \cdot \rho k c_p} \quad (2.8)$$

Όπου:

- $A_o (m^2)$: Συνολικό εμβαδόν ανοιγμάτων
- $A_t (m^2)$: Συνολικό εμβαδόν των εσωτερικών επιφανειών
- $H_o (m)$: Μέσο ύψος ανοιγμάτων
- $\rho (kg / m^3)$: Πυκνότητα των τοιχωμάτων
- $k (W / m \cdot K)$: Θερμική συναγωγιμότητα τοιχωμάτων
- $c_p (J / kg \cdot K)$: Ειδική θερμοχωρητικότητα τοιχωμάτων

Μορφοποίηση: Ελληνικά

Μορφοποίηση: Ελληνικά

Αλλαγή κωδικού πεδίου

Μορφοποίηση: Ελληνικά

2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ, ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

- Η μέγιστη θερμοκρασία καυσαερίων $T_{g,max}$ η οποία επιτυγχάνεται τη χρονική στιγμή $t = t_{max}$, υπολογίζεται από την Εξίσωση (2.9):

$$T_{g,max} = 20 + 1325 \left(1 - 0,324 \cdot e^{-0,2t_{max}^*} - 0,204 \cdot e^{-1,7t_{max}^*} - 0,472 \cdot e^{-19t_{max}^*} \right) \quad (2.9)$$

Όπου t_{max}^* (hr) είναι ο τροποποιημένος χρόνος επίτευξης της μέγιστης θερμοκρασίας, ο οποίος υπολογίζεται από την Εξίσωση (2.10):

$$t_{max}^* = 168200 \cdot \frac{Q_t'' A_o \sqrt{H_o}}{\rho k c_p A_t} \quad (2.10)$$

Όπου: Q_t'' (MJ / m²) η πυκνότητα πυροθερμικού φορτίου ανηγμένη στην A_t

- Η καμπύλη στη συνέχεια ακολουθεί γραμμική πτωτική πορεία, η οποία περιγράφεται σύμφωνα με την Εξίσωση (2.11).

$$T_g = \begin{cases} T_{g,max} - 625(t^* - t_{max}^*), & t_{max}^* \leq 0,5 \\ T_{g,max} - 250(3 - t_{max}^*)(t^* - t_{max}^*), & 0,5 \leq t_{max}^* \leq 2 \\ T_{g,max} + 250(t^* - t_{max}^*), & t_{max}^* \geq 2 \end{cases} \quad (2.11)$$

Η παραμετρική καμπύλη θερμοκρασίας – χρόνου, σε ορισμένες περιπτώσεις (Schleich et al., 2000) παρέχει μία μη ρεαλιστική αύξηση και μείωση της θερμοκρασίας. Επιπλέον, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η παραμετρική καμπύλη θερμοκρασίας – χρόνου (Παράρτημα Α, EN 1991-1-2, 2002) δεν έχει χρονική σχέση με την καμπύλη θερμικής ισχύος – χρόνου (Παράρτημα Ε, EN 1991-1-2, 2002), καθώς η επίτευξη μέγιστης θερμοκρασίας μπορεί να διαφέρει σημαντικά όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.10 (Zehfuss and Hosser, 2006).

Διέγραψε: 2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ

Μορφοποίησης: Γραμματοσειρά: Verdana, 10 στ.

Διέγραψε: (2.9)

Διέγραψε: (2.10)

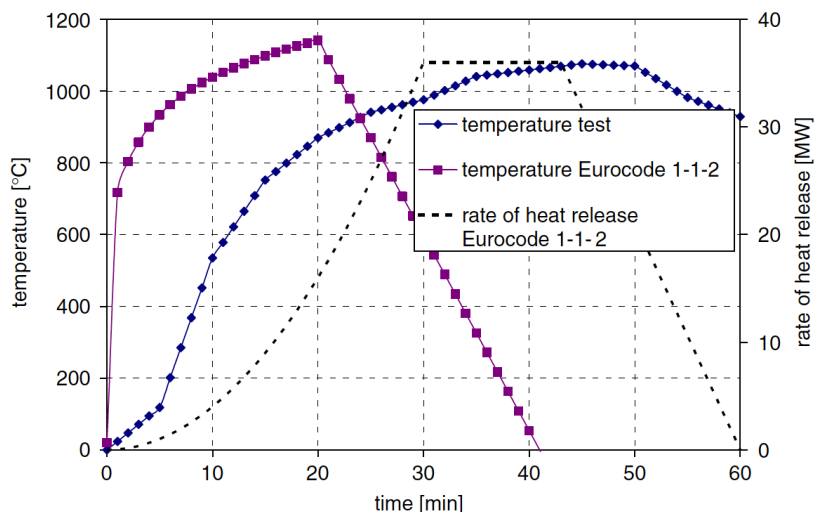
Μορφοποίησης: Ελληνικά, Χωρίς ορθογραφικό ή γραμματικό έλεγχο

Διέγραψε: 11

Αλλαγή κωδικού πεδίου

Μορφοποίησης: Ελληνικά, Χωρίς ορθογραφικό ή γραμματικό έλεγχο

Διέγραψε: 2



Σχήμα 2.10: Σύγκριση φυσικής φωτιάς με τις καμπύλες του Ευρωκώδικα 1-Μέρος 1-2, Zehlfuss and Hosser (2006).

2.3 Νόμοι ομοιότητας

Οι φωτιές που εκδηλώνονται σε κτίρια, συμβαίνουν σε φυσική κλίμακα, συνεπώς οι πειραματικές δοκιμές σε κλίμακα 1:1 (μεγάλης κλίμακας) αποφέρουν περισσότερο αληθοφανή αποτελέσματα όσον αφορά την εκτίμηση του θερμικού και ροϊκού πεδίου μιας φωτιάς σε διαμέρισμα. Ωστόσο, τα πειράματα μεγάλης κλίμακας έχουν υψηλό κόστος, χρόνο εκτέλεσης και εγκυμονούν κινδύνους. Για τους παραπάνω λόγους, η μελέτη των φαινομένων αυτών σε συστήματα υπό κλίμακα με ελεγχόμενες συνθήκες αποτελεί όλο και συχνότερο φαινόμενο στην ερευνητική κοινότητα. Οι πειραματικές δοκιμές υπο κλίμακα μπορούν να δώσουν μία αρκετά καλή εικόνα για τους μηχανισμούς και τη συμπεριφορά της φωτιάς ακόμα και αν δεν εξαχθούν ακριβή ποσοτικά αποτελέσματα.

Η μεθοδολογία για τη μοντελοποίηση των φαινομένων φωτιάς αναλύεται από τον Quintiere (2006), ο οποίος σύμφωνα με την θεωρία των Π του Buckingham, εξάγει από τις εξισώσεις διατήρησης αδιάστατες ομάδες. Με αυτές τις αδιάστατες ομάδες (μεταβλητές) μπορούν να δημιουργηθούν προσεγγιστικές σχέσεις, με τη χρήση

2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ, ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Μορφοποίηση: Γραμματοσειρά: Verdana, 10 στ.

Διέγραψε: 2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ

νόμων και ισολογισμών ενέργειας, με στόχο τη διευκόλυνση της μοντελοποίησης της φωτιάς και των φαινομένων που την αποτελούν. 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 σταθερές όλες οι παράμετροι των Π.

Οι αδιάστατες ομάδες που εφαρμόζονται στα φαινόμενα της φωτιάς, δημιουργούνται χρησιμοποιώντας τις διαστατές μορφές των εξισώσεων διατήρησης. Η πυκνότητα θεωρείται σταθερή, ρ_∞ , χωρίς καμία απώλεια σε γενικά πλαίσια, εκτός από τον όρο της άνωσης. Οι παράμετροι κανονικοποίησης για τις μεταβλητές συμβολίζονται ως $()^*$. Σε ορισμένες περιπτώσεις οι κανονικοποιημένοι παράγοντες δεν αποτελούν το φυσικό ισοδύναμο της αντίστοιχης μεταβλητής, π.χ. x/l όπου το l είναι το γεωμετρικό μήκος. Κατά αυτόν τον τρόπο εξάγονται οι ομάδες Π και οι αδιάστατες μεταβλητές διατηρούνται, π.χ. $\hat{u} = u/u^*$, $\hat{x} = x/l^*$. Αφού προκύψουν οι ομάδες $\{\Pi\}_i$ εξετάζεται η χρήση τους σε διάφορες συσχετίσεις, και η χρησιμότητά τους σε εφαρμογές μοντελοποίησης μικρής κλίμακας.

2.3.1 Ομοιότητα διαστάσεων

Βασική επιδίωξη στις πειραματικές δοκιμές υπό κλίμακα είναι η διατήρηση της θερμοκρασίας σε όμοια σημεία κατά την ανάλυση σε γεωμετρικά όμοια συστήματα. Οι διαστάσεις ενός όμοιου σημείου (x,y,z) αποτελούν μία ανεξάρτητη μεταβλητή και η αδιαστατοποίηση τους γίνεται μέσω της Εξίσωσης (2.12):

Διέγραψε: (2.12)

$$\hat{x} = \frac{x}{l} \quad (2.12)$$

όπου πρακτικά ισχύει: $x \sim l$

Από την αρχή διατήρησης της ενέργειας, Εξίσωση (2.22), αν όλες οι απώλειες θερμότητας θεωρηθούν ανάλογες του $l^{5/2}$, τότε για τη θερμοκρασία ισχύει $T \sim l^0$. Αυτό υποδεικνύει πως η θερμοκρασία είναι ανεξάρτητη από τις φυσικές διαστάσεις της κλίμακας και δεν επηρεάζεται από αυτή.

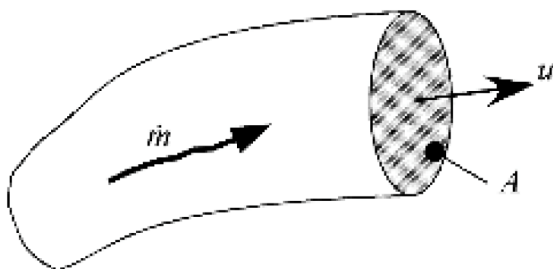
Διέγραψε: (2.22)

Διατήρηση της μάζας

Ο ρυθμός ροής μάζας δίνεται από την Εξίσωση (2.13) και απεικονίζεται στο Σχήμα 2.11.

$$\dot{m} = \rho u A \quad (2.13)$$

Στο πλαίσιο αυτό, η επιφάνεια A προσδιορίζεται με βάση τη μονάδα κλίμακας l , ως $A \sim l^2$ και ο όγκος, ομοίως, ως $V \sim l^3$.



Σχήμα 2.11: Ρυθμός ροής της μάζας

2.3.2 Ομοιότητα χρόνου

Η μεταβλητή του χρόνου αποτελεί μία ανεξάρτητη μεταβλητή όπως και η μεταβλητή του μήκους.

Διατήρηση της ορμής

Η διατήρηση της ορμής, ή αλλιώς ο 2ος Νόμος του Νεύτωνα, εφαρμόζεται σε ένα σωματίδιο ή σε ένα σταθερό σύνολο σωματιδίων, που καλείται σύστημα. Η ταχύτητα ορίζεται πάντα σε σχέση με ένα

2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ, ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

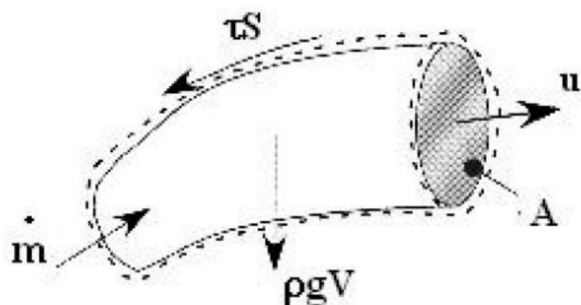
σταθερό ή αδρανειακό επίπεδο αναφοράς. Ισχύει λοιπόν η Εξίσωση (2.14), όπου F είναι το διανυσματικό σύνολο των δυνάμεων που ασκούνται στο σύστημα και u η ταχύτητα του συστήματος.

$$F = \frac{d(mu)}{dt} \quad (2.14)$$

Ο 2ος Νόμος του Νεύτωνα, με βάση έναν ορισμένο όγκο ελέγχου (CV) και ορίζοντας ως u_x την συνιστώσα της ταχύτητας κατά τον άξονα x , εφαρμόζεται μέσω της Εξίσωσης (2.15):

$$\sum F_x = \frac{d}{dt} \iiint_{CV} \rho u_x dV + \iint_{CS} \rho u_x (u - W) dS \quad (2.15)$$

Στο Σχήμα 2.12 απεικονίζεται ο όγκος ελέγχου με τις δυνάμεις του βάρους $\rho g V$ και τις διατμητικές δυνάμεις τ_s που ασκούνται στο ρευστό.



Σχήμα 2.12: Διατήρηση της ορμής

Με την εισαγωγή των δυνάμεων αυτών και της πίεσης, η σχέση για τη διατήρηση της ορμής κατά τον κάθετο άξονα εκφράζεται από την Εξίσωση (2.16).

Διέγραψε: 2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ

Μορφοποίησε: Γραμματοσειρά: Verdana, 10 στ.

Διέγραψε: (2.14)

Διέγραψε: (2.15)

Διέγραψε: (2.16)

2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ, ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Μορφοποίηση: Γραμματοσειρά: Verdana, 10 στ.

Διέγραψε: 2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ

$$\rho V \frac{du}{dt} + \dot{m}u \sim (\rho_\infty - \rho)gV + \rho A + \tau_s \quad (2.16)$$

Η σχέση μεταξύ των όρων της Εξίσωσης (2.16) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κανονικοποίηση παραμέτρων. Η Εξίσωση (2.17) εκφράζει τη συσχέτιση της ροής της ορμής με την ανωστική δύναμη.

$$\rho u^2 l^2 \sim (\rho_\infty - \rho)g l^3 \quad (2.17)$$

Από το νόμο των τέλειων αερίων υπό σταθερή πίεση προκύπτει η Εξίσωση (2.18).

$$\frac{\rho_\infty - \rho}{\rho} = \frac{T_\infty - T}{T} \quad (2.18)$$

Επομένως, αντικαθιστώντας την Εξίσωση (2.18) στην Εξίσωση (2.17), προκύπτει η Εξίσωση (2.19):

Διέγραψε: (2.19)

$$u \sim \sqrt{\frac{T - T_\infty}{T_\infty} g l} \sim \sqrt{g l} \quad (2.19)$$

Μορφοποίηση: Ελληνικά, Χωρίς ορθογραφικό ή γραμματικό έλεγχο

Διέγραψε: 2

Μορφοποίηση: Ελληνικά, Χωρίς ορθογραφικό ή γραμματικό έλεγχο

Διέγραψε: 19

Ένας κατάλληλος παράγοντας κανονικοποίησης για την ταχύτητα υπολογίζεται από την Εξίσωση (2.20):

$$u^* = \sqrt{g l} \quad (2.20)$$

Ομοίως, εξισώνοντας τον όρο της ορμής με την άνωση προκύπτει η χρονοκλίμακα, η οποία δίνεται από την Εξίσωση (2.21):

Διέγραψε: (2.21)

$$t^* \sim \frac{u^*}{g} \sim \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (2.21)$$

2.3.3 Ομοιότητα θερμικής ισχύος

Εξίσωση της ενέργειας

Για την εξαγωγή της αδιάστατης ομάδας του ρυθμού έκλυσης θερμότητας χρησιμοποιείται η εξίσωση ενέργειας στην οποία λαμβάνουν μέρος διαδικασίες όπως η καύση, η μεταφορά θερμότητας κ.α. Το Σχήμα 2.13 αποτελεί τη βάση των φυσικών και χημικών διεργασιών που λαμβάνονται υπόψη. Η παροχή μάζας περιλαμβάνει καύσιμο (F), οξυγόνο (O₂), νερό (I), υδρατμούς (g) και εξαναγκασμένη ροή (fan). Η χημική ενέργεια ή η θερμική ισχύς της φωτιάς συμβολίζεται ως \dot{Q} και οι απώλειες θερμότητας ως \dot{Q}_l . Μία γενική έκφραση της διατήρησης της ενέργειας σε έναν όγκο ελέγχου δίνεται στην Εξίσωση (2.22).

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \iiint_{CV} \left[\left(\sum_{i=1}^N \rho_i \int_{25^\circ C}^T c_{pi} dT \right) - P \right] dV + \iint_{CS} \left(\sum_{i=1}^N \rho_i \int_{25^\circ C}^T c_{pi} dT \right) (u + V_i - w) \cdot n dV = \\ = - \iint_{CS} \dot{q}'' \cdot n dS + \Delta h_c \iiint_{CV} m''' D dV - \dot{W}_s - \iint_{CS} P w \cdot n dS \end{aligned} \quad (2.22)$$

Όπου:

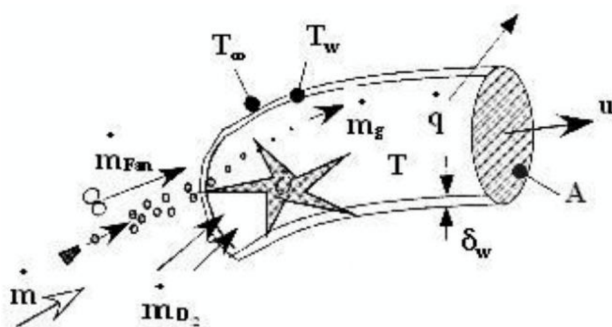
- u (m / s): Η ταχύτητα του μίγματος
- w (m / s): Η ταχύτητα στην επιφάνεια του όγκου ελέγχου
- V_i (m / s): Οι ταχύτητες διάχυσης
- \dot{q}'' (W / m²): Η θερμοροή ανά μονάδα εμβαδού
- \dot{m}_F''' (kg / s · m³): Παροχή μάζας του καυσίμου που καταναλώνεται ανά μονάδα όγκου
- Δh_c (J / kg): Η θερμογόνο δύναμη
- \dot{W}_s (W): Το αξονικό έργο και το έργο λόγω διάτμησης

2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ, ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Διέγραψε: 2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ

Μορφοποίηση: Γραμματοσειρά: Verdana, 10 στ.

- c_{pi} (J / kg · K): Η ειδική θερμοχωρητικότητα



Σχήμα 2.13: Διατήρηση της ενέργειας

Μία σειρά από απλουστεύσεις καθιστούν την Εξίσωση (2.22) πιο πρακτική και εύχρηστη στις διάφορες εφαρμογές. Για σταθερή τιμή της ειδικής θερμοχωρητικότητας για όλα τα συστατικά, ανεξάρτητη της θερμοκρασίας, για τέλειο αέριο και για ομοιόμορφη ροή στην επιφάνεια του όγκου ελέγχου η Εξίσωση (2.22) λαμβάνει τη μορφή της Εξίσωσης (2.23).

Διέγραψε: (2.22)

Διέγραψε: (2.22)

Διέγραψε: (2.23)

$$c_p \frac{d}{dt} (mT) - V \frac{dP}{dt} + \sum_{j,net,out} \dot{m}_j c_p T_j = \dot{m}_{F,reacted} \Delta h_c + \dot{Q} - \dot{W}_s \quad (2.23)$$

Η εξίσωση διατήρησης της μάζας, Εξίσωση (2.13), πολλαπλασιαζόμενη με το γινόμενο $c_p T$ δίνει την Εξίσωση (2.24):

$$c_p T \frac{dm}{dt} + \sum_{j,net,out} \dot{m}_j c_p T_j = 0 \quad (2.24)$$

Αφαιρώντας την Εξίσωση (2.24) από την Εξίσωση (2.23) προκύπτει τελικά η Εξίσωση (2.25):

2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ, ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

$$c_p m \frac{dT}{dt} - V \frac{dP}{dt} + \sum_{j, \text{net}, \text{out}} \dot{m}_j c_p (T - T_j) = \dot{m}_{F, \text{reacted}} \Delta h_c + \dot{Q} - \dot{W}_{\text{shaft}} \quad (2.25)$$

Η T θεωρείται ομοιόμορφη θερμοκρασία στον όγκο ελέγχου. Η ανάπτυξη των κύριων εξισώσεων που διέπουν τα μοντέλα ζώνης σε φαινόμενα φωτιάς εντός διαμερίσματος, βασίζονται στις προαναφερθείσες παραδοχές. Με βάση την Εξίσωση (2.25), για την κανονικοποίηση των παραμέτρων χρησιμοποιείται η Εξίσωση (2.26):

$$\rho c_p V \frac{dT}{dt} + \dot{m} c_p (T - T_\infty) \sim \dot{Q} - \dot{q} - \dot{m}_w h_{fg} \quad (2.26)$$

Ο τελευταίος όρος αντιστοιχεί στο ρυθμό ενέργειας που απαιτείται για την εξάτμιση των σταγονιδίων νερού. Συσχετίζοντας τον όρο ενέργεια (ρυθμός ενθαλπίας) με τη θερμική ισχύ, προκύπτει μία αδιάστατη ομάδα Π , η οποία είναι ευρέως διαδεδομένη με το σύμβολο Q^* ή αριθμός Zukoski και δίνεται από την Εξίσωση (2.27):

$$Q_i^* \equiv \Pi_2 = \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g l}^{5/2}} = \frac{\text{Θερμική ισχύς}}{\text{Ρυθμός ροής ενθαλπίας}} \quad (2.27)$$

Όπου το Q_i^* βασίζεται στη μονάδα μήκους l .

Διέγραψε: 2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ

Μορφοποίηση: Γραμματοσειρά: Verdana, 10 στ.

Διέγραψε: (2.25)

Διέγραψε: (2.26)

Διέγραψε: (2.27)

3. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

3.1 Πειραματικές μελέτες

Η μελέτη της φωτιάς σε διαμέρισμα ξεκίνησε την δεκαετία του 1960, με την δεκαετία του 1980 να αποτελεί την αρχή του έντονου ενδιαφέροντος ερευνητών. Η μελέτη των ροϊκών και θερμικών φαινομένων της φωτιάς σε διαμέρισμα σε κλίμακα 1:1 είναι προτιμότερη. Ωστόσο, η μελέτη της φωτιάς σε διαμέρισμα υπό κλίμακα την καθιστά πιο προσιτή σε ένα μεγαλύτερο πλήθος ερευνητών.

3.1.1 Μελέτες μεγάλης κλίμακας



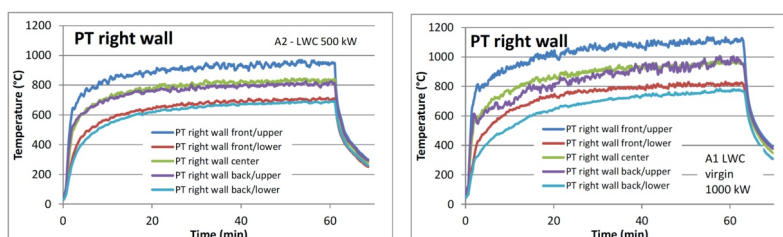
Σχήμα 3.1: Απεικόνιση κατάρρευσης στοίβας ξύλινων δοκιμών (Moinuddin et al., 2011).

Οι πειραματικές δοκιμές πραγματικής κλίμακας αποτελούν τον ιδανικότερο τρόπο προσομοίωσης μίας φωτιάς σε διαμέρισμα. Οι διαστάσεις των διαμερισμάτων επιλέγονται ανάλογα την φύση των πειραματικών δοκιμών. Όταν το καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι αέριο (τεχνητή φωτιά με καυστήρα) τότε συνήθως επιλέγεται η γεωμετρία του διαμερισματος του προτύπου ISO 9705 (ISO 9705-1,

2016), π.χ. Bryant (2009), Bryant and Mulholland (2008). Σε περιπτώσεις όπου το καύσιμο είναι ξύλινα δοκίμια και άλλη καύσιμη ύλη, κατασκευάζονται διαμερίσματα με μεγαλύτερες διαστάσεις (Horkin et al., 2011), με σκοπό την αποφυγή σεναρίων όπως στο Σχήμα 3.1, με περισσότερους από έναν ορόφους (Wald et al., 2009) ή με περισσότερα από ένα δωμάτια στο ίδιο επίπεδο όπως τα πειράματα των Poulsen et al. (2013) και Melcher et al. (2016).

3.1.1.1 Μελέτες τεχνητής φωτιάς (χρήση καυστήρα) σε μεγάλη κλίμακα

Ένα πλήθος μελετητών χρησιμοποίησαν αέρια καύσιμα για τους πειραματικές δοκιμές φωτιάς. Στα πειράματα αυτά το αέριο καύσιμο διοχετεύεται στο διαμέρισμα με σταθερή παροχή και κατ' επέκταση η ισχύς της φωτιάς είναι σταθερή. Φωτιές με υψηλότερο ρυθμό έκλυσης θερμότητας (HRR) αναπτύσσουν μεγαλύτερες θερμοκρασίες αερίου μείγματος, ανοίγματος και τοιχωμάτων σύμφωνα τους Dembsey et al. (1995), Steckler et al. (1982), Sjöström et al. (2016) (Σχήμα 3.2) και μεγαλύτερες ταχύτητες στο άνοιγμα σύμφωνα με τον Bryant (2009, 2011).



Σχήμα 3.2: Μετρούμενες θερμοκρασίες κοντά στην εκτεθειμένη επιφάνεια ενός πλαϊνού τοιχώματος για 500kW (αριστερά) και 1000kW (δεξιά), (Sjöström et al., 2016).

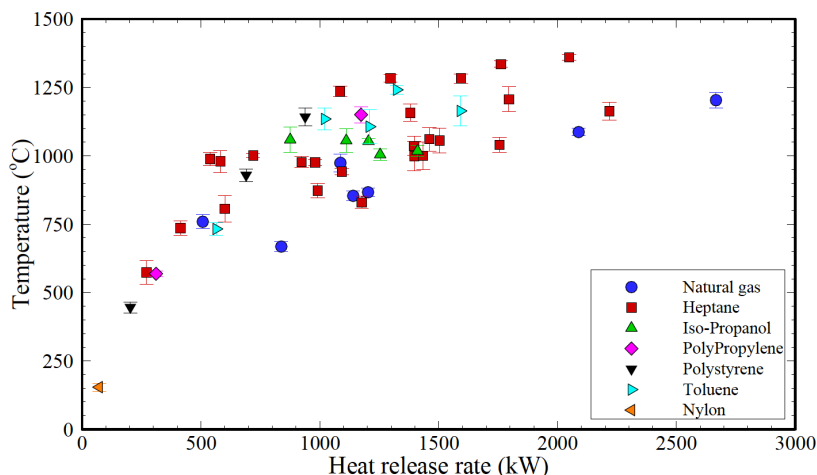
Η επίδραση της θέσης του καυστήρα εξερευνήθηκε από τους Dembsey et al. (1995), οι οποίοι βρήκαν πως η θέση του καυστήρα επηρεάζει τις θερμοκρασίες οροφής (ceiling jet temperatures) και τους συντελεστές συναγωγής και ακτινοβολίας αλλά οι θερμοκρασίες των εκτεθειμένων στη φλόγα επιφανειών μένουν ανεπηρέαστες (Sjöström

et al.,2016). Η θέση του καυστήρα επηρεάζει την παροχή μάζας εισερχόμενου αέρα στο διαμέρισμα σύμφωνα με Steckler et al. (1982).

3.1.1.2 Μελέτες φυσικής φωτιάς σε μεγάλη κλίμακα

Οι "φυσικές" φωτιές αναφέρονται συνήθως στην φυσική ή υποβοηθούμενη ανεξέλεγκτη καύση υγρών ή στερεών καυσίμων, η οποία οδηγεί σε χρονικά μεταβαλλόμενη εξέλιξη της θερμικής ισχύος της φωτιάς. Το καύσιμο σε τέτοιες φωτιές μπορεί να είναι μία υγρή κηλίδα υγρού καυσίμου (pool fires), στοίβες ξύλου (wood crib fires) ή οποιοδήποτε άλλο στερεό υλικό.

Σύμφωνα με τους Himoto et al. (2009), Hwang (2011), Lock et al. (2008) και Parkes (2008) η θέση πηγής της φωτιάς και ο διαμοιρασμός του καυσίμου δεν επηρεάζει τον ρυθμό έκλυσης θερμότητας (Heat Release Rate - HRR) πράγμα που οι Poulsen et al. (2012) και Moinneddin et al. (2011) δεν επιβεβαιώνουν για μεγαλύτερης ισχύος φωτιές. Οι Himoto et al. (2009), Hwang (2011), Parkes (2008) και Lock et al. (2008) συμπεραίνουν επιπλέον ότι η θέση της φωτιάς επηρεάζει τον ρυθμό κατανάλωσης καυσίμου, τις εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα (CO) εξωτερικά του διαμερίσματος, τον λόγο αερισμού και τον βαθμό απόδοσης της καύσης. Οι τελευταίοι αναφέρουν ότι ο τύπος των καυσίμων επηρεάζει την θερμοκρασία στο διαμέρισμα (Σχήμα 3.3).

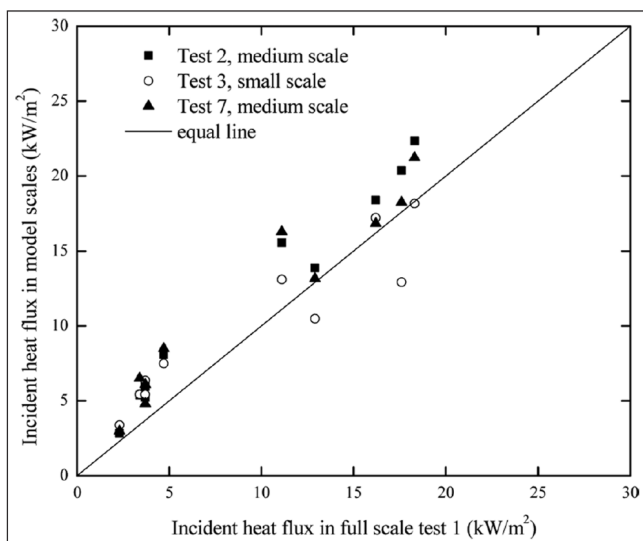


Σχήμα 3.3: Θερμοκρασίες διαμερίσματος συναρτήσει του ρυθμού έκλυσης θερμότητας για διάφορους τύπους καυσίμων.

Ο Parkes (2008), Lock et al. (2008), Hwang et al. (2010) δείχνουν ότι ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας (ΡΕΘ) επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τον συντελεστή αερισμού, πράγμα που απορρίπτει ο Chow (2013). Οι Parkes (2008) και Hwang et al. (2010) αναλύουν ότι το σχήμα της φλόγας, ο ρυθμός κατανάλωσης καυσίμου, οι θερμοκρασίες αερίου καθώς και οι συνθήκες μετά την καθολική ανάφλεξη εξαρτώνται από το συντελεστή ανοίγματος.

3.1.2 Μελέτες μικρής κλίμακας

Η μελέτη των φαινομένων φωτιάς υπο κλίμακα σε ένα εργαστήριο είναι ικανή να δώσει μία επαρκή εικόνα για τους μηχανισμούς και τη συμπεριφορά του συστήματος ακόμα και αν δεν εξαχθούν ακριβή ποσοτικά αποτελέσματα (Quintiere, 1989). Οι Li and Hertzberg (2015) πραγματοποίησαν πειράματα σε κλίμακες 1/2 και 1/3,5 του διαμερίσματος ISO 9705. Παρατήρησαν ότι οι μετρούμενες θερμοκρασίες τοιχωμάτων, θερμοροή (Σχήμα 3.4), ταχύτητες και συγκεντρώσεις των αερίων στο διαμέρισμα είναι υψηλότερες στις πειραματικές δοκιμές υπό κλίμακα.



Σχήμα 3.4: Σύγκριση τιμών θερμορροής στα τοιχώματα σε μικρές, μεσαίες και μεγάλης κλίμακας φωτιές. (Li and Hertzberg, 2015)

3.1.2.1 Μελέτες τεχνητής φωτιάς (χρήση καυστήρα) σε μικρή κλίμακα

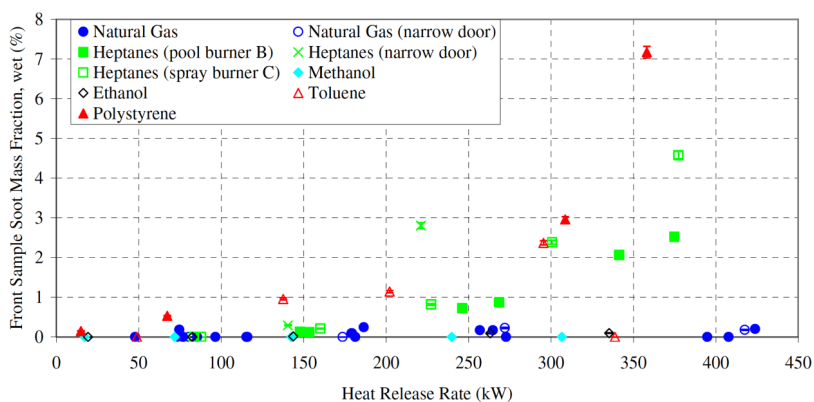
Σύμφωνα με τους Majdalani et al. (2016) για μικρές διαστάσεις ανοίγματος η θερμορροή, οι θερμοκρασίες αερίου στο διαμέρισμα και οι ταχύτητές στο άνοιγμα αυξάνονται ενώ αυξάνεται και η πιθανότητα εμφάνισης καθολικής ανάφλεξης σύμφωνα με τους Chen et al. (2011). Τα πειράματα των Fourneau et al. (2015) έδειξαν ότι για υψηλότερες τιμές συντελεστή αερισμού, οι συγκεντρώσεις CO και HC (υδρογονανθράκων) αυξάνονται ενώ η αντίστοιχη συγκέντρωση CO₂ μειώνεται.

Σύμφωνα με τους Suard et al. (2015), Majdalani et al. (2016), Fourneau et al. (2015), Li and Hertzberg (2015) και Chen et al. (2011), όταν αυξάνεται ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας, τότε αυξάνονται οι θερμοκρασίες στο άνοιγμα, στο εσωτερικό του διαμερίσματος και η θερμορροή στα τοιχώματα. Οι Chen et al. (2011), Yau (2001) και Babrauskas (1980) έδειξαν ότι για τοιχώματα με χαμηλή θερμομόνωση, η πιθανότητα εμφάνισης καθολικής ανάφλεξης αυξάνεται.. Οι πρώτοι συμπέραναν επίσης πως η πιθανότητα

εμφάνισης καθολικής ανάφλεξης αυξάνεται για χαμηλότερα επίπεδα θερμικής ισχύος.

3.1.2.2 Μελέτες φυσικής φωτιάς σε μικρή κλίμακα

Το είδος καυσίμου στις φυσικές φωτιές επηρεάζει σημαντικά το ποσοστό αιθάλης και συγκεντρώσεων μονοξειδίου του άνθρακα (CO) στο εσωτερικό του διαμερίσματος σύμφωνα με τους Ko et al. (2009) και Loo (2016). Στις φωτιές κηλίδας υγρού καυσίμου (pool fire) το επτάνιο (Heptane- C_7H_{16}) φαίνεται να παράγει το μεγαλύτερο ποσοστό αιθάλης σύμφωνα με τους Loo et al (2016) και Ko et al (2009), Johnsson et al. (2007) όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.5, ενώ το μεθάνιο (Methane- CH_4) βρίσκεται άκαυστο σε μεγαλύτερες ποσότητες στην οροφή. Οι Chen et al. (2011) και Haysaka et al. (2008) αναφέρουν επίσης πως η εμφάνιση του φαινομένου "backdraft" εξαρτάται επίσης από τον τύπο καυσίμων στις φωτιές με ξύλινα δοκίμια.



Σχήμα 3.5: Ποσοστό αιθάλης σε συνάρτηση με τον ρυθμό έκλυσης θερμότητας. Το πολυστυρένιο (Polystyrene) είναι στερεό καύσιμο. (Johnsson et al., 2007)

Οι διαστάσεις του ανοίγματος έχουν κυρίαρχη επιρροή στον ρυθμό έκλυσης θερμότητας, θερμοκρασία καυσαερίων και συγκεντρώσεις αερίων σύμφωνα με τους Loo (2016) και Quintiere et al. (1979). Επιπλέον, οι Quintiere et al. (1979) και Tofilo et al. (2007) αναφέρουν

ότι για μεγάλες διαστάσεις ανοίγματος μειώνεται ο ρυθμός κατανάλωσης καυσίμου και το ποσό θερμικής ακτινοβολίας στα τοιχώματα του πυροδιαμερίσματος.

Όσον αφορά την ποσότητα και την τοποθεσία καυσίμου, οι Ji et al. (2015) συμπεραίνουν ότι η απόσταση των καύσιμων υλών από την οροφή αυξάνει τις μέγιστες θερμοκρασίες της δέσμης αερίου οροφής (ceiling jet max temperatures) και οι Ma and Mäkeläinen (2000), ότι η συνολική επιφάνεια του καυσίμου επηρεάζει σημαντικά την εξέλιξη των υπο-αεριζόμενων φωτιών.

3.2 Εξισώσεις προσδιορισμού φυσικών μεγεθών

Τα βασικά φυσικά μεγέθη του θερμικού και ροϊκού πεδίου μιας φωτιάς σε διαμέρισμα είναι: η θερμοκρασία αερίου μείγματος (T_g), η θερμοκρασία στο άνοιγμα ($T_{opening}$), η θερμοροή στα τοιχώματα (\dot{h}_{net}), η ταχύτητα ροής (U) και παροχή μάζας (\dot{m}) στο άνοιγμα. Οι εξισώσεις προσδιορισμού των μεγεθών αυτών έχουν ως βάση τις εξισώσεις διατήρησης και με διάφορες παραδοχές και υποθέσεις μπορούν να δώσουν μια αρκετά καλή εικόνα για τα φαινόμενα που εξελίσσονται σε μια φωτιά σε διαμέρισμα.

3.2.1 Θερμοκρασία αερίου μείγματος

Η λύση ενός σχετικά πλήρους συνόλου εξισώσεων για τη διατήρηση της ενέργειας αποτελεί μία πολύπλοκη και χρονοβόρα διαδικασία. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού υπάρχουν δύο προσεγγίσεις. Η πρώτη αφορά μία προσεγγιστική επίλυση των εξισώσεων χρησιμοποιώντας ένα περιοριστικό σύνολο υποθέσεων και η δεύτερη την εύρεση μίας πιο ολοκληρωμένης λύσης με χρήση προγράμματος υπολογιστή. Σε κάθε περίπτωση, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι. Οι μέθοδοι που παρουσιάζονται είναι αυτές με μία ευρύτερη αποδοχή στην κοινότητα πυροπροστασίας, η κάθε μία με διαφορετικές υποθέσεις και περιορισμούς που πρέπει να γίνουν κατανοητοί πριν γίνει χρήση της μεθόδου. Τέλος, οι συσχετίσεις αφορούν τόσο το στάδιο ανάπτυξης μιας φωτιάς σε διαμέρισμα όσο και το στάδιο πλήρους ανεπτυγμένης φωτιάς και φαίνονται συνοπτικά στον Πίνακα 3.1.

3.2.1.1 Στάδιο Ανάπτυξης (Pre-flashover)

1) Οι McCaffrey, Quintiere και Harkleroad χρησιμοποίησαν μία απλή έκφραση της εξίσωσης της ενέργειας για να δημιουργήσουν μία προσεγγιστική εξίσωση της μέσης θερμοκρασίας των θερμών ανώτερων στρωμάτων μέσα στο διαμέρισμα (McCaffrey et al., 1981). Η εμπειρική συσχέτιση MQH δίνεται από την Εξίσωση (3.1):

Διέγγραψε: (3.1)

$$\dot{Q} = \dot{m}_g c_p (T_g - T_\infty) + q_{\text{loss}} \quad (3.1)$$

Όπου:

- \dot{Q} : Ρυθμός έκλυσης θερμότητας (kW)
- \dot{m}_g : Παροχή μάζας καυσαερίων προς το περιβάλλον (kg/s)
- c_p : Ειδική θερμοχωρητικότητα καυσαερίου (kJ/kg K)
- T_∞ : Θερμοκρασία περιβάλλοντος (K)
- q_{loss} : Απώλειες θερμότητας (συναγωγής και ακτινοβολίας) από το θερμό σώμα καυσαερίων (kW).

Αλλαγή κωδικού πεδίου

Οι απώλειες θερμότητας είναι προσεγγιστικά ίσες με το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας στα τοιχώματα λόγω συναγωγής και δίνονται από την Εξίσωση (3.2):

Διέγγραψε: (3.2)

$$q_{\text{loss}} = h_k A_T (T_g - T_\infty) \quad (3.2)$$

Όπου:

- h_k : Ενεργός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (kW/m²K)
- A_T : Συνολική εσωτερική επιφάνεια διαμερίσματος (m²)

Η παροχή μάζας δίνεται από την συσχέτιση του Rockett (1976), η οποία εκφράζεται μέσω της Εξίσωσης (3.3):

$$\dot{m}_g = \frac{2}{3} C_d W_o H_o^{3/2} \rho_\infty \left[2g \frac{T_\infty}{T_g} \left(1 - \frac{T_\infty}{T_g} \right) \right]^{-1/2} \quad (3.3)$$

Όπου:

- C_d : Συντελεστής συστολής στομίου (=0,7, τυπικά)
- W_o : Πλάτος ανοίγματος (m)
- H_o : Ύψος ανοίγματος (m)
- ρ_∞ : Πυκνότητα αέρα περιβάλλοντος (kg/m^3)
- g : Επιτάχυνση βαρύτητας, ($9,81 \text{ m/s}^2$)
- X_N : Ύψος ουδέτερου επιπέδου (m)

Με σύνθεση των Εξισώσεων (3.1), (3.2) και (3.3), προκύπτει η Εξίσωση (3.4):

$$\Delta T_g = T_g - T_\infty = \left(\frac{\dot{Q}}{\sqrt{g c_p \rho_\infty T_\infty} A \sqrt{H}} \right)^{2/3} \left(\frac{h_k A_T}{\sqrt{g c_p \rho_\infty} A \sqrt{H}} \right)^{-1/3} \quad (3.4)$$

Ο ενεργός συντελεστής μεταφοράς h_k προσδιορίζεται από την Εξίσωση (3.5):

$$h_k = \begin{cases} \sqrt{\frac{\rho k c}{t}}, t < t_p \\ \frac{k}{\delta}, t \geq t_p \end{cases} \quad (3.5)$$

Όπου:

- ρ : Πυκνότητα τοιχώματος (kg/m^3)
- c : Ειδική θερμοχωρητικότητα τοιχώματος (J/kg K)
- k : Θερμική αγωγιμότητα (W/m K)
- δ : Πάχος τοιχώματος (m)
- t : Χρόνος (s)

Διέγραψε: (3.1)

Διέγραψε: (3.2)

Διέγραψε: (3.3)

Διέγραψε: (3.4)

- t_p : Χρόνος θερμικής διείσδυσης (s), ο οποίος προσδιορίζεται από την Εξίσωση (3.6):

$$t_p = \frac{\delta^2 \rho c}{4k} \quad (3.6)$$

2) Οι Foote, Pagni και Alvares βασίστηκαν στη συσχέτιση MQH (McCaffrey et al., 1981) και πρόσθεσαν την περίπτωση της φωτιάς σε διαμέρισμα με εξαναγκασμένο αερισμό. Σύμφωνα, λοιπόν με τους Foote et al. (1986) η θερμοκρασία αερίου μείγματος υπολογίζεται από την Εξίσωση (3.7):

$$\frac{\Delta T_g}{T_\infty} = 0,63 \left(\frac{\dot{Q}}{\dot{m}_g c_p T_\infty} \right)^{0,72} \left(\frac{h_k A_T}{\dot{m}_g c_p} \right)^{-0,36} \quad (3.7)$$

3) Οι Beyler and Deal (1990) βασιζόμενοι στην συσχέτιση MQH πρότειναν την Εξίσωση (3.8), η οποία ισχύει για άνοιγμα τόσο στο πάνω όσο και στο κάτω μέρος του τοιχώματος:

$$\frac{\Delta T_g \dot{m}_g c_p}{\dot{Q}} = \frac{1}{1 + (h_k A_T) / \dot{m}_g c_p} \quad (3.8)$$

Όπου ο ενεργός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας h_k προσδιορίζεται από την Εξίσωση (3.9):

$$h_k = 0,4 \max \left(\sqrt{\frac{\rho k c}{t}}, \frac{k}{\delta} \right) \quad (3.9)$$

3.2.1.2 Στάδιο Πλήρους Ανεπτυγμένης Φωτιάς (Post-Flashover)

4) Οι Delichatsios et al. (2009) πρότειναν την Εξίσωση (3.10), με χρήση των εξής παραδοχών:

- Υπολογισμός της μέγιστης θερμοκρασίας αερίου στο διαμέρισμα για αδιαβατικές συνθήκες
- Υπολογισμός της θερμορροής στα τοιχώματα στο στάδιο ανάπτυξης της φωτιάς
- Χρήση ενός χρονικά δυναμικού μοντέλου για την απόκριση των τοιχωμάτων στις απώλειες θερμότητας
- Συνθήκες υποαεριζόμενης φωτιάς (ventilation-controlled)

$$\frac{T_g - T_\infty}{T_g^* - T_\infty} = 0,5 \left(\frac{\sqrt{t}}{\sqrt{k\rho c}} \frac{\dot{Q}}{A_T (T_g^* - T_\infty)} \right) \quad (3.10)$$

Όπου T_g^* (K) η (αδιαβατική) θερμοκρασία καυσαερίων για μηδενικές θερμικές απώλειες από το άνοιγμα του διαμερίσματος.

5) Βασιζόμενοι στη συσχέτιση MQH, οι Matsuyama et al. (1998), πρότειναν τις Εξισώσεις (3.11), για τη θερμοκρασία αερίου μείγματος, και (3.12), για τη διάρκεια της φωτιάς, για φωτιές ελεγχόμενες από αερισμό (ventilation-controlled):

$$T_g = 1280 \left(\frac{\dot{Q}}{A_T \sqrt{k\rho c} \sqrt{A\sqrt{H}}} \right)^{2/3} t^{1/6} + T_\infty \quad (3.11)$$

$$t_D = \frac{1}{60} \frac{F_L A_r}{Q} \quad (3.12)$$

Όπου:

- Q: Εκλυόμενη θερμότητα (MW)
- F_L : Πυκνότητα πυροθερμικού φορτίου (MJ/m²)
- A_r : Επιφάνεια δαπέδου (m²)
- t_D : Διάρκεια φωτιάς (min)

Διεύθυνση: (3.11)

Διεύθυνση: (3.12)

Πίνακας 3.1: Σύνοψη εξισώσεων θερμοκρασίας αερίου μείγματος.

Βιβλιογραφία - A/a	Εξίσωση
McCaffrey et al (1976) - (3.4)	$\Delta T_g = T_g - T_\infty = \left(\frac{\dot{Q}}{\sqrt{g c_p \rho_\infty T_\infty A \sqrt{H}}} \right)^{2/3} \left(\frac{h_k A_T}{\sqrt{g c_p \rho_\infty A \sqrt{H}}} \right)^{-1/3}$
Foote et al (1986) - (3.7)	$\frac{\Delta T_g}{T_\infty} = 0,63 \left(\frac{\dot{Q}}{\dot{m}_g c_p T_\infty} \right)^{0,72} \left(\frac{h_k A_T}{\dot{m}_g c_p} \right)^{-0,36}$
Beyler and Deal (1990) - (3.8)	$\frac{\Delta T_g \dot{m}_g c_p}{\dot{Q}} = \frac{1}{1 + (h_k A_T) / \dot{m}_g c_p}$
Delichatsios et al (2009) - (3.10)	$\frac{T_g - T_\infty}{T_g^* - T_\infty} = 0,5 \left(\frac{\sqrt{t}}{\sqrt{k \rho c}} \frac{\dot{Q}}{A_T (T_g^* - T_\infty)} \right)$
Matsuyama et al (1998) - (3.11)	$T_g = 1280 \left(\frac{\dot{Q}}{A_T \sqrt{k \rho c} \sqrt{A \sqrt{H}}} \right)^{2/3} t^{1/6} + T_\infty$

3.2.2 Θερμοκρασία στο άνοιγμα

Η θερμοκρασία στο άνοιγμα συνήθως προσεγγίζεται από τους ερευνητές ως δύο ξεχωριστές θερμοκρασίες, την θερμοκρασία του ανώτερου θερμού στρώματος των καυσαερίων T_{out} και την θερμοκρασία του εισερχόμενου ψυχρού αέρα T_a . Για τον προσδιορισμό των δύο θερμοκρασιών αυτών απαιτείται η γνώση του ύψους του ουδέτερου επιπέδου H_N και του ύψους της δέσμης οροφής στο διαμέρισμα H_D καθώς και της παροχής μάζας στο άνοιγμα. Γι αυτό τον λόγο, ο υπολογισμός των θερμοκρασιών στο άνοιγμα απαιτεί τη χρήση υπολογιστικών μοντέλων ή μπορεί να γίνει με κάποιες υποθέσεις:

- Για την θερμοκρασία του εισερχόμενου αέρα T_a ισχύει η υπόθεση ότι ισούται με την θερμοκρασία περιβάλλοντος T_∞ με σκοπό τον προσδιορισμό της παροχής μάζας αέρα από τις Εξισώσεις (3.21) – (3.24).
- Για την θερμοκρασία εξερχόμενων καυσαερίων T_{out} ισχύει η υπόθεση ότι ισούται με την θερμοκρασία του ανώτερου θερμού στρώματος καυσαερίων $T_{g,up}$ (Quintiere et al., 1981). Εάν υπάρχει γνώση των μεταβλητών H_N ή/και H_D τότε η θερμοκρασία T_{out} μπορεί να υπολογιστεί από τις Εξισώσεις (3.19), (3.23) ή (3.24).

Διέγραψε: (3.21)

Διέγραψε: (3.24)

Διέγραψε: (3.19)

Διέγραψε: (3.23)

Διέγραψε: (3.24)

3.2.3 Ταχύτητα ροής στο άνοιγμα

Όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 2.1.1 υπάρχουν δύο μοντέλα για την προσέγγιση των ροϊκών χαρακτηριστικών της φωτιάς σε διαμερίσμα στο άνοιγμα: Το μονοζωνικό, που αφορά το στάδιο πλήρους ανεπτυγμένης φωτιάς και το διζωνικό, το οποίο αφορά το στάδιο ανάπτυξης της. Η ταχύτητα της ροής σε κάθε μοντέλο περιγράφεται παρακάτω.

3.2.3.1 Μονοζωνικό μοντέλο

Στο μονοζωνικό μοντέλο, η δέσμη οροφής των θερμών καυσαερίων θεωρείται ότι καταλαμβάνει ολόκληρο τον εσωτερικό χώρο του διαμερίσματος. Η ταχύτητα των εξερχόμενων καυσαερίων δίνεται από την Εξίσωση (3.13) ενώ η ταχύτητα του εισερχόμενου αέρα από την Εξίσωση (3.14):

Διεύθυνση: (3.13)

Διεύθυνση: (3.14)

$$U_g(z) = \sqrt{\frac{2(\rho_a - \rho_g)gz}{\rho_g}}, \text{ για } 0 < z < H_o - H_N \quad (3.13)$$

$$U_a(z) = \sqrt{\frac{2(\rho_a - \rho_g)g|z|}{\rho_a}}, \text{ για } -H_N < z < 0 \quad (3.14)$$

Όπου:

- z : Ύψος (m)
- ρ_g : Πυκνότητα καυσαερίων (kg/m^3)
- ρ_a : Πυκνότητα περιβάλλοντος αέρα
- H_N : Ύψος ουδέτερου επιπέδου το οποίο δίνεται από την Εξίσωση (3.15) και φαίνεται στο Σχήμα 2.2:

$$H_N = \frac{H_o}{1 + (\rho_a/\rho_g)^{1/3}} \quad (3.15)$$

3.2.3.2 Διζωνικό μοντέλο

Στο μοντέλο αυτό, το εσωτερικό του διαμερίσματος χωρίζεται σε δύο ζώνες, την άνω πλευρά των θερμών καυσαερίων και την κάτω πλευρά του εισερχόμενου ψυχρού αέρα. Είναι σημαντικό να αναφερθεί και η μεταβλητή του ύψους δέσμης οροφής, H_D , η οποία φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Συνήθως ισχύει ότι $H_N > H_D$.

- Για την άνω πλευρά των θερμών καυσαερίων ($0 < z < H_o - H_D$) η ταχύτητα δίνεται από την Εξίσωση (3.13).
- Για την κάτω πλευρά του ψυχρού αέρα ($-(H_N - H_D) < z < 0$) η ταχύτητα δίνεται από τις Εξισώσεις (3.16) και (3.17) για το άνω μέρος (1) και για το κάτω μέρος (2) αντίστοιχα:

$$U_{a1}(z) = \sqrt{\frac{2(\rho_a - \rho_g)gz}{\rho_g}}, \text{ για } -(H_N - H_D) < z < 0 \quad (3.16)$$

$$U_{a2}(z) = \sqrt{\frac{2(\rho_a - \rho_g)g(H_N - H_D)}{\rho_g}}, \text{ για } -H_N < z < -(H_N - H_D) \quad (3.17)$$

Σύμφωνα με τους Rocket et al. (1976), το ύψος της δέσμης οροφής εντός του διαμερίσματος H_D μπορεί να υπολογιστεί από την εμπειρική Εξίσωση (3.18):

$$\frac{T_a}{T_g} \left(\frac{H_o}{H_N} - 1 \right)^3 = \left(1 - \frac{H_D}{H_N} \right) \left(1 + \frac{H_D}{2H_N} \right) \left(\frac{\dot{m}_g}{\dot{m}_a} \right)^2 \quad (3.18)$$

Όπου: \dot{m}_a η συνολική παροχή εισερχόμενου αέρα.

3.2.4 Παροχή μάζας στο άνοιγμα

Οι υπολογιστικές σχέσεις για τις ταχύτητες είναι σπάνιο φαινόμενο στη βιβλιογραφία. Αντίθετα, οι ερευνητές προτιμούν τα μεγέθη της

παροχής μάζας καυσαερίων \dot{m}_g και εισερχόμενου αέρα \dot{m}_a για την ανάλυση των ροϊκών φαινομένων στο άνοιγμα. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες από τις ευρύτερα αποδεκτές εξισώσεις για αυτά τα μεγέθη. Οι σχέσεις αφορούν το στάδιο ανάπτυξης της φωτιάς και άρα χρησιμοποιούν το διζωνικό μοντέλο όπως αναφέρθηκε στις Παραγράφους 3.2.3 και 2.1.1 και φαίνονται συνοπτικά στον Πίνακα 3.2.

3.2.4.1 Παροχή μάζας καυσαερίων \dot{m}_g

- Οι Rocket et al. (1976) πρότειναν την Εξίσωση (3.19) (παρόμοια με την Εξίσωση (3.3)), η οποία αποτελεί ακόμα και σήμερα την ευρύτερα αποδεκτή για τον προσδιορισμό του μεγέθους της παροχής μάζας καυσαερίων διαμέσου του ανοίγματος.

$$\dot{m}_g = \frac{2}{3} C_d W_o \rho_\infty \left[2g \frac{T_\infty}{T_{out}} \left(1 - \frac{T_\infty}{T_{out}} \right) \right]^{1/2} (H_o - H_N)^{3/2} \quad (3.19)$$

Όπου T_{out} η θερμοκρασία του ανώτερου θερμού στρώματος καυσαερίων που εξέρχεται από το άνοιγμα.

- Οι Johansson and Van Hees (2014) στην ανάλυση της Εξίσωσης (3.19) πρότειναν την Εξίσωση (3.20):

$$\dot{m}_g = 0,26 W_o \sqrt{H_o^3} C_d \rho_\infty \sqrt{g} \left(1 - \frac{H_D}{H_o} \right) \quad (3.20)$$

3.2.4.2 Παροχή μάζας εισερχόμενου αέρα \dot{m}_a

- Οι Rocket et al. (1976) πρότειναν επίσης την Εξίσωση (3.21) για τον προσδιορισμό της παροχής μάζας του εισερχόμενου αέρα. Η εξίσωση αυτή έχει αναφερθεί από ένα πλήθος ερευνητών (Quintiere, 2002, Walton and Thomas, 2002, Johansson and Van

Διεύθυνση: (3.21)

Hees, 2014) με διάφορες τροποποιήσεις και συναντάται συχνά στην βιβλιογραφία.

$$\dot{m}_a = \frac{2}{3} C_d W_o \rho_\infty \left[2g \left(1 - \frac{T_\infty}{T_{out}} \right) \right]^{1/2} (H_N - H_b)^{1/2} \left(H_N + \frac{H_b}{2} \right) \quad (3.21)$$

Οι Rocket et al. (1976) έδειξαν ότι για θερμοκρασίες άνω των 150°C η ροή εισερχόμενου αέρα μπορεί να προσεγγιστεί με μία σταθερά πολλαπλασιασμένη με τον όρο $A_o \sqrt{H_o}$.

- Οι Thomas (1992) υπολόγισαν την σταθερά αυτή σε 0,5 kg/s·m^{5/2}, η οποία αποτελεί την πλέον διαδεδομένη, και πρότειναν την Εξίσωση (3.22):

$$\dot{m}_a = 0,5 A_o \sqrt{H_o} \quad (3.22)$$

Διέγραψε: (3.22)

- Οι Quintiere et al. (1981) πρότειναν την Εξίσωση (3.23):

$$\dot{m}_a = 2,48 W_o \sqrt{2g \left(\frac{T_\infty (T_{g,up} - T_\infty)}{T_{g,up}^2} \right) (H_o - H_N)^3} \quad (3.23)$$

Διέγραψε: (3.23)

Όπου $T_{g,up}$ η θερμοκρασία του ανώτερου θερμού στρώματος καυσαερίων στο διαμέρισμα.

- Ο Tewarson (1984) πρότεινε την Εξίσωση (3.24), η οποία είναι η μόνη που περιέχει τον όρο της παροχής μάζας καυσίμου \dot{m}_{fuel} :

$$\dot{m}_a = \frac{2}{3} A_o \sqrt{H_o} C_d \rho_\infty \sqrt{2g \left(\frac{T_\infty (T_{out} - T_\infty)}{T_{out}^2} \right) \left(\frac{H_o - H_N}{H_o} \right)^3} - \dot{m}_{fuel} \quad (3.24)$$

Διέγραψε: (3.24)

Πίνακας 3.2: Σύνοψη εξισώσεων παροχής μάζας στο άνοιγμα.

Βιβλιογραφία - Α/α	Εξίσωση
Rocket et al (1976) - (3.19)	$\dot{m}_g = \frac{2}{3} C_d W_o \rho_\infty \left[2g \frac{T_\infty}{T_{out}} \left(1 - \frac{T_\infty}{T_{out}} \right) \right]^{1/2} (H_o - H_N)^{3/2}$
Johansson and Van Hees (2014) - (3.20)	$\dot{m}_g = 0,26 W_o \sqrt{H_o^3} C_d \rho_\infty \sqrt{g} \left(1 - \frac{H_D}{H_o} \right)$
Rocket et al (1976) - (3.21)	$\dot{m}_a = \frac{2}{3} C_d W_o \rho_\infty \left[2g \left(1 - \frac{T_\infty}{T_{out}} \right) \right]^{1/2} (H_N - H_D)^{1/2} \left(H_N + \frac{H_D}{2} \right)$
Thomas and Heselden (1992) - (3.22)	$\dot{m}_a = 0,5 A_o \sqrt{H_o}$
Quintiere et al (1981) - (3.23)	$\dot{m}_a = 2,48 W_o \sqrt{2g \left(\frac{T_\infty (T_{g,up} - T_\infty)}{T_{g,up}} \right) (H_o - H_N)^3}$
Tewarson (1984) - (3.24)	$\dot{m}_a = \frac{2}{3} A \sqrt{H_o} C_d \rho_\infty \sqrt{2g \left(\frac{T_\infty (T_{out} - T_\infty)}{T_{out}} \right) \left(\frac{H_o - H_N}{H_o} \right)^3} - \dot{m}_{fuel}$

4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

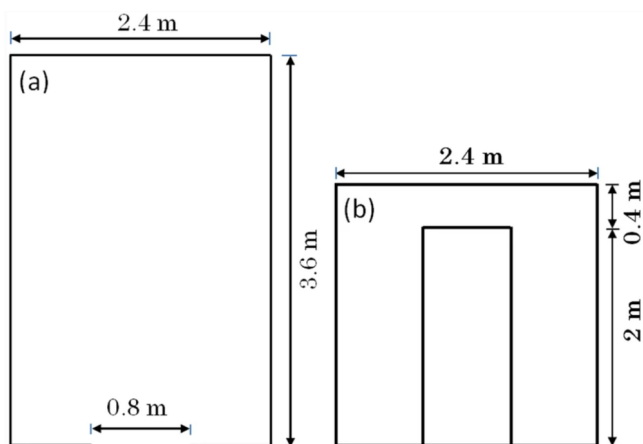
4.1 Βασικά χαρακτηριστικά πειραματικής εγκατάστασης

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται η πειραματική εγκατάσταση (πυροδιαμέρισμα, μετρητικές διατάξεις, λογισμικό) που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή των πειραμάτων, ενώ παράλληλα παρουσιάζονται και τα αντίστοιχα σφάλματα των μετρητικών οργάνων και η μεθοδολογία διόρθωσης των μετρήσεων θερμοκρασίας.

4.2 Χαρακτηριστικά του διαμερίσματος

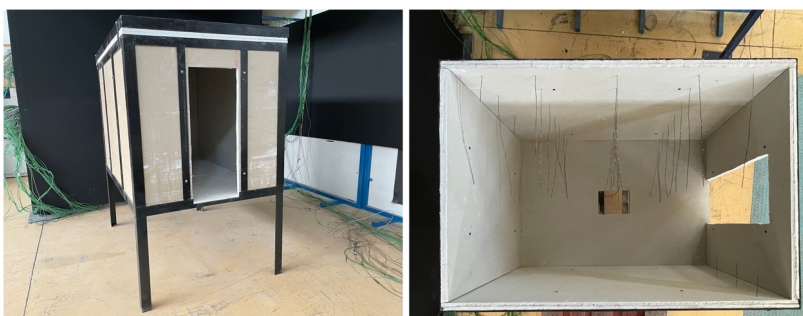
4.2.1 Διαστάσεις διαμερίσματος

Για τη μελέτη της φωτιάς σε διαμέρισμα σε πραγματική κλίμακα (1:1), χρησιμοποιείται κατά κανόνα το πρότυπο διαμέρισμα ISO 9705, για να γίνει εφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων στην ερευνητική κοινότητα. Το διαμέρισμα αυτό έχει τυποποιημένες εσωτερικές διαστάσεις: μήκος 3,6 m, πλάτος 2,4 m και ύψος 2,4 m και περιλαμβάνει επίσης ένα άνοιγμα (πόρτα), όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1, με διαστάσεις 0,80 m πλάτος και 2,00 m ύψος.



Σχήμα 4.1: Κάτοψη (αριστερά) και εμπρός όψη διαμερίσματος ISO 9705, Alsanie et al. (2021).

Όπως αναφέρθηκε και στην Παράγραφο 2.3, τα πειράματα μεγάλης κλίμακας έχουν υψηλό κόστος διεξαγωγής, απαιτούν χρόνο και εγκυμονούν κινδύνους. Για τον λόγο αυτό, τα πειράματα μικρής και μεσαίας κλίμακας είναι συνηθέστερα διότι, παρόλο που μπορεί να μην εξαχθούν ακριβή ποσοτικά αποτελέσματα, μπορούν να δώσουν επαρκή εικόνα για τους μηχανισμούς και τη συμπεριφορά της φωτιάς σε διαμέρισμα. Για την διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών, στο εργαστήριο ΕΜΣΚ (Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης) του ΕΜΠ, στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο του διαμερίσματος ISO 9705 υπό κλίμακα ένα προς τρία (1:3), όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2. Έτσι, οι εσωτερικές διαστάσεις του πυροδιαμερίσματος της πειραματικής εγκατάστασης διαμορφώθηκαν ως εξής: 1200 mm μήκος, 800 mm πλάτος και 800 mm ύψος, ενώ οι διαστάσεις του ανοίγματος ήταν 260 mm (πλάτος) x 660 mm (ύψος).



Σχήμα 4.2: Μοντέλο διαμερίσματος ISO 9705 (κλίμακα 1:3) σε λοξή πλάγια όψη (αριστερά) και κάτοψη (δεξιά).

4.2.1 Τα δομικά υλικά

Για την κατασκευή του διαμερίσματος χρησιμοποιήθηκε ένας χαλύβδινος σκελετός (Σχήμα 4.3) πάχους 4 mm, για την στήριξη των δομικών υλικών.



Σχήμα 4.3: Ο χαλύβδινος σκελετός της κατασκευής

Για τα τοιχώματα, δάπεδο και οροφή του διαμερίσματος πραγματοποιήθηκε παραμετρική μελέτη χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικά δομικά υλικά, όπως αναφέρεται και στο Κεφάλαιο 5.1.

Στις ομάδες πειραμάτων Q – GP και ISO - GP, χρησιμοποιήθηκαν δύο πυράντοχες γυψοσανίδες πάχους 12,5 mm η κάθε μία, για την κατασκευή των τοιχωμάτων, της οροφής και του δαπέδου. Οι γυψοσανίδες, συνολικού πάχους 25 mm, τοποθετήθηκαν στην εσωτερική πλευρά του σκελετού ώστε να μην υπάρχουν μέρη μετάλλου εκτεθειμένα στην φλόγα όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.2 (δεξιά).



Σχήμα 4.4: Στάδια κατασκευής διαμερίσματος

Στις ομάδες πειραμάτων Q – SiCa και ISO – SiCa χρησιμοποιήθηκε μία σανίδα πυριτικού ασβεστίου (Calcium Silicate) πάχους 20 mm, η οποία τοποθετήθηκε κατά παρόμοιο τρόπο στην εσωτερική πλευρά του σκελετού. Η μεθοδολογία κατασκευής του διαμερίσματος ήταν όμοια για όλες τις πειραματικές δοκιμές και φαίνεται στο Σχήμα 4.4

Οι θερμοφυσικές ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων δομικών υλικών σύμφωνα με τα φύλλα τεχνικών δεδομένων, Promat (2017) και Knauf (2020) και φαίνονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Θερμοφυσικές ιδιότητες δομικών υλικών

Δομικό Υλικό	Θερμική αγωγιμότητα k (W/m·K)	Πυκνότητα ρ (kg/m ³)	Ειδική θερμοχωρητικότητα c (kJ/kg·K)
Πυράντοχη γυψοσανίδα (EN 520,A1) (Knauf, 2020)	0,25	800	1,1
Σανίδα πυριτικού ασβεστίου (Promat, 2017)	0,21	870	0,92

4.3 Μετρητικές διατάξεις

Για τη μέτρηση των θερμικών και ροϊκών χαρακτηριστικών της φωτιάς χρησιμοποιήθηκαν θερμοστοιχεία, θερμοροόμετρα, αναλυτής καυσαερίων, παροχόμετρα αέρα, δικατευθυντικοί μετρητές ταχύτητας και σωλήνες Pitot.

4.3.1 Θερμοστοιχεία

Τα θερμοστοιχεία είναι ένα όργανο το οποίο χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της θερμοκρασίας και αποτελείται από δύο πόλους (θετικός – αρνητικός). Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν θερμοστοιχεία τύπου K (Σχήμα 4.5) διαμέτρου 1,5 mm με σύσταση θετικού πόλου

4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Μορφοποίηση: Γραμματοσειρά: Verdana, 10 στ.

Διέγγραψε: 4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

90% Ni – 10% Cr και αρνητικού 95% Ni – 2% Al – 3% Mn. Το ανώτερο όριο θερμοκρασίας που μπορούν να λειτουργήσουν είναι 1038°C. Η ανάγωση από Volts σε βαθμούς Κελσίου (°C) γίνεται με τη βοήθεια της Εξίσωσης (4.1).

Διέγγραψε: (4.1)

$$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{T(\text{Volt})}{0,000041} \quad (4.1)$$



Σχήμα 4.5: Θερμοστοιχείο τύπου K

4.3.2 Σωλήνες Pitot - Static

Για την μέτρηση της οριζόντιας ταχύτητας των καυσαερίων στο άνοιγμα χρησιμοποιήθηκαν σωλήνες Pitot – Static και δικάτευθυντικοί μετρητές ταχύτητας. Οι σωλήνες Pitot (Σχήμα 4.6) συνδέονται με μικρομανόμετρα Kimo, στα οποία η αναγωγή των μετρούμενων τιμών από Volts σε Pascal γίνεται μέσω της Εξίσωσης (4.2).

Διέγγραψε: (4.2)

$$\Delta p(\text{Pa}) = 100\Delta p(\text{Volt}) \quad (4.2)$$



Σχήμα 4.6: Σωλήνες Pitot – Static

Στη συνέχεια, με την βοήθεια της Εξίσωσης (4.3) υπολογίζεται η ταχύτητα u .

$$u = \left(\frac{2\Delta p}{\rho} \right)^{1/2} \quad (4.3)$$

όπου, ρ (kg/m^3) η πυκνότητα υπολογίζεται από την διαμορφωμένη καταστατική εξίσωση των τέλειων αερίων με δεδομένα $p = 1 \text{ atm} = 10^5 \text{ Pa}$ και $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$, Εξίσωση (4.4):

Διεύθυνση: (4.4)

$$\rho = \frac{352,8}{T} \quad (4.4)$$

όπου T (K) η θερμοκρασία.

4.3.3 Δικατευθυντικοί μετρητές ταχύτητας

Για την μέτρηση της ταχύτητας των καυσαερίων στο άνοιγμα χρησιμοποιήθηκαν δικατευθυντικοί μετρητές ταχύτητας (bi-directional probe).



Σχήμα 4.7: Δικατευθυντικοί μετρητές ταχύτητας

Ένας δικατευθυντικός μετρητής (Σχήμα 4.7) αποτελείται από ένα τμήμα κυλινδρικού αγωγού από ανοξείδωτο χάλυβα ($L/D=2$) με ένα διάφραγμα στο κέντρο και δύο οπές που διανοίγονται εκατέρωθεν του διαφράγματος. Ο άξονας του αγωγού ευθυγραμμίζεται με τη ροή, η οπή που βρίσκεται ανάντι της ροής ανιχνεύει την πίεση ανακοπής και η οπή κατάντι στη ροή ανιχνεύει μία πίεση ελάχιστα μικρότερη από την στατική. Οι μικροί σωλήνες που χρησιμοποιούνται για να μεταφέρουν τα σήματα της πίεσης χρησιμεύουν επίσης ως βάση στήριξης του μετρητή (McCaffrey and Heskestad, 1976). Οι σωλήνες αυτοί συνδέθηκαν με μικρομανόμετρα Omega, στα οποία η αναγωγή από Volt σε πίεση Pascal γίνεται με τη βοήθεια της Εξίσωσης (4.5).

$$\Delta p(\text{Pa}) = 2,49\Delta p(\text{Volt}) - 12,45 \quad (4.5)$$

Στη συνέχεια ο προσδιορισμός της τοπικής ταχύτητας u δίνεται από την Εξίσωση(4.6):

$$u = \left(\frac{1}{K_p} \right) \left(\frac{2\Delta p}{\rho} \right)^{1/2} \quad (4.6)$$

όπου, K_p η σταθερά του αισθητήρα μέτρησης πίεσης.

Η σταθερά K_p εξαρτάται από το σχήμα του μετρητή, την κατεύθυνσή του και τον αριθμό Reynolds. Σύμφωνα με τους McCaffrey και Heskestad (1976) η τιμή της σταθεράς K_p για μεγάλους Re είναι περίπου 1,08.

4.3.4 Μετρητής ροής θερμότητας

Ο μετρητής ροής θερμότητας (heat flux sensor) είναι μια συσκευή με την οποία μετρείται η ροή θερμότητας μέσω ακτινοβολίας από το περιβάλλον στο σημείο που είναι τοποθετημένη. Το «οπτικό πεδίο» μέτρησης της είναι συνήθως 180° . Για τις πειραματικές δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν τρεις υδρόψυκτοι μετρητές ροής θερμότητας (water cooled heat flux sensor) τύπου Schmidt - Boelter, κατάλληλοι για μετρήσεις σε περιβάλλον υψηλών θερμοκρασιών. Στο Σχήμα 4.8 απεικονίζεται ένας από τους μετρητές αυτούς. Η αναγωγή από Volts σε kW / m^2 γίνεται μέσω της Εξίσωσης (4.7), όπου E ($\text{m}^2 \text{ Volt} / \text{kW}$) η ευαισθησία του μετρητή.

$$q'' \left(\frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \right) = \frac{q'' (\text{Volt})}{E} \quad (4.7)$$



Σχήμα 4.8: Μετρητής ροής θερμότητας (heat flux sensor)

4.3.5 Αναλυτής καυσαερίων

Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε αναλυτής αερίων τύπου ABB ACX Optima AO2000 Series (Σχήμα 4.9, αριστερά) με τον οποίο μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις οξυγόνου, μονοξειδίου του άνθρακα και διοξειδίου του άνθρακα των καυσαερίων. Η καταγραφή των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε με το ακροφύσιο του αναλυτή το οποίο ήταν τοποθετημένο στον αγωγό απαγωγής καυσαερίων (Σχήμα 4.9, δεξιά).



Σχήμα 4.9: Αναλυτής καυσαερίων (αριστερά) και αγωγός απαγωγής καυσαερίων (δεξιά)

4.3.6 Παροχόμετρο καυσαερίων

Για τον υπολογισμό της ογκομετρικής παροχής καυσαερίων εγκαταστάθηκε εντός του αγωγού απαγωγής το μετρητικό όργανο KIMO DEBIMO, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 4.10. Το όργανο DEBIMO, με χρήση πολλαπλών οπών, επιτρέπει τον προσδιορισμό της «μέσης» τιμής της δυναμικής πίεσης σε ολόκληρη τη διατομή του μετρούμενου αγωγού. Η αναγωγή από Volts σε Pa γίνεται μέσω της Εξίσωσης (4.8).

$$\Delta p(\text{Pa}) = 100\Delta p(\text{Volt}) \quad (4.8)$$

4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Μορφοποίηση: Γραμματοσειρά: Verdana, 10 στ.

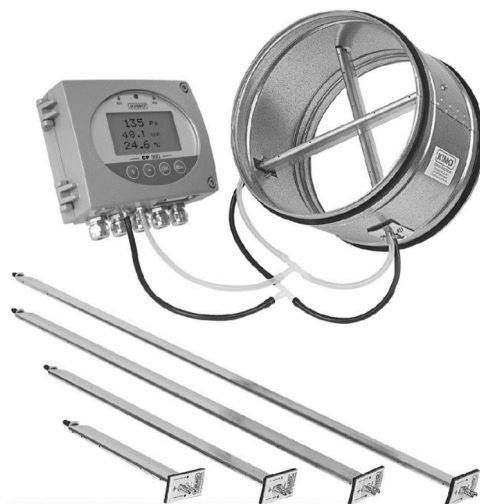
Διέγραψε: 4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Στη συνέχεια, μέσω της δυναμικής πίεσης υπολογίζεται η μέση ταχύτητα των καυσαερίων εντός του αγωγού (Εξίσωσης (4.6)), όπου το $1 / K_p$ ισούται με 0,8165 και με δεδομένη τη διατομή του (A_{duct}), υπολογίζεται τελικά η ογκομετρική παροχή τους μέσω της Εξίσωσης (4.9).

Διέγραψε: (4.6)

Διέγραψε: (4.9)

$$\dot{V} = uA_{duct} \quad (4.9)$$



Σχήμα 4.10: Μετρητής παροχής καυσαερίων

4.4 Σύστημα παροχής καυσίμου

Για την διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών χρησιμοποιήθηκε, αέριο καύσιμο, το προπάνιο (C_3H_8) με ιδιότητες όπως φαίνονται στον Πίνακα 4.2.

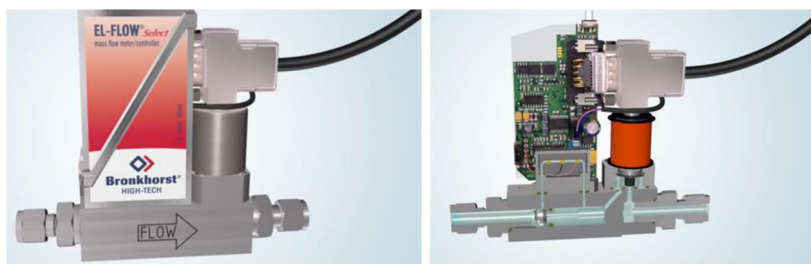
Πίνακας 4.2: Θερμοφυσικές ιδιότητες προπάνιου (C_3H_8) σε αέρια μορφή.

Μοριακή μάζα W (kg/kmol)	44,09
Θερμοκρασία βρασμού T_b (°C)	-42,2

Ειδική θερμοχωρητικότητα c_p (kJ/kg °C)	1,67
Κατώτερη Θερμογόνος δύναμη Δh_c (MJ/kg)	46,36
Μονάδα μάζας O_2 για καύση 1kg C_3H_8 r_o	3,629

4.4.1 Παροχόμετρα καυσίμου

Το καύσιμο διοχετεύεται από δυο φιάλες παράλληλα και για την ρύθμιση της ογκομετρικής παροχής χρησιμοποιήθηκαν δύο ψηφιακά παροχόμετρα Bronkhorst EL-FLOW select (Σχήμα 4.11), τα οποία ήταν συνδεδεμένα με ηλεκτρονικό υπολογιστή.



Σχήμα 4.11: Θερμικό παροχόμετρο Bronckhorst EL-FLOW select

4.4.2 Πορώδης καυστήρας

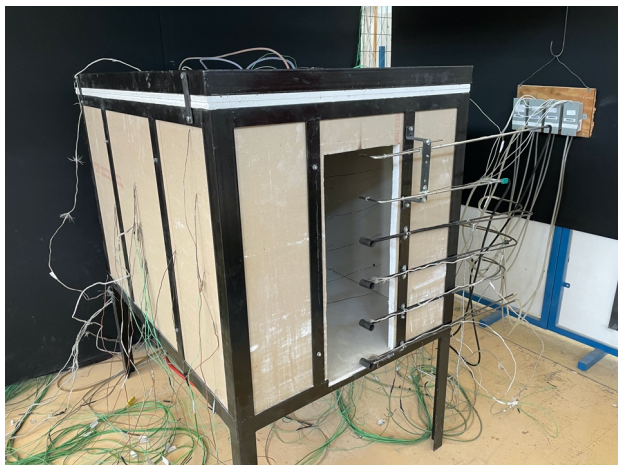
Το προπάνιο ύστερα διαχέεται μέσα στο διαμερίσμα με την χρήση ενός πορώδους καυστήρα (porous burner) κατασκευασμένου από οξειδίου αλουμινίου, κατάλληλο για τις δεδομένες συνθήκες θερμικού πεδίου. Ο καυστήρας (Σχήμα 4.12, αριστερά) με διαστάσεις 175 mm μήκος, 125 mm πλάτος και ύψος 55 mm έχει οπές με διάμετρο 1 mm και είναι τοποθετημένος στο κέντρο του διαμερίσματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.12 (δεξιά).



Σχήμα 4.12: Πορώδης καυστήρας (αριστερά) και η θέση του στο διαμέρισμα (δεξιά).

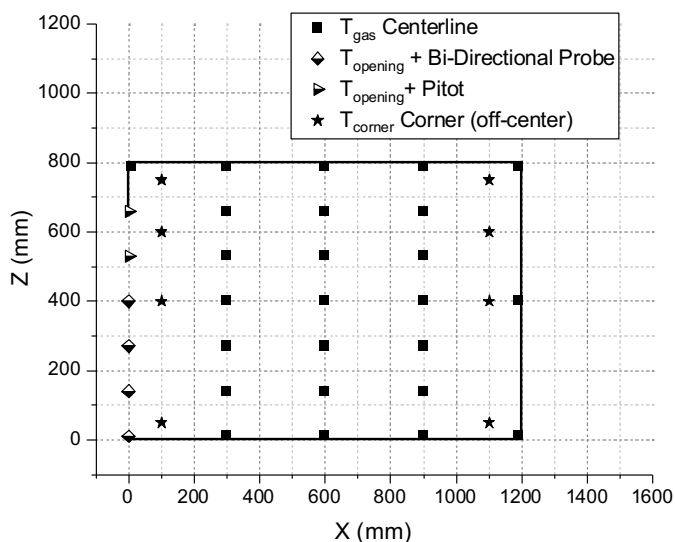
4.5 Διάταξη μετρητικών συσκευών

Η τοποθέτηση των μετρητικών οργάνων έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να αποτυπώνεται όσο το δυνατόν καλύτερα το αποτέλεσμα του πειράματος στις μετρήσεις. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκαν για την καταγραφή των δεδομένων συνολικά 75 θερμοστοιχεία, 4 δικατευθυντικοί μετρητές ταχύτητας, 2 σωλήνες Pitot - Static, 3 μετρητές ροής θερμότητας, δυο παροχόμετρα και ο αναλυτής καυσαερίων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.13.



Σχήμα 4.13: Πυροδιαμέρισμα με μετρητικές διατάξεις (Πειραματικές δοκιμές – GP).

Προκειμένου να γίνει η παράθεση της ακριβούς θέσης των μετρητικών οργάνων είναι αναγκαίο να οριστεί ένα σύστημα συντεταγμένων (x,y,z) . Ως άξονας x ορίζεται ο άξονας ο οποίος είναι παράλληλος με το δάπεδο και την οροφή και είναι κάθετος στην πρόσοψη, ως άξονας z ορίζεται ο άξονας ο οποίος είναι κάθετος στο δάπεδο και την οροφή και είναι παράλληλος με τη πρόσοψη και ο άξονας y είναι ο κάθετος στους άλλους δυο άξονες. Ως αρχή των αξόνων $(0,0,0)$ ορίζεται το σημείο που βρίσκεται στο επίπεδο του ανοίγματος, στο κατώτερο μέρος και στο κέντρο αυτού όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.14.



Σχήμα 4.14: Διάταξη «ελεύθερων» μετρητικών συσκευών στο επίπεδο $\gamma=0$ (και $\gamma = \pm 300$ για τα θερμοστοιχεία των γωνιών).

4.5.1 Θερμοστοιχεία

Τα θερμοστοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν μπορούν να διαχωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες, στα ελεύθερα θερμοστοιχεία και στα θερμοστοιχεία στο εσωτερικό των τοιχωμάτων.

Τα **ελευθέρα θερμοστοιχεία**, διακρίνονται ανάλογα με την θέση τους στον άξονα γ στις εξής κατηγορίες:

- Θερμοστοιχεία Κεντρικής Γραμμής (Centerline): Αυτά τοποθετήθηκαν εσωτερικά του διαμερίσματος στο επίπεδο $\gamma=0$ και κατά μήκος του άξονα x , όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.15. Οι ακριβείς συντεταγμένες τους παρατίθενται στον Πίνακα 4.3 και στα Σχήματα 4.14 και 4.15 (μακριά καλώδια).

Πίνακας 4.3: Θέσεις θερμοστοιχείων κεντρικού επιπέδου.

A/a	x (mm)	z (mm)	y (mm)
1	300	10	0
2	300	140	0
3	300	270	0
4	300	400	0
5	300	530	0
6	300	660	0
7	300	790	0
8	600	10	0
9	600	140	0
10	600	270	0
11	600	400	0
12	600	530	0
13	600	660	0
14	600	790	0
15	900	10	0
16	900	140	0
17	900	270	0
18	900	400	0
19	900	530	0
20	900	660	0
21	900	790	0
22	1190	10	0
23	1190	400	0
24	1190	790	0
25	10	790	0



Σχήμα 4.15: Θερμοστοιχεία κεντρικής γραμμής σε κάτοψη (αριστερά) και σε εμπρόσθια όψη (δεξιά).

- Θερμοστοιχεία Ανοίγματος (Opening): Τα θερμοστοιχεία στην τομή των επιπέδων $y=0$ και του επιπέδου του ανοίγματος. Οι θέσεις τους φαίνονται στα Σχήματα 4.14 και 4.16 καθώς και στον Πίνακα 4.4.

Πίνακας 4.4: Θέσεις θερμοστοιχείων ανοίγματος.

A/a	x (mm)	z (mm)	y (mm)
26	0	10	0
27	0	140	0
28	0	270	0
29	0	400	0
30	0	530	0
31	0	660	0



Σχήμα 4.16: Τοποθέτηση θερμοστοιχείων ανοίγματος μαζί με αισθητήρες μέτρησης ταχύτητας.

- Θερμοστοιχεία Εμπρόσθιας και Οπίσθιας Γωνίας (Front and Back Corner): Τοποθετημένα σε ομάδες των 4 όπως φαίνονται στον Πίνακα 4.5 και στα Σχήματα 4.14, 4.15 και 4.17.

Πίνακας 4.5: Θέσεις θερμοστοιχείων γωνιών.

A/a	x (mm)	z (mm)	y (mm)	Είδος
37	100	50	300	Εμπρόσθια Γωνία
38	100	400	300	
39	100	600	300	
40	100	750	300	
41	1100	50	-300	Οπίσθια Γωνία
42	1100	400	-300	
43	1100	600	-300	
44	1100	750	-300	



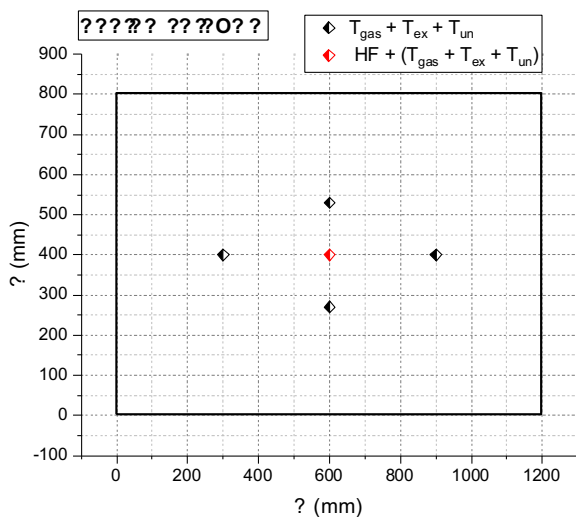
Σχήμα 4.17: Θερμοστοιχεία γωνίας.

- Θερμοστοιχεία εφαπτόμενων στο πλαϊνό τοίχωμα (Gas Sidewall): Τα θερμοστοιχεία στις θέσεις του Πίνακα 4.6 και απόσταση 10 mm από το τοίχωμα, φαίνονται και στο Σχήμα 4.18.

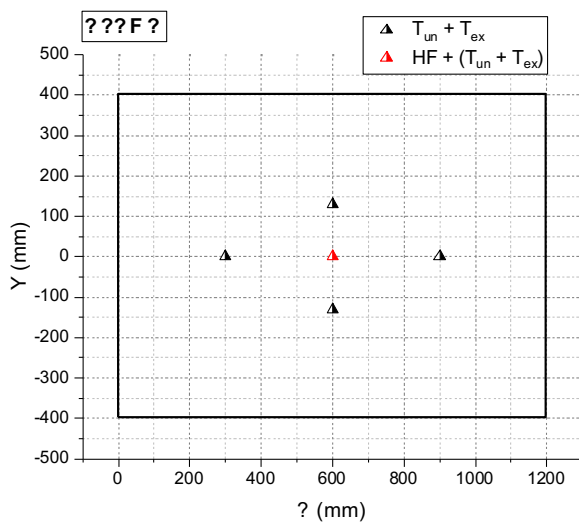
Πίνακας 4.6: Θέσεις ελευθέρων θερμοστοιχείων πλαϊνού τοιχώματος.

A/a	x (mm)	z (mm)	y (mm)
32	900	400	390
33	600	270	390
34	600	400	390
35	600	530	390
36	300	400	390

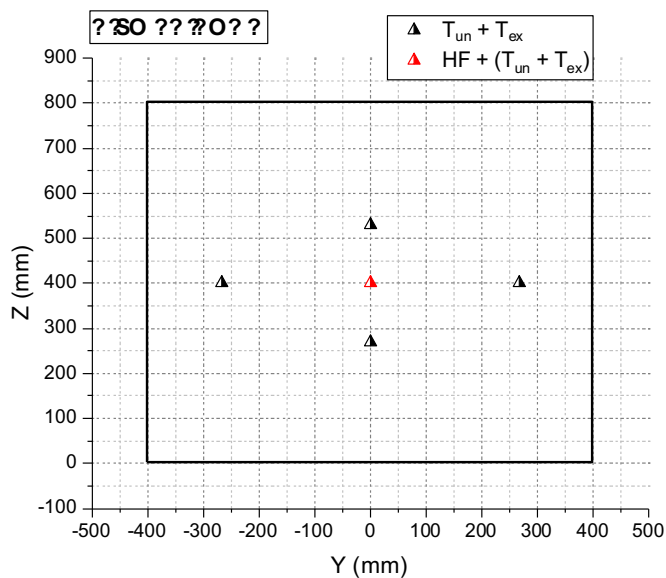
Τα **εσωτερικά θερμοστοιχεία** των τοιχωμάτων τοποθετήθηκαν στην οροφή, στο οπίσθιο τοίχωμα και σε ένα από τα πλαϊνά τοιχώματα, όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.18-4.23.



Σχήμα 4.18: Θέσεις μετρητικών συσκευών στο πλαϊνό τοίχωμα.



Σχήμα 4.19: Θέσεις εσωτερικών μετρητικών συσκευών στην οροφή.



Σχήμα 4.20: Θέσεις εσωτερικών μετρητικών συσκευών στο οπίσθιο τοίχωμα.

Οι θέσεις των εσωτερικών θερμοστοιχείων του πλαϊνού τοιχώματος σε σχέση με τους άξονες x και z (Σχήμα 4.18 και 4.21) ήταν σταθερές για όλες τις πειραματικές δοκιμές. Ομοίως, οι θέσεις των θερμοστοιχείων της οροφής σταθερές με τους άξονες x και y (Σχήμα 4.19 και 4.22) και των θερμοστοιχείων του οπίσθιου τοιχώματος σταθερές ως προς z και y (Σχήμα 4.20 και 4.23).



Σχήμα 4.21: Εσωτερικά θερμοστοιχεία πλαϊνού τοιχώματος.



Σχήμα 4.22: Εσωτερικά θερμοστοιχεία οροφής.

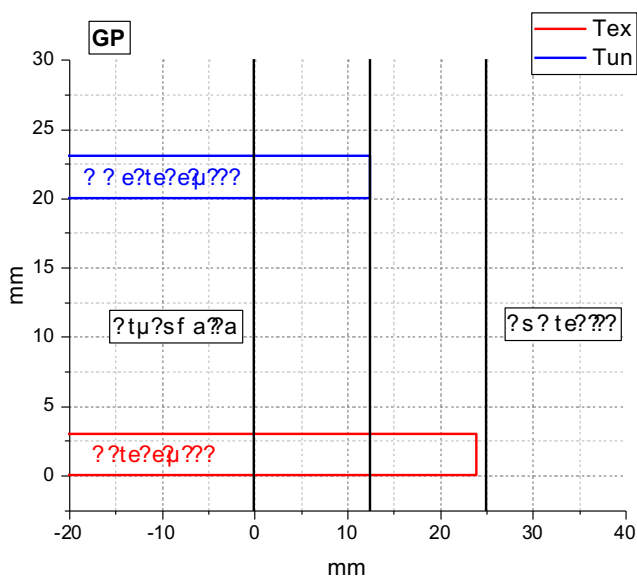


Σχήμα 4.23: Εσωτερικά θερμοστοιχεία οπίσθιου τοιχώματος.

Ανάλογα με το δομικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε (γυψοσανίδες - GP, σανίδες πυριτικού ασβεστίου - SiCa), οι θέσεις των θερμοστοιχείων ως προς το πάχος του κάθε τοιχώματος ήταν διαφορετικές ως εξής:

- Πειραματικές δοκιμές με διπλή γυψοσανίδα (GP)

Για τα πειράματα με τοιχώματα κατασκευασμένα με διπλή γυψοσανίδα συνολικού πάχους 25 mm, τα θερμοστοιχεία τοποθετήθηκαν σε απόσταση 1 mm (Εκτεθειμένα - Exposed) και 12,5mm (Μη εκτεθειμένα - Unexposed) από την εκτεθειμένη στην φωτιά επιφάνεια, χωρίς την δημιουργία διαμπερούς οπής. Στο Σχήμα 4.24 φαίνεται ένα ποιοτικό σχήμα των θέσεων των Εκτεθειμένων και Μη Εκτεθειμένων Θερμοστοιχείων σε σχέση με το πάχος των τοιχωμάτων για τις πειραματικές δοκιμές με διπλή γυψοσανίδα (GP).



Σχήμα 4.24: Θέσεις εσωτερικού εκτεθειμένου και μη εκτεθειμένου θερμοστοιχείου στα τοιχώματα σχετικές με το πάχος για τα πειράματα με διπλή γυψοσανίδα (GP).

Οι συντεταγμένες όλων των εσωτερικών θερμοστοιχείων τους φαίνονται στους Πίνακες 4.7-4.9.

Πίνακας 4.7: Θέσεις θερμοστοιχείων πλαϊνού τοιχώματος (Sidewall - GP).

A/a	x (mm)	z (mm)	y (mm)	Είδος
45	900	400	400	Μη εκτεθειμένη
46	600	270	400	
47	600	400	400	
48	600	530	400	
49	300	400	400	
50	900	400	412,5	Εκτεθειμένη
51	600	270	412,5	
52	600	400	412,5	
53	600	530	412,5	
54	300	400	412,5	

Πίνακας 4.8: Θέσεις θερμοστοιχείων πίσω τοίχου (Backwall – GP).

A/a	x (mm)	z (mm)	y (mm)	Είδος
55	1200	400	0	Μη εκτεθειμένη
56	1200	270	0	
57	1200	530	0	
58	1200	400	267	
59	1200	400	-267	
60	1212,5	400	0	Εκτεθειμένη
61	1212,5	270	0	
62	1212,5	530	0	
63	1212,5	400	267	
64	1212,5	400	-267	

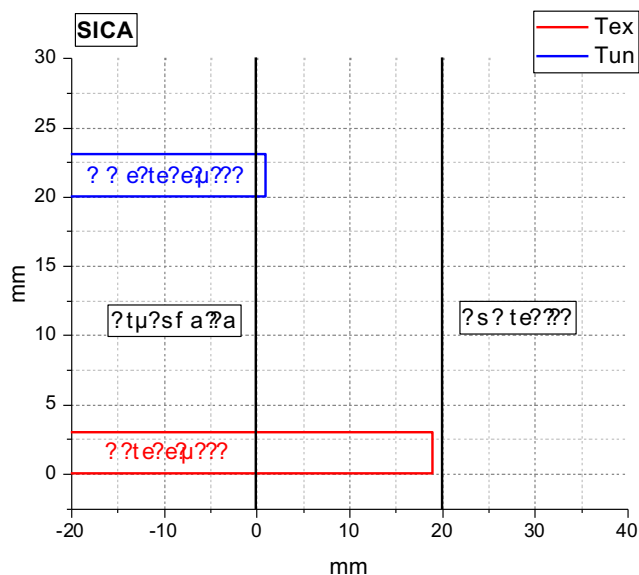
Πίνακας 4.9: Θέσεις θερμοστοιχείων οροφής (Ceiling – GP).

A/a	x (mm)	z (mm)	y (mm)	Είδος
65	600	800	0	Μη εκτεθειμένη
66	300	800	0	
67	900	800	0	
68	600	800	-130	
69	600	800	130	
70	600	812,5	0	Εκτεθειμένη
71	300	812,5	0	
72	900	812,5	0	
73	600	812,5	-130	
74	600	812,5	130	

- Πειραματικές δοκιμές με σανίδα πυριτικού ασβεστίου (SiCa)

Στα πειράματα με σανίδα πυριτικού ασβεστίου (SiCa) τα θερμοστοιχεία, τοποθετήθηκαν σε απόσταση 1mm (Εκτεθειμένα - Exposed) και 19mm (Μη εκτεθειμένα - Unexposed) από την εσωτερική επιφάνεια, χωρίς την δημιουργία διαμπερούς οπής. Στο Σχήμα 4.25 φαίνεται ένα ποιοτικό σχήμα των θέσεων των Εκτεθειμένων και Μη Εκτεθειμένων Θερμοστοιχείων σε σχέση με

το πάχος των τοιχωμάτων για τις πειραματικές δοκιμές με σανίδα πυριτικού ασβεστίου (SiCa).



Σχήμα 4.25: Θέσεις εσωτερικού εκτεθειμένου και μη εκτεθειμένου θερμοστοιχείου στα τοιχώματα σχετικές με το πάχος για τα πειράματα σανίδα πυριτικού ασβεστίου (SiCa).

Οι συνταγμένες τους φαίνονται στους Πίνακες 4.10-4.12.

Πίνακας 4.10: Θέσεις θερμοστοιχείων πλαϊνού τοιχώματος (Sidewall - SiCa).

A/a	x (mm)	z (mm)	y (mm)	Είδος
45	900	400	400	Μη εκτεθειμένη
46	600	270	400	
47	600	400	400	
48	600	530	400	
49	300	400	400	
50	900	400	420	Εκτεθειμένη

51	600	270	420	
52	600	400	420	
53	600	530	420	
54	300	400	420	

Πίνακας 4.11: Θέσεις θερμοστοιχείων πίσω τοίχου (Backwall – SiCa).

A/a	x (mm)	z (mm)	y (mm)	Είδος
55	1200	400	0	Μη εκτεθειμένη
56	1200	270	0	
57	1200	530	0	
58	1200	400	267	
59	1200	400	-267	
60	1220	400	0	Εκτεθειμένη
61	1220	270	0	
62	1220	530	0	
63	1220	400	267	
64	1220	400	-267	

Πίνακας 4.12: Θέσεις θερμοστοιχείων οροφής (Ceiling – SiCa).

A/a	x (mm)	z (mm)	y (mm)	Είδος
65	600	800	0	Μη εκτεθειμένη
66	300	800	0	
67	900	800	0	
68	600	800	-130	
69	600	800	130	
70	600	820	0	Εκτεθειμένη
71	300	820	0	
72	900	820	0	
73	600	820	-130	
74	600	820	130	

4.5.2 Θερμορόμετρα

Για τον υπολογισμό της θερμορροής στα τοιχώματα, τοποθετήθηκαν στην οροφή, στο οπίσθιο και σε ένα πλαϊνό τοίχωμα τρία θερμορόμετρα συνολικά. Οι θέσεις τους φαίνονται στον Πίνακα 4.13 και στα Σχήματα 4.18-4.20.

Πίνακας 4.13: Θέσεις θερμοροόμετρων.

A/a	x (mm)	z (mm)	y (mm)	Ευαισθησία E (m ² Volt/kW)
1	600	400	400	0,000172
2	1200	400	0	0,000167
3	600	800	0	0,000141

4.5.3 Δικατευθυντικοί μετρητές ταχύτητας

Οι διευθυντικοί μετρητές ταχύτητας είναι τοποθετημένοι στο άνοιγμα ώστε να μετρούν την οριζόντια ταχύτητα κατά τον άξονα x του εισερχόμενου αέρα και των εξερχόμενων καυσαερίων. Οι θέσεις των οργάνων φαίνονται στον Πίνακα 4.14 καθώς και στα Σχήματα 4.14 και 4.15.

Πίνακας 4.14: Θέσεις δικατευθυντικών μετρητών ταχύτητας.

A/a	x (mm)	z (mm)	y (mm)
1	0	10	0
2	0	140	0
3	0	270	0
4	0	400	0

4.5.4 Σωλήνες Pitot – Static

Οι σωλήνες Pitot – Static χρησιμοποιήθηκαν και αυτοί για την μέτρηση της ταχύτητας οριζόντια στο άνοιγμα. Οι θέσεις τους φαίνονται στον Πίνακα 4.15 και στο Σχήματα 4.14 και 4.15.

Πίνακας 4.15: Θέσεις σωλήνων Pitot.

A/a	x (mm)	z (mm)	y (mm)
5	0	530	0
6	0	660	0

4.6 Σύστημα δειγματοληψίας – Θερμιδομετρία

Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας (Heat Release Rate – HRR) είναι η πιο σημαντική παράμετρος για την εκτίμηση του κινδύνου φωτιάς. Η συσκευή που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της εκλυόμενης θερμότητας καλείται θερμιδομετρητής και η μέθοδος μέτρησης ονομάζεται θερμιδομετρία. Η πρώτη από τις δύο βασικές μεθόδους εκτίμησης του κινδύνου εκδήλωσης φωτιάς αποτελεί μία πειραματική εκτίμηση σε πραγματικό μέγεθος (κλίμακα 1:1). Η προσέγγιση αυτή περιλαμβάνει μία σειρά πειραμάτων μεγάλης κλίμακας που καλύπτουν όλα τα πιθανά σενάρια πυρκαγιάς. Η δεύτερη μέθοδος περιλαμβάνει τη χρησιμοποίηση δεδομένων μικρής κλίμακας – κατά κύριο λόγο του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (PEΘ) – σε συνδυασμό με μία διαδικασία υπολογισμών για αναγωγή σε πραγματικό μέγεθος. Η δεύτερη προσέγγιση είναι αναμφίβολα περισσότερο ευέλικτη και λιγότερο χρονοβόρα και δαπανηρή. Με τη συνεχή βελτίωση της ικανότητας πρόβλεψης και την ακρίβεια των μοντέλων φωτιάς η δεύτερη μέθοδος έχει επικρατήσει και χρησιμοποιείται ευρέως σήμερα.

4.6.1 Θερμιδομετρία κατανάλωσης οξυγόνου

Το 1917, ο Thornton έδειξε ότι για ένα μεγάλο μέρος οργανικών υγρών και αερίων απελευθερώνεται ένα σχετικά σταθερό ποσό θερμότητας ανά μονάδα καταναλισκόμενου οξυγόνου για τέλεια καύση (Thornton, 1917). Ο Hugget (1980) επιβεβαίωσε τον ισχυρισμό αυτό και για τα οργανικά στερεά και η σταθερά E, η οποία συμβολίζει τον ρυθμό έκλυσης θερμότητας ανά μονάδας μάζας οξυγόνου (kJ / g), έχει μέση τιμή ίση με 13,1 MJ / kg O₂, με απόκλιση 5%. Ο κανόνας του Thornton υπονοεί ότι η μέτρηση του οξυγόνου που καταναλώθηκε σε ένα σύστημα καύσης είναι επαρκής ώστε να καθοριστεί η καθαρά εκλυόμενη θερμική ενέργεια. Αυτή είναι η θεμελιώδης αρχή που διέπει τη μέθοδο μέτρησης του ρυθμού έκλυσης θερμότητας με βάση το οξυγόνο που καταναλώθηκε στα πειράματα φωτιάς.

Η πρώτη εφαρμογή της τεχνικής της μέτρησης του καταναλισκόμενου οξυγόνου σε έρευνα γύρω από τη φωτιά πραγματοποιήθηκε από τον Parker (1977) στο πείραμα ASTM E 84 σε σήραγγα. Αργότερα, ο Sensenig (1980) την χρησιμοποίησε σε πειράματα μεσαίας κλίμακας. Η τεχνική της μέτρησης του καταναλισκόμενου οξυγόνου βελτιώθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1970 από το NIST (National Institute of

Standards and Technology) αποτελώντας ένα σημαντικό επίτευγμα στην ακριβή μέτρηση του ρυθμού έκλυσης θερμότητας στα πειράματα φωτιάς. Σήμερα η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται ευρέως παγκοσμίως για εφαρμογές μικρής και μεγάλης κλίμακας.

Κανόνες του Thornton

Η ακριβής τιμή του E_{O_2} για ένα συγκεκριμένο καύσιμο ισούται με την κατώτερη θερμογόνο δύναμη (H_u) του καυσίμου διαιρεμένης με τη μάζα του οξυγόνου που απαιτείται για την πλήρη καύση μίας μονάδας μάζας καυσίμου. Η μάζα του οξυγόνου που απαιτείται για την πλήρη καύση μίας μονάδας καυσίμου καθορίζεται από τη στοιχειομετρία των αντιδράσεων καύσης.

Πίνακας 4.16: Τιμές εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα μάζας O_2 , CO_2 , CO (MJ/kgO_2) και ογκομετρικής διαστολής α (Janssens, 2016).

Κατηγορία	E_{O_2}	α	E'_{O_2} ή E_{CO_2}	E''_{O_2} ή E_{CO}
Κανονικά αλκάνια	12,7	1,079	14,6	12,9
Υποκατάστατα αλκανίων	12,6	1,076	14,6	12,8
Κυκλο-αλκάνια	12,7	1,069	13,8	11,6
Κανονικά αλκένια	13,2	1,070	14,2	12,4
Κυκλο-αλκένια	13,0	1,062	13,4	11,1
Αλκαδιένια	13,5	1,057	13,5	11,2
Κανονικά αλκίνια	13,3	1,060	14,0	12,0
Αρωματικοί υδρογονάνθρακες	13,0	1,049	12,4	9,4
Κανονικά αλκάνια	12,7	1,079	14,6	12,9

Στον Πίνακα 4.16 παρουσιάζονται διάφορες τιμές για την σταθερά E_{O_2} , αλλά και για τα αντίστοιχα ποσά θερμότητας ανά μονάδα μάζας CO_2 και CO που παράγονται κατά την καύση και συμβολίζονται με E'_{O_2} και E''_{O_2} αντίστοιχα. Επιπλέον αναφέρονται και τιμές για την σταθερά α (ογκομετρική διαστολή) για καύσιμα που περιέχουν C (άνθρακα) και H (υδρογόνο).

4.6.2 Εφαρμογή της Μεθόδου Κατανάλωσης του Οξυγόνου

Η βασική προϋπόθεση για τη χρησιμοποίηση της τεχνικής του καταναλισκόμενου οξυγόνου είναι η συλλογή και καθοδήγηση όλων των προϊόντων της καύσης διαμέσου ενός αγωγού καυσαερίων. Ο θερμιδομετρητής οξυγόνου τοποθετείται σε μία απόσταση κατάντι της ροής στον αγωγό καυσαερίων τέτοια ώστε να γίνεται επαρκής ανάμειξη και μετρούνται η παροχή μάζας και η σύνθεση των καυσαερίων. Στο Σχήμα 4.26 απεικονίζεται σχηματικά ένας θερμιδομετρητής οξυγόνου. Δεν είναι απαραίτητη η μέτρηση του αέρα εισόδου, δεδομένου ότι η μέτρηση γίνεται στον αγωγό εξόδου. Η πρακτική εφαρμογή της τεχνικής του καταναλισκόμενου οξυγόνου είναι έμμεση και όχι άμεση. Η εφαρμογή του κανόνα του Thornton στο σύστημα καύσης που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.27 οδηγεί στην Εξίσωση (4.10) για το ρυθμό έκλυσης θερμότητας:

Διέγγραψε: (4.10)

$$\dot{Q} = E_{O_2} (\dot{m}_a Y_{O_2}^a - \dot{m}_e Y_{O_2}^e) \quad (4.10)$$

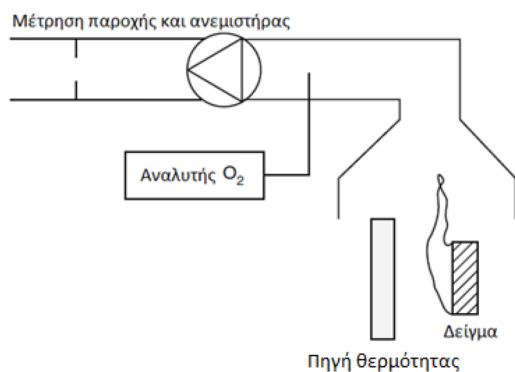
Όπου:

- E_{O_2} : Εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα μάζας καταναλισκόμενου οξυγόνου ($\approx 13,1$ MJ / kg)
- \dot{m}_a (kg/s): Παροχή μάζας αέρα καύσης
- \dot{m}_e (kg/s): Παροχή μάζας προϊόντων καύσης
- $Y_{O_2}^a$: Κλάσμα μάζας του οξυγόνου στον αέρα καύσης (0,232 kg / kg ξ.αέρα)
- $Y_{O_2}^e$: Κλάσμα μάζας του οξυγόνου στα προϊόντα της καύσης (kg / kg)

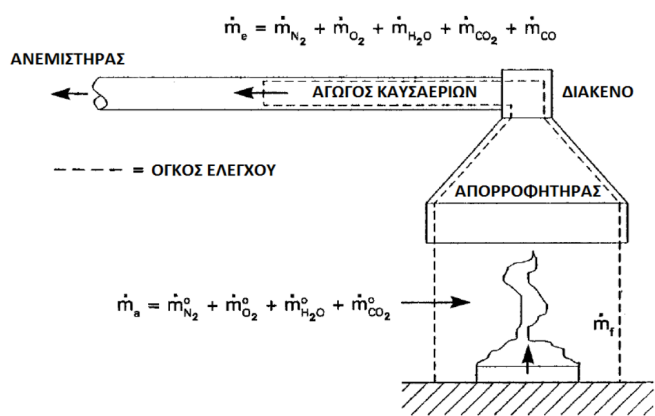
Αλλαγή κωδικού πεδίου

Αλλαγή κωδικού πεδίου

Αλλαγή κωδικού πεδίου



Σχήμα 4.26: Θερμιδομετρητής καταναλισκομένου οξυγόνου



Σχήμα 4.27: Αρχή διατήρησης μάζας στη θερμιδομετρία.

Υπάρχουν τρία προβλήματα με την εφαρμογή της Εξίσωσης (4.10).

Πρώτον, οι αναλυτές οξυγόνου μετρούν γραμμομοριακά κλάσματα (X_{O_2}) και όχι κλάσματα μάζας (Y_{O_2}) στο δείγμα των καυσαερίων. Τα γραμμομοριακά κλάσματα θα πρέπει να μετατρέπονται σε κλάσματα μάζας πολλαπλασιάζοντας το γραμμομοριακό κλάσμα με το λόγο της μοριακής μάζας του οξυγόνου (M_{O_2}) προς τη μοριακή μάζα του δείγματος των αερίων. Συνήθως, η τελευταία είναι περίπου ίση με τη μοριακή μάζα του αέρα ($\approx 29 \text{ kg/kmol}$).

Δεύτερον, η υγρασία αφαιρείται από το δείγμα πριν τη διέλευσή του από τον παραμαγνητικό αναλυτή, έτσι ώστε το γραμμομοριακό κλάσμα να μετριέται επί ξηρού.

Τρίτον, τα παροχόμετρα αέρα μετρούν παροχές όγκου και όχι παροχές μάζας. Η ογκομετρική παροχή στον αγωγό εξόδου, υπό κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, είναι συνήθως ελάχιστα διαφορετική από την παροχή εισόδου του αέρα λόγω της διαστολής των καυσαερίων μετά την καύση.

Οι Parker (1982) και Janssens (1991) έλυσαν τα προβλήματα αυτά και ανέπτυξαν εξισώσεις για τον υπολογισμό του ρυθμού έκλυσης θερμότητας με τη μέθοδο του καταναλισκόμενου οξυγόνου για ποικίλες εφαρμογές. Οι εξισώσεις αυτές αποτελούν συνάρτηση της ανάλυσης των καυσαερίων. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η μέτρηση της συγκέντρωσης του οξυγόνου. Ωστόσο, η ακρίβεια μπορεί να βελτιωθεί με την προσθήκη οργάνων μέτρησης της συγκέντρωσης και άλλων αερίων.

4.6.2.1 Μέτρηση μόνο του O_2

Σε αυτήν την περίπτωση πρέπει να αφαιρεθούν όλοι οι υδρατμοί (από ένα ψυγείο και έναν απορροφητή υγρασίας) και το CO_2 (από ένα χημικό απορροφητή) από το ρεύμα των καυσαερίων πριν ληφθεί η μέτρηση του O_2 . Αυτό οδηγεί στην υπόθεση ότι τα καυσαέρια αποτελούνται μόνο από O_2 και N_2 . Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας υπολογίζεται από την Εξίσωση (4.11).

$$\dot{Q} = E_{O_2} \frac{\Phi}{1 + \Phi(a-1)} \dot{m}_g \frac{M_{O_2}}{M_a} (1 - X_{H_2O}^a - X_{CO_2}^a) X_{O_2}^{A^a} \quad (4.11)$$

Διέγγραψε: (4.11)

Ο παράγοντας κατανάλωσης οξυγόνου, Φ , προσδιορίζεται μέσω της Εξίσωσης (4.12).

$$\Phi = \frac{X_{O_2}^{A^a} - X_{O_2}^{A^e}}{(1 - X_{O_2}^{A^a}) X_{O_2}^{A^e}} \quad (4.12)$$

Διέγγραψε: (4.12)

Όπου,

- ϕ : Παράγοντας κατανάλωσης οξυγόνου (κλάσμα της ποσότητας του εισερχόμενου αέρα για το οποίο καταναλώνεται πλήρως το οξυγόνο)
- a : Συντελεστής ογκομετρικής μεταβολής
- \dot{m}_g : Παροχή μάζας των καυσαερίων στον αγωγό εξόδου (kg/s)
- M_{O_2} : Μοριακή μάζα του οξυγόνου (32 kg/kmol)
- M_a : Μοριακή μάζα του αέρα καύσης (29 kg/kmol ξηρού αέρα)
- $X_{H_2O}^a$: Πραγματικό γραμμομοριακό κλάσμα υδρατμών στον αέρα καύσης
- $X_{CO_2}^a$: Πραγματικό γραμμομοριακό κλάσμα διοξειδίου του άνθρακα στον αέρα καύσης
- $X_{O_2}^{A^a}$: Μετρούμενο γραμμομοριακό κλάσμα οξυγόνου στον αέρα καύσης
- $X_{O_2}^{A^e}$: Μετρούμενο γραμμομοριακό κλάσμα οξυγόνου στα καυσαέρια

Όταν η σύνθεση του καυσίμου δεν είναι γνωστή, χρησιμοποιείται μία μέση τιμή για το συντελεστή ογκομετρικής μεταβολής. Πλήρης καύση του άνθρακα σε ξηρό περιβάλλον δίνει $a=1$. Μία συνήθης μέση τιμή για τα καύσιμα του πίνακα είναι $1,105 \pm 0,066$.

Το $X_{H_2O}^a$ μπορεί να μετρηθεί μέσω της σχετικής υγρασίας (Relative Humidity) και της θερμοκρασίας στο εργαστήριο σύμφωνα με την Εξίσωση (4.13). Τυπικά κυμαίνεται σε 1-2% σε εργαστήριο με ελεγχόμενη θερμοκρασία.

Διέγραψε: (4.13)

$$X_{H_2O}^a = \frac{RH}{100} \frac{p_s(T_a)}{p_a} \quad (4.13)$$

Όπου:

- RH: Σχετική υγρασία του αέρα (%)
- $p_s(T_a)$: Τάση ατμών του νερού σε θερμοκρασία T_a (Pa)
- T_a : Θερμοκρασία αέρα περιβάλλοντος (K)

Το $X_{\text{CO}_2}^a$ είναι περίπου 390 ppm σε ξηρό αέρα. Η Εξίσωση (4.13) αναμένεται να είναι ακριβής με μέσο σφάλμα $\pm 10\%$ με την υπόθεση ότι η καύση είναι τέλεια. Το σφάλμα μπορεί να είναι μεγαλύτερο αν παραχθούν μετρήσιμες ποσότητες CO και αιθάλης ή αν τα προϊόντα της καύσης περιέχουν συστατικά εκτός των H_2O και CO_2 σε σημαντικές ποσότητες (για παράδειγμα HCl). Το σφάλμα εν μέρει οφείλεται στην αβεβαιότητα των μεταβλητών E_{O_2} και a .

Διέγραψε: (4.13)

4.6.2.2 Μέτρηση των O_2 , CO_2

Στην περίπτωση αυτή δεσμεύονται μόνο οι υδρατμοί του καυσαερίου προτού το δείγμα καυσαερίου φτάσει στον αναλυτή. Σε πολλές περιπτώσεις η ποσότητα του CO είναι αμελητέα. Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας υπολογίζεται από την Εξίσωση (4.14)

Διέγραψε: (4.14)

$$\dot{Q} = E_{\text{O}_2} \frac{\Phi}{1 + \phi(a-1)} \dot{m}_g \frac{M_{\text{O}_2}}{M_a} (1 - X_{\text{H}_2\text{O}}^a) X_{\text{O}_2}^{Aa} \quad (4.14)$$

Ο παράγοντας κατανάλωσης οξυγόνου, ϕ , προσδιορίζεται μέσω της Εξίσωσης (4.15).

Διέγραψε: (4.15)

$$\phi = \frac{X_{\text{O}_2}^{Aa} (1 - X_{\text{CO}_2}^{Ae}) - X_{\text{O}_2}^{Ae} (1 - X_{\text{CO}_2}^{Aa})}{(1 - X_{\text{O}_2}^{Aa} - X_{\text{CO}_2}^{Ae}) X_{\text{O}_2}^{Aa}} \quad (4.15)$$

Όπου:

- $X_{\text{O}_2}^{Aa}$: Μετρούμενο γραμμομοριακό κλάσμα διοξειδίου του άνθρακα στον αέρα καύσης.
- $X_{\text{O}_2}^{Ae}$: Μετρούμενο γραμμομοριακό κλάσμα διοξειδίου του άνθρακα στα καυσαέρια.

4.6.2.3 Μέτρηση των O_2 , CO_2 και CO

Γενικά, με την προσθήκη του CO₂ δεν βελτιώνεται πάρα πολύ η ακρίβεια της μέτρησης του ρυθμού έκλυσης θερμότητας. Εάν σημαντικό μέρος του άνθρακα στο καύσιμο μετατραπεί σε CO αντί για CO₂, οι εξισώσεις μπορούν να διορθωθούν λαμβάνοντας υπόψη και την ατελή καύση. Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας υπολογίζεται από την Εξίσωση (4.16).

Διέγραψε: (4.16)

$$\dot{Q} = \left[E_{O_2} \phi - (E_{CO} - E_{O_2}) \frac{1 - \phi}{2} \frac{X_{CO}^{A^a}}{X_{O_2}^{A^a}} \right] \frac{\dot{m}_g}{1 + \phi(a-1)} \frac{M_{O_2}}{M_a} (1 - X_{H_2O}^a) X_{O_2}^{A^a} \quad (4.16)$$

Ο παράγοντας κατανάλωσης οξυγόνου, ϕ , προσδιορίζεται μέσω της Εξίσωσης (4.17).

Διέγραψε: (4.17)

$$\phi = \frac{X_{O_2}^{A^a} (1 - X_{CO_2}^{A^e} - X_{CO}^{A^e}) - X_{O_2}^{A^e} (1 - X_{CO_2}^{A^a})}{(1 - X_{O_2}^{A^a} - X_{CO_2}^{A^e} - X_{CO}^{A^e}) X_{O_2}^{A^a}} \quad (4.17)$$

Όπου:

- E_{CO} (ή E_{O_2}): Θερμότητα που εκλύεται ανά μάζα καταναλισκόμενου οξυγόνου για το CO (17.6 MJ/g)
- $X_{CO}^{A^e}$: Μετρούμενο γραμμομοριακό κλάσμα μονοξειδίου του άνθρακα στα καυσαέρια

4.7 Σύστημα συλλογής δεδομένων

4.7.1 Συσκευές 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

παρέχουν ως αποτέλεσμα, ψηφιακά, τη μέτρηση στις επιθυμητές μονάδες.

Το ένα από τα δύο συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν είναι σύστημα συλλογής δεδομένων NI cDAQ-9172, της National Instruments και φαίνεται αριστερά στο Σχήμα 4.28. Στο σύστημα αυτό συνδέονται κάρτες με 18 κανάλια (channels) η κάθε μια, για την είσοδο σημάτων (signals) από τις συσκευές μέτρησης. Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 53 δέκτες σημάτων.



Σχήμα 4.28: Συστήματα συλλογής δεδομένων NI cDAQ-9172 (αριστερά) και Agilent 34972A (δεξιά).

Το δεύτερο σύστημα συλλογής δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε είναι το Agilent 34972A της εταιρείας Agilent Technologies όπως φαίνεται δεξιά στο Σχήμα 4.28. Με αντίστοιχο τρόπο κάρτες δέχονται σήμα (signal) για καθένα από τα 20 κανάλια (channels) τα οποία διαθέτουν. Στις πειραματικές δοκιμές, χρησιμοποιήθηκαν δύο κάρτες. Επειδή το Agilent 34972A εκτελεί σειριακή σάρωση όλων των κατειλημμένων καναλιών ο χρόνος δειγματοληψίας των τιμών από τα δύο συστήματα συλλογής δεδομένων ορίστηκε στο 1,1 δευτερόλεπτο για συμφωνία μετρήσεων.

Τα συστήματα αυτά συνδέθηκαν στη συνέχεια μέσω θύρας USB με ηλεκτρονικό υπολογιστή και με τη βοήθεια του λογισμικού LabView με τη βοήθεια του οποίου πραγματοποιήθηκε η διαχείριση, ο έλεγχος άμεσα από τον χρήστη κατά τη διάρκεια του κάθε πειράματος και αργότερα η εξαγωγή των δεδομένων για επεξεργασία.

4.7.2 Λογισμικό LabVIEW

Για την αποθήκευση, επεξεργασία και παρουσίαση των τιμών από τις κάρτες συλλογής δεδομένων των δυο συστημάτων συλλογής δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό LabVIEW.

Το πρόγραμμα LabVIEW είναι ένα περιβάλλον προγραμματισμού στο οποίο χρησιμοποιείται η γραφική γλώσσα προγραμματισμού G. Έτσι, με το LabVIEW, δημιουργείται πρόγραμμα το οποίο έχει τη μορφή δομικών διαγραμμάτων. Για τη δημιουργία των δομικών διαγραμμάτων χρησιμοποιήθηκαν κάποια βασικά εργαλεία τα οποία παρέχονται από το πρόγραμμα.

Για την διευκόλυνση των χρηστών το LabVIEW περιέχει βιβλιοθήκες με υπορουτίνες για πολλά είδη συστημάτων συλλογής δεδομένων, όπως τα NI cDAQ-9172 και Agilent 34972A. Οι βιβλιοθήκες αυτές περιέχουν εργαλεία και υπορουτίνες για συλλογή δεδομένων, επεξεργασία, αποθήκευση, αλλά και μεθοδολογίες παρουσίασης σε πραγματικό χρόνο (real time).

4.7.2.1 Μεθοδολογία δημιουργίας προγράμματος για τις πειραματικές δοκιμές σταθερής ισχύος (steady state)

Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για τη σχεδίαση του προγράμματος σε κάθε πείραμα σταθερής θερμικής ισχύος ήταν κοινή.

Αρχικά, μέσω υπορουτίνων από βιβλιοθήκες του προγράμματος, γινόταν η αναγνώριση των συσκευών που ήταν συνδεδεμένες με τις θύρες USB. Στη συνέχεια, τοποθετήθηκε επαναληπτικός βρόγχος με συχνότητα δειγματοληψίας τα 1,1 sec. Εντός του επαναληπτικού βρόγχου πραγματοποιούνταν συλλογή σήματος μέσω των εργαλείων ελέγχου (Signal Output) από τις συσκευές που είχαν ήδη αναγνωρισθεί. Έπειτα, τα σήματα από κάθε συσκευή κατηγοριοποιήθηκαν σε ομάδες ανάλογα με το είδος της μετρητικής συσκευής (θερμοστοιχεία, θερμοροόμετρα, δικατευθυντικοί μετρητές ταχύτητας, σωλήνες Pitot-Static, αναλυτής καυσαερίων, παροχόμετρα αέρα). Με τον τρόπο αυτό έγινε δυνατή η άμεση προβολή και επεξεργασία των σημάτων σε γραφικές παραστάσεις (graphs) σε πραγματικό χρόνο. Παράλληλα, γινόταν αποθήκευση όλων των τιμών σε αρχεία μορφής .xls.

Οι σχέσεις αναγωγής του σήματος ηλεκτρικής τάσης σε κατάλληλες μονάδες (Παράγραφο 4.3) πραγματοποιούνταν σε πραγματικό χρόνο μέσα στο πρόγραμμα με την εισαγωγή ειδικών δομικών στοιχείων (formulas), τα οποία επέτρεπαν την εκτέλεση αλγεβρικών πράξεων και την άμεση αντιστοίχιση των μονάδων ηλεκτρικής τάσης με τις τιμές των φυσικών μεγεθών που ερευνώνται. Κατ' αυτόν τον τρόπο, τα γραφήματα των διαφόρων μεγεθών συναρτήσεως του χρόνου μπορούσαν να παράσχουν σημαντική πληροφορία κατά τη διάρκεια διεξαγωγής του εκάστοτε πειράματος.

4.7.2.2 Μεθοδολογία δημιουργίας προγράμματος για τις πειραματικές δοκιμές πρότυπων καμπυλών

Για τις πειραματικές δοκιμές πρότυπων καμπυλών θερμοκρασίας-χρόνου (T-t) χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα της Παραγράφου 4.9 με την προσθήκη ενός υποπρογράμματος ελέγχου παροχής καυσίμου και μίας υπορουτίνας αυτόματου ελέγχου (PID). Για τις δοκιμές αυτές το LabVIEW μέσω ενός υποπρογράμματος επικοινωνούσε με το πρόγραμμα των παροχόμετρων καυσίμου και ήλεγχε την ογκομετρική παροχή.

Για τις καμπύλες θερμοκρασίας - χρόνου χρησιμοποιήθηκε υπορουτίνα αυτομάτου ελέγχου PID. Κάθε 1,1 δευτερόλεπτο ο μέσος όρος των θερμοκρασιών των θερμοστοιχείων στις θέσεις του Πίνακα 4.17 υπολογιζόταν και συγκρινόταν με την θεωρητική τιμή της θερμοκρασίας από τις υπολογιστικές τιμές των πρότυπων καμπυλών (Παράγραφος 2.3). Εάν η μετρούμενη θερμοκρασία ήταν μικρότερη από την θεωρητική τότε το πρόγραμμα έστελνε σήμα στα παροχόμετρα καυσίμου να αυξηθεί η ογκομετρική παροχή. Εάν η μετρούμενη θερμοκρασία ήταν μεγαλύτερη της θεωρητικής, η παροχή μειωνόταν.

4.8 Εκτίμηση πειραματικών σφαλμάτων

Υπάρχουν δύο είδη σφαλμάτων, το συστηματικό και το τυχαίο σφάλμα.

Το συστηματικό σφάλμα (B_T) είναι το σφάλμα που οφείλεται σε συστηματικές μεταβολές και εκτιμάται από στατιστικές μεθόδους. Τα

συστηματικά σφάλματα είναι δυνατόν να οφείλονται σε κάποια από τις παρακάτω αιτίες:

- Περιορισμοί στην ακρίβεια μέτρησης του οργάνου
- Υποκειμενικό σφάλμα παρατηρητή
- Ατελής τεχνική μέτρησης (π.χ. κακή τοποθέτηση ενός θερμοστοιχείου μέσα σε ένα κανάλι ροής ρευστού).

Το τυχαίο σφάλμα (S_T) είναι το οφειλόμενο σε τυχαίες μεταβολές, ποικίλλει από μέτρηση σε μέτρηση και εκτιμάται από μη στατιστικές μεθόδους. Τα τυχαία σφάλματα είναι δυνατόν να οφείλονται σε κάποια από τις παρακάτω αιτίες:

- Διακυμάνσεις των πειραματικών συνθηκών (π.χ. λόγω χρονικής μεταβολής των τιμών των εξωτερικών μεταβλητών ή λόγω ελλιπούς ρύθμισης των τιμών των ανεξάρτητων μεταβλητών)
- Ανεπαρκής ανάγνωση οργάνου
- Διαταραχές που επιδρούν κατά μικρά και ακανόνιστα χρονικά διαστήματα (π.χ. τύρβη)

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι σε μία μέτρηση μπορεί να συνυπάρχουν συστηματικά και τυχαία σφάλματα. Τα συστηματικά σφάλματα είτε εκτιμώνται κατά τη μέτρηση, είτε θεωρούνται δεδομένα (π.χ. το συστηματικό σφάλμα βαθμονόμησης). Τα τυχαία σφάλματα είναι δυνατόν να εκτιμηθούν, μόνο αν γίνουν επανειλημμένες μετρήσεις του ίδιου μεγέθους και κάτω από κατά το δυνατόν αμετάβλητες πειραματικές συνθήκες (Σιμόπουλος, 1989).

Εδώ και δεκαετίες, αρκετοί μηχανικοί και στατιστικολόγοι ανέπτυξαν διάφορα μοντέλα υπολογισμού των αβεβαιοτήτων στις μετρήσεις των οργάνων καθένα από τα οποία παρουσιάζει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα (Dieck, 1997). Παράτω παρουσιάζεται το μοντέλο ASME (American Society of Mechanical Engineers, 1998), το οποίο χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα εργασία.

4.8.1 Το μοντέλο ASME

Το μοντέλο υπολογισμού της αβεβαιότητας ASME διέπεται από την Εξίσωση (4.18):

$$U_{ASME} = \pm t_{95} \left[\left(\frac{B_T}{2} \right)^2 + (S_T)^2 \right] \quad (4.18)$$

Η στοχαστική μεταβλητή t_{95} της κατανομής Student καθορίζεται από τον αριθμό των βαθμών ελευθερίας. Η μέθοδος αυτή θεωρείται πως είναι αρκετά αξιόπιστη και χρησιμοποιείται ευρέως από τους μηχανικούς.

Η συνολική συστηματική αβεβαιότητα B_T και η συνολική τυχαία αβεβαιότητα S_T υπολογίζονται από τις Εξισώσεις (4.19) και (4.20), όπου οι B_1, B_2, B_3 και S_1, S_2, S_3 είναι ξεχωριστές πηγές σφαλμάτων.

$$B_T = [B_1^2 + B_2^2 + B_3^2 + \dots]^{1/2} \quad (4.19)$$

$$S_T = [S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 + \dots]^{1/2} \quad (4.20)$$

Προκειμένου να προσδιοριστεί το συνολικό ή σύνθετο σφάλμα της μέτρησης κάθε μεγέθους, πρέπει να συνδυαστεί κατάλληλα το μέγιστο πιθανό τυχαίο σφάλμα της μέτρησης (S_T), καθώς και το συστηματικό σφάλμα (B_T). Μετά από κατάλληλη στατιστική ανάλυση, το συνολικό σφάλμα της μέτρησης, προσδιορίζεται με χρήση της Εξίσωσης (4.18). Δεδομένου ότι κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων οι τιμές των μετρούμενων μεγεθών παρουσίαζαν διακυμάνσεις, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός του τυχαίου σφάλματος μέσω της Εξίσωσης (4.21):

$$S_1 = S_T = 2\sigma_x \quad (4.21)$$

Όπου η τυπική απόκλιση της μέσης τιμής (σ_x) προσδιορίζεται μέσω της Εξίσωσης (4.22). Επιλέγεται το εύρος $2\sigma_x$ διότι αντιστοιχεί στο διάστημα εμπιστοσύνης 95% που έχει επιλεγεί για την ανάλυση σφαλμάτων.

Διέγραψε: (4.18)

Διέγραψε: (4.21)

Διέγραψε: (4.22)

$$\sigma_x = \frac{s}{\sqrt{N}} \quad (4.22)$$

Όπου η τυπική απόκλιση (s) προσδιορίζεται μέσω της Εξίσωσης (4.23)

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (X_i - \bar{X})^2} \quad (4.23)$$

Όπου, \bar{X} η μέση τιμή του δείγματος και N το μέγεθος του δείγματος.

4.8.1 Θερμοστοιχεία

Η μετρούμενη θερμοκρασία από τα θερμοστοιχεία είναι διαφορετική από την πραγματική λόγω των μετρητικών σφαλμάτων που μπορεί να προκύψουν (Nakos, 2004). Παρακάτω παρουσιάζονται τα συστηματικά σφάλματα και οι πηγές τους.

- **Η ατελής βαθμονόμηση του οργάνου:** Τα θερμοστοιχεία τύπου K, με τα καλώδια τα οποία χρησιμοποιήθηκαν, έχουν συστηματικό σφάλμα βαθμονόμησης που ανέρχεται στους $\pm 2,2^\circ\text{C}$, ή $\pm 0,75\%$ (όποια τιμή είναι μεγαλύτερη από τις δύο) για μετρήσεις θερμοκρασίας άνω των 0°C και για διάστημα εμπιστοσύνης 3σ (99,7%).
- **Οι απώλειες σύνδεσης θερμοστοιχείου:** Μία ακόμα πηγή συστηματικού σφάλματος που ελήφθη υπόψη είναι οι απώλειες σύνδεσης του θερμοστοιχείου στην υποδοχή. Σύμφωνα με τον Nakos (2004), το σφάλμα αυτό ανέρχεται στους $\pm 0,5^\circ\text{C}$.
- **Καλώδια και προεκτάσεις:** Θεωρούνται ως η τρίτη πηγή συστηματικού σφάλματος, το οποίο λαμβάνει την τιμή $\pm 2,2^\circ\text{C}$ ανεξαρτήτως της μετρούμενης τιμής (Nakos, 2004).

Τα τυχαία σφάλματα των θερμοστοιχείων θεωρούνται αμελητέα (Nakos, 2004). Εφαρμόζοντας την Εξίσωση (4.18), η αβεβαιότητα λόγω συστηματικών σφαλμάτων αναγράφεται στον Πίνακα 4.16.

Διέγραψε: (4.18)

4.8.2 Αισθητήρες μέτρησης ταχύτητας

Όπως προαναφέρθηκε, στην πειραματική εγκατάσταση τοποθετήθηκαν τέσσερις δικατευθυντικοί μετρητές ταχύτητας και δύο σωλήνες Pitot-Static. Η αβεβαιότητα στις μετρήσεις ενός δικατευθυντικού μετατροπέα μπορεί να επηρεαστεί από:

- **Γωνία πρόσπτωσης:** Τόσο στους δικατευθυντικούς μετρητές ταχύτητας όσο και στους σωλήνες Pitot – Static το συστηματικό σφάλμα λόγω γωνίας πρόσπτωσης είναι ίσο με $\pm 10\%$, σύμφωνα με τους McCaffrey και Heskestad (1976) για μεταβολή γωνίας 50° .
- **Ψηφιακά όργανα μέτρησης πίεσης:** Κάθε δικατευθυντικός μετρητής ταχύτητας συνδέθηκε με έναν αισθητήρα πίεσης PX277, ο οποίος έχει σφάλμα ακριβείας $\pm 1\%$ επί της μέγιστης τιμής του οργάνου, η οποία είναι τα 10 Pa. Κάθε σωλήνας Pitot – Static συνδέθηκε με ένα ψηφιακό μανόμετρο KIMO CP211, το οποίο εισάγει σφάλμα ανάγνωσης ίσο με $\pm 0,5\%$.

Η ταχύτητα υπολογίζεται έμμεσα βάσει της Εξίσωσης (4.6) και οι πηγές σφαλμάτων αφορούν τα μεγέθη της πίεσης και της πυκνότητας και κατ' επέκταση της θερμοκρασίας. Το συνολικό σφάλμα της ταχύτητας προκύπτει ως συνάρτηση των σφαλμάτων των επιμέρους μεγεθών και δίνεται από την Εξίσωση (4.24).

Διέγραψε: (4.6)

Διέγραψε: (4.24)

$$U_u = \left[\left(\frac{\partial U}{\partial T} U_T \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial p} U_p \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.24)$$

Όπου:

- U_u : η συνολική αβεβαιότητα της ταχύτητας

- U_T : η συνολική αβεβαιότητα του θερμοστοιχείου στη θέση του δικατευθυντικού μετατροπέα / Σωλήνα Pitot – Static
- U_p : η συνολική αβεβαιότητα του μετρητή διαφορικής πίεσης του δικατευθυντικού μετατροπέα / Σωλήνα Pitot – Static

4.8.3 Μετρητές ροής θερμότητας

Οι μετρήσεις που λαμβάνονται από τους αισθητήρες ροής θερμότητας τύπου SBG01 υπόκεινται σε σφάλματα που οφείλονται στις ιδιότητες των οργάνων, τη βαθμονόμησή τους, στη μη γραμμικότητα, τη συναγωγή και την εξισορρόπηση της ακτινοβολίας.

- **Βαθμονόμηση οργάνου:** Το αρχικό σφάλμα βαθμονόμησης είναι $\pm 3\%$.
- **Μη γραμμικότητα μέτρησης:** Ο αισθητήρας θεωρείται ότι δημιουργεί τάση η οποία είναι γραμμική ως προς τη ροή θερμότητας, κάτι το οποίο δεν είναι αληθές. Το σφάλμα ισούται με το $\pm 2\%$ επί της μέγιστης τιμής, που αντιστοιχεί σε ± 4 kW/m², αφού η μέγιστη τιμή της θερμοροής των μετρητών ήταν 200 kW/m² (Κεφάλαιο 5).
- **Εξισορρόπηση ακτινοβολίας:** Η μέτρηση ενός μετρητή ροής θερμότητας αφορά την εξισορρόπηση ακτινοβολίας, κατά την οποία η ροή θερμότητας όπως μετρήθηκε από τον αισθητήρα (σε kW/m²) είναι η διαφορά της ροής θερμότητας που προσπίπτει μείον τη ροή θερμότητας που εκπέμπεται (σε kW/m² επίσης). Και οι δύο αυτές ροές θερμότητας είναι ανάλογες της σταθεράς Boltzmann, με τη δεύτερη να είναι ανάλογη της θερμοκρασίας του αισθητήρα και την πρώτη ανάλογη της θερμοκρασίας της πηγής της ακτινοβολίας. Η ροή που εκπέμπεται στους 20 °C είναι 0,420 kW/m², οπότε κατά τη βαθμονόμηση, όπου οι θερμοκρασίες είναι άνω των 800 °C, η συνεισφορά αυτή θεωρείται αμελητέα.

4.8.4 Ψηφιακά παροχόμετρα καυσίμου

Τα ψηφιακά παροχόμετρα Bronkhorst EL-FLOW εμφανίζουν συστηματικό σφάλμα βαθμονόμησης λόγω:

- **Ανάγνωσης:** Το συστηματικό σφάλμα βαθμονόμησης είναι $\pm 0,5\%$. Τα σφάλματα λόγω ανάγνωσης είναι 0,110 - 0,220 - 0,330 - 0,440 l/min ανά παροχόμετρο για τα τρία επίπεδα ισχύος, 34kW - 68kW - 102kW - 136 kW στις πειραματικές δοκιμές σταθερής θερμικής ισχύος.
- **Πλήρους κλίμακας:** Το σφάλμα πλήρους κλίμακας αντιστοιχεί σε μία σταθερά τιμή ανεξάρτητα από το ποια είναι η τιμή της ροής εντός του εύρους του οργάνου. Η μέγιστη ροή καυσίμου που διέρχεται από το κάθε παροχόμετρο του εργαστηρίου είναι 120 l/min. Επομένως εάν το συστηματικό σφάλμα πλήρους κλίμακας είναι $\pm 0,1\%$ τότε μία τιμή $\pm 0,12$ l/min ισχύει για κάθε τιμή της ροής. Για μικρότερες ροές το ποσοστό του σφάλματος αυξάνεται. Για τις πειραματικές δοκιμές τριών επιπέδων ροής (22 - 44 - 66 - 88 l/min) και θερμικής ισχύος (34kW - 68kW - 102kW - 136kW) τα σφάλματα θα είναι:
 - Για 22 l/min: $\pm 0,2\%$ και $\pm 0,044$ l/min
 - Για 44 l/min: $\pm 0,18\%$ και $\pm 0,0792$ l/min
 - Για 66 l/min: $\pm 0,16\%$ και $\pm 0,1056$ l/min
 - Για 88 l/min: $\pm 0,14\%$ και $\pm 0,1232$ l/min

4.8.5 Ψηφιακά παροχόμετρα καυσαερίων

Προκειμένου να υπολογιστεί η παροχή καυσαερίων χρησιμοποιήθηκε ο ψηφιακός μετρητής διαφορικής πίεσης KIMO DEBIMO και ένα θερμοστοιχείο τύπου K εντός του αγωγού καυσαερίων στη θέση όπου ήταν εγκατεστημένο το ψηφιακό μανόμετρο. Κάνοντας χρήση της Εξίσωσης (4.9) γίνεται φανερό ότι είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της ταχύτητας των καυσαερίων. Αυτό σημαίνει ότι και πάλι εισάγονται τα συνολικά σφάλματα του θερμοστοιχείου και του ψηφιακού μετρητή πίεσης στον υπολογισμό του συνολικού σφάλματος της παροχής καυσαερίων, το οποίο δίνεται από την Εξίσωση (4.25).

Διέγγραψε: (4.9)

Διέγγραψε: (4.25)

$$U_v = \left[\left(\frac{\partial \dot{V}}{\partial T} U_T \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{V}}{\partial p} U_p \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.25)$$

Όπου:

- U_v : η συνολική αβεβαιότητα της παροχής καυσαερίων
- U_T : η συνολική αβεβαιότητα του θερμοστοιχείου στη θέση του μετρητή διαφορικής πίεσης
- U_p : η συνολική αβεβαιότητα του μετρητή διαφορικής πίεσης

Οι συνιστώσες των αβεβαιοτήτων συνοψίζονται στον Πίνακα 4.16.

Πίνακας 4.16: Σύνοψη αβεβαιοτήτων.

Αισθητήρας	Πηγή Αβεβαιότητας	Συστηματική	Τυχαία	Συνολική Αβεβαιότητα
Θερμοστοιχεία	Βαθμονόμηση	$\pm 2,2^\circ\text{C}$, ή $\pm 0,75\%$	Εξισώσεις (4.20- 4.23)	Εξίσωση (4.18)
	Σύνδεση	$\pm 0,5^\circ\text{C}$		
	Καλώδια	$\pm 2.2^\circ\text{C}$		
Δικατευθυντικοί μετρητές ταχύτητας	Γωνία πρόσπτωσης	$\pm 10\%$	Εξισώσεις (4.20- 4.23)	Εξίσωση (4.24)
	Ψηφιακό Μανόμετρο	$\pm 1\%$ μέγιστης		
Σωλήνες Pitot-Static	Γωνία πρόσπτωσης	$\pm 10\%$	Εξισώσεις (4.20- 4.23)	Εξίσωση (4.24)
	Ψηφιακό Μανόμετρο	$\pm 0,5\%$ μέγιστης		
Θερμοροόμετρα	Βαθμονόμηση	$\pm 3\%$	Εξισώσεις (4.20- 4.23)	Εξίσωση (4.18)
	Μη ευθυγράμμιση	± 4 kW/m^2		
Παροχόμετρα καυσίμου	Ανάγνωσης	$\pm 0,5\%$ της ροής	Εξισώσεις (4.20- 4.23)	Εξίσωση (4.18)
	Πλήρους Κλίμακας	$\pm 0,1$ της μέγιστης		
Παροχόμετρα Καυσαερίων	Ψηφιακό μανόμετρο	$\pm 5\%$ της μέγιστης	Εξισώσεις (4.20- 4.23)	Εξίσωση (4.25)

4.9 Διόρθωση θερμοκρασιών

Είναι γνωστό ότι οι μετρούμενες θερμοκρασίες θερμοστοιχείων μπορεί να μην είναι αντιπροσωπευτικές των τοπικών πραγματικών θερμοκρασιών αερίου (Kumar et al., 2005, Blevins and Pitts, 1999, Wen et al., 2001). Οι λόγοι για αυτό ποικίλλουν αν και η κυριότερη επιρροή είναι συνήθως το «σφάλμα ακτινοβολίας» που προκύπτει από το μεταφορά θερμότητας σε (ή από) την «άκρη» ενός θερμοστοιχείου σε περιβάλλον χαμηλότερου (ή υψηλότερου) θερμικού πεδίου. Ένας άλλος λόγος είναι λόγω της συναγωγιμότητας κατά μήκος του καλωδίου του θερμοστοιχείου αλλά και προβλήματα στη μεταβατική θερμική απόκριση του θερμοστοιχείου (Luo, 1998, Blevins and Pitts, 1999, Francis and Yau, 2004). Η διόρθωση σε οποιαδήποτε κατεύθυνση της ροής και η εκτίμησή του ροϊκού πεδίου γύρω από το θερμοστοιχείο απαιτεί ακριβή γνώση των συνθηκών σε όλο το μήκος του σύρματος, που είναι γενικά ανεπαρκώς γνωστά (Blevins and Pitts, 1999). Ομοίως, το περιοδικό σφάλμα θέρμανσης θα είναι μικρό για τυπικές συνθήκες φωτιάς, δηλαδή η χρονική κλίμακα της θερμικής απόκρισης του θερμοστοιχείου θα είναι σημαντικά μικρότερη με την χρονική κλίμακα αλλαγής του μεγέθους της φωτιάς (Bradley and Matthews, 1968). Επομένως και οι δύο διορθώσεις συνήθως παραμελούνται και θα αναλυθούν τα σφάλματα λόγω ακτινοβολίας.

4.9.1 Σφάλματα λόγω ακτινοβολίας

Η πιθανή σημασία των σφαλμάτων ακτινοβολίας είναι ευρέως αναγνωρισμένη (Kumar et al., 2005, Blevins and Pitts, 1999, Wen et al., 2001). Ένα θερμοστοιχείο που τοποθετείται σε ένα ζεστό στρώμα αερίου μπορεί να δέχεται ακτινοβολία χαμηλότερη από αυτή που υπονοείται από την τοπική θερμοκρασία αερίου λόγω της επίδρασης μακρινών ψυχρότερων επιφανειών. Το αποτέλεσμα είναι η καταγραφή θερμοκρασίας ελαφρώς χαμηλότερης από την πραγματική θερμοκρασία αερίου (Kumar et al., 2005). Αντίστοιχα, σε ένα χαμηλότερο στρώμα ρευστού είναι πιθανή η μέτρηση μιας θερμοκρασίας υψηλότερης από το αναμενόμενο λόγω της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τις μακρινές φλόγες (Blevins and Pitts, 1999) και το στρώμα θερμού αερίου (Francis and Yau, 2004) προς το θερμοστοιχείο.

Με τη μοντελοποίηση της μεταφοράς θερμότητας μέσω ακτινοβολίας και συναγωγής μεταξύ του θερμοστοιχείου και του τοπικού περιβάλλοντος, υποθέτοντας ψευδομόνιμες (quasi-steady state) συνθήκες, είναι δυνατή η πρόβλεψη αυτών των σφαλμάτων μέσω της θεωρίας του ενεργειακού ισοζυγίου.

Πρέπει να σημειωθεί ότι πρακτικές μέθοδοι, όπως η χρήση μονωμένων (aspirated) θερμοστοιχείων, με ασπίδες ακτινοβολίας (Blevins and Pitts, 1999), ή μετρητές με δύο θερμοστοιχεία διαφορετικής διαμέτρου «άκρης» (Broheza et al., 2004), έχουν προταθεί για τον μετριασμό των προβλημάτων του σφάλματος ακτινοβολίας. Ωστόσο, κανένα μέτρο δεν είναι απολύτως αποτελεσματικό και χρειάζονται μέθοδοι που μπορούν εφαρμοστούν σε υπάρχοντα σύνολα μετρήσεων θερμοκρασίας, η πλειονότητα των οποίων ελήφθη με απλά «γυμνά» θερμοστοιχεία (bare bead thermocouples).

4.9.2 Μεθοδολογία διόρθωσης θερμοκρασιών

Για την διόρθωση των θερμοκρασιών χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος που αναλύεται από τους Welch et al. (2007).

Υποθέτοντας συνθήκες σταθερής κατάστασης (steady state), το συνολικό άθροισμα των ροών θερμότητας πρέπει να ισούνται με μηδέν, δηλαδή ισχύει η Εξίσωση (4.26):

Διέγγραψε: (4.26)

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{q}_{\text{net}}'' = \dot{q}_{\text{conv}}'' + \dot{q}_{\text{rad}}'' = 0 \\ \dot{q}_{\text{conv}}'' = h_{\text{TC}} (T_{\text{gas}} - T_{\text{TC}}) \\ \dot{q}_{\text{rad}}'' = \varepsilon_{\text{TC}} \sigma (T_s^4 - T_{\text{TC}}^4) \end{array} \right\} \Rightarrow T_{\text{gas}} = \frac{\varepsilon_{\text{TC}}}{h_{\text{TC}}} (T_{\text{TC}}^4 - T_s^4) + T_{\text{TC}} \quad (4.26)$$

Όπου:

- σ : Σταθερά Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$)
- T_s : Θερμοκρασία των περιβάλλοντων επιφανειών (surroundings temperature) (K).
- ε_{TC} : Συντελεστής εκπομπής θερμοστοιχείου, επιλέχθηκε ίσος με 0,9 κατά Welch et al. (2007).

4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Διέγραψε: 4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Μορφοποίηση: Γραμματοσειρά: Verdana, 10 στ.

- κ : Συντελεστής απόσβεσης (υπόθεση: τοπικά σταθερός). Μια χαρακτηριστική τιμή για τον συντελεστή απόσβεσης, $\kappa=1$, ελήφθη σύμφωνα με το μοντέλο RadCal (Grosshandler, 1993).
- h_{TC} : Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής ($W/m^2/K$) και μπορεί να υπολογισθεί από την Εξίσωση (4.27):

Διέγραψε: (4.27)

$$h_{TC} = \frac{\kappa Nu}{d_{TC}} \quad (4.27)$$

Όπου:

- κ : Θερμική αγωγιμότητα ($W/m/K$), η οποία δίνεται από την Εξίσωση (4.28):

$$\kappa = \frac{\mu C_p}{Pr} \quad (4.28)$$

Ο αριθμός Prandtl, Pr , θεωρείται γενικά σταθερός 0,7 σύμφωνα με Jones and Whitelaw (1982). Το ιξώδες, μ , μπορεί, για παράδειγμα, να υπολογιστεί από το νόμο του Sutherland (Anderson, 1994) σύμφωνα με την Εξίσωση (4.29):

Διέγραψε: (4.29)

$$\mu = \frac{C_1 T^{1,5}}{T + C_2} \quad (4.29)$$

όπου οι σταθερές C_1 και C_2 ορίζονται ως $1,458 \times 10^{-6} \text{ kg/m/s/ K}^{0,5}$ και $110,4 \text{ K}$, αντίστοιχα.

- Ο αριθμός Nusselt για μια σφαίρα μπορεί να υπολογιστεί, από την έκφραση Williams/Kramers (McAdams, 1954), (Εξίσωση (4.30):

Διέγραψε: (4.30)

$$Nu = 0,37Re^{0,6} \quad (4.30)$$

Όπου Re: αριθμός Reynolds, ο οποίος δίνεται από την Εξίσωση (4.31)

$$\text{Re} = \frac{\rho_{\text{gas}} u d_{\text{TC}}}{\mu} \quad (4.31)$$

όπου η πυκνότητα ρ_{gas} καυσαερίων προσδιορίζεται από την Εξίσωση (4.4).

Η προσέγγιση της θερμοκρασίας των περιβάλλοντων επιφανειών, T_s , για κάθε θερμοστοιχείο επιτυγχάνεται μέσω μιας διαδικασίας που εκμεταλλεύεται τις πληροφορίες σχετικά με τις τρέχουσες καλύτερες εκτιμήσεις της θερμοκρασίας του αερίου στις θέσεις κάθε θερμοστοιχείου για να βρεθεί μια αριθμητική προσέγγιση για το πεδίο ακτινοβολίας από τη θέση ενδιαφέροντος. Η θέση ενδιαφέροντος αναφέρεται κάθε φορά στην θέση του θερμοστοιχείου του οποίου η θερμοκρασία «διορθώνεται». Η επιρροή του κάθε θερμοστοιχείου, προς τη θέση ενδιαφέροντος, σταθμίζεται σύμφωνα με την αναμενόμενη συνεισφορά ακτινοβολίας προς το τελευταίο. Η συνεισφορά αυτή υπολογίζεται με βάση τις σχετικές αποστάσεις των θερμοστοιχείων από τη θέση ενδιαφέροντος, τις οπτικές ιδιότητες του παρεμβαλλόμενου ρευστού (συντελεστής απόσβεσης κ) και τον συντελεστή εκπομπής των θερμοστοιχείων αυτών. Σημειώνεται ότι το θερμοστοιχείο στη θέση ενδιαφέροντος περιλαμβάνεται και το ίδιο στην στάθμιση, καθώς παρέχει τις καλύτερες διαθέσιμες πληροφορίες για τον χαρακτηρισμό του τοπικού πεδίου ακτινοβολίας. Έτσι η θερμοκρασία T_s δίνεται και ανανεώνεται σε κάθε σάρωση από την Εξίσωση (4.32):

$$T_s = \sqrt[4]{W_1 \cdot T_{\text{gas,TC1}}^4 + W_2 \cdot T_{\text{gas,TC2}}^4 + \dots + W_n \cdot T_{\text{gas,TCn}}^4} \quad (4.32)$$

όπου TC ($i=1, n$) οι μετρούμενες θερμοκρασίες των θερμοστοιχείων και W_i ο συντελεστής στάθμισης, ο οποίος υπολογίζεται από την Εξίσωση (4.33):

$$W_{i=1}^n = \frac{e^{-L_i \kappa} (1 - e^{-\Delta L_i \kappa})}{\sum (e^{-L_i \kappa} (1 - e^{-\Delta L_i \kappa}))} \quad (4.33)$$

Διέγραψε: (4.32)

Διέγραψε: (4.33)

όπου L_i είναι η συνολική απόσταση από το θερμοστοιχείο ενδιαφέροντος, $i=1$, στο θερμοστοιχείο TC_i και ΔL_i είναι το μήκος ευθείας διαδρομής μεταξύ τους.

4.9.3 Πρόγραμμα σε προγραμματιστικό περιβάλλον

Για την εφαρμογή της μεθόδου δημιουργήθηκε πρόγραμμα MATLAB [MATLABs 7.4, TheMathworks, Inc., Natick, MA] σε μία γενικευμένη δισδιάστατη (2D) μορφή. Ο κώδικας του προγράμματος παρουσιάζεται αναλυτικά στο Παράρτημα Β.

Η γενικευμένη δισδιάστατη μορφή προϋποθέτει όλα τα θερμοστοιχεία να είναι διατεταγμένα στην ίδια κατεύθυνση και τότε η απόσταση (L) μπορεί να ληφθεί με απλή υποδιαίρεση της διαδρομής ως εξής:

$$\begin{aligned} L_2, & \quad \text{για } i = 1 \\ \frac{(L_{n+1} - L_{n-1})}{2}, & \quad \text{για } 2 \leq i \leq n - 1 \\ (L_n - L_{n-1}), & \quad \text{για } i = n \end{aligned}$$

Κατά την εφαρμογή της παραπάνω διαδικασίας χρησιμοποιήθηκε μία επαναληπτική μέθοδος. Σε κάθε σάρωση οι τρέχουσες εκτιμήσεις θερμοκρασίας περιβάλλοντος (T_s) χρησιμοποιούνται για την ενημέρωση των τοπικών θερμοκρασιών αερίου (T_{gas}). Η διαδικασία ξεκινά εκτιμώντας τις πρώτες τιμές για τις θερμοκρασίες αερίου ως τις μετρημένες θερμοκρασίες θερμοστοιχείου (TC). Τα θερμοστοιχεία που επιλέχθηκαν για την διόρθωση θερμοκρασιών φαίνονται στον Πίνακα 4.17.

Πίνακας 4.17: Θέσεις θερμοστοιχείων κεντρικής γραμμής που συμμετείχαν στη διόρθωση θερμοκρασιών.

A/a	x (mm)	z (mm)	y (mm)
1	300	10	0
2	300	140	0
3	300	270	0

4	300	400	0
5	300	530	0
6	300	660	0
7	300	790	0
8	600	10	0
9	600	140	0
10	600	270	0
11	600	400	0
12	600	530	0
13	600	660	0
14	600	790	0
15	900	10	0
16	900	140	0
17	900	270	0
18	900	400	0
19	900	530	0
20	900	660	0
21	900	790	0

Οι υπολογισμένες θερμοκρασίες αερίου χρησιμοποιούνται στη συνέχεια στην επόμενη επανάληψη, και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι οι επιμέρους εκτιμήσεις συγκλίνουν σε μια ενιαία λύση για το πεδίο θερμοκρασίας. Στις πειραματικές δοκιμές το κριτήριο σύγκλισης επιλέχθηκε στον $\pm 1^\circ\text{C}$. Με σκοπό να αποφευχθούν τυχόν αριθμητικά προβλήματα και για ευκολία σύγκλισης της σειράς, υιοθετήθηκε μία συμβατική μέθοδος ελέγχου σύγκλισης, εισάγοντας έναν παράγοντα χαλάρωσης, r , στην Εξίσωση (4.26). Ο συντελεστής αυτός καθορίζει το ποσοστό κατά το οποίο η «παλιά» θα επηρεάσει την «νέα». Έτσι η θερμοκρασία αερίου θα δίνεται από την Εξίσωση (4.34).

Διέγραψε: (4.26)

Διέγραψε: (4.34)

$$T_{\text{gas}} = \left[\frac{\epsilon_{\text{TC}} \cdot \sigma}{h} (T_{\text{TC}}^4 - T_s^4) + T_{\text{TC}} \right] r + T_{\text{gas-1}} [1 - r] \quad (4.34)$$

5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

Τα πειράματα διεξήχθησαν στο Εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κατά το έτος 2021. Συνολικά διεξήχθησαν 11 πειράματα. Τα πρώτα 9 αποτελούν πειραματικές δοκιμές σταθερής ισχύος με παραμετρική μελέτη στην ισχύ της φωτιάς και το υλικό των τοιχωμάτων. Τα επόμενα 2 αφορούν την προσέγγιση της πρότυπης καμπύλης θερμοκρασίας – χρόνου ISO834 (μεταβλητή ισχύς) με παραμετρική μελέτη στο υλικό των τοιχωμάτων του διαμερίσματος. Το σύνολο των πειραμάτων και των χαρακτηριστικών τους φαίνονται στον Πίνακα 5.1

Πίνακας 5.1: Σύνολο πειραμάτων και παραμετρικών μελετών.

A/a	Ονομασία πειράματος	Θεωρητική Ισχύς Q (kW)	Υλικό τοιχωμάτων
1	Q68-GP1	68	Γυψοσανίδα
2	Q102-GP1	102	Γυψοσανίδα
3	Q136-GP1	136	Γυψοσανίδα
4	Q34-GP2	34	Γυψοσανίδα
5	Q68-GP2	68	Γυψοσανίδα
6	Q102-GP2	102	Γυψοσανίδα
7	Q34-SICA	34	Σανίδα πυριτικού ασβεστίου
8	Q68-SICA	68	Σανίδα πυριτικού ασβεστίου
9	Q102-SICA	102	Σανίδα πυριτικού ασβεστίου
10	ISO-GP	Μεταβαλλόμενη	Γυψοσανίδα
11	ISO-SICA	Μεταβαλλόμενη	Σανίδα πυριτικού ασβεστίου

5.1 Παραμετρικές μελέτες

Στο πλαίσιο διερεύνησης της επίδρασης σημαντικών λειτουργικών παραμέτρων στα χαρακτηριστικά της φωτιάς σε διαμέρισμα πραγματοποιήθηκε πειραματική παραμετρική μελέτη. Με στόχο τον προσδιορισμό της επίδρασης της μεταβολής κάθε μελετώμενης παραμέτρου, σε κάθε πείραμα μεταβαλλόταν μόνο μια μεταβλητή. Οι λειτουργικές παράμετροι που μελετήθηκαν στις πειραματικές δοκιμές της παρούσας εργασίας ήταν η θερμική ισχύς της φωτιάς και το υλικό των τοιχωμάτων του διαμερίσματος.

5.1.2 Ισχύς φωτιάς

Σύμφωνα με το Παράρτημα Ε.4 του Ευρωκώδικα 1 (Annex E, EN1991:1-2, 2002) οι προτεινόμενοι μέγιστοι ρυθμοί έκλυσης θερμότητας ανά τετραγωνικό μέτρο για διάφορες χωρητικότητες εσωτερικών χώρων φαίνονται στον Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2: Προτεινόμενες τιμές για την ανάπτυξη φωτιάς σε διαμέρισμα για διάφορα είδη εσωτερικών χώρων.

Τύπος κτηρίου	Ρυθμός ανάπτυξης φωτιάς	Χρόνος για την επίτευξη ΡΕΘ 1 MW, t_a (s)	Μέγιστος ΡΕΘ ανά m^2 , RHR_f (kW/m^2)
Κατοικία	Μέτριος	300	250
Δωμάτιο νοσοκομείου	Μέτριος	300	250
Δωμάτιο ξενοδοχείου	Μέτριος	300	250
Βιβλιοθήκη	Γρήγορος	150	500
Γραφείο	Μέτριος	300	250
Δωμάτιο σχολείου	Μέτριος	300	250
Εμπορικό κέντρο	Γρήγορος	150	250
Θέατρο	Γρήγορος	150	500
Χώρος μεταφοράς	Αργός	600	250

Για τις πειραματικές δοκιμές σταθερής θερμικής ισχύος χρησιμοποιήθηκε η μέγιστη τιμή για τον τύπο κτηρίου «Γραφείο». Έτσι, η τιμή της μέγιστης ισχύος για το διαμέρισμα πλήρους κλιμακας ISO9705 καθορίστηκε στα 2160 kW και, χρησιμοποιώντας την Εξίσωση 2.X, για το πειραματικό διαμέρισμα υπό κλίμακα 1:3, η μέγιστη θερμική ισχύς υπολογίστηκε στα 135,86 kW.

Για τις πειραματικές δοκιμές σταθερής ισχύος μελετήθηκαν τέσσερα διαφορετικά επίπεδα ισχύος της φωτιάς: 25%, 50%, 75% και 100% της μέγιστης θεωρητικής. Τα επίπεδα ισχύος ρυθμίστηκαν από την παροχή όγκου του καυσίμου σύμφωνα με την Εξίσωση 5.1.:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{\text{fuel}} H_u \quad (5.1)$$

Έτσι, οι παροχές καυσίμου και οι αντίστοιχες τιμές της θεωρητικής ισχύος φαίνονται στον Πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.3: Επίπεδα ισχύος και παροχής καυσίμου για το μοντέλο και οι αντίστοιχες τιμές τους για το πρωτότυπο διαμέρισμα ISO9705.

Ονομασία ομάδας πειραμάτων	Θεωρητική ισχύς μοντέλου (kW)	Παροχή όγκου καυσίμου (nlpm)	Θεωρητική ισχύς πρωτοτύπου (kW)
Q34	34	22	540
Q68	68	44	1080
Q102	102	66	1620
Q36	136	88	2160

5.1.2 Υλικό τοιχωμάτων

Για τις πειραματικές δοκιμές σταθερής ισχύος και για τα πειράματα πρότυπης καμπύλης θερμοκρασίας - χρόνου ISO834, πραγματοποιήθηκε παραμετρική μελέτη στο υλικό των τοιχωμάτων. Όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 4.1.2 χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά υλικά για την κατασκευή των τοιχωμάτων, γυψοσανίδα (Gypsum Board - GP) και σανίδα πυριτικού ασβεστίου (Calcium Silicate - SICA).

5.1.3 Επαναληψιμότητα

Με σκοπό την επαλήθευση των αποτελεσμάτων με ίδιες και σταθερές συνθήκες πραγματοποιήθηκαν συνολικά 4 πειράματα επαναληψιμότητας. Για τα πειράματα αυτά, ανά 2, χρησιμοποιήθηκε το ίδιο υλικό τοιχωμάτων (γυψοσανίδα) καθώς και τα ίδια επίπεδα ισχύος, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.4: Πειράματα επαναληψιμότητας.

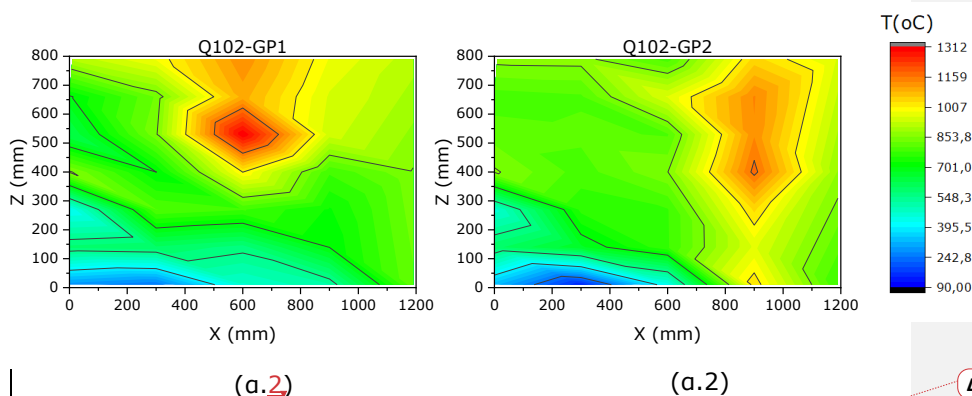
Όνομασία πειράματος	Επίπεδα ισχύος (kW)	Υλικό τοιχωμάτων
Q68 – GP1	68	Γυψοσανίδα
Q68 – GP2	68	Γυψοσανίδα
Q102 – GP1	102	Γυψοσανίδα
Q102 – GP2	102	Γυψοσανίδα

Τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών επαναληψιμότητας για το θερμικό και ροϊκό πεδίο της φωτιάς παρουσιάζονται σε αυτή την παράγραφο. Θα συγκριθούν ενδεικτικά τα αποτελέσματα από τα πειράματα Q102-GP1 και Q102-GP2 για να προσδιοριστούν τυχόν αποκλίσεις.

Αναπτυσσόμενο θερμικό πεδίο

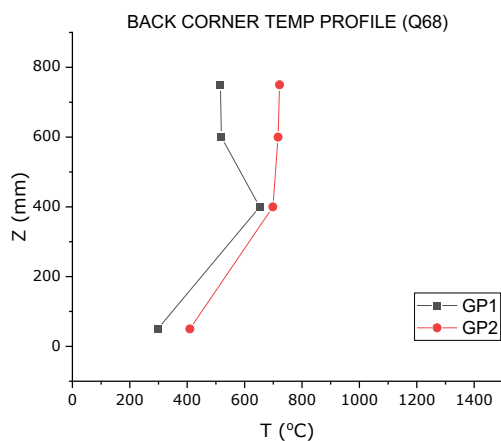
1) Αέριο περιβάλλον

Στο Σχήμα 5.2 απεικονίζονται οι κατανομές θερμοκρασίας αερίου μείγματος (gas temperature contour plots) στην τομή $\gamma=0$ του διαμερίσματος για τα πειράματα του Q102-GP1 και Q102-GP2.



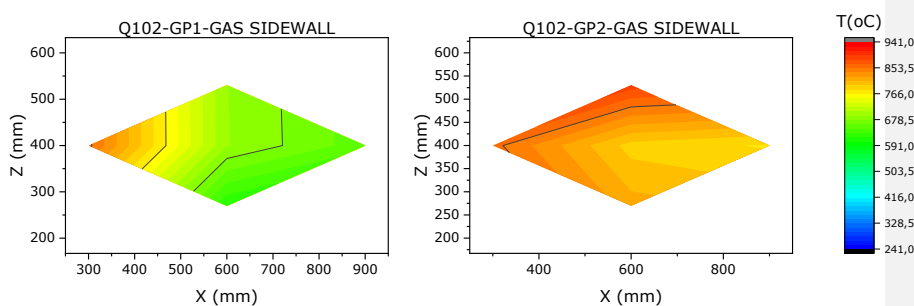
Σχήμα 5.2: Κατανομές θερμοκρασίας στην τομή $y=0$.

Αναλύοντας τα Σχήματα 5.2 (α.1) και (α.2) παρατηρείται μια περιοχή χαμηλών θερμοκρασιών στο κάτω μέρος του διαμερίσματος και κοντά στο άνοιγμα. Υπενθυμίζεται ότι το άνοιγμα βρίσκεται στη θέση $X = 0$ mm και εκτείνεται, καθ' ύψος, από $Z = 0$ mm έως $Z = 660$ mm. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει την εισροή ψυχρού αέρα στο διαμέρισμα από το κάτω μέρος του ανοίγματος. Οι περιοχές των υψηλών θερμοκρασιών για κάθε πείραμα φαίνεται να βρίσκονται μεταξύ των αξόνων $Z = 400$ και 530 mm, αλλά σε διαφορετικά σημεία ως προς τον άξονα X . Στο Σχήμα 5.2.(α.1) παρατηρείται η περιοχή υψηλότερων θερμοκρασιών στον κατακόρυφο άξονα του καυστήρα ($X=600$ mm), ενώ για την περίπτωση του Σχήματος 5.2.(α.2) η περιοχή αυτή είναι ελαφρώς μετατοπισμένη προς τα πίσω. Αυτό πιθανώς να συμβαίνει λόγω κάποιας ριπής ανέμου στη περίπτωση του πειράματος Q102 – GP2 που μετατόπιζε την φλόγα προς την οπίσθια πλευρά του διαμερίσματος. Το γεγονός αυτό μπορεί να επιβεβαιωθεί και από την εισχώρηση του κατώτερου ψυχρού σώματος αέρα μακρύτερα στο εσωτερικό του διαμερίσματος.



Σχήμα 5.3: Κατανομή θερμοκρασιών καθ' ύψος στην οπίσθια γωνία.

Η τάση της φλόγας προς τα πίσω για το πείραμα Q102-GP2 φαίνεται και στο Σχήμα 5.3, όπου απεικονίζονται οι καθ' ύψος κατανομές θερμοκρασίας στην οπίσθια γωνία και είναι εμφανές ότι αυτές είναι υψηλότερες από το πείραμα Q102-GP1.

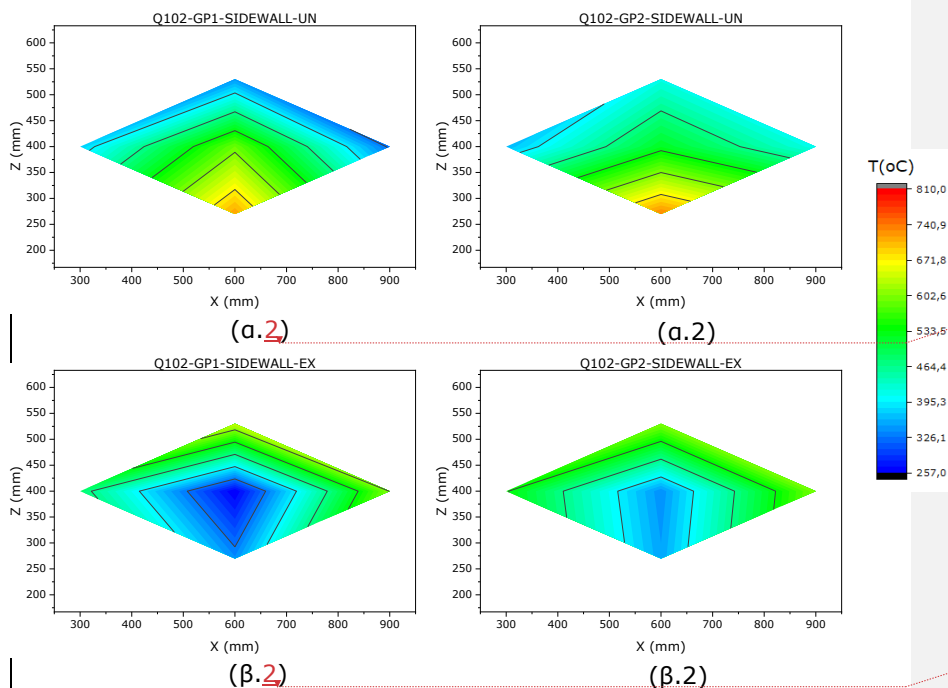


Σχήμα 5.4: Κατανομές θερμοκρασίας αερίου μείγματος κοντά στο πλαϊνό τοίχωμα για τα πειράματα Q102-GP1 (αριστερά) και Q102-GP2 (δεξιά).

Για τις θερμοκρασίες αερίου μείγματος κοντά στο πλαϊνό τοίχωμα, σύμφωνα με το Σχήμα 5.4, παρατηρούνται γενικά υψηλότερες τιμές στο πείραμα Q102-GP2. Η μέγιστη θερμοκρασία παρατηρείται στο σημείο (300,400) για το πείραμα Q102-GP1 ενώ για το πείραμα Q102-GP2 ανάμεσα στα σημεία (300,400) και (600,530).

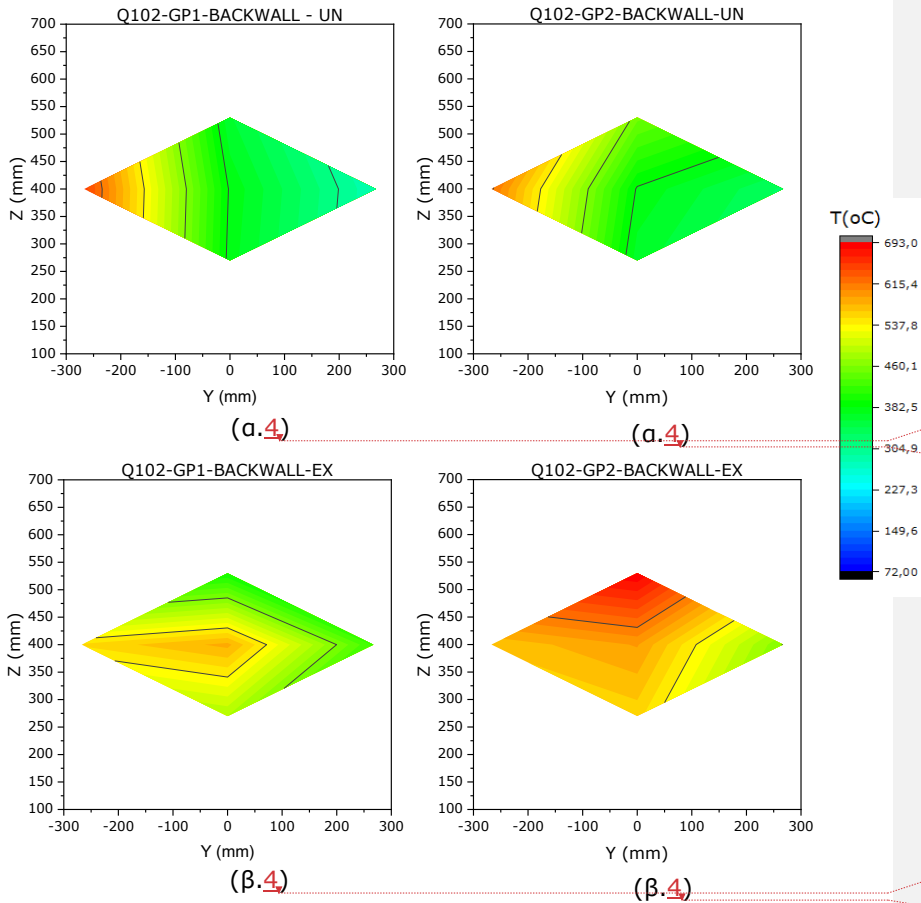
2) Τοιχώματα

Στο Σχήμα 5.5 απεικονίζονται οι κατανομές θερμοκρασίας για τα μη εκτεθειμένα (UN) θερμοστοιχεία, Σχήματα 5.5.(α.1), (α.2), και για τα εκτεθειμένα (EX) θερμοστοιχεία, Σχήματα 5.5.(β.1), (β.2), στο εσωτερικό του πλαϊνού τοιχώματος. Στα Σχήματα 5.5.(α.1), (α.2) παρατηρείται ότι η υψηλότερη θερμοκρασία βρίσκεται στο κάτω μέρος του τοιχώματος ακολουθώντας μία φθίνουσα πορεία όσο αυξάνεται το ύψος. Αντίθετα, στα Σχήματα 5.5.(β.1), (β.2), η κατανομή θερμοκρασιών των εκτεθειμένων θερμοστοιχείων περιλαμβάνει υψηλές θερμοκρασίες περιφερειακά και χαμηλότερες στο κέντρο. Γενικά, οι εσωτερικές θερμοκρασίες του πλαϊνού τοιχώματος για τα δύο πειράματα φαίνεται να είναι συγκρίσιμες.



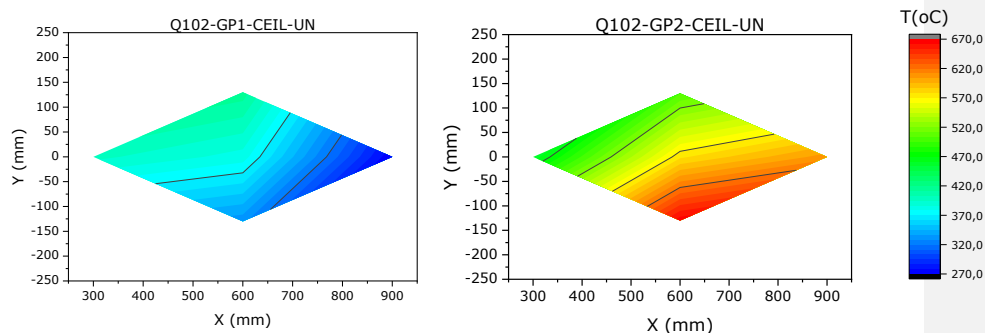
Σχήμα 5.5: Χάρτες θερμοκρασίας εκτεθειμένων, (α.1) και (α.2), και μη, (β.1) και (β.2), θερμοστοιχείων στο εσωτερικό του πλαινού τοιχώματος.

Για το οπίσθιο τοίχωμα, παρατηρείται σε όλα τα διαγράμματα θερμοκρασίας του Σχήματος 5.6 μία τάση της φωτιάς προς την αριστερή πλευρά του τοιχώματος. Συγκρίνοντας τα Σχήματα 5.6.(α.1), (α.2) η κατανομή θερμοκρασιών της μη εκτεθειμένης επιφάνειας είναι παρόμοια. Αντιθέτως, για τις θερμοκρασίες της εκτεθειμένης επιφάνειας, Σχήματα 5.6.(β.1), (β.2), υπάρχουν διαφορές της τάξης των 200°C . Στο πείραμα Q102-GP2 η υψηλή περιοχή θερμοκρασιών καταλαμβάνει το επάνω αριστερά τμήμα του τοιχώματος ενώ στο πείραμα Q102-GP οι υψηλές θερμοκρασίες παρατηρούνται στο ύψος $Z=400$ και προς τα αριστερά. Τα αποτελέσματα αυτά, σε συνδυασμό με το Σχήμα 5.2.(α.2) αποδεικνύουν ότι η φλόγα τείνει προς την αριστερή και οπίσθια γωνία του διαμερίσματος.



Σχήμα 5.6: Χάρτες θερμοκρασίας εκτεθειμένων, (α.1) και (α.2), και μη, (β.1) και (β.2), θερμοστοιχείων στο εσωτερικό του οπίσθιου τοιχώματος.

Στην περίπτωση του πειράματος Q102-GP2 οι μη εκτεθειμένες θερμοκρασίες στο εσωτερικό της οροφής, Σχήμα 5.7.(α.2), είναι σημαντικά υψηλότερες από το πείραμα Q102-GP1, Σχήμα 5.7.(α.1). Επιπλέον, στο πείραμα Q102-GP1 οι θερμοκρασίες είναι σημαντικά χαμηλότερες από το Q102-GP2.

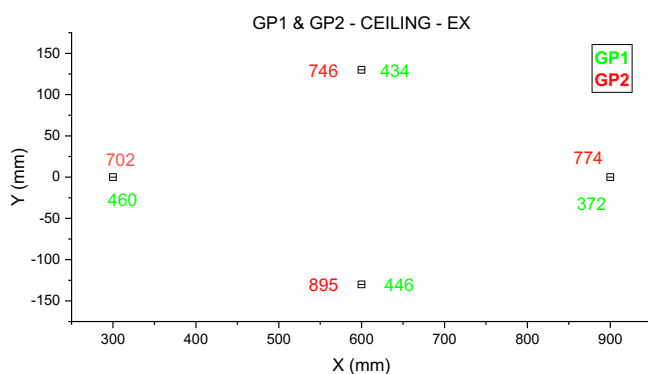


(α.1)

(α.2)

Διεύθυνση: 2

Διεύθυνση: 1



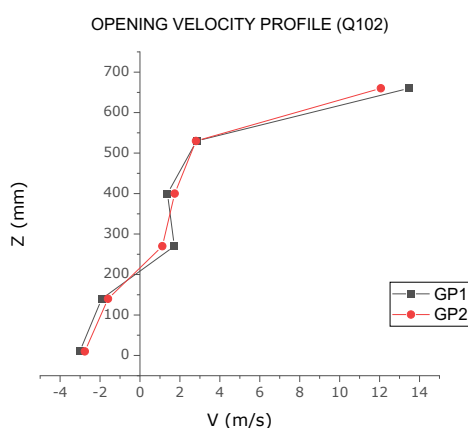
(β)

Σχήμα 5.7: Διαγράμματα κατανομής θερμοκρασίας μη εκτεθειμένων θερμοστοιχείων, (α.1) και (α.2) στην οροφή, για ισχύ 102 kW.

Και στα δύο πειράματα το εκτεθειμένο θερμοστοιχείο στο κέντρο της οροφής αστόχησε και δεν εμφανίζεται στη σύγκριση θερμοκρασιών στο Σχήμα 5.7.(β). Παρόλα αυτά οι μετρούμενες θερμοκρασίες και στην εκτεθειμένη επιφάνεια εμφανίζουν σημαντικές αποκλίσεις.

Αναπτυσσόμενο ροϊκό πεδίο

Όσον αφορά την καθ' ύψος κατανομή ταχυτήτων στο άνοιγμα, στο Σχήμα 5.8 παρατηρείται ότι στα κατώτερα επίπεδα η ταχύτητα του ψυχρού εισερχόμενου αέρα είναι αρνητική, με φορά προς το εσωτερικό του διαμερίσματος, ενώ στα ανώτερα στρώματα η ταχύτητα των θερμών καυσαερίων θετική, με φορά προς τα έξω. Οι τιμές για τα δύο πειράματα παρουσιάζουν μικρές διαφορές.

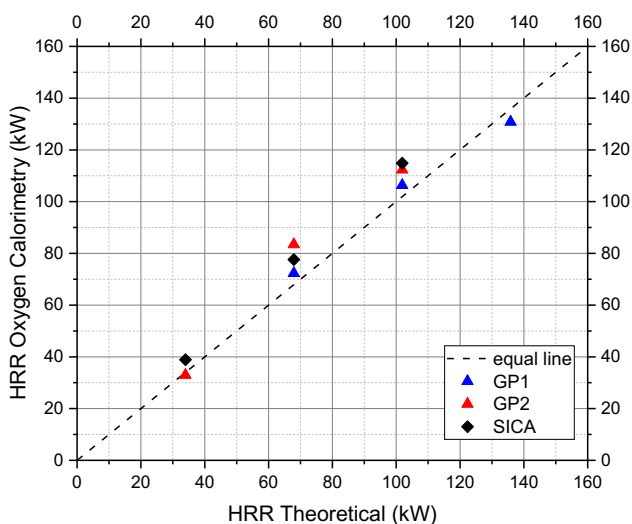


Σχήμα 5.8: Κατανομή ταχυτήτων καθ' ύψος στο άνοιγμα για τα πειράματα Q102-GP1 και Q102-GP2.

5.2 Πειράματα σταθερής ισχύος

Στο Σχήμα 5.9 απεικονίζεται ο μετρούμενος ρυθμός έκλυσης θερμότητας (PEΘ – HRR) συναρτήσει της θεωρητικής ισχύος της φωτιάς. Είναι εμφανές ότι ο μετρούμενος PEΘ φαίνεται μεγαλύτερος από την θεωρητική ισχύ πράγμα που θα σήμαινε ότι ο βαθμός απόδοσης της καύσης θα ήταν μεγαλύτερος του 100%. Οι αποκλίσεις στις μετρήσεις του PEΘ οφείλονται στα πειραματικά σφάλματα του αναλυτή, τα οποία στα πλαίσια της εργασίας αυτής δεν πραγματοποιήθηκαν.

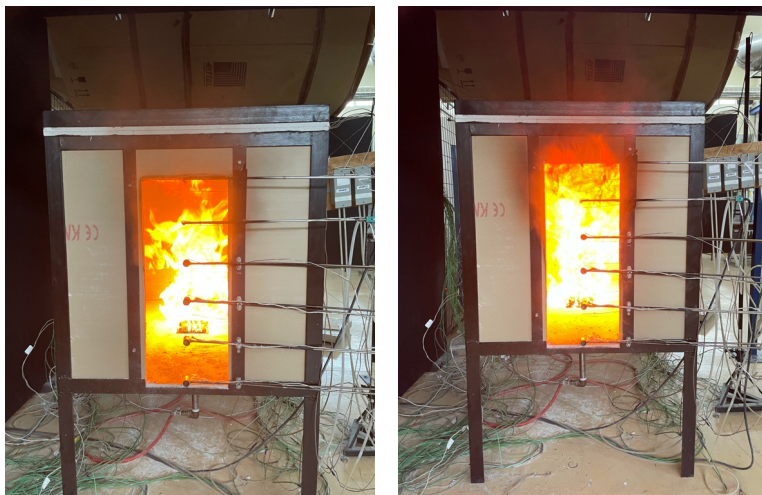
Έτσι θεωρείται ότι οι φωτιές που αναπτύχθηκαν σε όλες τις πειραματικές δοκιμές σταθερής ισχύος είχαν βαθμό απόδοσης κοντά στο 100%.



Σχήμα 5.9: Ρυθμός έκλυσης θερμότητας σε σχέση με την θεωρητική ισχύς φωτιάς για τα πειράματα σταθερής ισχύος.

5.2.1 Επίδραση ισχύος φωτιάς

Συνολικά μελετήθηκαν τέσσερα επίπεδα ισχύος (34, 68, 102 και 136 kW) όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5.1. Ωστόσο, για το επίπεδο των 136 kW (Πείραμα Q136-GP1) δεν εξάχθηκαν σαφή αποτελέσματα διότι η φλόγα εξερχόταν από το άνοιγμα και το πείραμα διακόπηκε πριν επιτευχθούν ψευδο-μόνιμες συνθήκες. Στο Σχήμα 5.10 παρουσιάζονται στιγμιότυπα από τις δοκιμές Q34 – GP2 και Q68 – GP2 σταθερής ισχύος.

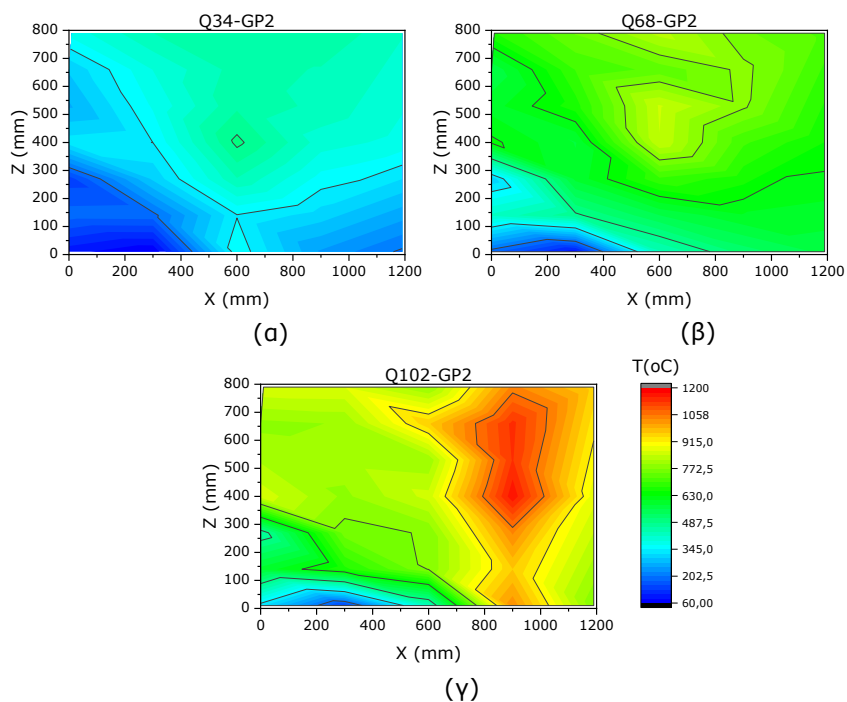


Σχήμα 5.10: Στιγμιότυπα εμπρόσθιας όψης για τις δοκιμές Q34 – GP2 (αριστερά) και Q68 – GP2 (δεξιά)

Για την κατανόηση της επίδρασης της ισχύος της φωτιάς στα χαρακτηριστικά του θερμικού και ροϊκού πεδίου της φωτιάς παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ομάδας πειραμάτων Q – GP2 (Πίνακας 5.1) για όλα τα επίπεδα ισχύος.

1) Αέριο περιβάλλον

Στο Σχήμα 5.11 παρουσιάζονται οι κατανομές θερμοκρασίας αερίου μείγματος στην τομή $Y=0$ του διαμερίσματος.

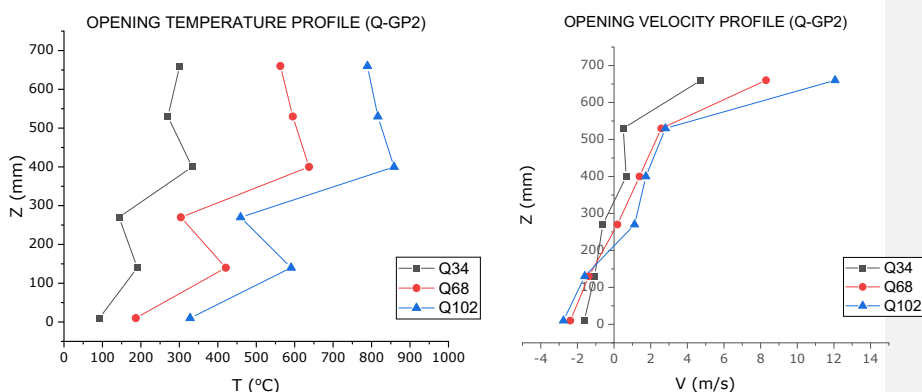


Σχήμα 5.11: Κατανομές θερμοκρασίας αερίου στην τομή $Y=0$ του διαμερίσματος για τα πειράματα Q34, 68, 102 – GP2.

Σύμφωνα με το Σχήμα 5.11 η αύξηση της ισχύος της φωτιάς μετατοπίζει την περιοχή μέγιστων θερμοκρασιών από το σημείο (300,400) προς τα πάνω και στο οπίσθιο μέρος του διαμερίσματος. Σε χαμηλό επίπεδο ισχύος, Σχήμα 5.11.(α), οι θερμοκρασίες είναι σχετικά χαμηλές (60-450°C) και το πλούμιο φαίνεται να καταλαμβάνει το άνω μισό του διαμερίσματος. Στα επόμενα Σχήματα 5.11.(β) και 5.11.(γ) επικρατούν υψηλές θερμοκρασίες, 250-1000°C και 450-1200°C αντίστοιχα, σε ολόκληρο το εσωτερικό του διαμερίσματος, εκτός από την περιοχή κοντά στο άνοιγμα μέχρι και τον άξονα του καυστήρα. Η αύξηση της θερμικής ισχύος φαίνεται να μετακινεί τη φλόγα προς τα πίσω.

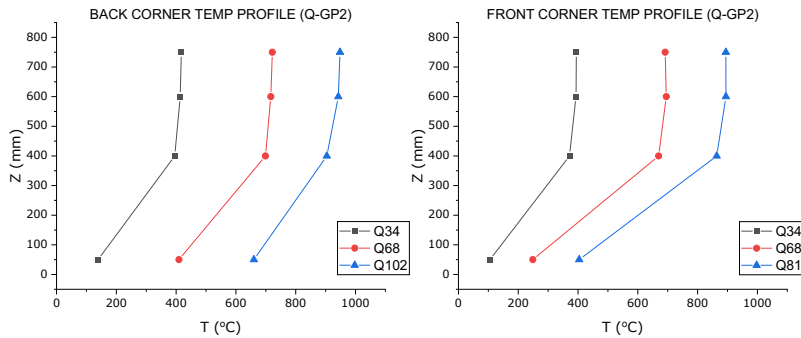
Στο άνοιγμα, η αύξηση της ισχύος της φωτιάς οδηγεί σε αύξηση της μέσης θερμοκρασίας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.12 (αριστερά). Η αύξηση αυτή είναι έντονη στο άνω τμήμα του ανοίγματος λόγω της συνεχούς θέρμανσης της δέσμης οροφής καυσαερίων.

Παράλληλα, οι ταχύτητες εισροής αέρα και εξαγωγής καυσαερίων αυξάνονται για μεγαλύτερα επίπεδα ισχύος όπως και το ύψος του ουδέτερου επιπέδου όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.12 (δεξιά).



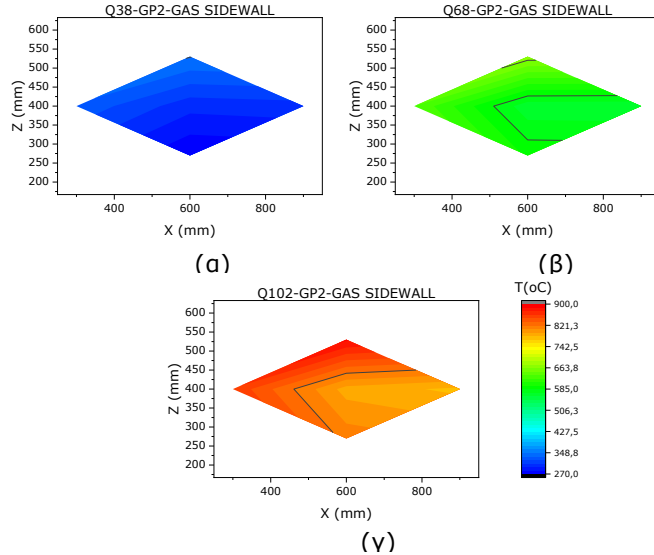
Σχήμα 5.12: Κατανομή θερμοκρασιών (αριστερά) και ταχυτήτων (δεξιά) στο άνοιγμα για τα πειράματα Q34, 68, 102 – GP2.

Η καθ' ύψος κατανομή θερμοκρασιών στην οπίσθια και την εμπρόσθια γωνία φαίνεται στο Σχήμα 5.13. Συνολικά και για τις δύο γωνίες η αύξηση της ισχύος της φωτιάς συνεπάγεται αύξηση όλων των θερμοκρασιών. Στην περίπτωση της εμπρόσθιας γωνίας, Σχήμα 5.13 (δεξιά), η αύξηση στην μετρούμενη θερμοκρασία στο ύψος $Z=50\text{mm}$ είναι σημαντικά μικρότερη από την αντίστοιχη αύξηση για την οπίσθια γωνία, Σχήμα 5.13 (αριστερά). Αυτό είναι λογικό καθώς η εμπρόσθια γωνία βρίσκεται πλησιέστερα στο άνοιγμα και συνεπώς ψύχεται εντονότερα από τον εισερχόμενο αέρα.



Σχήμα 5.13: Κατανομή θερμοκρασίας για την οπίσθια (αριστερά) και εμπρόσθια γωνία (δεξιά).

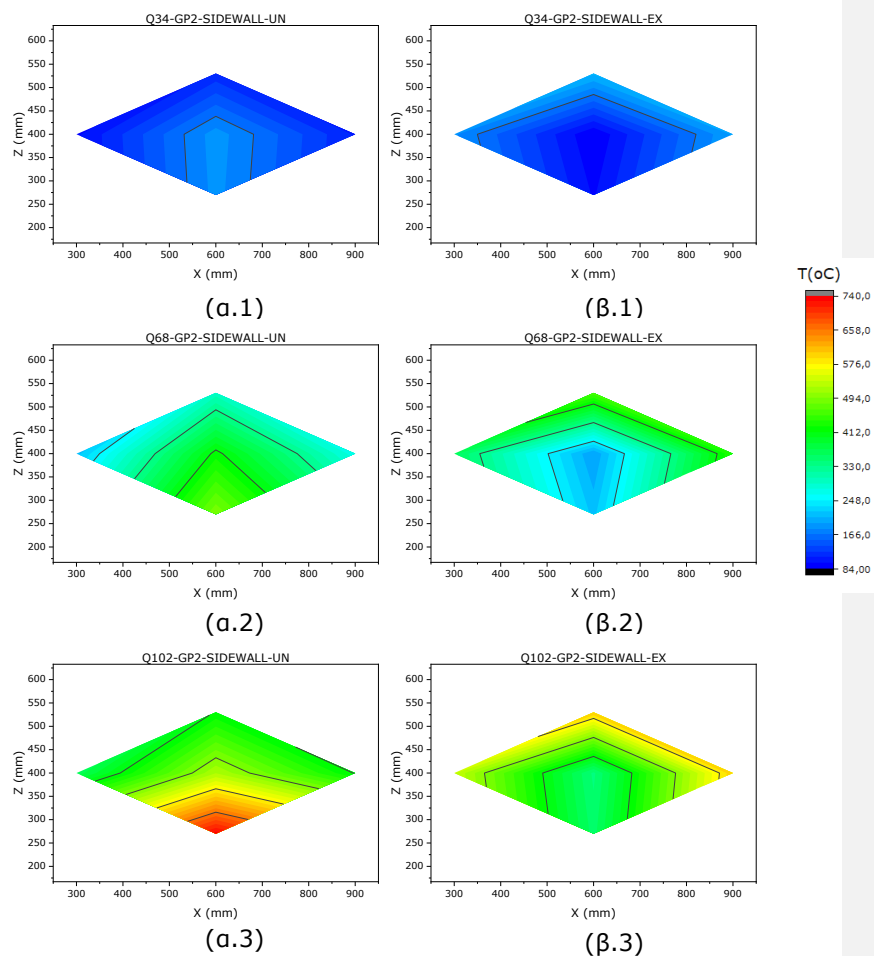
Τα επίπεδα θερμοκρασιών στην επιφάνεια κοντά στο πλαϊνό τοίχωμα αυξάνονται με την αύξηση της ισχύος ενώ η κατανομή τους διατηρεί σταθερή δομή, η οποία γίνεται αντιληπτή στα υψηλά επίπεδα ισχύος στα Σχήματα 5.14.(β), (γ). Χαμηλές θερμοκρασίες παρατηρούνται στα δεξιά της επιφάνειας ενώ αυξάνονται προχωρώντας προς τα πάνω και προς το άνοιγμα (αριστερά της επιφάνειας).



Σχήμα 5.14: Κατανομές θερμοκρασίας αερίου μείγματος κοντά στην επιφάνεια του πλαϊνού τοιχώματος.

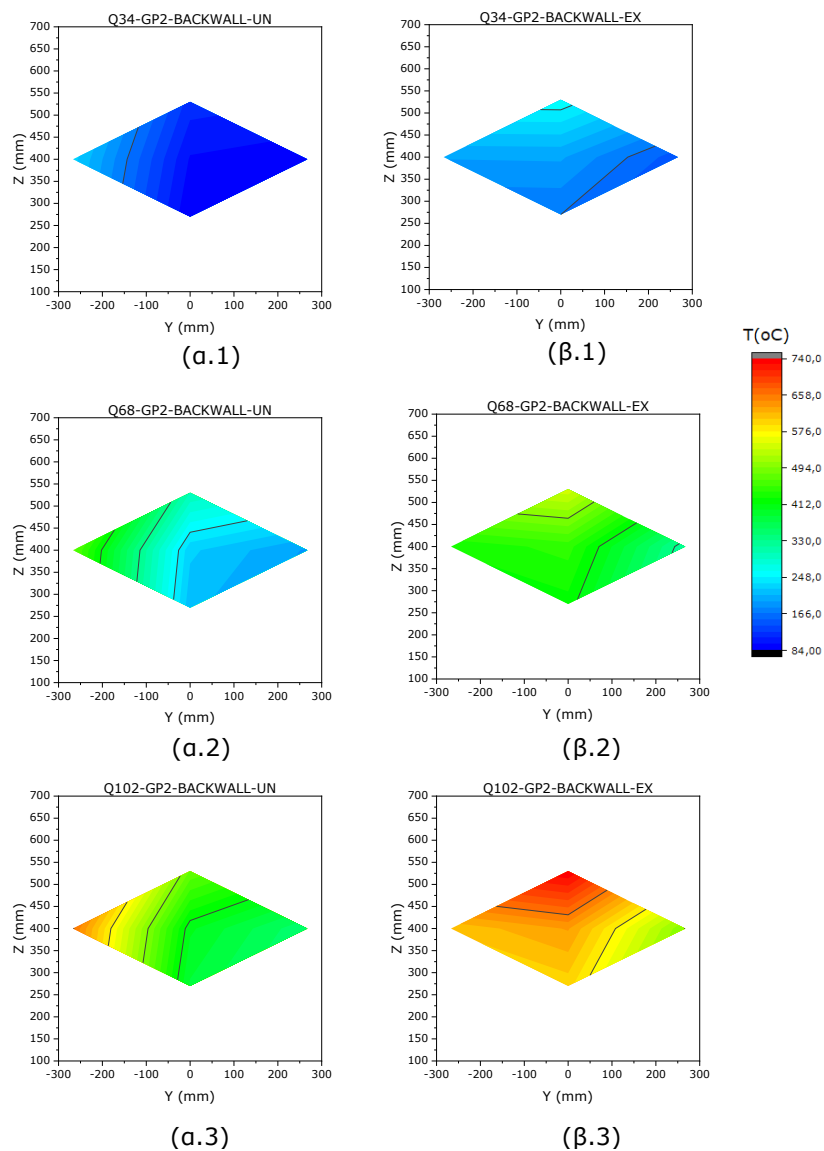
2) Θερμοκρασίες Τοιχωμάτων

Στο Σχήμα 5.15 απεικονίζονται οι κατανομές θερμοκρασίας στο εσωτερικό του πλαϊνού τοιχώματος, με την εκτεθειμένη επιφάνεια στη δεξιά στήλη και τη μη εκτεθειμένη επιφάνεια στην αριστερή.



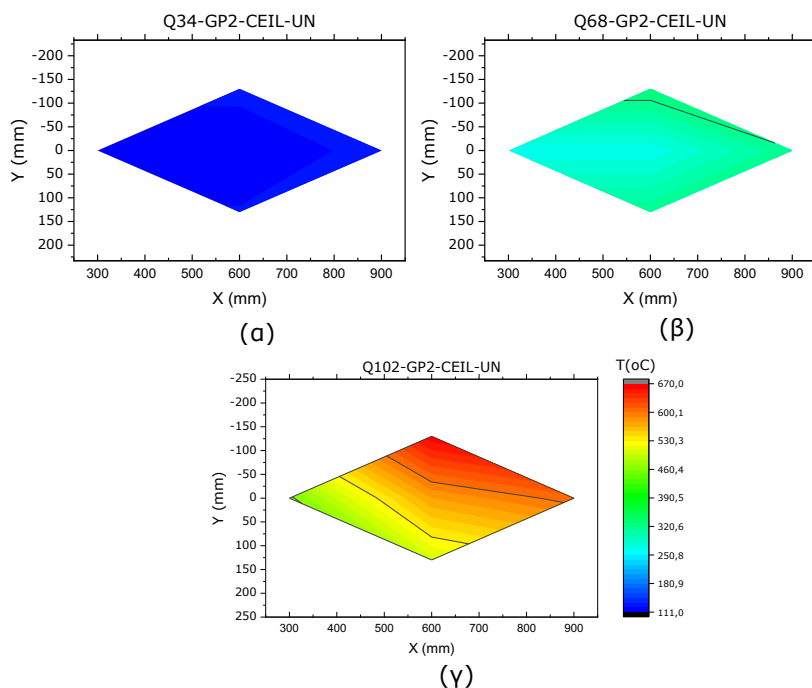
Σχήμα 5.15: Κατανομές θερμοκρασίας στο εσωτερικό του πλαϊνού τοιχώματος, για την εκτεθειμένη (δεξιά στήλη) και τη μη εκτεθειμένη (αριστερή στήλη) επιφάνεια.

Όπως αναφέρθηκε και στην Παράγραφο 5.1.3 και το Σχήμα 5.5, η κατανομή θερμοκρασιών στη μη εκτεθειμένη επιφάνεια για όλα τα επίπεδα ισχύος παρουσιάζει υψηλές τιμές χαμηλά και κεντρικά στο τοίχωμα (και κοντά στον καυστήρα) με σταδιακή μείωση όσο αυξάνεται η απόσταση όπως φαίνεται και στα Σχήματα 5.15.(α.1), (α.2), (α.3). Το τοίχωμα θερμαίνεται από κάτω προς τα πάνω λόγω φυσικής συναγωγής. Αντίθετα, όπως φαίνεται στα Σχήματα 5.15.(β.1), (β.2) οι θερμοκρασίες της εκτεθειμένης επιφάνειας παρουσιάζουν χαμηλές τιμές στον άξονα $X=600$ mm μέχρι το ύψος $Z=400$ mm και η μεταφορά θερμότητας γίνεται προς το κέντρο του τοιχώματος. Η μέγιστη θερμοκρασία στο εσωτερικό του τοιχώματος παρουσιάζεται για την περίπτωση της μη εκτεθειμένης επιφάνειας, Σχήμα 5.15.(α.3).

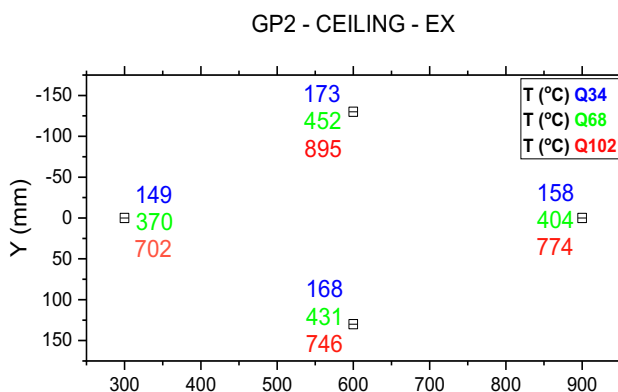


Σχήμα 5.16: Κατανομές θερμοκρασίας στο οπίσθιο τοίχωμα των εκτεθειμένων (δεξιά) και μη εκτεθειμένων (αριστερά) θερμοστοιχείων.

Στη συνέχεια, σύμφωνα με το Σχήμα 5.16, οι μετρούμενες θερμοκρασίες στο εσωτερικό του οπίσθιου τοιχώματος αυξάνονται με την αύξηση της ισχύος. Στην μη εκτεθειμένη επιφάνεια υψηλές θερμοκρασίες παρουσιάζονται προς τα αριστερά του τοιχώματος όπως φαίνεται στα Σχήματα 5.16.(α.1), (α.2), (α.3). Για την εκτεθειμένη επιφάνεια, υψηλές τιμές θερμοκρασίας μετρούνται στο άνω τμήμα του τοιχώματος. Με την αύξηση της ισχύος η φλόγα τείνει προς τα αριστερά του τοιχώματος από το οποίο επηρεάζονται κυρίως οι μη εκτεθειμένες θερμοκρασίες, Σχήμα 5.16 (αριστερά). Οι εκτεθειμένες θερμοκρασίες, Σχήμα 5.16 (δεξιά), φαίνεται να έχουν μία σχετικά ομοιόμορφη κατανομή.



Σχήμα 5.17: Κατανομές θερμοκρασίας στην οροφή των μη εκτεθειμένων θερμοστοιχείων.



Σχήμα 5.18: Κατανομή θερμοκρασίας στην οροφή των εκτεθειμένων θερμοστοιχείων.

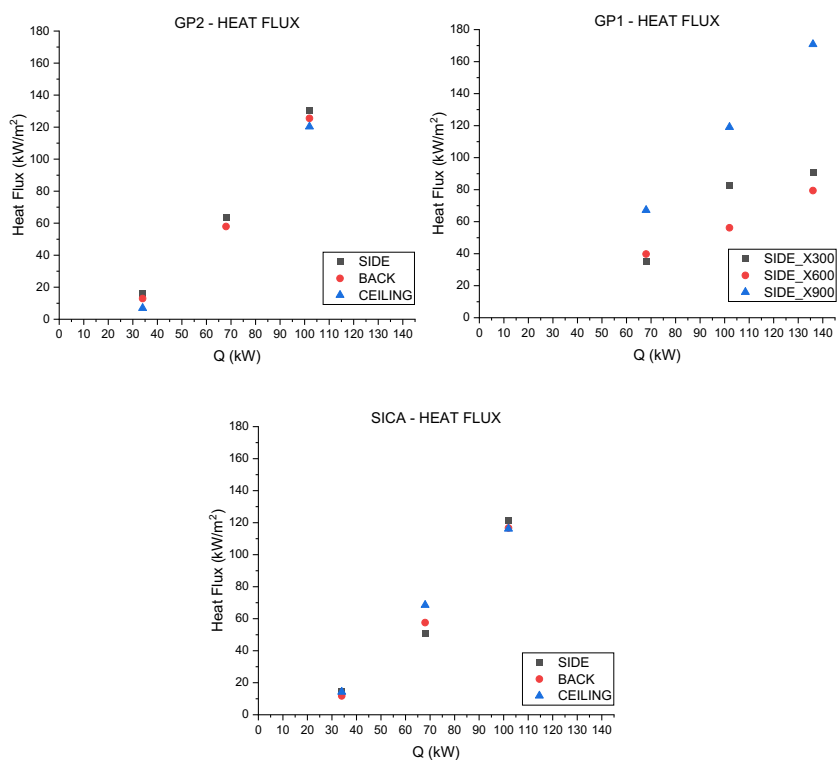
Η κατανομή των θερμοκρασιών των μη εκτεθειμένων θερμοστοιχείων στο εσωτερικό της οροφής, Σχήμα 5.17, είναι ομοιόμορφη στο χαμηλό επίπεδο ισχύος (γύρω στους 120°C). Καθώς η θερμική ισχύς αυξάνεται οι θερμοκρασίες στο οπίσθιο και αριστερό μέρος του διαμερίσματος φαίνεται να επηρεάζονται περισσότερο. Η ισχύς της φωτιάς επηρεάζει κατά όμοιο τρόπο και την κατανομή των θερμοκρασιών των εκτεθειμένων θερμοστοιχείων της οροφής όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.18.

Τα δύο Σχήματα 5.17 και 5.18 σε συνδυασμό με το Σχήμα 5.16 (θερμοκρασίες οπίσθιου τοιχώματος) δείχνουν ότι η φλόγα τείνει προς την οπίσθια αριστερή γωνία με την αύξηση της ισχύος.

3) Θερμορροή στα τοιχώματα

Συνολικά μετρήθηκαν θερμορροές σε τρία τοιχώματα: πλαϊνό, οπίσθιο και οροφή. Οι τιμές για τα διάφορα επίπεδα ισχύος παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.18.(α) για την ομάδα πειραμάτων GP2. Ο αισθητήρας θερμορροής της οροφής παρουσίασε ασυνήθιστες μετρήσεις στα πειράματα Q34 – GP2 και Q68 – GP2 και δεν μπορούν να βγουν σαφή αποτελέσματα.

Για την εκτίμηση των τιμών θερμορροής χρησιμοποιείται και το Σχήμα 5.19.(γ) στο οποίο φαίνονται οι τιμές για τα πειράματα της ομάδας Q-SICA. Εκτιμώντας πως η συμπεριφορά είναι παρόμοια για τις δύο ομάδες (GP2 και SICA) παρότι αλλάζει το δομικό υλικό των τοιχωμάτων, η θερμορροή φαίνεται να διπλασιάζεται για κάθε επίπεδο ισχύος. Επίσης, σύμφωνα με τα Σχήματα 5.19.(α), (γ), δεν υπάρχουν σαφείς διαφορές για τις θερμορροές των 3 τοιχωμάτων (πλαϊνό και οπίσθιο τοίχωμα, οροφή) για όλα τα επίπεδα ισχύος.



Σχήμα 5.19: Θερμορροή τοιχωμάτων για τα διάφορα επίπεδα ισχύος για τα πειράματα (α) GP2, (β) GP2, (γ) SICA.

Επιπλέον, στο Σχήμα 5.19.(γ) απεικονίζονται οι θερμορροές για 3 σημεία στο πλαϊνό τοίχωμα (Πειράματα Q-GP1). Φαίνεται ότι η

Θερμορροή στον άξονα Χ900 είναι σημαντικά υψηλότερη σε όλα τα επίπεδα ισχύος, ενώ σε υψηλά επίπεδα ισχύος η θερμορροή στον άξονα Χ300 είναι μεγαλύτερη από τον άξονα του καυστηρά (Χ600).

5.2.2 Επίδραση υλικού τοιχωμάτων

Για την μελέτη της επίδρασης του υλικού τοιχωμάτων στα χαρακτηριστικά της φωτιάς χρησιμοποιείται ένας μέσος όρος των ομάδων πειραμάτων Q-GP1 και Q-GP2 για τη σύγκριση με τα πειράματα Q-SICA. Για λόγους οικονομίας χώρου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών Q68-GP2 και Q68-SICA. Τα εξαγόμενα συμπεράσματα είναι παρόμοια και κατά τη σύγκριση των υπολοίπων πειραμάτων.

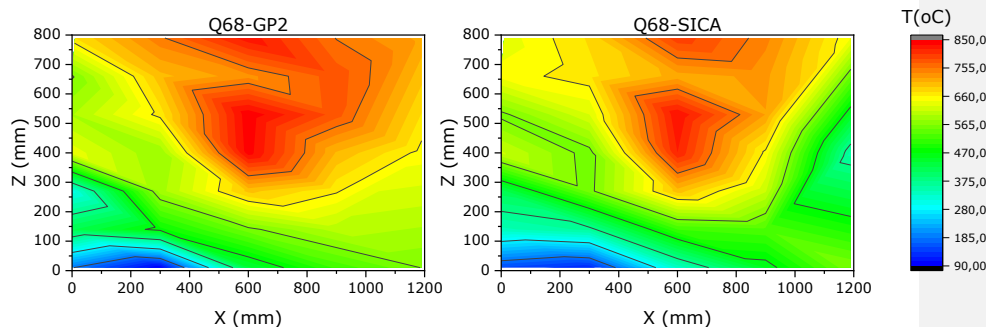
Οι θερμοφυσικές ιδιότητες των δομικών υλικών (Πίνακα 4.1), γυψοσανίδα (GP) και σανίδα πυριτικού ασβεστίου (SICA) δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές μεταξύ τους. Για αυτό τον λόγο η σύγκριση των αποτελεσμάτων των πειραματικών δοκιμών δεν αναμένεται να παρουσιάσει σημαντικές αποκλίσεις. Στο Σχήμα 5.20 φαίνονται στιγμιότυπα από τις δοκιμές Q68 - GP2 και Q68 - SICA.



Σχήμα 5.20: Στιγμιότυπα φωτιάς σε διαμέρισμα μπροστινής όψης για τα πειράματα Q68 - GP2 (αριστερά) και Q68 - SICA (δεξιά).

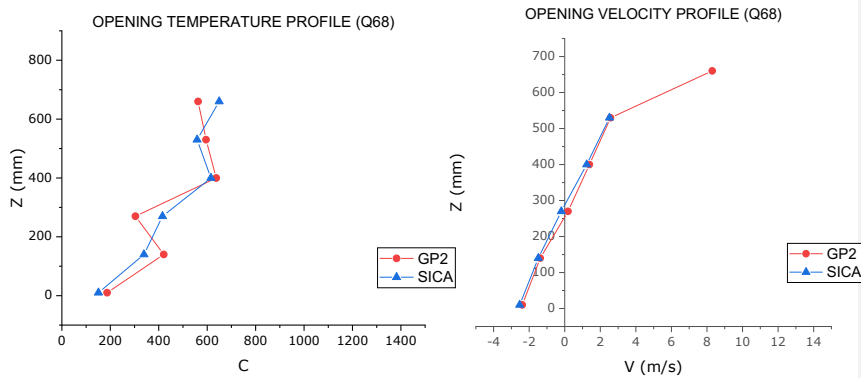
1) Αέριο περιβάλλον

Οι θερμοκρασίες στο διαμέρισμα για το πείραμα Q68-GP2 είναι υψηλότερες από αυτές στο πείραμα Q68-SICA, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.21. Στην περίπτωση του πειράματος με γυψοσανίδα (Σχήμα 5.21, αριστερά) αναπτύσσονται υψηλότερες θερμοκρασίες στη δέσμη καυσαερίων σε όλο το μήκος της οροφής. Η περιοχή ψυχρών θερμοκρασιών (εισερχόμενος αέρας) είναι μεγαλύτερη για το πυριτικό ασβέστιο (Σχήμα 5.21, δεξιά).



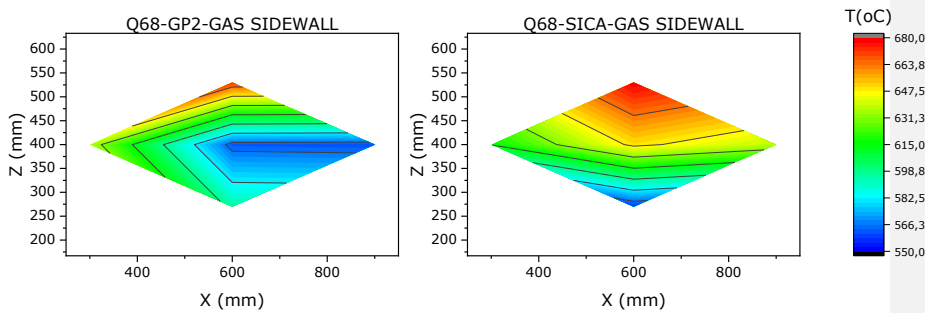
Σχήμα 5.21: Κατανομές θερμοκρασίας στο επίπεδο $Y=0$.

Στο άνοιγμα τα καυσαέρια που εξάγονται από το άνω τμήμα καθώς και ο εισερχόμενος αέρας βρίσκονται σε υψηλότερη θερμοκρασία στην δοκιμή με την γυψοσανίδα (Σχήμα 5.22, αριστερά). Στο Σχήμα 5.22 (αριστερά) φαίνεται ότι οι ταχύτητες και για τα δύο υλικά δεν παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές. Πρέπει να σημειωθεί ότι κατά το πείραμα Q68-SICA κατέρρευσε τμήμα του τοιχώματος πάνω από το άνοιγμα και έτσι η μέτρηση στο ανώτερο σημείο είναι λανθασμένη και δεν απεικονίζεται στο Σχήμα 5.22 (αριστερά).



Σχήμα 5.22: Κατανομή θερμοκρασιών (αριστερά) και ταχυτήτων (δεξιά) στο άνοιγμα κατά τον κατακόρυφο άξονα.

Οι θερμοκρασίες αερίου μείγματος κοντά στο πλαϊνό τοίχωμα δεν παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές (μέγιστη 680°C) για τα δύο υλικά, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.23. Η μέγιστη θερμοκρασία παρατηρείται στο ανώτερο σημείο και για τις δύο περιπτώσεις.

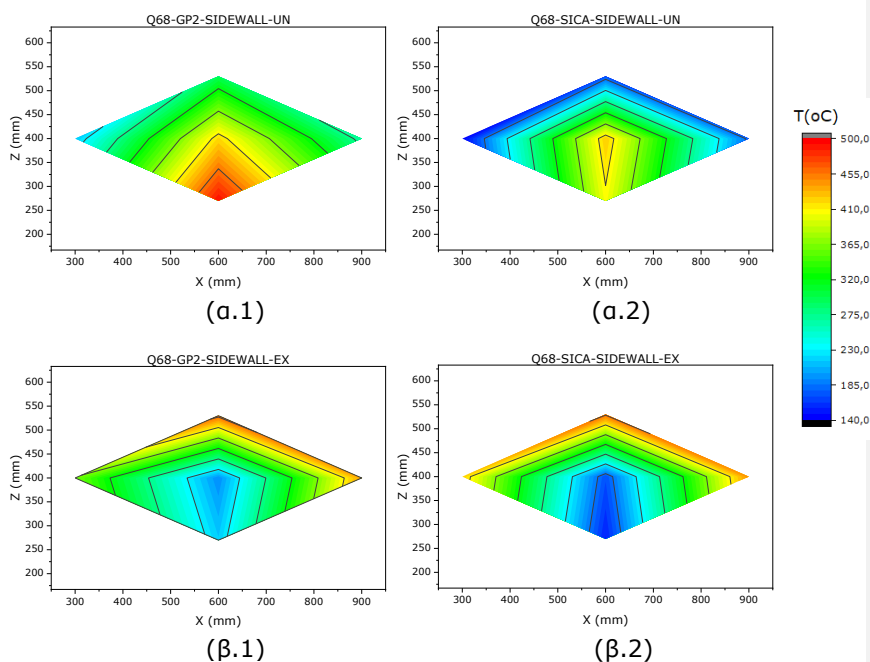


Σχήμα 5.23: Κατανομές θερμοκρασίας αερίου μείγματος κοντά στην επιφάνεια του πλαϊνού τοιχώματος.

2) Τοιχώματα

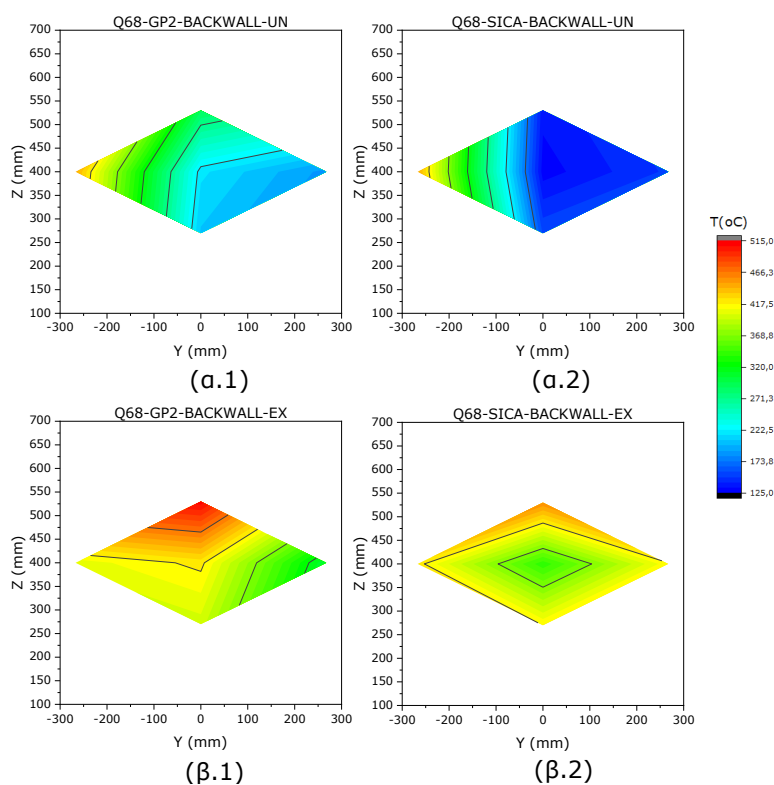
Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4, οι θέσεις των μην εκτεθειμένων θερμοστοιχείων στο εσωτερικό όλων των τοιχωμάτων είναι διαφορετικές, και συγκεκριμένα σε βάθος 12,55 mm για την γυψοσανίδα (GP) και σε βάθος 19 mm για τη σανίδα πυριτικού ασβεστίου (SICA). Οι συγκρίσεις των θερμοκρασιών στα επίπεδα πιθανώς να μην είναι ακριβείς ποσοτικά αλλά περιγράφουν ποιοτικά τη συμπεριφορά της μη εκτεθειμένης επιφάνειας των τοιχωμάτων στη φωτιά σε διαμέρισμα.

Η διαφορά θερμοκρασίας στο εσωτερικό των τοιχωμάτων ανάμεσα στην γυψοσανίδα (GP) και στη σανίδα πυριτικού ασβεστίου (SICA) γίνεται εμφανής στο Σχήμα 5.24. Οι αποκλίσεις για τις θερμοκρασίες των εκτεθειμένων θερμοστοιχείων φαίνεται να είναι μικρότερες, Σχήμα 5.24.(β.1), (β.2), ενώ η μεταφορά θερμότητας γίνεται κατά όμοιο τρόπο και για τα δύο υλικά.



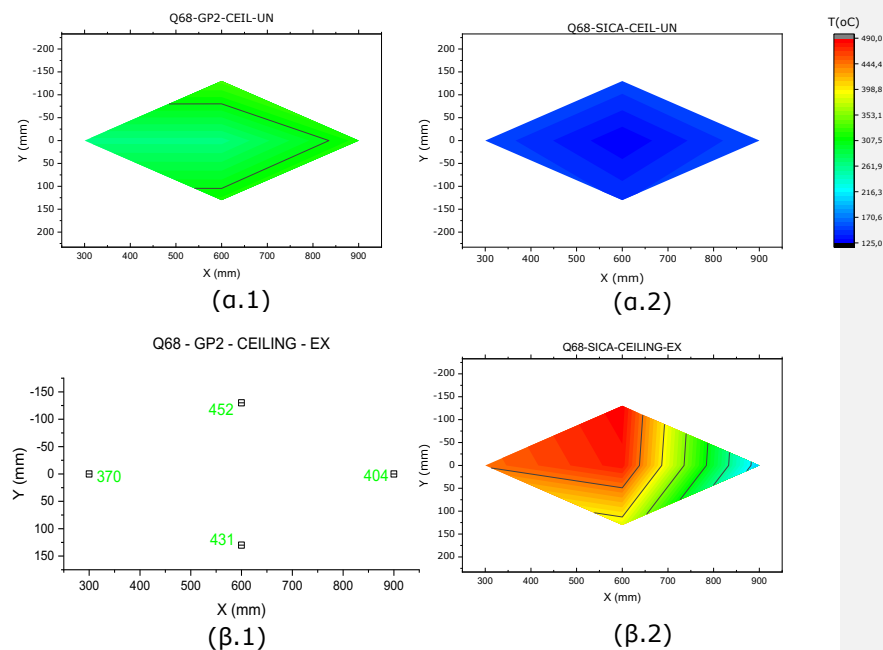
Σχήμα 5.24: Κατανομές θερμοκρασίας μη εκτεθειμένων, (α.1) και (α.2), εκτεθειμένων, (β.1) και (β.2), θερμοστοιχείων στο εσωτερικό του πλαϊνού τοιχώματος.

Σχετικά υψηλές διαφορές παρατηρούνται και στην περίπτωση του οπίσθιου τοιχώματος, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.25. Οι θερμοκρασίες των μη εκτεθειμένων θερμοστοιχείων, Σχήμα 5.25.(α.1), (α.2), είναι υψηλές προς τα αριστερά του τοιχώματος. Επιπλέον, η μέγιστη θερμοκρασία των εκτεθειμένων θερμοστοιχείων, Σχήματα 5.25.(β.1), (β.2), παρατηρείται στο κεντρικό και ανώτερο σημείο του τοιχώματος με την διαφορά στη μέση θερμοκρασία ανάμεσα στα δύο υλικά να είναι και εδώ περίπου 120°C . Η μεταφορά θερμότητας για το πυριτικό ασβέστιο, Σχήμα 5.25.(β.1), φαίνεται να γίνεται προς το κέντρο του τοιχώματος ενώ στην περίπτωση της γυψοσανίδας, η φωτιά φαίνεται να επηρεάζει το αριστερό και άνω τμήμα του.



Σχήμα 5.25: Κατανομές θερμοκρασίας μη εκτεθειμένων, (α.1) και (α.2), και εκτεθειμένων, (β.1) και (β.2), θερμοστοιχείων στο εσωτερικό του οπίσθιου τοιχώματος.

Οι θερμοκρασίες στο εσωτερικό της οροφής παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.26. Η κατανομή θερμοκρασίας των μη εκτεθειμένων θερμοστοιχείων, Σχήμα 5.26.(α.1), (α.2) είναι ομοιόμορφη και για τα δύο υλικά με τη διαφορά στους 150°C. Από την άλλη πλευρά, οι θερμοκρασίες των εκτεθειμένων θερμοστοιχείων, Σχήματα 5.26.(β.1), (β.2) δεν παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις.



Σχήμα 5.26: Κατανομές θερμοκρασίας μη εκτεθειμένων, (α.1) και (α.2), και εκτεθειμένων, (β.1) και (β.2), θερμοστοιχείων στο εσωτερικό της οροφής.

5.2.3 Συνέπειες στη δομή των τοιχωμάτων

Τα τοιχώματα του διαμερίσματος επαναχρησιμοποιήθηκαν σε αρκετές πειραματικές δοκιμές σταθερής ισχύος. Η συνεχής έκθεση τους σε φωτιές διαφορετικών επιπέδων ισχύος είχε ως αποτέλεσμα την αλλαγή των εσωτερικών διαστάσεων του διαμερίσματος λόγω παραμόρφωσης και ακόμα και την αστοχία σε υψηλές τιμές θερμικής ισχύος. Τα τοιχώματα γυψοσανίδας χρησιμοποιήθηκαν για τις ομάδες πειραματικών δοκιμών Q – GP1 και Q – GP2 με προτεραιότητα τα χαμηλά επίπεδα ισχύος και με αυτή την σειρά χρονικά.

Οι συνέπειες των πειραμάτων Q – GP1 φαίνονται στο Σχήμα 5.27. Μετά το πέρας και της δοκιμής Q136 – GP1 δεν φάνηκε κάποιο σοβαρό πρόβλημα στη δομή των τοιχωμάτων. Τα μαύρα σημάδια στο δάπεδο είναι η καμένη επικάλυψη της γυψοσανίδας.



Σχήμα 5.27: Εμπρόσθια όψη διαμερίσματος μετά από τις πειραματικές δοκιμές Q – GP1.

Στη συνέχεια, την επόμενη μέρα πραγματοποιήθηκαν η ομάδα δοκιμών Q – GP2. Στο Σχήμα 5.27 φαίνονται οι συνέπειες μετά το πέρας και της δοκιμής Q102 – GP2.



Σχήμα 5.27: Εικόνα κατά τη διάρκεια της δοκιμής Q102 – GP2 (δεξιά) και μετά το πέρας (αριστερά).

Κατά τη διάρκεια, και προς το τέλος, του πειράματος Q102 – GP2 ένα μέρος της οροφής και συγκεκριμένα το εκτεθειμένο στη φλόγα φύλλο γυψοσανίδας κατέρρευσε, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.27 (αριστερά). Επιπλέον, καταγράφηκαν και ραγίσματα στο δάπεδο κοντά στον καυστήρα και στα πλαϊνά τοιχώματα. Η οροφή κατέρρευσε κατά την αφαίρεση της.

Για την ομάδα δοκιμών Q – SICA οι συνέπειες απεικονίζονται στο Σχήμα 5.28.



Σχήμα 5.28: Εικόνες του διαμερίσματος μετά το πέρας των δοκιμών Q – SICA.

Μετά το πέρας της δοκιμής Q102 – SICA το δάπεδο καθώς και όλα τα τοιχώματα αστόχησαν. Στο οπίσθιο τοίχωμα η αστοχία του τοιχώματος είναι οριζόντια και στο κέντρο ενώ στα πλαϊνά τοιχώματα είναι κατακόρυφη. Οι αστοχίες προέκυψαν από την παραμόρφωση των τοιχωμάτων λόγω της θερμότητας της φωτιάς όπως φαίνεται στο

Σχήμα 5.28 (πάνω δεξιά). Η οροφή κατέρρευσε κατά την αφαίρεση της.

5.3 Πειράματα πρότυπης καμπύλης θερμοκρασίας – χρόνου ISO834.

Η καμπύλη θερμοκρασίας – χρόνου ISO834, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.6, ακολουθεί μονότονα ανοδική πορεία και δεν υπάρχει προτεινόμενος χρόνος διάρκειας της φωτιάς. Η διάρκεια της πειραματικής δοκιμής επιλέχθηκε να είναι 3600 s ή 1 ώρα. Κατά τη διάρκεια του πειράματος ISO-SICA το πρόγραμμα αυτομάτου ελέγχου παρουσίασε ασταθή συμπεριφορά μετά το χρονικό σημείο των 2200 δευτερολέπτων (ή 36 λεπτών) με η παροχή καυσίμου να εναλλάσσεται από μηδέν στην μέγιστη. Η πειραματική δοκιμή ISO-GP διήρκησε κανονικά και τα 3600 δευτερόλεπτα.

Στιγμιότυπα από τις δύο πειραματικές δοκιμές φαίνονται στα Σχήματα 5.29 και 5.30. Η πειραματική δοκιμή ISO – GP πραγματοποιήθηκε χωρίς προηγούμενη καταπόνηση των τοιχωμάτων από κάποιο πείραμα. Αντίθετα, σε μικρό χρονικό διάστημα (κάποιες ημέρες) πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές Q - SICA και ISO – SICA. Για τον λόγο αυτό η κατάσταση των τοιχωμάτων πυριτικού ασβεστίου, πριν την έναρξη του πειράματος ISO – SICA ήταν αυτή του Σχήματος 5.28 και συνεπώς οι μετρήσεις θερμοκρασίας τόσο στο αέριο περιβάλλον αλλά κυρίως στο εσωτερικό των τοιχωμάτων μπορεί να μην είναι αντιπροσωπευτικές ενός διαμερίσματος με «φρέσκα» τοιχώματα.

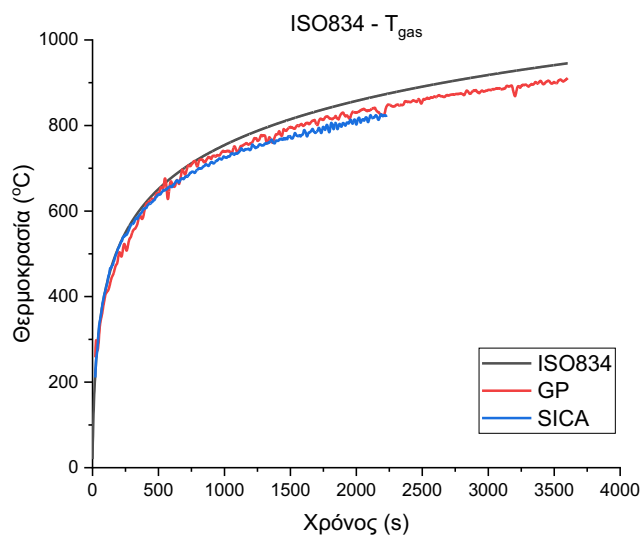


Σχήμα 5.29: Στιγμιότυπα από το πείραμα ISO – GP στο 1^ο λεπτό (πάνω αριστερά), στα 30 λεπτά (δεξιά) και στην 1 ώρα (κάτω αριστερά).



Σχήμα 5.30: Στιγμιότυπα από το πείραμα ISO – SICA στα 30 λεπτά.

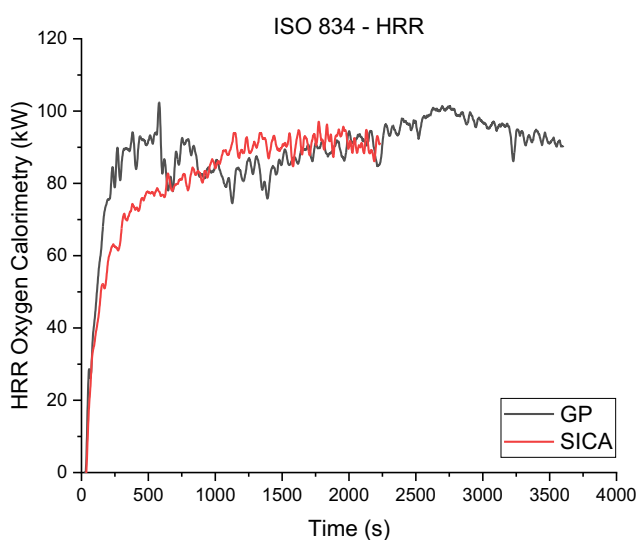
Η προσέγγιση της πρότυπης καμπύλης θερμοκρασίας-χρόνου ISO 834, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.31 είναι καλή. Η μέση μετρούμενη θερμοκρασία του στρώματος καυσαερίων και για τα δύο πειράματα εξάχθηκε από τις μετρούμενες θερμοκρασίες των θερμοστοιχείων όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.17 είναι μικρότερη λόγω της διόρθωσης θερμοκρασιών (Κεφάλαιο 4). Για την ομαλοποίηση των καμπυλών θερμοκρασίας καθώς και όλων των καμπυλών που θα παρουσιαστούν σε αυτό το κεφάλαιο χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του κινούμενου μέσου (Rolling Average).



Σχήμα 5.31: Πειραματικές καμπύλες θερμοκρασίας – χρόνου

Στα πρώτα λεπτά η καμπύλη ISO834 παρουσιάζει ραγδαία άνοδο πράγμα που καθιστά την προσέγγιση της ιδιαίτερα δύσκολη. Ωστόσο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.31 οι μετρούμενες θερμοκρασίες σε αυτό το σημείο φαίνεται να την ακολουθούν επαρκώς. Αντίθετα, αυξανόμενη απόκλιση εμφανίζεται όσο ο χρόνος αυξάνεται και κατά επέκταση όταν οι θερμοκρασίες αποκτούν σχετικά σταθερές τιμές.

Ο μετρούμενος ρυθμός έκλυσης θερμότητας (PEΘ – HRR) συναρτήσει του χρόνου απεικονίζεται στο Σχήμα 5.32. Η μορφή των δύο καμπυλών για τα διαφορετικά υλικά είναι αναμενόμενη. Παρατηρείται απότομη αύξηση της θερμικής ισχύος στα πρώτα λεπτά και σταθεροποίηση στην περιοχή των 90 kW όσο περνάει ο χρόνος.

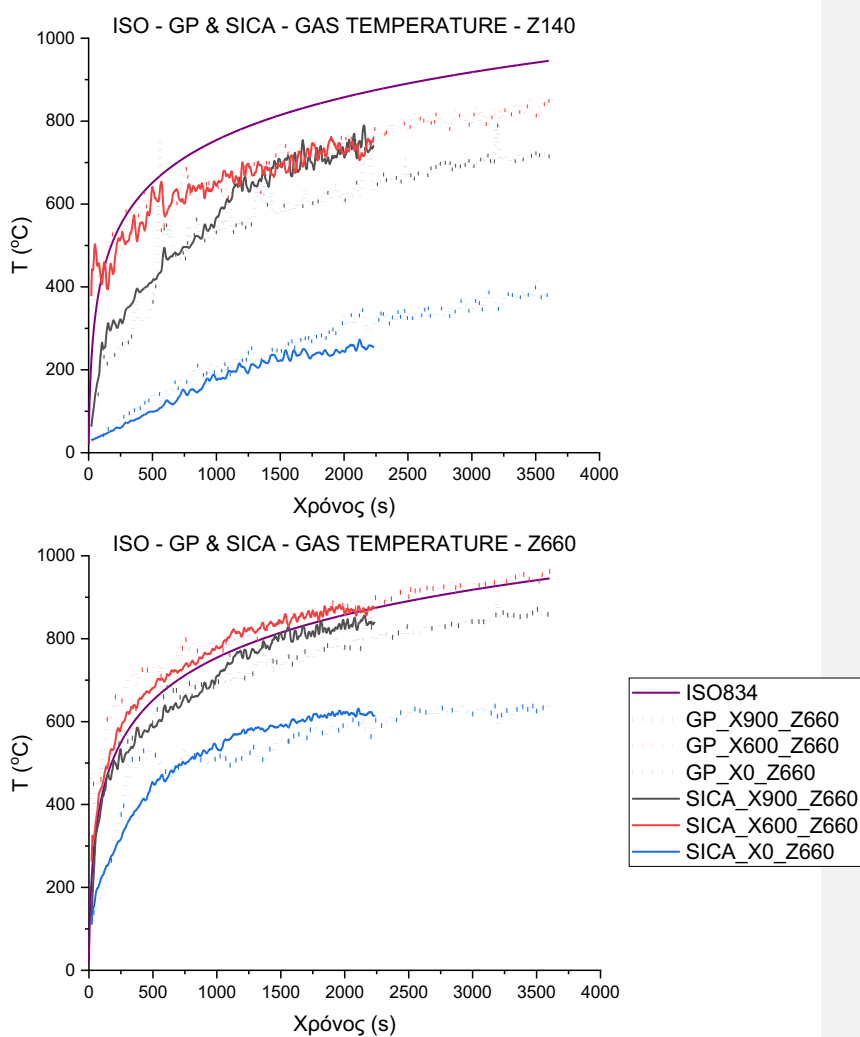


Σχήμα 5.32: Καμπύλη ρυθμού έκλυσης θερμότητας.

5.3.1 Αέριο περιβάλλον

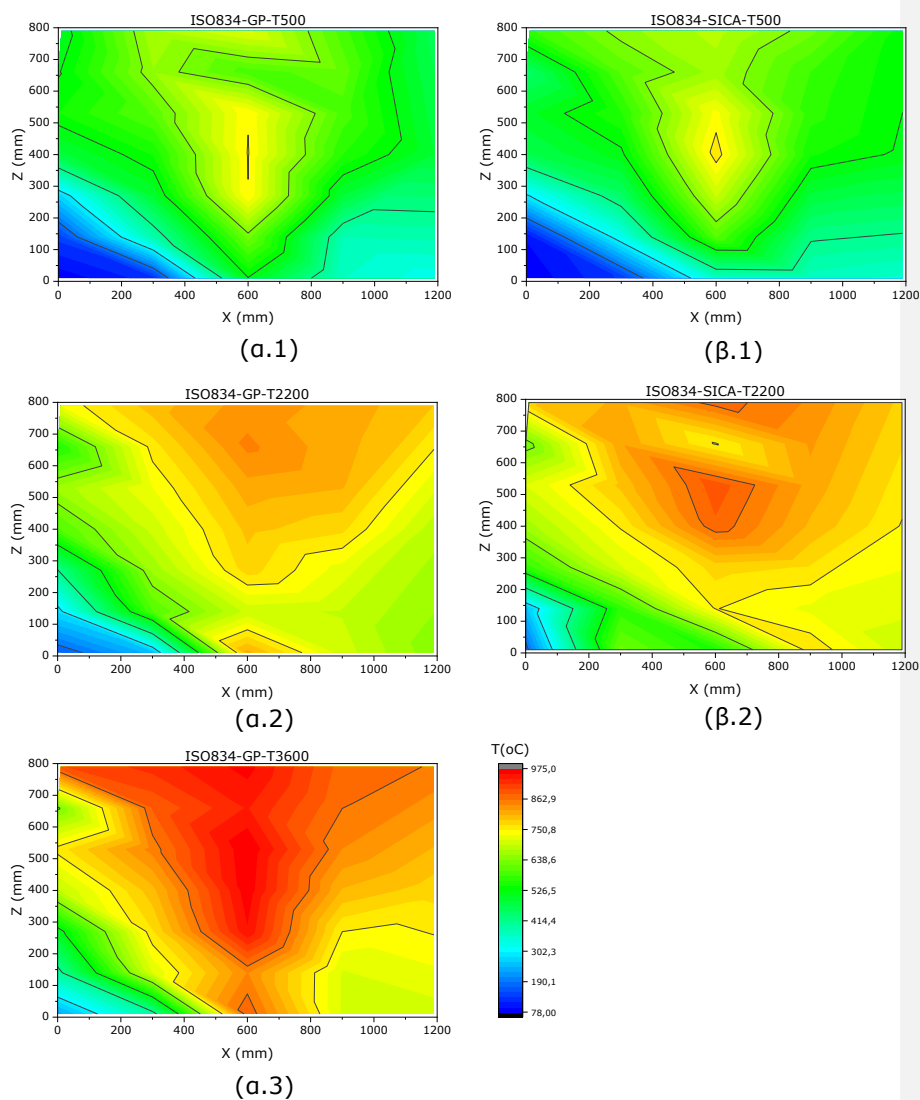
Στο Σχήμα 5.33 απεικονίζονται ενδεικτικά θερμοκρασίες διάφορων ελεύθερων θερμοστοιχείων σε συνάρτηση με τον χρόνο. Παρατηρείται ότι οι θερμοκρασίες στους άξονες X600 (καυστήρας) και X900 για τα ύψη $Z=140$, Σχήμα 5.33 (πάνω), και $Z=660$ mm, Σχήμα 5.33 (κάτω), εμφανίζουν ταλαντώσεις λόγω της έντονης μεταβολής της τιμής της ισχύος της φωτιάς στα αρχικά στάδια των πειραματικών δοκιμών. Οι ταλαντώσεις αυτές υποχωρούν κατά ένα βαθμό σταδιακά με την πάροδο του χρόνου, ωστόσο, η επιρροή της ισχύος της φωτιάς στις μετρήσεις θερμοκρασίας συνεχίζει να υπάρχει. Στο πείραμα ISO – SICA η θερμοκρασία στον άξονα X900 είναι ιδιαίτερα αυξημένη και κατά το χρονικό διάστημα 1200 s έως 2200 s φαίνεται να κινείται στις

ίδιες τιμές με τις θερμοκρασίες πάνω από τον καυστήρα (X600). Η φλόγα πιθανώς να έχει κλίση προς τα πίσω. Από την άλλη πλευρά, κοντά στο άνοιγμα οι καμπύλες θερμοκρασίας είναι περισσότερο ομαλές και οι μετρήσεις των δύο πειραματικών δοκιμών (ISO – GP, ISO – SICA) παρουσιάζουν καλή σύγκλιση.



Σχήμα 5.33: Ενδεικτικές θερμοκρασίες αερίου μείγματος στο ύψος Z140 (πάνω) και Z660 (κάτω).

Στο Σχήμα 5.34 απεικονίζονται κατανομές θερμοκρασίας στα στιγμιότυπα των χρονικών στιγμών $t=500s$, $t=2200s$ και $t=3600s$ για τις δύο πειραματικές δοκιμές ISO - GP (δεξιά) και ISO - SICA (αριστερά).

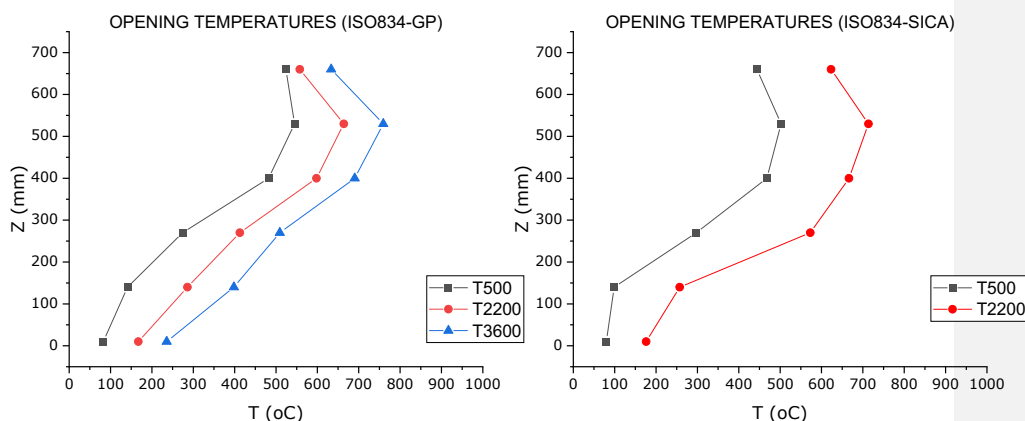


Σχήμα 5.34: Κατανομές θερμοκρασιών για διάφορες χρονικές στιγμές για τα πειράματα ISO – GP (αριστερά) και ISO – SICA (δεξιά).

Στα αρχικά στάδια των πειραματικών δοκιμών (χρονική στιγμή $t=500s$) Σχήματα 5.34.(α.1), (β.1) υψηλές θερμοκρασίες ($700^{\circ}C$) παρατηρούνται πάνω από τον καυστήρα. Η περιοχή χαμηλών θερμοκρασιών (ψυχρού αέρα) είναι μεγαλύτερη στο Σχήμα 5.34.(β.1) και οι θερμοκρασίες καυσαερίων είναι ελαφρώς υψηλότερες σε σχέση με το Σχήμα 5.34.(α.1). Η καμπύλη ISO 834 όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.32 δεν έχει φτάσει στο στάδιο όπου οι θερμοκρασίες είναι σχετικά σταθερές.

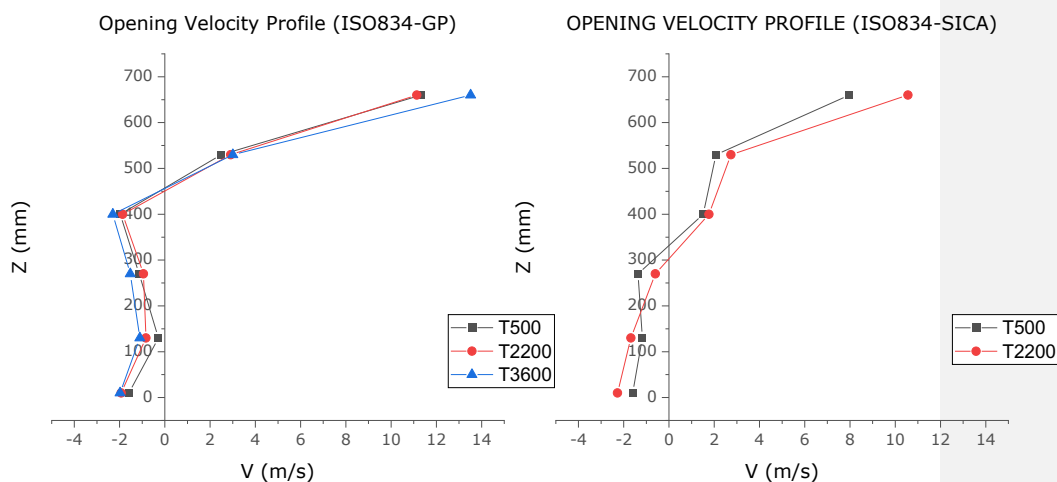
Την χρονική στιγμή $t=2200s$ οι θερμοκρασίες καυσαερίων έχουν φτάσει τις τιμές $800^{\circ}C$, όπως φαίνεται στα Σχήματα 5.34.(α.2), (β.2). Στο πείραμα ISO – SICA παρατηρούνται υψηλότερες θερμοκρασίες συνολικά από το πείραμα ISO – GP. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τα αποτελέσματα της Παραγράφου 5.2.2, όπου οι θερμοκρασίες αέριου μείγματος στο πείραμα Q68 – SICA ήταν χαμηλότερες από το πείραμα Q68 – GP2.

Τέλος, την χρονική στιγμή $t=3600s$, Σχήμα 5.34.(α.3) θερμοκρασίες της τάξης των $850 - 950^{\circ}C$ παρατηρούνται σε ολόκληρο το άνω τμήμα του διαμερίσματος. Η διαφορά της μέγιστης θερμοκρασίας δεν φαίνεται να είναι μεγάλη σε σχέση με το Σχήμα 5.34.(α.2) αλλά η περιοχή των υψηλών θερμοκρασιών έχει αυξηθεί.



Σχήμα 5.35: Κατανομή θερμοκρασίας στο άνοιγμα για ISO – GP (αριστερά) και ISO – SICA (δεξιά).

Όσον αφορά τις θερμοκρασίες στο άνοιγμα, Σχήμα 5.35, η κατανομή τους δεν φαίνεται να αλλάζει σημαντικά με την πάροδο του χρόνου και για τα δύο πειράματα. Οι θερμοκρασίες αυξάνουν όσο περνά ο χρόνος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.35, αριστερά – GP και δεξιά – SICA. Η κατανομή παρουσιάζει ανοδική πορεία με την αύξηση του ύψους μέχρι και το ύψος $Z=530\text{mm}$. Στο ύψος $Z=660\text{mm}$ η θερμοκρασία έξοδος των καυσαερίων είναι μειωμένη κατά 50°C . Σημαντική διαφορά (150°C) ανάμεσα στις δύο πειραματικές δοκιμές παρουσιάζεται στην μέτρηση θερμοκρασίας στο σημείο $(0,270)$ για την χρονική στιγμή $t=2200\text{s}$. Η διαφορά αυτή δεν απεικονίζεται στην κατανομή ταχυτήτων Σχήμα 5.36, με το σημείο αυτό να καταγράφει ταχύτητα προς το διαμέρισμα (ψυχρός αέρας) και για τα δύο πειράματα την χρονική στιγμή $t=2200\text{s}$.

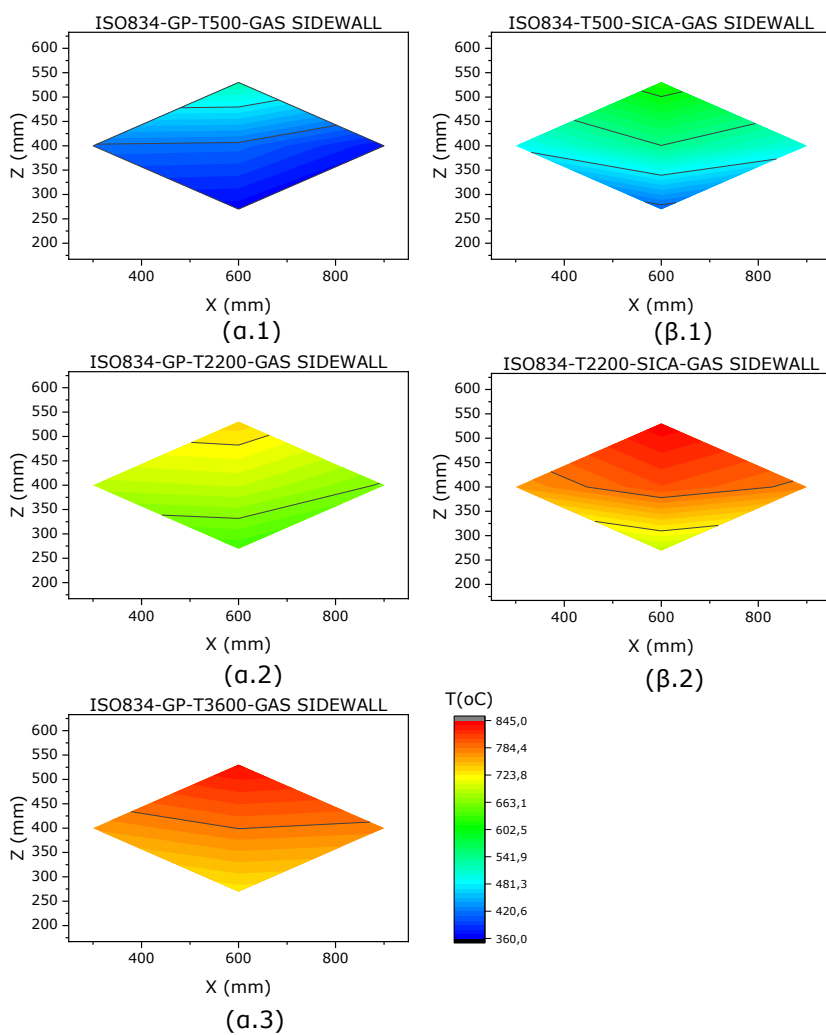


Σχήμα 5.36: Κατανομή ταχυτήτων στο άνοιγμα για ISO – GP (αριστερά) και ISO – SICA (δεξιά).

Η κατανομή ταχυτήτων απεικονίζεται στο Σχήμα 5.36 για το πείραμα ISO – GP (αριστερά) και ISO – SICA (δεξιά). Η κατανομή καθώς και οι τιμές της ταχύτητας δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες αλλαγές με την

πάροδο του χρόνου. Ωστόσο, συγκρίνοντας τα δύο πειράματα παρατηρείται διαφορετικό ύψος του ουδέτερου επιπέδου σύμφωνα με το Σχήμα 5.36. Για το πείραμα ISO – GP το μέσο ύψος των ουδέτερων επιπέδων για όλες τις χρονικές στιγμές υπολογίστηκε στα 450 mm ενώ για το πείραμα ISO – SICA στα 320 mm.

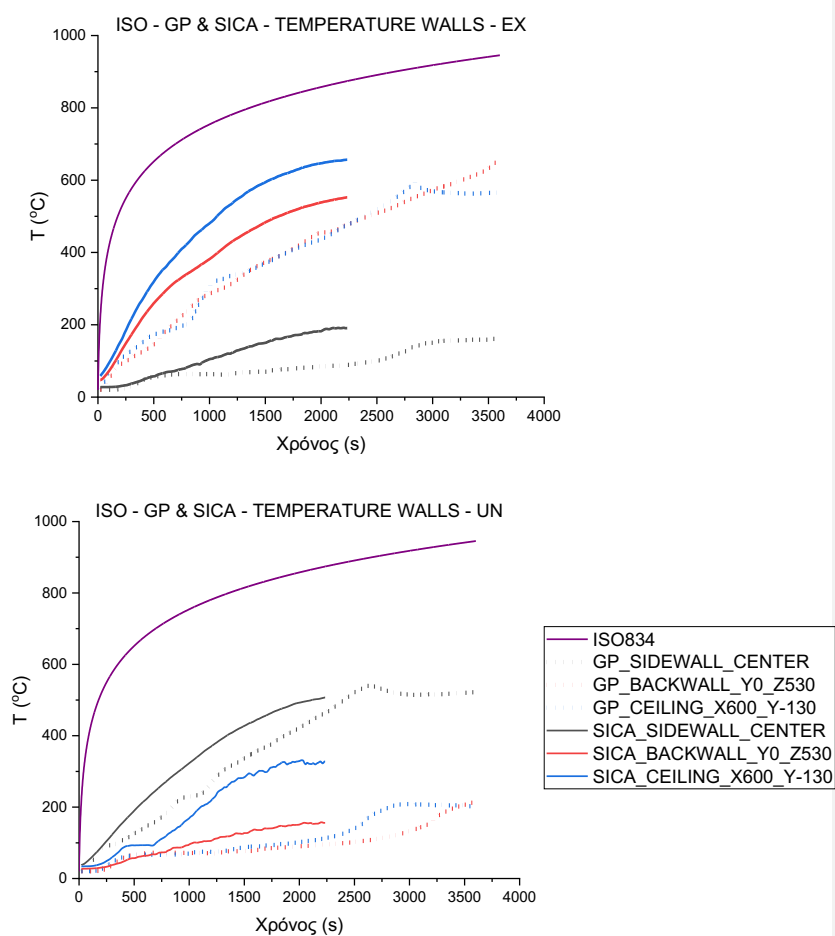
Οι μετρήσεις θερμοκρασίας αέριου μείγματος κοντά στο πλαϊνό τοίχωμα απεικονίζονται στο Σχήμα 5.37. Οι θερμοκρασίες στο άνω τμήμα της περιοχής κοντά στο τοίχωμα εμφανίζουν υψηλές τιμές και μειώνονται σταδιακά προς τα κάτω. Αυτό ισχύει για όλες τις χρονικές στιγμές και στα δύο πειράματα ISO – GP και ISO – SICA. Στο πείραμα ISO – SICA, όπως φαίνεται και στα Σχήμα 5.37.(β.1), (β.2) οι θερμοκρασίες είναι συνολικά υψηλότερες από τις αντίστοιχες του πειράματος ISO – GP, Σχήμα 5.37.(α.1), (α.2). Επιπλέον, το Σχήμα 5.37.(β.2) είναι συγκρίσιμο και με το Σχήμα 5.37.(α.3) που παρουσιάζει τα αποτελέσματα τη χρονική στιγμή $t=3600s$ από το πείραμα ISO – GP.



Σχήμα 5.37: Κατανομές θερμοκρασίας κοντά στο πλαϊνό τοίχωμα για το πείραμα ISO – GP (αριστερά) και ISO – SICA (δεξιά).

5.3.2 Τοιχώματα

Ενδεικτικά παρουσιάζονται και μετρήσεις θερμοκρασίας από κάποια εσωτερικά θερμοστοιχεία στα τοιχώματα, Σχήμα 5.38. Οι θερμοκρασίες εδώ και για τα εκτεθειμένα, Σχήμα 5.38 (πάνω) και για τα μη εκτεθειμένα, Σχήμα 5.38 (κάτω), θερμοστοιχεία δεν «τρεμοπαίζουν» και είναι συνολικά υψηλότερες για το πείραμα ISO – SICA από το πείραμα ISO – GP, με την μεγαλύτερη απόκλιση να αφορά το εσωτερικό θερμοστοιχείο οροφής στη θέση (600,-130) και την χρονική στιγμή 2200 s.



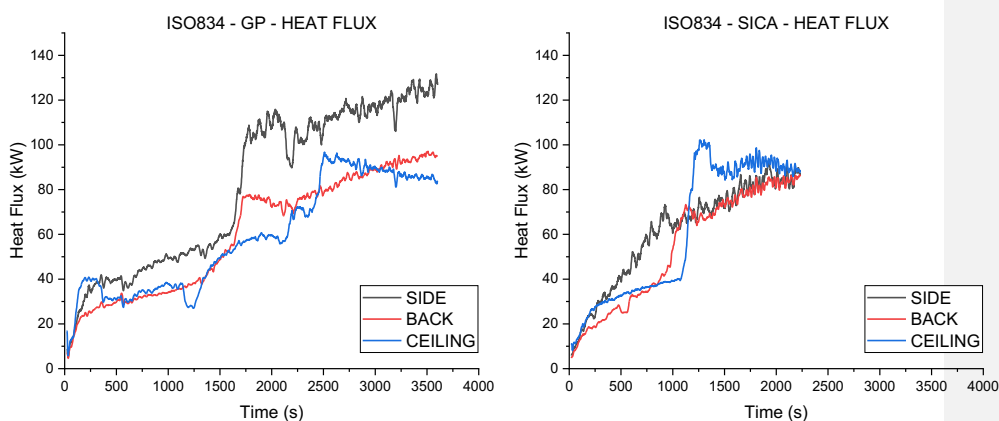
Σχήμα 5.38: Ενδεικτικές θερμοκρασίες εσωτερικών εκτεθειμένων (πάνω) και μη εκτεθειμένων (κάτω) θερμοστοιχείων τοιχωμάτων.

Οι μετρήσεις θερμορροής της οροφής, του πλαϊνού και του οπίσθιου τοιχώματος σε συνάρτηση με τον χρόνο απεικονίζονται στο Σχήμα 5.39 (αριστερά) για το πείραμα ISO - GP και δεξιά για το πείραμα ISO - SICA. Η θερμορροή τοιχωμάτων αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου για όλες τις πειραματικές δοκιμές όπως είναι αναμενόμενο.

Όσον αφορά το πείραμα ISO - GP, σύμφωνα με το Σχήμα 5.39 (αριστερά) οι μέγιστες τιμές τη χρονική στιγμή 3600s είναι 130 (kW/m²) για το πλαϊνό τοίχωμα και 80 και 90 (kW/m²) για το οπίσθιο τοίχωμα και την οροφή, αντίστοιχα. Η θερμορροή στο πλαϊνό τοίχωμα είναι υψηλότερη από τις άλλες δυο σε όλη την διάρκεια του πειράματος ενώ απότομη αύξηση παρατηρείται την χρονική στιγμή 1600 s.

Για το πείραμα ISO - SICA, οι θερμορροές έχουν αποκτήσει σχετικά σταθερές τιμές, (80-100 kW/m²) από το 1600 s και έπειτα. Επιπλέον, η τιμή της θερμορροής της οροφής αυξάνεται με αργό ρυθμό μέχρι το 1200 s ενώ ύστερα αυξάνεται απότομα και συγκλίνει με τις άλλες δυο. Η συμπεριφορά αυτή ίσως να οφείλεται και στη λάθος τοποθέτηση του αισθητήρα στο εσωτερικό της οροφής πριν το πείραμα.

Συγκρίνοντας για τη χρονική στιγμή 2200 s τις τιμές των θερμορροών για τα δυο πειράματα, παρατηρείται ότι οι τιμές του οπίσθιου τοιχώματος και της οροφής είναι υψηλότερες για το πείραμα ISO - SICA κατά 15-20 (kW/m²). Αντίθετα για το πλαϊνό τοίχωμα η μετρούμενη τιμή θερμορροής στο πείραμα ISO - GP είναι μεγαλύτερη κατά περίπου 20 (kW/m²).



Σχήμα 5.39: Καμπύλες θερμορροής τοιχωμάτων για το πείραμα ISO – GP (δεξιά) και ISO – SICA (αριστερά)

1) Θερμοκρασίες οπίσθιου τοιχώματος (back wall)

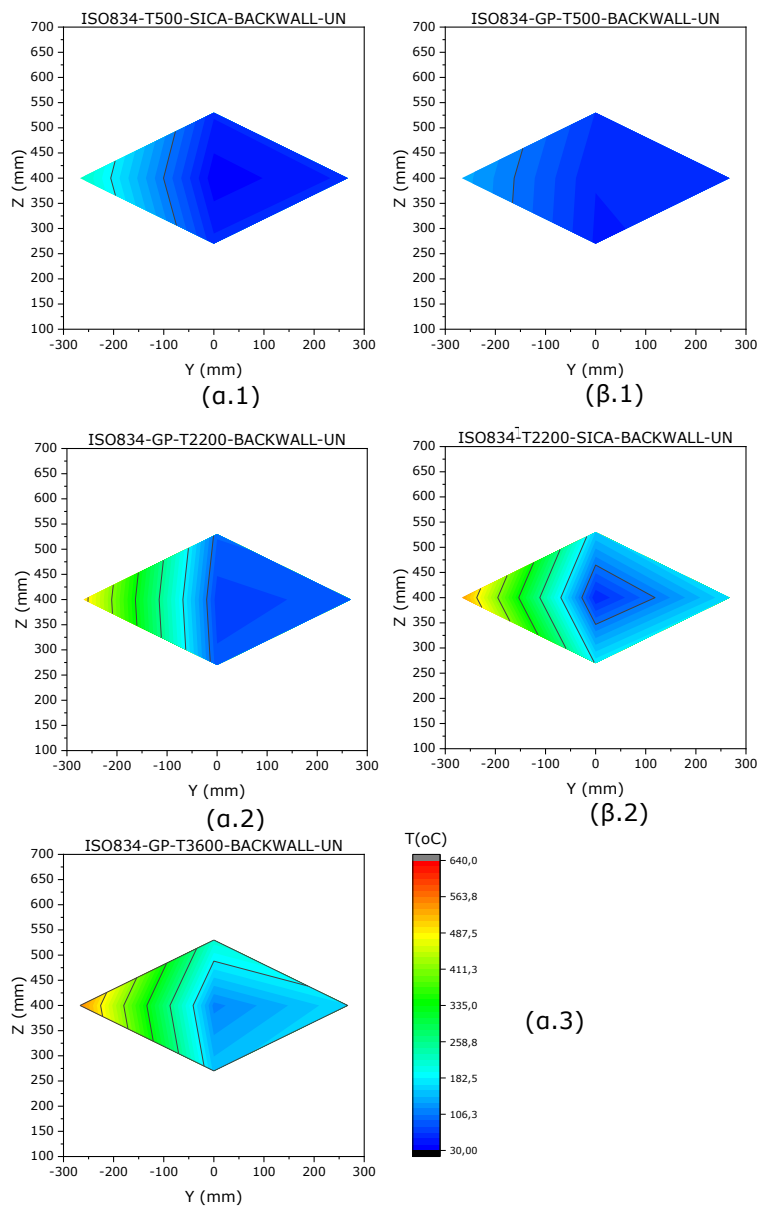
Οι χάρτες θερμοκρασίας στο εσωτερικό του οπίσθιου τοιχώματος για τις διάφορες χρονικές στιγμές φαίνονται στο Σχήμα 5.40 για τα μη εκτεθειμένα θερμοστοιχεία και στο Σχήμα 5.41 για τα εκτεθειμένα.

Αναλύοντας τα Σχήματα 5.40.(α.1), (α.2), (α.3), το αριστερό μέρος του οπίσθιου τοιχώματος είναι πιο θερμό από το αριστερό στο επίπεδο της μη εκτεθειμένης επιφάνειας. Οι θερμοκρασίες αυξάνονται με την πάροδο του χρόνου. Ομοίως, στα Σχήματα 5.40.(β.1), (β.2) για το πείραμα ISO – SICA το τοίχωμα είναι θερμότερο στην αριστερή του πλευρά στο επίπεδο της μη εκτεθειμένης επιφάνειας (διαφορετική από την ISO – GP).

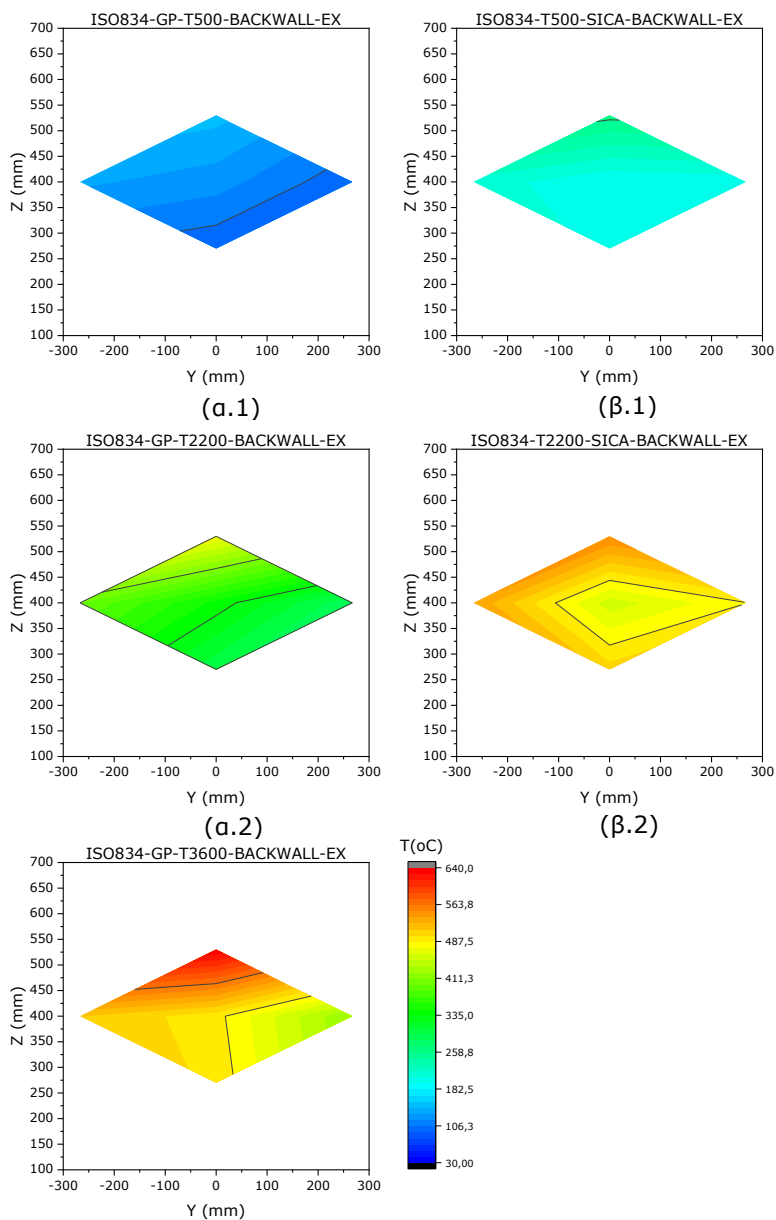
Από την άλλη πλευρά, οι κατανομές θερμοκρασίας των εκτεθειμένων θερμοστοιχείων δείχνουν τις θερμοκρασίες πιο ομοιόμορφα κατανομημένες και με τις μέγιστες να παρουσιάζονται στο άνω τμήμα του οπίσθιου τοιχώματος, όπως φαίνεται σε στο Σχήμα 5.41 για όλες τις χρονικές στιγμές και για τα δύο πειράματα.

Συγκρίνοντας τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο εσωτερικό των δύο υλικών για την ίδια χρονική στιγμή, σύμφωνα με τα Σχήματα

5.40.(α.2) και (β.2), οι θερμοκρασίες του πειράματος ISO – SICA είναι υψηλότερες παρόλο που η μη εκτεθειμένη επιφάνεια στη σανίδα πυριτικού ασβεστίου βρίσκεται σε μικρότερο πάχος από το πείραμα ISO – GP (γυψοσανίδα). Παρόμοια συμπεριφορά συναντάται και στις εκτεθειμένες επιφάνειες, όμοιες και για τα δύο υλικά (Σχήμα 5.41.(α.2), (β.2)).



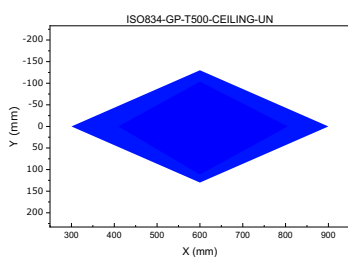
Σχήμα 5.40: Κατανομές θερμοκρασίας οπίσθιου τοιχώματος μη εκτεθειμένων θερμοστοιχείων για το ISO – GP (αριστερά) και ISO – SICA (δεξιά).



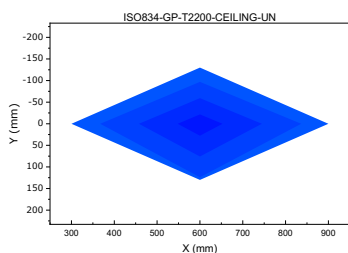
Σχήμα 5.41: Κατανομές θερμοκρασίας οπίσθιου τοιχώματος εκτεθειμένων θερμοστοιχείων για το ISO-GP (αριστερά) και ISO-SICA (δεξιά).

2) Θερμοκρασίες οροφής (Ceiling)

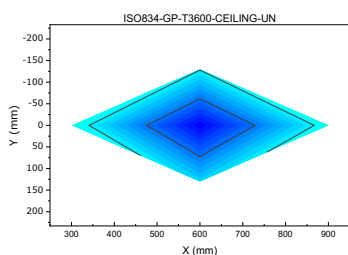
Στην οροφή οι θερμοκρασίες των μη εκτεθειμένων θερμοστοιχείων απεικονίζονται στο Σχήμα 5.42. Την χρονική στιγμή 500 s η μέση θερμοκρασία είναι χαμηλή στα δύο πειράματα ISO - GP, Σχήμα 5.42.(α.1) και ISO - SICA, Σχήμα 5.42.(β). Με την πάροδο του χρόνου οι θερμοκρασίες αυξάνονται και το τοίχωμα στην μη εκτεθειμένη επιφάνεια θερμαίνεται από τα άκρα προς το κέντρο.



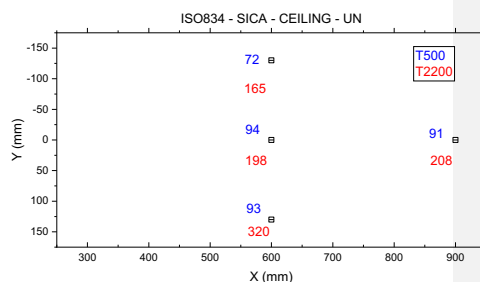
(α.1)



(α.2)



(α.3)

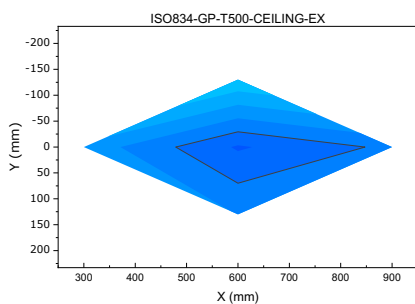


(β)

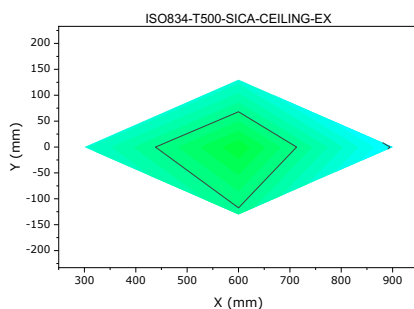
Σχήμα 5.42: Κατανομές θερμοκρασίας οπίσθιου τοιχώματος μη εκτεθειμένων θερμοστοιχείων για το ISO - GP (αριστερά) και ISO - SICA (δεξιά).

Υψηλότερη θερμοκρασία παρατηρείται για την περίπτωση του πυριτικού ασβεστίου σε σχέση με το πείραμα με την γυψοσανίδα, με την μέγιστη να είναι 320°C τη χρονική στιγμή 2200 s.

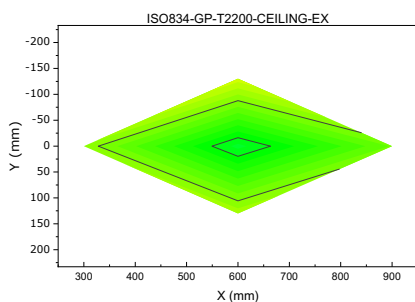
Στα Σχήματα 5.43 φαίνονται οι θερμοκρασίες των εκτεθειμένων θερμστοιχείων στην οροφή.



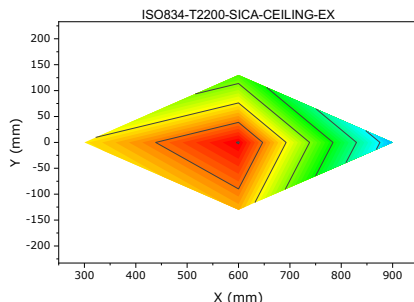
(a.1)



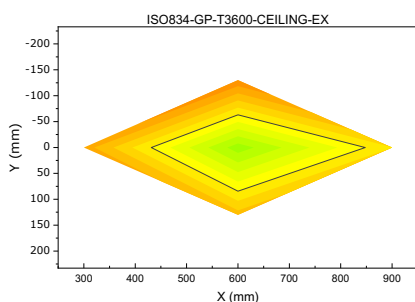
(β.1)



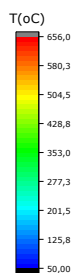
(a.2)



(β.2)



(a.3)



Σχήμα 5.43: Χάρτες θερμοκρασίας οροφής εκτεθειμένων θερμοστοιχείων για το ISO – GP (αριστερά) και ISO – SICA (δεξιά).

Για το πείραμα ISO – GP, Σχήμα 5.43.(α.2), (α.2), (α.3) η οροφή αναπτύσσει υψηλότερες θερμοκρασίες περιφερειακά σε αντίθεση με το πείραμα ISO – SICA, Σχήμα 5.43.(β.1), (β.2), όπου η οροφή θερμαίνεται από κέντρο προς τα έξω. Επιπλέον, την χρονική στιγμή 2200s οι θερμοκρασίες είναι σημαντικά υψηλότερες στο πείραμα ISO – SICA όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.43.(β.2) σε σχέση με το πείραμα ISO – GP.

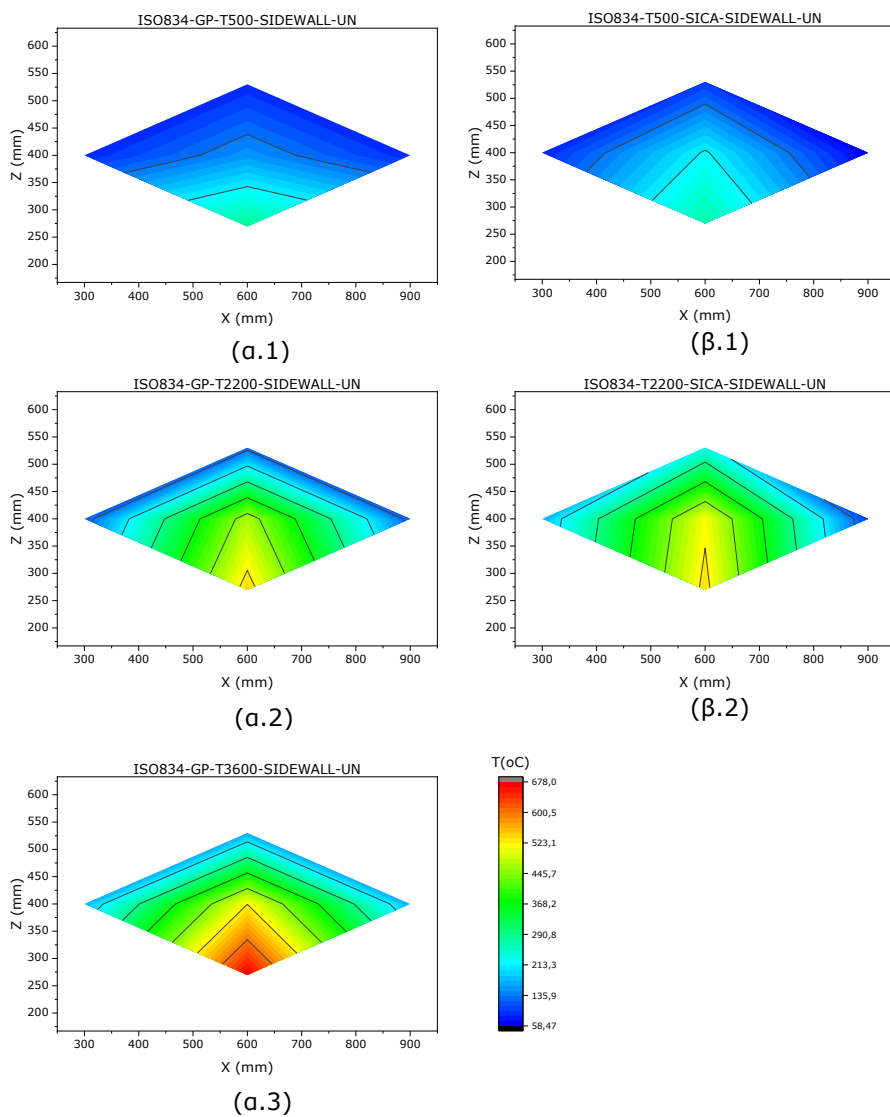
3) Θερμοκρασίες πλαϊνού τοιχώματος (Side Wall)

Τέλος, στα Σχήματα 5.44 και 5.45 απεικονίζονται οι κατανομές θερμοκρασίας στο εσωτερικό του πλαϊνού τοιχώματος για τα μη εκτεθειμένα και εκτεθειμένα θερμοστοιχεία αντίστοιχα.

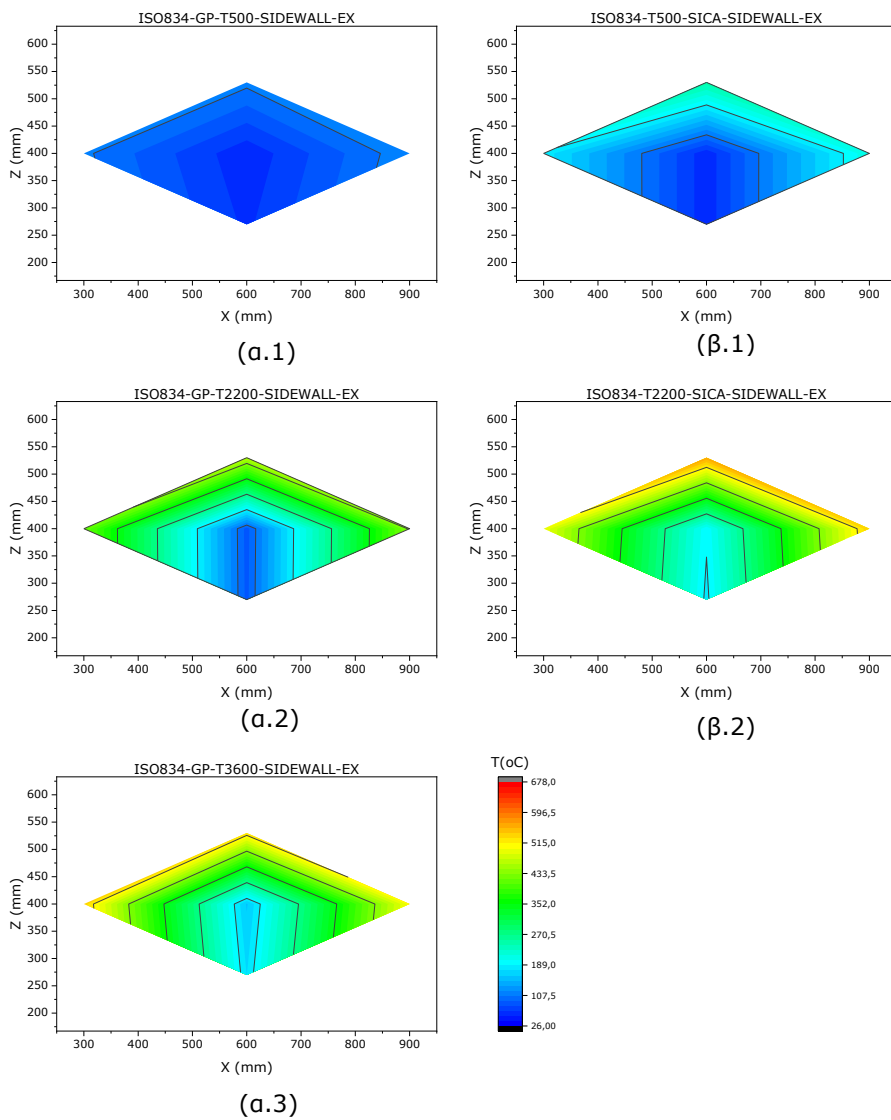
Στην μη εκτεθειμένη πλευρά, το τοίχωμα και για τα δύο πειράματα θερμαίνεται από κάτω προς τα πάνω λόγω μεταφοράς θερμότητας με φυσική συναγωγή. Οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο πείραμα ISO – SICA, Σχήματα 5.44.(β.1), (β.2) είναι γενικά υψηλότερες από αυτές του πειράματος ISO – GP, Σχήματα 5.40.(α.1), (α.2).

Για την εκτεθειμένη επιφάνεια του πλαϊνού τοιχώματος η θερμότητα μεταφέρεται από τις πλευρές του τοιχώματος προς το κέντρο όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.45. Οι θερμοκρασίες του πειράματος ISO – SICA είναι και εδώ υψηλότερες από τον πείραμα ISO – GP.

Συγκρίνοντας την εκτεθειμένη με την μη εκτεθειμένη επιφάνεια και για τα δύο υλικά, γυψοσανίδα και σανίδα πυριτικού ασβεστίου, παρατηρείται ότι παρόλο που αναπτύσσονται υψηλότερες θερμοκρασίες σε μεγαλύτερη έκταση στην εκτεθειμένη επιφάνεια, η μέγιστη θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη για την μη εκτεθειμένη.



Σχήμα 5.44: Κατανομές θερμοκρασίας πλαϊνού τοιχώματος μη εκτεθειμένων θερμοστοιχείων για το ISO – GP (αριστερά) και ISO – SICA (δεξιά).



Σχήμα 5.45: Κατανομές θερμοκρασίας πλαϊνού τοιχώματος εκτεθειμένων θερμοστοιχείων για το ISO – GP (αριστερά) και ISO – SICA (δεξιά).

6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων για την θερμοκρασία αέριου περιβάλλοντος, την ταχύτητα και την παροχή μάζας αερίων στο άνοιγμα με τα αποτελέσματα των εμπειρικών σχέσεων υπολογισμού των μεγεθών αυτών όπως αναφέρθηκαν στην Παράγραφο 3.2.

6.1 Θερμοκρασίες αερίου περιβάλλοντος

Ο υπολογισμός των θερμοκρασιών αερίου περιβάλλοντος πραγματοποιήθηκε με χρήση των σχετικών εμπειρικών συσχετίσεων, Εξισώσεις (3.4), (3.7), (3.8), (3.10), (3.11), για τα χαρακτηριστικά του υπό κλίμακα μοντέλου διαμερίσματος που χρησιμοποιήθηκε για τις πειραματικές δοκιμές. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε και πάλι ο υπολογισμός της θερμοκρασίας για τα χαρακτηριστικά του πρωτότυπου διαμερίσματος πλήρους κλίμακας ISO 9705 (3,6 x 2,4 x 2,4). Οι τιμές των μεταβλητών εξάχθηκαν σύμφωνα με τους νόμους ομοιότητας που περιεγράφηκαν στην Παράγραφο 2.3 και φαίνονται στον Πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1: Μετάθεση μεταβλητών των Εξισώσεων 3.X από το μοντέλο στο πρωτότυπο διαμέρισμα ISO 9705.

	Μοντέλο		Πρωτότυπο
Διαστάσεις	Ατ: επιφάνεια τοιχωμάτων	x	3-Διαστάσεις
		y	
		z	
	A: επιφάνεια ανοίγματος	H: ύψος ανοίγματος	
		Wο: πλάτος ανοίγματος	
	δ: πάχος τοιχώματος		
Ισχύς	Q: Ρυθμός έκλυσης θερμότητας		$Q_{\text{πρωτ}}=Q \cdot 3^{5/2}$
Παροχή μάζας	m_g : παροχή μάζας καυσαερίων		$m_{g,\text{πρωτ}}=m_g \cdot 3^{5/2}$

Χρόνος	t: χρόνος έκθεσης φωτιάς	$t_{\text{πρωτ}}=t/(3/g)^{1/2}$
---------------	--------------------------	---------------------------------

Μορφοποίηση: Γραμματοσειρά: Verdana, 10 στ.

Διέγγραψε: 6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ...

Οι θεωρητικές τιμές θερμοκρασιών περιβάλλοντος συγκρίνονται με τις πειραματικές τιμές στους Πίνακες 6.2 - 6.6. Για τις συγκρίσεις χρησιμοποιούνται η μέση θερμοκρασία καυσαερίων (T_g) και η μέση θερμοκρασία του διαμερίσματος (T_f). Η μέση θερμοκρασία των καυσαερίων εξάγεται από τις μετρούμενες θερμοκρασίες των θερμοστοιχείων κεντρικής γραμμής του Πίνακα 4.X. Η μέση θερμοκρασία του διαμερίσματος υπολογίζεται από τις μετρούμενες θερμοκρασίες όλων των θερμοστοιχείων κεντρικής γραμμής (Πίνακας 4.X).

6.1.1 Φωτιές πριν την καθολική ανάφλεξη

1) Στον Πίνακα 6.2 παρουσιάζονται οι τιμές των μέσων πειραματικών θερμοκρασιών του στρώματος των καυσαερίων (T_g) και οι θεωρητικές τιμές σύμφωνα με την Εξίσωση 3.4 – MQH (McCaffrey et al., 1981) για το μοντέλο διαμερίσματος (MQH_m) και για το πρωτότυπο διαμέρισμα πλήρους κλίμακας (MQH_p).

Πίνακας 6.2: Πειραματικές τιμές μέσης θερμοκρασίας καυσαερίων, θεωρητικές θερμοκρασίες για μοντέλο και πρωτότυπο σύμφωνα με McCaffrey et al. (1981) και αποκλίσεις.

Όνομασία πειράματος	T_g (°C)	MQH _m (°C)	Απόκλιση	MQH _p (°C)	Απόκλιση
Q34-SICA	399,4	413,5	-3,54%	646,1	61,78%
Q34-GP2	440,8	409,0	-7,76%	550,9	24,99%
Q68-SICA	722,5	643,3	-12,31%	1012,6	40,15%
Q68-GP1	734,9	636,2	-15,52%	931,08	26,68%

6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ 6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Μορφοποίηση: Γραμματοσειρά: Verdana, 10 στ.

Διεύθυνση: 6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ

Q68-GP2	758,4	636,2	-19,21%	861,4	13,58%
Q102-SICA	988,9	836,1	-18,28%	1319,9	33,48%
Q102-GP1	995,3	826,8	-20,38%	1213,1	21,89%
Q102-GP2	932,1	826,8	-12,74%	1121,8	20,35%
Q136-GP1	1116,3	996,8	-11,98%	1464,9	31,23%
Μέσος όρος αποκλίσεων			-13,52%		30,46%

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.2, η Εξίσωση 3.4 – MQH προσεγγίζει σε καλό βαθμό την μέση θερμοκρασία καυσαερίων στα πειράματα Q34-GP2 και Q34-SICA στην περίπτωση του μοντέλου. Οι αποκλίσεις για πειράματα μεγαλύτερης ισχύος μεγαλώνουν, πράγμα λογικό αφού σύμφωνα με τους McCaffrey et al. (1981) η Εξίσωση 3.4 παρέχει επαρκείς προσεγγίσεις για θερμοκρασίες μέχρι 600°C.

Επιπλέον, για το μοντέλο διαμερίσματος η εξίσωση MQH παρέχει μικρότερες εκτιμώμενες τιμές θερμοκρασίας από τις πραγματικές μετρούμενες ενώ στην περίπτωση του πρωτότυπου διαμερίσματος οι θεωρητικές τιμές είναι μεγαλύτερες.

2) Στον Πίνακα 6.3 παρουσιάζονται οι τιμές των μέσων πειραματικών θερμοκρασιών του στρώματος των καυσαερίων (T_g) και οι θεωρητικές τιμές σύμφωνα με την Εξίσωση 3.7 (Foote et al., 1986) για το μοντέλο διαμερίσματος ($Foote_m$) και το διαμέρισμα πλήρους κλίμακας ($Foote_p$).

Πίνακας 6.3: Πειραματικές τιμές μέσης θερμοκρασίας καυσαερίων, θεωρητικές θερμοκρασίες για μοντέλο και πρωτότυπο σύμφωνα με Foote et al. (1986) και αποκλίσεις.

6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ 6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Μορφοποίηση: Γραμματοσειρά: Verdana, 10 στ.

Διέγραψε: 6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ

Όνομασία πειράματος	T _g (°C)	Foote _m (°C)	Απόκλιση	Foote _p (°C)	Απόκλιση
Q34-SICA	399,4	291,0	-37,25%	467,1	16,94%
Q34-GP2	440,8	295,8	-49,04%	405,5	-8,69%
Q68-SICA	722,5	464,9	-55,42%	754,9	4,48%
Q68-GP1	734,9	472,7	-55,48%	710,3	-3,47%
Q68-GP2	758,4	472,7	-60,44%	653,6	-16,05%
Q102-SICA	988,9	614,9	-60,82%	1003,3	1,45%
Q102-GP1	995,3	625,4	-59,13%	943,6	-5,48%
Q102-GP2	932,1	625,4	-49,04%	867,6	-7,44%
Q136-GP1	1116,3	764,2	-46,07%	1155,6	3,52%
Μέσος όρος αποκλίσεων			-52,52%		-1,64%

Στη συγκεκριμένη περίπτωση διαπιστώνεται ότι η μετρούμενη θερμοκρασία στο υπό κλίμακα διαμέρισμα υποεκτιμάται από την Εξίσωση 3.7 με αποκλίσεις έως και 60%. Αντίθετα, για την περίπτωση του διαμερίσματος πλήρους κλίμακας οι μέσες θερμοκρασίες καυσαερίων προσεγγίζονται με αρκετή ακρίβεια. Αυτό πιθανώς να συμβαίνει λόγω της φύσης της Εξίσωσης 3.7 (Foote et al., 1986), η οποία έχει σχηματιστεί από αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών μεγάλης κλίμακας.

6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ 6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Μορφοποίηση: Γραμματοσειρά: Verdana, 10 στ.

Διεύθυνση: 6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ

3) Στον Πίνακα 6.4 παρουσιάζονται οι τιμές των μέσων πειραματικών θερμοκρασιών του στρώματος των καυσαερίων (T_g) και οι θεωρητικές τιμές σύμφωνα με την Εξίσωση 3.8 (Beyler and Deal, 1990) για το μοντέλο ($Beyler_m$) και το πρωτότυπο ($Beyler_p$) διαμέρισμα.

Πίνακας 6.4: Πειραματικές τιμές μέσης θερμοκρασίας καυσαερίων, θεωρητικές θερμοκρασίες για μοντέλο και πρωτότυπο σύμφωνα με Beyler and Deal (1990) και αποκλίσεις.

Όνομασία πειράματος	T_g (°C)	$Beyler_m$ (°C)	Απόκλιση	$Beyler_p$ (°C)	Απόκλιση
Q34-SICA	399,4	843,2	111,13%	890,6	122,98%
Q34-GP2	440,8	825,4	87,25%	927,6	110,45%
Q68-SICA	722,5	1042,2	44,24%	1110,6	53,71%
Q68-GP1	734,9	908,3	23,58%	917,9	24,88%
Q68-GP2	758,4	937,5	23,60%	947,4	24,91%
Q102-SICA	988,9	1152,2	16,51%	1219,3	23,30%
Q102-GP1	995,3	1059,3	6,44%	1072,7	7,77%
Q102-GP2	932,1	625,4	-49,04%	1159,7	24,42%
Q136-GP1	1116,3	1181,9	5,88%	1305,2	16,92%
Μέσος όρος αποκλίσεων			29,95%		45,48%

6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ 6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Μορφοποίηση: Γραμματοσειρά: Verdana, 10 στ.

Διεύθυνση: 6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ

Η Εξίσωση 3.8 των Beyler and Deal (1990) αναφέρεται σε φωτιές σε διαμέρισμα με εξαναγκασμένο αερισμό. Σε αντίθεση με την σχέση των Foote et al. (1986), οι συγγραφείς δεν παραθέτουν κάποια προσέγγιση για φυσικά αεριζόμενες φωτιές. Παρατηρούνται μεγάλες αποκλίσεις στο επίπεδο ισχύος 34kW, όπου οι θεωρητικές θερμοκρασίες και για το μοντέλο και για το πρωτότυπο είναι σχεδόν διπλάσιες από τις μετρούμενες. Οι μικρότερες αποκλίσεις παρουσιάζονται για το πείραμα Q102-GP1 και για το πείραμα Q136-GP1, πράγμα που πιθανώς να συνδέεται και με την υψηλή παροχή μάζας στα πειράματα αυτά, συγκρίσιμη πιθανώς με την παροχή μάζας σε δοκιμές με εξαναγκασμένο αερισμό.

6.1.2 Φωτιές μετά την καθολική ανάφλεξη

4) Ο υπολογισμός της θεωρητικής θερμοκρασίας καυσαερίων σύμφωνα με την Εξίσωση 3.10 (Delichatsios et al., 2009) πραγματοποιήθηκε μόνο για το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στις πειραματικές δοκιμές. Τα επίπεδα ισχύος της φωτιάς του πρωτότυπου διαμερίσματος απέτρεψαν την εξαγωγή ακριβών αποτελεσμάτων για τον υπολογισμό της μεταβλητής T_g^* . Παρόλα αυτά, η προσέγγιση των πειραματικών θερμοκρασιών καυσαερίων του διαμερίσματος υπό κλίμακα είναι αρκετά ικανοποιητική, όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.5.

Πίνακας 6.5: Πειραματικές τιμές μέσης θερμοκρασίας καυσαερίων, θεωρητικής θερμοκρασίας για το μοντέλο σύμφωνα με Delichatsios et al. (2009) και αποκλίσεις.

Όνομασία πειράματος	T_g (°C)	Delichatsios (°C)	Απόκλιση
Q34-SICA	399,4	292,7	36,45%
Q34-GP2	440,8	281,2	-56,74%
Q68-SICA	722,5	623,4	15,91%

6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Μορφοποίηση: Γραμματοσειρά: Verdana, 10 στ.

Διέγραψε: 6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ

Q68-GP1	734,9	557,9	-31,75%
Q68-GP2	758,4	597,8	-26,87%
Q102-SICA	988,9	949,2	4,18%
Q102-GP1	995,3	870,3	-14,37%
Q102-GP2	932,1	909,8	-2,45%
Q136-GP1	1116,3	1166,7	4,51%
Μέσος όρος αποκλίσεων			-7,90%

Από τον Πίνακα 6.5 φαίνεται πως οι θεωρητικές τιμές θερμοκρασίας καυσαερίων σύμφωνα με την Εξίσωση 3.10 είναι γενικά μικρότερες από τις μετρούμενες. Οι αποκλίσεις μειώνονται καθώς αυξάνεται η ισχύς της φωτιάς. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί ίσως λόγω της φύσης της Εξίσωσης 3.11 η οποία προορίζεται για φωτιές μετά την καθολική ανάφλεξη και, κατ' επέκταση, με υψηλότερες αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες.

5) Τέλος, στον Πίνακα 6.6 παρουσιάζονται οι μέσες μετρούμενες θερμοκρασίες του διαμερίσματος και οι θεωρητικές τιμές τους σύμφωνα με την Εξίσωση 3.11 (Matsuyama et al., 1998).

Πίνακας 6.6: Πειραματικές τιμές μέσης θερμοκρασίας διαμερίσματος, θεωρητικές θερμοκρασίες για το μοντέλο (Matsuyama_m) και πρωτότυπο (Matsuyama_p) σύμφωνα με Matsuyama et al. (1998) και αποκλίσεις.

Όνομασία πειράματος	T _f (°C)	Matsuyama _m (°C)	Απόκλιση	Matsuyama _p (°C)	Απόκλιση
---------------------	---------------------	-----------------------------	----------	-----------------------------	----------

6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ **6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ**

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Μορφοποίηση: Γραμματοσειρά: Verdana, 10 στ.

Διέγγραψε: 6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ

Q34-SICA	334,5	355,3	6,20%	463,2	38,44%
Q34-GP2	365,9	345,8	-5,84%	450,6	23,11%
Q68-SICA	597,4	615,7	3,04%	775,4	29,78%
Q68-GP1	615,3	535,8	-14,84%	702,1	14,10%
Q68-GP2	648,9	598,7	-8,39%	753,9	16,17%
Q102-SICA	836,5	854,2	2,11%	1060,5	26,78%
Q102-GP1	818,6	777,6	-5,27%	1021,8	24,82%
Q102-GP2	847,8	830,4	-2,10%	1030,9	21,58%
Q136-GP1	903,5	1001,3	10,82%	1317,6	45,83%
Μέσος όρος αποκλίσεων			-1,59%		26,73%

Η προσέγγιση της μέσης θερμοκρασίας του διαμερίσματος από την Εξίσωση 3.11 των Matsuyama et al. (1998) είναι αρκετά καλή για το μοντέλο των πειραματικών δοκιμών όπως φαίνεται και στον Πίνακα 6.5. Το εύρος των αποκλίσεων κυμαίνεται από 14,84 έως 2,10% και μειώνονται καθώς η ισχύς αυξάνεται. Όπως και με την σχέση των Delichatsios et al. (2009), αυτό ίσως οφείλεται στο ότι η Εξίσωση 3.10 έχει αναπτυχθεί για πλήρως ανεπτυγμένες φωτιές σε διαμέρισμα.

Στον Πίνακα 6.7 παρουσιάζονται συνοπτικά οι αποκλίσεις των πειραματικών και των θεωρητικών τιμών θερμοκρασίας καυσαερίων από τους Πίνακες 6.2 – 6.5 και θερμοκρασίας διαμερίσματος από τον Πίνακα 6.6. Παρατηρείται ότι οι τιμές θερμοκρασίας της σχέσης των

6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ 6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Μορφοποίηση: Γραμματοσειρά: Verdana, 10 στ.

Διέγγραψε: 6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ

Foote et al. (1986) για το πρωτότυπο προσεγγίζουν στον καλύτερο δυνατό βαθμό τις μετρούμενες θερμοκρασίες για τα διάφορα επίπεδα ισχύος. Η σχέση των Delichatsios et al (2009) επίσης εμφανίζει μικρές αποκλίσεις. Οι τιμές του Πίνακα 6.6 για τη σχέση Matsuyama et al. (1998) αφορούν την μέση θερμοκρασία από το εσωτερικό του διαμερίσματος και έτσι δεν μπορεί να συγκριθεί με τις υπόλοιπες σχέσεις που παρουσιάστηκαν. Ωστόσο, για την περίπτωση του μοντέλου η σχέση των Matsuyama et al. (1998) δίνει μια καλή εικόνα της μέσης θερμοκρασίας στο διαμέρισμα.

Πίνακας 6.7: Συνοπτικός πίνακας αποκλίσεων θεωρητικών και πειραματικών τιμών θερμοκρασίας.

T_g (°C)	420,1	738,6	972,1	1116,3	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση
Ισχύες (kW)	34	68	102	136		
MQH _m	-6%	-16%	-17%	-12%	-13%	0,0512
Foote _m	-43%	-57%	-56%	-46%	-51%	0,0710
Beyler _m	99%	30%	-9%	6%	32%	0,4780
Delichatsios _m	-10%	-14%	-4%	5%	-6%	0,0814
MQH _p	43%	27%	25%	31%	32%	0,0822
Foote _p	4%	-5%	-4%	4%	-0,3%	0,0479
Beyler _p	117%	35%	18%	17%	47%	0,4738
T_f (°C)	350,2	620,5	834,3	903,5		
Matsuyama _m	0,2%	-7%	-2%	11%	1%	0,0739
Matsuyama _p	31%	20%	24%	46%	30%	0,1128

6.2 Ταχύτητες στο άνοιγμα

Όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 3.2 υπάρχουν δύο μοντέλα για την περιγραφή του ροϊκού πεδίου της φωτιάς σε ένα διαμέρισμα: το μονοζωνικό και το διζωνικό μοντέλο. Για το διζωνικό μοντέλο, ο

6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ 6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ

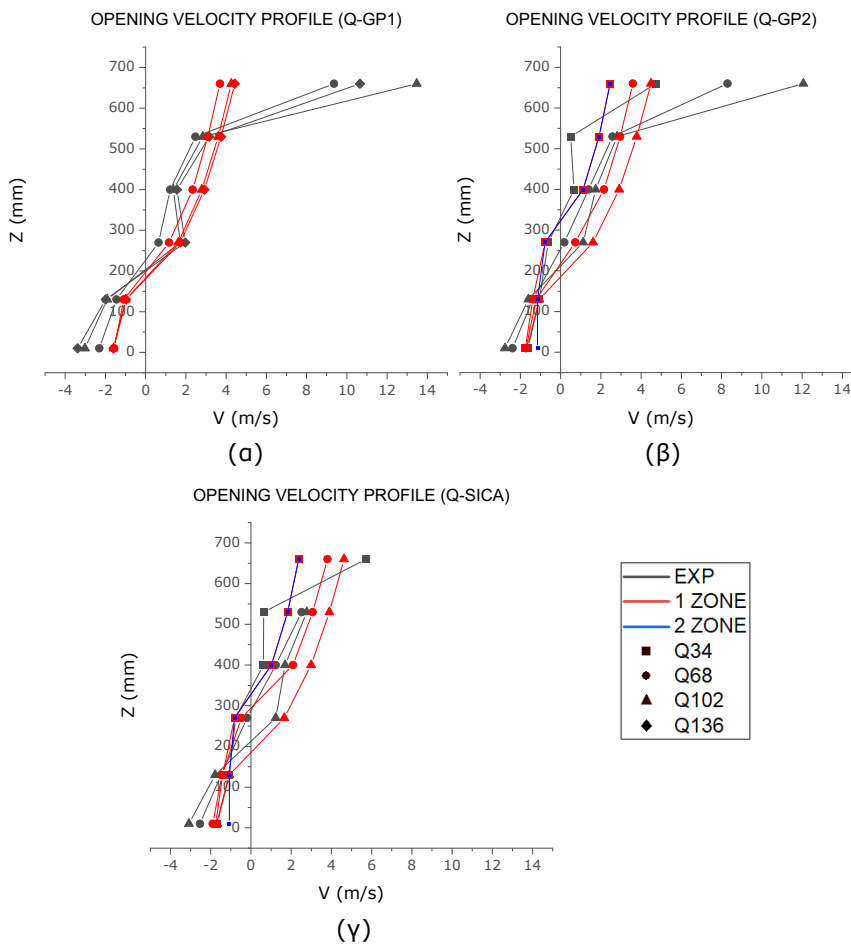
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Μορφοποίηση: Γραμματοσειρά: Verdana, 10 στ.

Διεύθυνση: 6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ

υπολογισμός του ύψους της δέσμης καυσαερίων στο διαμέρισμα (H_D) έγινε με τον εμπειρικό τύπο, Εξίσωση (3.15).

Η σύγκριση των θεωρητικών τιμών των ταχυτήτων και για τα δύο μοντέλα με τις μετρούμενες φαίνεται στα Σχήματα 6.1.(α), (β), (γ).



Σχήμα 6.1: Κατανομή πειραματικών και θεωρητικών ταχυτήτων στο άνοιγμα για ομάδες πειραμάτων: (α) Q-GP1, (β) Q-GP2, (γ) Q-SICA.

Κατά την διάρκεια των υπολογισμών των ταχυτήτων μέσω του διζωνικού μοντέλου παρατηρήθηκε ότι το ύψος της δέσμης καυσαερίων

στο εσωτερικό του διαμερίσματος (H_D) είχε θετικές τιμές μόνο για τα πειράματα Q34-GP2 και Q34-SICA. Επιπλέον, η ανώτερη μετρούμενη ταχύτητα για τα πειράματα Q68-SICA και Q102-SICA είναι στο σημείο (0, 530) διότι η μέτρηση στο σημείο (0, 660) δεν ήταν ακριβής.

Συνολικά, από τα Σχήματα 6.1.(α), (β), (γ) παρατηρείται καλή προσέγγιση των ταχυτήτων στο κάτω μέρος του ανοίγματος με τις θεωρητικές τιμές να υποεκτιμούν τις πειραματικές. Με την άυξηση του ύψους οι αποκλίσεις παραμένουν σχετικά σταθερές μέχρι και την ταχύτητα στο σημείο (0,660). Όπως φαίνεται σε όλα τα Σχήματα 6.1.(α), (β), (γ) οι θεωρητικές τιμές των ταχυτήτων είναι σημαντικά μικρότερες από τις πειραματικές.

6.3 Παροχή μάζας στο άνοιγμα

Η παροχή μάζας καυσαερίων και αέρα στο άνοιγμα υπολογίστηκε σύμφωνα με την Εξίσωση 6.1, χρησιμοποιώντας τις μετρούμενες ταχύτητες στο άνοιγμα. Ο συντελεστής και για τις δύο παροχές επιλέχθηκε να είναι ίσος με την τιμή 0,7.

$$\dot{m} = C_d \int \rho_{\infty} u dA \quad (6.1)$$

Για τα πειράματα Q68-SICA και Q102-SICA η ταχύτητα στο σημείο (0,660) δεν μετρήθηκε σωστά, συνεπώς η σύγκριση των συνολικών παροχών μάζας στο άνοιγμα για τα πειράματα αυτά δεν μπόρεσε να πραγματοποιηθεί.

6.3.1 Παροχή μάζας καυσαερίων στο άνοιγμα

1) Οι θεωρητικές τιμές της παροχής μάζας σύμφωνα με την Εξίσωση 3.19 των Rockett et al. (1976) φαίνονται στον Πίνακα 6.8.

Πίνακας 6.8: Πειραματικές και θεωρητικές τιμές παροχής μάζας καυσαερίων σύμφωνα με τους Rockett et al. (1976), αποκλίσεις.

6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ 6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Μορφοποίηση: Γραμματοσειρά: Verdana, 10 στ.

Διέγραψε: 6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ

Όνομασία πειράματος	m_g (kg/s)	Rockett et al. (kg/s)	Απόκλιση
Q34-SICA	0,0567	0,0605	-6,78%
Q34-GP2	0,0731	0,0632	-15,76%
Q68-GP2	0,1037	0,0825	-25,86%
Q68-GP1	0,1131	0,0928	-21,88%
Q102-GP2	0,0997	0,0891	-11,89%
Q102-GP1	0,1176	0,0942	-24,85%
Q136-GP1	0,1258	0,0934	-34,65%
Μέσος όρος αποκλίσεων			-20,24%

Οι θεωρητικές παροχές μάζας καυσαερίων σύμφωνα με τους Rockett et al. (1976) είναι μικρότερες από τις πειραματικές. Η καλύτερη προσέγγιση έγινε για τα πειράματα Q34-SICA και Q102-GP2.

2) Οι Johansson and Van Hees (2014) βελτίωσαν την σχέση των Rockett et al. (1976) με την Εξίσωση 3.20. Οι θεωρητικές τιμές της παροχής μάζας καυσαερίων σύμφωνα με τη σχέση των Johansson and Van Hees (2014) φαίνονται στον Πίνακα 6.9.

Πίνακας 6.9: Πειραματικές και θεωρητικές τιμές παροχής μάζας καυσαερίων σύμφωνα με τους Johansson and Van Hees (2014), αποκλίσεις.

6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ 6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Μορφοποίηση: Γραμματοσειρά: Verdana, 10 στ.

Διεύθυνση: 6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ

Όνομασία πειράματος	m_g (kg/s)	Johansson and Van Hees (kg/s)	Απόκλιση
Q34-SICA	0,0567	0,0662	16,78%
Q34-GP2	0,0731	0,0698	-4,89%
Q68-GP2	0,1037	0,0985	-5,40%
Q68-GP1	0,1131	0,0985	-14,84%
Q102-GP2	0,0997	0,0985	-1,26%
Q102-GP1	0,1176	0,0985	-19,46%
Q136-GP1	0,1258	0,0985	-27,78%
Μέσος όρος αποκλίσεων			-8,12%

Οι θεωρητικές τιμές παροχής μάζας της σχέσης των Johansson and Van Hees (2014) προσεγγίζουν καλύτερα από την σχέση των Rockett et al. (1976) τις πειραματικές τιμές, για τις ομάδες πειραμάτων Q-GP1 και Q-GP2.

6.3.2 Παροχή μάζας αέρα στο άνοιγμα

1) Η σχέση υπολογισμού παροχής μάζας αέρα στο άνοιγμα σύμφωνα με τους Rockett et al. (1976) φαίνεται στην Εξίσωση 3.21. Στον Πίνακα 6.10 παρουσιάζονται οι θεωρητικές και πειραματικές τιμές της.

Πίνακας 6.10: Πειραματικές και θεωρητικές τιμές παροχής μάζας αέρα σύμφωνα με τους Rockett et al. (1976), αποκλίσεις.

6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ 6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Μορφοποίηση: Γραμματοσειρά: Verdana, 10 στ.

Διέγγραψε: 6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ

Όνομασία πειράματος	m_a (kg/s)	Rockett et al. (kg/s)	Απόκλιση
Q34-GP2	0,0723	0,0732	1,12%
Q34-SICA	0,0804	0,0719	11,89%
Q68-GP1	0,0836	0,0559	-49,52%
Q68-GP2	0,0839	0,0680	-23,34%
Q102-GP1	0,1058	0,0507	-108,70%
Q102-GP2	0,0875	0,0549	-59,40%
Q136-GP1	0,1137	0,0500	-127,11%
Μέσος όρος αποκλίσεων			-50,72%

Οι θεωρητικές τιμές της σχέσης των Rockett et al. (1976) φαίνεται να μειώνονται καθώς αυξάνεται η ισχύς, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 6.10. Αυτό πιθανώς να οφείλεται στο γεγονός ότι το ύψος της δέσμης καυσαερίων στο διαμέρισμα υπολογίστηκε ως μηδέν για τα πειράματα Q68-GP1, Q102-GP1, Q136-GP1, Q68-GP2 και Q102-GP2. Φαίνεται ότι στα υψηλά επίπεδα ισχύος η δέσμη καυσαερίων καταλάμβανε ολόκληρο το εσωτερικό του διαμερίσματος. Αντίθετα, στα πειράματα Q34-GP2 και Q34-SICA η παροχή μάζας αέρα προσεγγίζεται με μία επαρκή ακρίβεια.

2) Οι θεωρητικές τιμές της παροχής μάζας αέρα της Εξίσωση 3.22 των Thomas and Hedelson (1992) παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.11.

Πίνακας 6.11: Πειραματικές και θεωρητικές τιμές παροχής μάζας αέρα σύμφωνα με Thomas and Hedelson (1992), αποκλίσεις.

Όνομασία πειράματος	m_a (kg/s)	Thomas and Hedelson (kg/s)	Απόκλιση
Q34-GP2	0,0723	0,0722	-0,15%
Q34-SICA	0,0804	0,0722	-11,30%
Q68-GP1	0,0836	0,0722	-15,66%
Q68-GP2	0,0839	0,0722	-16,14%
Q102-GP1	0,1058	0,0722	-46,39%
Q102-GP2	0,0875	0,0722	-21,07%
Q136-GP1	0,1137	0,0722	-57,37%
Μέσος όρος αποκλίσεων			-24,01%

Η εξίσωση των Thomas and Hedelson (1992) δεν εξαρτάται από την ισχύς και έχει σταθερή τιμή. Η θεωρητική τιμή της παροχής μάζας είναι γενικά σε καλό επίπεδο με τις μικρότερες αποκλίσεις να βρίσκονται στο επίπεδο ισχύος 34 kW.

3) Στον Πίνακα 6.12 παρουσιάζονται οι παροχές μάζας αέρα της Εξίσωσης 3.23 σύμφωνα με τους Quintiere et al. (1981).

Πίνακας 6.12: Πειραματικές και θεωρητικές τιμές παροχής μάζας αέρα σύμφωνα με Quintiere et al. (1981), αποκλίσεις.

6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ 6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Μορφοποίηση: Γραμματοσειρά: Verdana, 10 στ.

Διεύθυνση: 6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ

Όνομασία πειράματος	m_a (kg/s)	Quintiere et al. (kg/s)	Απόκλιση
Q34-GP2	0,0723	0,0625	-15,72%
Q34-SICA	0,0804	0,0604	-33,13%
Q68-GP1	0,0836	0,0873	4,42%
Q68-GP2	0,0839	0,0790	-6,17%
Q102-GP1	0,1058	0,0876	-20,77%
Q102-GP2	0,0875	0,0867	-0,92%
Q136-GP1	0,1137	0,0857	-32,67%
Μέσος όρος αποκλίσεων			-14,99%

Η σχέση των Quintiere et al. (1981) μειώνει συνολικά τις παρατηρούμενες αποκλίσεις των θεωρητικών τιμών της παροχής μάζας αέρα από τις πειραματικές.

4) Τέλος, η Εξίσωση 3.23 του Tewarson (1984) χρησιμοποιεί και την παροχή καυσίμου για τον υπολογισμό της παροχής μάζας αέρα. Οι θεωρητικές τιμές φαίνονται στον Πίνακα 6.13.

Πίνακας 6.13: Πειραματικές και θεωρητικές τιμές παροχής μάζας αέρα σύμφωνα με Tewarson (1984), αποκλίσεις.

6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ 6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Μορφοποίηση: Γραμματοσειρά: Verdana, 10 στ.

Διέγραψε: 6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ

Όνομασία πειράματος	m_a (kg/s)	Tewarson (kg/s)	Απόκλιση
Q34-GP2	0,0723	0,0624	-15,86%
Q34-SICA	0,0804	0,0598	-34,49%
Q68-GP1	0,0836	0,0913	9,20%
Q68-GP2	0,0839	0,0809	-3,67%
Q102-GP1	0,1058	0,0919	-15,03%
Q102-GP2	0,0875	0,0869	-0,71%
Q136-GP1	0,1137	0,0904	-25,72%
Μέσος όρος αποκλίσεων			-12,33%

Οι θεωρητικές τιμές παροχής μάζας της σχέσης του Tewarons (1984) παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά με τα αποτελέσματα της σχέσης των Quintiere et al. (1981), Πίνακας 6.12.

Στους Πίνακες 6.14 και 6.15 παρουσιάζονται συνοπτικά όλες οι αποκλίσεις των θεωρητικών τιμών από τις πειραματικές για την παροχή μάζας καυσαερίων και αέρα αντίστοιχα. Με έντονα γράμματα απεικονίζονται οι μικρότερες αποκλίσεις. Η των Johansson and Van Hees (2014) αποτελεί την καλύτερη προσέγγιση για την εκτίμηση της παροχής μάζας καυσαερίων στο σύνολο των πειραματικών δοκιμών σταθερής ισχύος της παρούσας εργασίας. Για την παροχή μάζας αέρα, η του Tewarson (1984) αποτελεί την καλύτερη προσέγγιση των πειραματικών τιμών παροχής μάζας. Η των Rockett et al. (1976) φαίνεται να προσεγγίζει καλύτερα πειράματα μικρής ισχύος (κάτω των

6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ **6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ**

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

34kW) ενώ οι αποκλίσεις της μεθόδου αυτή μεγαλώνουν με την αύξηση της ισχύος.

Μορφοποίηση: Γραμματοσειρά: Verdana, 10 στ.

Διέγγραψε: 6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ

Πίνακας 6.14: Αποκλίσεις θεωρητικών και πειραματικών τιμών παροχής μάζας καυσαερίων.

m_g (kg/s)	0,0649	0,1084	0,1086	0,1258	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση
Ισχύς (kW)	34	68	102	136		
Rockett et al	-11%	-24%	-18%	-35%	-22%	0,0986
Johansson & Van Hees	6%	-10%	-10%	-28%	-11%	0,1377

Πίνακας 6.15: Αποκλίσεις θεωρητικών και πειραματικών τιμών παροχής μάζας αέρα.

m_a (kg/s)	0,0763	0,0837	0,0966	0,1137	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση
Ισχύς (kW)	34	68	102	136		
Rockett et al	7%	-36%	-84%	-127%	-60%	0,5791
Thomas & Hedelsen	-6%	-16%	-34%	-57%	-28%	0,2264
Quintiere et al	-24%	-1%	-11%	-33%	-17%	0,1412
Tewarson	-25%	3%	-8%	-26%	-14%	0,1391

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία, ερευνήθηκε πειραματικά η επίδραση της ισχύος φωτιάς, των υλικών των τοιχωμάτων καθώς και της πρότυπης καμπύλης θερμοκρασίας – χρόνου ISO 834 στα ροϊκά και θερμικά χαρακτηριστικά της φωτιάς σε διαμέρισμα.

Χρησιμοποιώντας τέσσερα επίπεδα ισχύος και δύο διαφορετικά υλικά τοιχωμάτων, πραγματοποιήθηκαν συνολικά 9 πειραματικές δοκιμές σταθερής ισχύος. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια συστήματος αυτομάτου ελέγχου, πραγματοποιήθηκαν δύο επιπλέον πειραματικές δοκιμές προσέγγισης της καμπύλης θερμοκρασίας – χρόνου ISO 834 με τη χρήση δύο διαφορετικών υλικών τοιχωμάτων.

Κατά την διάρκεια όλων των πειραματικών δοκιμών μετρούνταν:

- Θερμοκρασίες αερίου μείγματος εντός του πυροδιαμερίσματος
- Θερμοκρασίες αερίου μείγματος στο άνοιγμα
- Ταχύτητες στο άνοιγμα
- Θερμοκρασίας στο εσωτερικό των τοιχωμάτων
- Θερμορροή στα τοιχώματα
- Συγκεντρώσεις αερίων

Για τις μετρήσεις τοποθετήθηκαν συνολικά 75 θερμοστοιχεία, 4 δικατευθυντικοί μετρητές ταχύτητας, 2 σωλήνες Pitot – Static και 3 μετρητές ροής θερμότητας, ενώ 2 παροχόμετρα ρύθμιζαν την παροχή προπάνιου και 1 παροχόμετρο μετρούσε την παροχή όγκου στην απαγωγή καυσαερίων προς τον 1 αναλυτή καυσαερίων. Με την επεξεργασία των μετρήσεων των συγκεντρώσεων αερίων και των ταχυτήτων στο άνοιγμα υπολογίστηκε ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας (Heat Release Rate) της φωτιάς και η παροχή μάζας στο άνοιγμα.

Αξιολογώντας τα πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών σταθερής ισχύος εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα:

Για το εσωτερικό του διαμερίσματος:

- Όσο αυξάνεται η ισχύς, αυξάνεται η μέση θερμοκρασία του άνω στρώματος καυσαερίων καθώς και όλου του διαμερίσματος.

- Σε χαμηλά επίπεδα ισχύος οι μέγιστες θερμοκρασίες παρουσιάζονται στον κατακόρυφο άξονα του καυστήρα και στο μέσο ύψος του διαμερίσματος.
- Σε υψηλά επίπεδα ισχύος, οι μέγιστες θερμοκρασίες παρουσιάζονται στο οπίσθιο και άνω μέρος του διαμερίσματος.
- Όσο αναφορά το υλικό των τοιχωμάτων, στην περίπτωση της γυψοσανίδας η μέση θερμοκρασία του διαμερίσματος είναι υψηλότερη από ότι στην περίπτωση σανίδας πυριτικού ασβεστίου, για το ίδιο επίπεδο ισχύος.

Για το άνοιγμα:

- Όσο αυξάνει η ισχύς, αυξάνονται οι θερμοκρασίες στο άνοιγμα.
- Η χρήση γυψοσανίδας ως υλικό τοιχωμάτων ισοδυναμεί με υψηλότερες θερμοκρασίες στο άνοιγμα από την χρήση σανίδας πυριτικού ασβεστίου.
- Όσο αυξάνει η ισχύς, αυξάνονται οι ταχύτητες και οι παροχές μάζας εκροής καυσαερίων και εισροής αέρα στο άνοιγμα.
- Η χρήση διαφορετικών υλικών για τα τοιχώματα δεν επηρεάζει τις ταχύτητες.

Για τα τοιχώματα γενικά ισχύει ότι:

- Όσο αυξάνει η ισχύς, οι θερμοκρασίες της εκτεθειμένης και μη εκτεθειμένης επιφάνειας αυξάνονται.
- Η χρήση γυψοσανίδας ως υλικό τοιχωμάτων έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερες θερμοκρασίες στο εσωτερικό τους από την περίπτωση της σανίδας πυριτικού ασβεστίου σε γενικά πλαίσια.
- Οι θερμορροές τοιχωμάτων αυξάνονται με την αύξηση της ισχύος.
- Δεν φαίνεται να υπάρχουν σαφείς διαφορές ανάμεσα στις θερμορροές για το πλαϊνό, το οπίσθιο τοίχωμα και την οροφή.

Για το πλαϊνό τοίχωμα:

- Οι θερμοκρασίες της μη εκτεθειμένης επιφάνειας είναι υψηλές στο κεντρικό και κάτω μέρος της και μειώνονται προς τα άκρα.
- Οι θερμοκρασίες της εκτεθειμένης επιφάνειας είναι χαμηλές στο κεντρικό και κάτω μέρος της και αυξάνονται όσο η απόσταση αυξάνει.

- Για χαμηλά επίπεδα ισχύος οι διαφορές θερμοκρασίας της εκτεθειμένης από την μη εκτεθειμένη επιφάνεια είναι μικρές. Οι διαφορές γίνονται έντονες για υψηλά επίπεδα ισχύος.
- Η κατανομή θερμοκρασιών αποτυπώνει τη μεταφορά θερμότητας λόγω φυσικής συναγωγής.

Για το οπίσθιο τοίχωμα:

- Οι θερμοκρασίες της εκτεθειμένης επιφάνειας είναι συνολικά υψηλότερες από αυτές της μη εκτεθειμένης.
- Οι υψηλές θερμοκρασίες της εκτεθειμένης επιφάνειας για την περίπτωση της γυψοσανίδας εμφανίζονται στο άνω μέρος του τοιχώματος και προς τα αριστερά.
- Για την περίπτωση πυριτικού ασβεστίου, οι θερμοκρασίες της εκτεθειμένης επιφάνειας κατανέμονται ομοιόμορφα σε όλη την επιφάνεια.
- Οι υψηλές θερμοκρασίες της μη εκτεθειμένης επιφάνειας παρουσιάζονται στο κέντρο του τοιχώματος και προς τα αριστερά.

Για την οροφή:

- Όσο αυξάνει η ισχύς οι θερμοκρασίες της εκτεθειμένης και μη εκτεθειμένης επιφάνειας της οροφής εμφανίζουν υψηλές τιμές προς τα πίσω και αριστερό τμήμα της.
- Σε χαμηλά επίπεδα ισχύος, οι θερμοκρασίες και των δύο επιφανειών παρουσιάζουν ομοιόμορφες κατανομές.
- Η χρήση σανίδας πυριτικού ασβεστίου είχε ως αποτέλεσμα οι θερμοκρασίες εκτεθειμένης επιφάνειας να είναι σημαντικά υψηλότερες προς την μεριά του ανοίγματος από την περίπτωση χρήσης γυψοσανίδας.

Για τις πειραματικές δοκιμές σταθερής ισχύος τα αποτελέσματα των μεγεθών της μέσης θερμοκρασίας καυσαερίων και αέριου περιβάλλοντος στο εσωτερικό του διαμερίσματος, των ταχυτήτων και παροχής μάζας στο άνοιγμα συγκρίθηκαν με θεωρητικές τιμές από σχέσεις υπολογισμού από την βιβλιογραφία.

Η σύγκριση των μέσων πειραματικών και θεωρητικών θερμοκρασιών πραγματοποιήθηκε για το διαμέρισμα ISO 9705 υπό κλίμακα 1:3 και ύστερα με την χρήση μεθόδων ομοιότητας και για το πρωτότυπο διαμέρισμα ISO 9705. Οι θεωρητικές τιμές θερμοκρασίας παρουσίασαν

μία καλή σύγκλιση με τις πειραματικές με μικρές έως και μεσαίες μέσες αποκλίσεις. Επιπλέον, ο υπολογισμός των θερμοκρασιών για το πρωτότυπο δεν παρουσίασε κάποιο ιδιαίτερο πλεονέκτημα έναντι του μοντέλου εκτός από την περίπτωση των Foote et al. (1986).

Για τις ταχύτητες στο άνοιγμα, χρησιμοποιήθηκαν δύο μοντέλα, το μονοζωνικό και το διζωνικό. Οι θεωρητικές τιμές βρέθηκαν να έχουν καλή σύγκλιση στα χαμηλά και μεσαία ύψη του ανοίγματος με τις πειραματικές. Για τα μεγάλα ύψη οι θεωρητικές τιμές συνολικά υποεκτιμούν τις πειραματικές.

Οι τιμές των σχέσεων υπολογισμού των παροχών μάζας καυσαερίων και αέρα ήταν συνολικά μικρότερες από τις μετρούμενες. Οι αποκλίσεις ήταν μεσαίες έως και μεγάλες.

Αξιολογώντας τα πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών προσέγγισης πρότυπης καμπύλης θερμοκρασίας – χρόνου ISO 834 εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η μέση θερμοκρασία καυσαερίων προσεγγίζει την καμπύλη ISO 834 σε ικανοποιητικό βαθμό για τις περιπτώσεις και των δύο διαφορετικών υλικών τοιχωμάτων. Η μέση θερμοκρασία μετά τις διορθώσεις λόγω ακτινοβολίας είναι ελαφρώς μικρότερη της αναμενόμενης.
- Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας φαίνεται να αυξάνεται αρχικά με την πάροδο του χρόνου και στη συνέχεια να σταθεροποιείται.

Για το εσωτερικό του διαμερίσματος:

- Η μέση θερμοκρασία στο διαμέρισμα αυξάνεται αρχικά και σταθεροποιείται από τη χρονική στιγμή 1200 s. Οι μέγιστες θερμοκρασίες παραμένουν στον κατακόρυφο άξονα του καυστήρα και στο άνω μέρος του. Η φωτιά στις δοκιμές φαίνεται να μην έχει την κλίση προς τα πίσω που παρατηρήθηκε στα πειράματα σταθερής ισχύος.
- Για την ίδια χρονική στιγμή οι θερμοκρασίες του πειράματος με υλικό τοιχωμάτων το πυριτικό ασβέστιο παρουσιάζουν συνολικά υψηλότερες τιμές.

Για το άνοιγμα:

- Οι θερμοκρασίες στο άνοιγμα αυξάνουν με την πάροδο του χρόνου.

- Στην περίπτωση της γυψοσανίδας, οι θερμοκρασίες είναι υψηλότερες από το πυριτικό ασβέστιο για την ίδια χρονική στιγμή.
- Οι ταχύτητες παραμένουν σχετικά σταθερές από την χρονική στιγμή 500s και μετά για την περίπτωση της γυψοσανίδας ενώ για τη σανίδα πυριτικού ασβεστίου αυξάνονται συνεχώς. Οι τιμές των ταχυτήτων για το πυριτικό ασβέστιο είναι ελαφρώς χαμηλότερες.

Για τα τοιχώματα γενικά ισχύει ότι:

- Οι θερμοκρασίες των εκτεθειμένων και μη εκτεθειμένων επιφανειών αυξάνονται με τον χρόνο.
- Οι θερμοκρασίες στο εσωτερικό των τοιχωμάτων είναι συνολικά υψηλότερες για την περίπτωση του πυριτικού ασβεστίου. Αυτό πιθανώς να συμβαίνει λόγω της προηγούμενης καταπόνησης και την εμφάνιση ρηγμάτων στα τοιχώματα σε πειράματα σταθερής ισχύος.
- Οι εσωτερικές θερμοκρασίες των τοιχωμάτων στην περιοχή προς την οπίσθια αριστερή γωνία του διαμερίσματος εμφάνιζαν συνεχώς υψηλότερες τιμές από τις υπόλοιπες.
- Οι θερμορροές αυξάνονται ραγδαία στα αρχικά στάδια των δοκιμών. Για την θερμορροή της οροφής παρατηρείται μία σταθερότητα από μία χρονική στιγμή και έπειτα ενώ οι θερμορροές του πλαϊνού και οπίσθιου τοιχώματος αυξάνουν συνεχώς.
- Για την περίπτωση υλικού γυψοσανίδας η θερμορροή του πλαϊνού τοιχώματος είναι σημαντικά υψηλότερη από τα υπόλοιπα τοιχώματα, ενώ για την περίπτωση της σανίδας πυριτικού ασβεστίου όλες οι θερμορροές συγκλίνουν από τη χρονική στιγμή 1300s και έπειτα.

Τέλος, για την συνολική αξιολόγηση πρέπει να σημειωθούν και οι παρακάτω δυσκολίες κατά την πραγματοποίηση των πειραματικών δοκιμών:

- Τα χρησιμοποιούμενα υλικά των τοιχωμάτων (γυψοσανίδα, σανίδα πυριτικού ασβεστίου) δεν είχαν την απαραίτητη μηχανική αντοχή για την πραγματοποίηση πολλαπλών πειραματικών δοκιμών. Έτσι, μετά από περίπου τρία πειράματα το διαμέρισμα έπρεπε να ανακατασκευαστεί. Επιπλέον, τα τοιχώματα φαίνεται να μην μπορούσαν να ανταπεξέλθουν στο επίπεδο ισχύος 136kW, με αποτέλεσμα να μην καλύπτουν την μέγιστη προτεινόμενη τιμή

ρυθμού έκλυσης θερμότητας από τον Ευρωκώδικα 1 (EN1992:1-2, 2002).

- Στις πειραματικές δοκιμές σταθερής ισχύος η φωτιά είχε μία κλίση προς την πίσω πλευρά του διαμερίσματος. Για τα πειράματα προσέγγισης της καμπύλης ISO 834 το διαμέρισμα τοποθετήθηκε στο χώρο με τέτοιο τρόπο ώστε η φωτιά να επηρεάζεται όσο τον δυνατόν λιγότερο από ξαφνικές ριπές αέρα.
- Δεν πραγματοποιήθηκαν αρκετά πειράματα επαναληψιμότητας λόγω έλλειψης χρόνου. Η πραγματοποίηση επιπλέον πειραμάτων θα είχε αυξήσει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Abu A., Block F., Butterworth N., Burgess I., "Structural fire engineering assessments of the FRACOF and Mokrsko fire tests, an engineering prediction", Proceedings of International Conference, 19-20, (2009)

Agilent 34970A/34972A, Data Acquisition / Switch Unit User's Guide, Agilent Technologies Inc., 2012.

Anderson D., Tannehill J., Pletcher R. "Computational fluid mechanics and heat transfer", New York, McGraw-Hill, 1994.

Barnett C.R. (2002) "BFD curve: a new empirical model for fire compartment temperatures", Fire Safety Journal, 437-463.

Beyler C., Deal S., (1990) "Correlating Preflashover Room Fire Temperatures", Journal of Fire Protection Engineering 2, 33-88.

Blevins L.G., Pitts W.M. (1999) "Modelling of bare and aspirated thermocouples in compartment fires gradients", Fire Safety Journal 33, 239-59.

Bradley D., Matthews K.J. (1968) "Measurement of high gas temperatures with fine wire thermocouples", Journal Mechanical Engineering Science 10, 299-305.

Broheza S., Delvosalle C., Marlair G. (2004) "A two-thermocouples probe for radiation corrections of measured temperatures in compartment fires", Fire Safety Journal 39, 399-411.

Bronkhorst, General instructions digital Mass Flow / Pressure instruments laboratory style / IN-FLOW, 2016.

Bryant R & Mulholland, George. (2008) "A guide to characterizing heat release rate measurement uncertainty for full-scale fire tests", Fire and Materials 32, 121-139.

Bryant R. (2009) "A comparison of gas velocity measurements in a full-scale enclosure fire", Fire Safety Journal 44, 793-800.

Bryant R. (2009) "The application of stereoscopic PIV to measure the flow of air into an enclosure containing a fire", Experiments in Fluids 47, 295-308.

Bryant R.A., Bryant R.A. (2005) "Particle Image Velocimetry Measurements of Buoyancy Inducted Flow Through a Doorway", US

Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology.

Bryner N., Johnsson E., Pitts W. (1994) "Carbon Monoxide Production in Compartment Fires: Reduced-Scale Enclosure Test Facility (NISTIR 5568)", NIST Interagency/Internal Report (NISTIR), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.

Bundy M.F., Hamins A.P., Johnsson E.L., Kim S.C., Ko G., Lenhart D.B. (2007) "Measurements of heat and combustion products in reduced-scale ventilation-limited compartment fires". (No. Technical Note (NIST TN)-1483).

Chen A., Yang S., Dong X. (2011) "Studies of the combined effects of some important factors on the likelihood of flashover", Fire and Materials 35.

Chen A., Zhou L., Liu B., Chen W. (2011) "Theoretical analysis and experimental study on critical conditions of backdraft", Journal of Loss Prevention in The Process Industries 24, 632-637.

Chow W. (2013) "Air pumping action of a plume in a room fire", Build. Simul. 6, 95-102.

Corner, I. R. (1993) "International Standard-Fire tests-Full-scale room test for surface products; ISO 9705: 1993", International Organisation for Standardisation, Geneva.

Delichatsios M., Lee Y.P., Tofiło P. (2009) "A new correlation for gas temperature inside a burning enclosure" Fire Safety Journal 44, 1003-1009.

Dembsey N.A., Pagni P.J., Williamson R.B. (1995) "Compartment fire experiments: Comparison with models", Fire Safety Journal 25, 187-227.

Dieck R. (1997) "Measurement uncertainty models", ISA transactions 36, 29-35.

Eurocode 1, 1991-1-2:2002. Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire. EN 1991-1-2:2002, European Committee for Standardization, Brussels, CEN, 2002.

Experimental Study of the Effects of Fuel Type, Fuel Distribution, and Vent Size on Full-Scale Underventilated Compartment Fires in an ISO 9705 Room (NIST TN 1603), 2008, Andrew J. Lock, Matthew F.

Bundy, Erik L. Johnsson, Anthony P. Hamins, Gwon Ko, Cheolhong Hwang, Stephen P. Fuss, Richard H. Harris Jr.

Feasey, Roger & Buchanan, Andrew. (2002). "Post-flashover fires for structural design", *Fire Safety Journal* 37, 83-105.

Foote K.L., Pagni P.J., Alvares N.J., "Temperature Correlations for Forced-Ventilated Compartment Fires," in *Proceedings of the First International Symposium, International Association for Fire Safety Science*, Hemisphere Publishing, Newport, Australia, pp. 139-148, 1986.

Fourneau C., Delvosalle C., Breulet H., Brohez S. (2015) "Characterization of highly under-ventilated fires using the cone calorimeter", *Fire and Materials* 40.

"Francis J, Yau T.M. (2004) "On radiant network models of thermocouple

error in pre and post flashover compartment fires", *Fire Technology* 40, 277-294."

"Grosshandler W. "RadCal: a narrow band model for radiation calculations in a combustion environment", NIST Technical Note (TN 1402), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1993"

Hayasaka H., Kudo Y., Kojima H., Hashigami T., Ito J., Ueda T. (2008) "Backdraft Experiments in a Small Compartment", In: Saito K. (eds) *Progress in Scale Modeling*, Springer, Dordrecht.

Himoto K., Tsuchihashi T., Tanaka Y., Tanaka T. (2009) Modeling thermal behaviors of window flame ejected from a fire compartment, *Fire Safety Journal* 44, 230-240

Hopkin D., Lennon T., El-Rimawi J., Silberschmidt V. (2011) "Full-scale natural fire tests on gypsum lined structural insulated panel (SIP) and engineered floor joist assemblies" *Fire Safety Journal*, 46, 528-542.

https://www.fireservice.gr/el_GR/synola-dedomenon (31/1/2022)

Huggett C. (1980) "Estimation of the Rate of Heat Release by Means of Oxygen Consumption", *Fire and Materials* 12, 61-65.

Hwang C.H., Lock A., & Bundy, Matthew & Johnsson, Erik & Ko, Gwon. (2011). Effects of Fuel Location and Distribution on Full-Scale Underventilated Compartment Fires. *Journal of Fire Sciences - J FIRE SCI.* 29. 21-52.

Hwang C.H., Lock A., Bundy M., Johnsson E., Ko G. (2010) "Studies on Fire Characteristics in Over and Underventilated Full-scale Compartments", *Journal of Fire Sciences* 28, 459-486.

"ISO 834-10. Fire resistance tests - Elements of building construction - Part 10: Specific requirements to determine the contribution of applied fire protection materials to structural steel elements. International Standard ISO 834, Geneva, 2014.

"

Janssens M. (1991) "Measuring Rate of Heat Release by Oxygen Consumption", *Fire Technology* 27, 234-249.

Janssens M. (2016) "27: Calorimetry", In M. Hurley (ed), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 905-951.

"Ji J., Fu Y., Li K., Sun J., Fan C., Shi W.,

"Experimental study on behavior of sidewall fires at varying height in a corridor-like structure", *Proceedings of the Combustion Institute* 35, 2639-2646, 2015."

Johansson, N. and van Hees, P. (2014) "A correlation for predicting smoke layer temperature in a room adjacent to a room involved in a pre-flashover fire", *Fire Materials* 38, 182-193.

Johnsson E., Bundy M., Hamins A. (2007) "Reduced-Scale Ventilation-Limited Enclosure Fires: Heat and Combustion Product Measurements", US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology.

"Jolly S., Saito K. (1992)

"Scale modeling of fires with emphasis on room flashover phenomenon", *Fire Safety Journal* 18, 139-182."

"Jones W.P., Whitelaw J.H. (1982) "Calculation methods for reacting turbulent

flow: a review", *Combustion and Flame* 48, 1-26."

K.D. Steckler, J.G. Quintiere, W.J. Rinkinen, Flow induced by fire in a compartment, Symposium (International) on Combustion, Volume 19, Issue 1, 1982, Pages 913-920.

Kaldvee B., Wahlqvist J., Jonsson M., Brackmann C., Andersson B., Van Hees P., Bood J., Aldén M. (2013) "Room-Fire Characterization Using Highly Range-Resolved Picosecond Lidar Diagnostics and CFD Simulations", Combustion Science and Technology 185.

Kimo CP210, Temperature and differential pressure transmitter, technical data sheet.

Kimo Debimo, Air flow measuring blades, Technical Data Sheet.

Knauf Gips KG, Knauf Fireboard: Special gypsum board A1 for fire protection, 2020

Ko G., Hamins A., Bundy M., Johnsson E., Kim S., Lenhert D. (2009) "Mixture fraction analysis of combustion products in the upper layer of reduced-scale compartment fires", Combustion and Flame 156, 467-476.

"Kumar S., Welch S., Miles S.D., Cajot L.G., Haller M., Ojanguren M. (2005) "Natural fire safety concept—the development and validation of

a CFD-based engineering methodology for evaluating thermal action on steel and composite structures. Luxembourg", Office for Official Publications of the European Communities."

Lai C.M., Tsai M.J., Lin T.H. (2010) "Experimental Investigations of Fire Spread from Movable to Fixed Fire Loads in Office Fires", Journal of Fire Sciences 28, 539-559.

Li Y., Hertzberg T. (2015) "Scaling of internal wall temperatures in enclosure fires", Journal of Fire Sciences 33.

Loo A., Coppalle A., Yon J., Aîné P. (2016) "Time-dependent smoke yield and mass loss of pool fires in a reduced-scale mechanically ventilated compartment", Fire Safety Journal 81, 32-43.

"Luo M. (1998) "Effects of radiation on temperature measurement in a fire environment", Journal of Fire Science 15, 443-61."

Ma Z., Mäkeläinen P. (2000) "Parametric temperature-time curves of medium compartment fires for structural design", *Fire Safety Journal* 34, 361-375.

Ma Z., Mäkeläinen P. (2000) "Parametric temperature-time curves of medium compartment fires for structural design", *Fire Safety Journal* 34, 361-375.

Magnusson S.E., Thelandersson S. (1970) "Temperature - Time Curves of Complete Process of Fire Development", *Bulletin of Division of Structural Mechanics and Concrete Construction* 16, Lund Institute of Technology.

Majdalani A.H., Cadena J.E., Cowlard A., Munoz F., Torero J.L. (2016) "Experimental characterisation of two fully-developed enclosure fire regimes", *Fire Safety Journal* 79, 10-19.

Makhviladze G., Shamshin A., Yakush S., Zykov A. (2006) "Experimental and numerical study of transient compartment fires", *Combustion Explosion and Shock Waves* 42, 723-730.

Manzello S.L., Gann R.G., Kukuck S.R., Prasad K., Jones W.W. (2005) "Real fire performance of partition assemblies" *Fire Materials* 29, 351-366.

Matsuyama K., Fujita T., Kaneko H., Ohmiya Y., Tanaka T., Wakamatsu T. (1998) "A Simple Predictive Method for Room Fire Behavior", *Fire Science and Technology* 18, 43-69.

McAdams W.H. "Heat transmission", New York, McGraw-Hill, 1954.

McCaffrey B.J., Quintiere J.G., and Harkleroad M.F. (1981) "Estimating Room Fire Temperatures and the Likelihood of Flashover Using Fire Test Data Correlations", *Fire Technology* 17, 98-119.

McCaffrey B.J., Rockett J. (1977) "Static pressure measurements of enclosure fires", *Journal of research of the National Bureau of Standards* 82, 107.

McCaffrey B.J., Heskestad G. (1976) "A robust Bidirectional Low-Velocity Probe for Flame and Fire application", *Combustion and Flame* 26, 125-127.

Melcher T., Zinke R., Trott M., Krause U. (2016) "Experimental investigations on the repeatability of real scale fire tests", *Fire Safety Journal* 82, 101-114.

Moinuddin K., Al-Menhali J., Prasannan K., Thomas I. (2011) "Rise in structural steel temperatures during ISO 9705 room fires", *Lancet* 46, 480-496.

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.

Omega, PX274, PX275, PX277, PX278 Series Low Pressure Sensors, Technical Data Sheet.

Park S.H., Manzello S.L., Bundy M.F., Mizukami T. (2011) "Experimental study on the performance of a load-bearing steel stud gypsum board wall assembly exposed to a real fire", *Fire Safety Journal* 46, 497-505.

Parker W. "An Investigation of the Fire Environment in the ASTM E84 Tunnel Test", NBS Technical Note 945, National Bureau of Standards, Gaithersburg, MD, 1977.

Parker W. "Calculations of the Heat Release Rate by Oxygen Consumption for Various Applications", NBSIR 81-2427, National Bureau of Standards, Gaithersburg, MD, 1982.

Parkes A., "The impact of size and location of pool fires on compartment fire behaviour", (2009).

Poulsen A., Bwalya A., Jomaas G. (2013) "Evaluation of the Onset of Flashover in Room Fire Experiments", *Fire Technology* 49, 891-905.

Poulsen A., Jomaas G. (2012) "Experimental Study on the Burning Behavior of Pool Fires in Rooms with Different Wall Linings", *Fire Technology* 48, 419-439.

Prétre, H. & Such, J.M.. (2005). Effect of ventilation procedures on the behaviour of a fire compartment scenario. *Nuclear Engineering and Design*. 235. 2155-2169.

Promat, Promatex - H, Technical Data Sheet, 2017.

Quintiere J.G., *Fundamentals of Fire Phenomena*, John Wiley and Sons Ltd, (2006).

Quintiere J.G., McCaffrey B.J., Den K., "Experimental and theoretical analysis of quasi-steady small-scale enclosure fires", Symposium (International) on Combustion 17, 1125-1137, 1979.

Quintiere J.G., Rinkinen W.J., Jones W.W. (1981) "The Effect of Room Openings on Fire Plume Entrainment", Combustion Science and Technology 26, 193-201.

Rockett J.A. (1976) "Fire Induced Gas Flow in an Enclosure", Combustion Science and Technology 12, 165-175.

Rodney A. Bryant, Evaluating practical measurements of fire-induced vent flows with stereoscopic PIV, Proceedings of the Combustion Institute, Volume 33, Issue 2 (2011), Pages 2481-2487.

Schleich J.B., (2000) "Natural fire safety concept : Full-scale tests, implementation in the Eurocodes and development of a user-friendly design tool", Technical report no. 6, CEC agreement 7210-PA/PB/PC/PD/PE/PF PR-060, Esch/Alzette.

Sjöström, J., Wickström, U., & Byström, A. (2016). Validation data for room fire models: Experimental background.

Suard S., Koched A., Prétrel H., Audouin L. (2015) "Numerical simulations of fire-induced doorway flows in a small scale enclosure", International Journal of Heat and Mass Transfer, 578-590.

Sultan M.A. (2006) "Incident heat flux measurements in floor and wall furnaces of different sizes", Fire Materials 30, 383-396.

Tewarson, A., "Fully Developed Enclosure Fires of Wood Cribs," Twentieth Symposium (International) on Combustion, 1555-1566. The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, 1984.

Thomas P.H. (1992) "Two-Dimensional Smoke Flows from Fires in Compartments: Some Engineering Relationships", Fire Safety Journal 18, 125-137.

Thornton W. (1917) "The Relation of Oxygen to the Heat of Combustion of Organic Compounds", Philosophical Magazine and Journal of Science 33.

Tofilo P., Delichatsios M.A., Silcock G. (2005) "Effect Of Fuel Sootiness On The Heat Fluxes To The Walls In Enclosure Fires", Fire Safety Science 8, 987-998.

Tsai K.C., Chung W.T. "Clarifying the mechanism of flashover from the view of unburned fuel volatiles and secondary fuels" Proceedings of the Combustion Institute 33, 2649-2656, 2011.

Utiskul Y., Quintiere J., Rangwala A., Ringwelski B., Wakatsuki K., Naruse T. (2005) "Compartment fire phenomena under limited ventilation" Fire Safety Journal 40, 367-390.

Utiskul, Y. & Quintiere, James. (2007). Theoretical and experimental study on fully-developed compartment fire. 5. 2722-2735.

Wald F., Chlouba J., Uhlř A., Kallerová P., Štjberová, M (2009) "Temperatures during fire tests on structure and its prediction according to Eurocodes", Fire Safety Journal 44, 135-146.

Walton W.D., Thomas P.H., Ohmiya Y. (2016). "30: Estimating Temperatures in Compartment Fires", In M. Hurley (ed). SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 996-1023.

Wang H. (2009) "Numerical study of under-ventilated fire in medium-scale enclosure", Building and Environment 44, 1215-1227.

Wang M., Perricone J., Chang P., Quintiere J.G. (2008) "Scale Modeling of Compartment Fires for Structural Fire Testing", Journal of Fire Protection Engineering 18, 223-240.

Welch S., Rubini P. "Three-dimensional simulation of a fire resistance furnace" In: Fire Safety Science—Proceedings of the Fifth International Symposium, 1009-1020, IAFSS, 1999.

Wen J.X., Huang L.Y., Roberts J. (2001) "The effect of microscopic and global radiative heat exchange on the predictions of compartment fires", Fire Safety Journal 36, 205-23.

Weng W.G., Fan W.C. (2003) "Critical condition of backdraft in compartment fires: a reduced-scale experimental study", Journal of Loss Prevention in the Process Industries 16, 19-26."

www.coltonfire.com (31/1/2022)

Zehfuss J., Hosser D., (2007) "A parametric natural fire model for the structural fire design of multi-storey buildings", Fire Safety Journal 42, 115-126.

Zhang W., Hamer A., Klassen M., Carpenter D., Roby R. (2002) "Turbulent statistics in a fire room model by large eddy simulation", Fire Safety Journal 37, 721-752.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σιμόπουλος Σ.Ε, Μετρήσεις τεχνικών μεγεθών Β' Έκδοση, Εκδόσεις Πολυτεχνείου, (1989).

Μορφοποίηση: Γραμματοσειρά: Verdana, 10 στ.

Διέγραψε: 8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Παρακάτω παρουσιάζεται ο κώδικας του προγράμματος MATLAB [MATLABs 7.4, TheMathworks, Inc., Natick, MA] διόρθωσης των μετρούμενων θερμοκρασιών των θερμοστοιχείων σύμφωνα με την μεθοδολογία της Παραγράφου 4.9:

```
% Diavazw dedomena apo ta arxeia
XZ = readmatrix('locationdata.txt');
TG = readmatrix('temp.txt');
%pinakas gia na xrhsimopoiw sthn epanalhpsn san T thermocouples
TC_col1 = readmatrix('temp.txt');

N=21;
% Ftiaxnw TC(N,N) me ka8e sthlh na antistoixei se kathe origin
thermocouple
TC=zeros(N);
for j=1:N
TC(:,j) = readmatrix('temp.txt');
End

%Υπολογισw apostaseis
L=zeros(N);
for j=1:N
    for i=1:N
        L(i,j)=sqrt((XZ(j,1)-XZ(i,1))^2+(XZ(j,2)-XZ(i,2))^2);
    end
end

% Sortarw apostaseis
```

```
[L_sorted,l_order]=sort(L);

% Sortarw ton Pinaka TC me vash ton L_sorted pleon etsi wste na
gnwrizw se
% poio Li antistoixei h Ttci
T_sorted=TC(l_order);

DL=zeros(N);
W=zeros(N);
W_PARANOM=zeros(1,N);

% Statheres k=extinction factor, h=const pros to paron,
e=emmisivity
% factor, s= boltzman, r=relaxation factor (an xrhsimopoihsu)
k=1;
h=200;
e=0.9;
s=5.6704*10^(-8);
r=0.2;

% Ypologizw DL kai Weights gia ka8e sthli (origin thermocouple)
for j=1:N
    ATH=0;
    for i=1:N
        if i==1
            DL(i,j)=L_sorted(2,j);
        elseif (i >= 2) && (i <= (N-1))
            DL(i,j)=abs((L_sorted(i+1,j)-L_sorted(i-1,j)))/2;
        elseif i==N
```

```
DL(i,j)=abs(L_sorted(i,j)-L_sorted(i-1,j));
end
ATH = ATH +(exp(-L_sorted(i,j)*k)*(1-exp(-DL(i,j)*k)));
end
W_PARANOM(j)=ATH;
end

for j=1:N
    for i=1:N
        W(i,j)=(exp(-L_sorted(i,j)*k)*(1-exp(-
DL(i,j)*k)))/W_PARANOM(j);
    end
end

% EpanalhpsH dior8wshs Tg
idx=0;
A=zeros(N,1);
dev=10;
while dev > 1
    A=TG;
    for j=1:N
        WTC4=0;
        for i=1:N
            WTC4=WTC4+(W(i,j)*T_sorted(i,j)^4);
        end
        Ts=nthroot(WTC4,4);
    end
    % Dhmiourgw TG pinaka mias diastashs ton opoio antika8istw
    ston
```

```
% T_sorted ana sth lh. Epeita sortarw pali ton T_sorted sumfwna
me ton
% L_sorted prin apo ka8e "sarwsh"
TG(j)=((e*s/h)*(TC_col1(j)^4-
Ts^4)+TC_col1(j))*r+TG(j)*(1-r);
%to TG(j) sto de3i melos einai to TG(j) sthn prohgomeneh
%epanalhpsh
T_sorted(:,j)=TG;
T_sorted=T_sorted(l_order);
end
dev=abs(std(TG)-std(A));
idx=idx+1;
if idx >= 100
    break
end
end

writematrix(TG,'tempgas.txt')
```