

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΤΕΡΟΓΕΝΩΝ ΜΕΙΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΥΣΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Πειραματική Διερεύνηση Χαρακτηριστικών Φωτιάς σε
Διαμέρισμα με Δομικά Στοιχεία Σταυρωτής Επικολητής
Ξυλείας (CLT)**

ΠΑΝΤΟΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΚΟΛΑΪΤΗΣ ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ

ΑΘΗΝΑ, ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2024

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες προς τον Καθηγητή Διονύσιο Κολαΐτη για την πολύτιμη καθοδήγηση και υποστήριξη του κατά τη διάρκεια της συνεργασίας μας προς τη διεκπεραίωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ταυτόχρονα , θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον υποψήφιο διδάκτορα Ανδριανό Κόκλα για την αδιάκοπη βοήθειά του και τις εξαιρετικές συμβουλές και καθοδήγηση που συνέβαλαν ουσιαστικά στην διεκπεραίωση της πειραματικής μελέτης. Ιδιαίτερες ευχαριστίες πρέπει να εκφραστούν και στον υπεύθυνο κατασκευών του εργαστηρίου κ. Μαυράκη Χαράλαμπο για την πολύτιμη βοήθεια του στην κατασκευή και συναρμολόγηση της πειραματικής εγκατάστασης και την υποστήριξη του στην ολοκλήρωση των πειραματικών δοκιμών. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλο το προσωπικό του Εργαστηρίου Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης για την υποστήριξη που προσέφεραν.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	7
ABSTRACT	8
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ	9
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
1.1 Φωτιά σε Διαμέρισμα	11
1.1.1 Γενικά χαρακτηριστικά.....	11
1.1.2 Παράμετροι επίδρασης.....	13
1.2 Δομικά υλικά σε περιβάλλον φωτιάς.....	13
1.2.1 Συμπεριφορά ξύλου σε συνθήκες φωτιάς.....	13
1.2.2 Φυσικά και χημικά φαινόμενα κατά την καύση του ξύλου	14
1.3 Σκοπός της εργασίας	16
2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ	17
2.1 Φυσικά φαινόμενα	17
2.1.1 Αναπτυσσόμενο ροϊκό πεδίο	17
2.1.2 Αναπτυσσόμενο θερμικό πεδίο	20
2.2 Πρότυπες καμπύλες φωτιάς	22
2.2.1 Καμπύλη ISO 834.....	22
2.2.2 Παραμετρικές καμπύλες.....	23
2.3 Νόμοι ομοιότητας.....	27
2.3.1 Ομοιότητα διαστάσεων	28
2.3.2 Ομοιότητα χρόνου	28
2.3.3 Ομοιότητα θερμικής ισχύος	29
3. ΣΤΑΥΡΩΤΗ ΕΠΙΚΟΛΛΗΤΗ ΞΥΛΕΙΑ	31
3.1 Χαρακτηριστικά CLT	31
3.2 Χρήση CLT στις Κατασκευές.....	35
3.3 Συμπεριφορά CLT κατά την Καύση.....	39
3.3.1 Αποκόλληση και Δεύτερη Καθολική Ανάφλεξη	39
4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	42
4.1 Πειραματικές μελέτες μικρής κλίμακας	42
4.2 Πειραματικές μελέτες πλήρους κλίμακας	48
4.3 Σύνθετες πειραματικές μελέτες πλήρους κλίμακας	55
5. ΜΕΤΡΗΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ	58
5.1 Βασικά χαρακτηριστικά μετρητικής διάταξης και πειραματικής εγκατάστασης .	58
5.1.1 Διαστάσεις πυροδιαμερίσματος.....	58
5.1.2 Δομικά υλικά του πυροδιαμερίσματος.....	58
5.2 Μετρητικές συσκευές.....	60
5.2.1 Θερμοστοιχεία	60

5.2.2 Δικατευθυντικοί μετρητές ταχύτητας.....	61
5.2.3 Θερμορροόμετρα.....	62
5.2.4 Σωλήνες Pitot – Static.....	63
5.2.5 Αναλυτής καυσαερίων.....	63
5.2.6 Παροχόμετρα καυσαερίων.....	64
5.3 Διάταξη μετρητικών οργάνων στο διαμέρισμα.....	65
5.3.1 Θερμοστοιχεία.....	66
5.3.2 Θερμοροόμετρα.....	71
5.3.3 Δικατευθυντικοί μετρητές ταχύτητας.....	71
5.3.4 Σωλήνες Pitot-Static.....	72
5.4 Σύστημα παροχής καυσίμου.....	73
5.4.1 Παροχόμετρα προπάνιου-Σύστημα παροχής.....	73
5.4.2 Καυστήρας.....	74
5.5 Σύστημα συλλογής δεδομένων.....	75
5.5.1 Συσκευές συλλογής δεδομένων.....	75
5.5.2 Λογισμικό LabVIEW.....	76
5.6 Σύστημα δειγματοληψίας-θερμιδομετρία.....	78
5.6.1 Θερμιδομετρία κατανάλωσης οξυγόνου.....	78
5.6.2 Εφαρμογή της Μεθόδου Κατανάλωσης Οξυγόνου.....	80
5.7 Εκτίμηση πειραματικών σφαλμάτων.....	84
5.7.1 Συστηματικά Σφάλματα των μετρητικών οργάνων.....	84
6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ.....	89
6.1 Παραμετρικές μελέτες.....	89
6.1.1 Δομικά υλικά.....	89
6.1.2 Πρότυπες καμπύλες φωτιάς.....	89
6.1.3 Επαναληψιμότητα.....	91
6.1.4 Επιβεβαίωση καμπυλών φωτιάς.....	95
6.2 Αναπτυσσόμενο θερμικό πεδίο.....	96
6.2.1 Αέριο περιβάλλον.....	96
6.2.2 Άνοιγμα πυροδιαμερίσματος.....	114
6.2.3 Τοιχώματα.....	116
6.2.4 Οροφή.....	127
6.3 Αναπτυσσόμενο ροϊκό πεδίο.....	138
6.3.1 Άνοιγμα.....	138
6.4 Επίδραση CLT.....	147
6.4.1 Ρυθμός Έκλυσης Θερμότητας (Heat Release Rate HRR).....	147
6.4.2 Ρυθμός εξανθράκωσης του CLT.....	152
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	154
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	158

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η επίδραση προτύπων καμπυλών φωτιάς και του υλικού της οροφής στα θερμικά και ροϊκά χαρακτηριστικά της φωτιάς σε πυροδιαμέρισμα. Κατά την διεξαγωγή της πειραματικής μελέτης πραγματοποιήθηκαν συνολικά 8 πειράματα με χρήση πειραματικής διάταξης πυροδιαμερίσματος υπό κλίμακα 1/3 του προτύπου ISO 9705, 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 (106 θερμοστοιχεία, 4 δικατευθυντικοί μετρητές ταχύτητας, 2 σωλήνες Pitot - Static, 3 μετρητές ροής θερμότητας, 2 ψηφιακά παροχόμετρα, 1 αναλυτής καυσαερίων και 1 μετρητής παροχής καυσαερίων). Τα μετρητικά όργανα συνδέθηκαν με κατάλληλο τρόπο με Η/Υ του εργαστηρίου με σκοπό την καταγραφή, αποθήκευση και επεξεργασία των δεδομένων για την μελέτη τους και την εξαγωγή αποτελεσμάτων και πληροφοριών. Μελετήθηκε η χρήση δύο διαφορετικών δομικών υλικών για την οροφή, μια άκαυστη κεραμική πλάκα και μια οροφή από πάνελ σταυρωτής επικολλητής ξυλείας. Οι δύο διαφορετικές οροφές υποβλήθηκαν σε δύο καμπύλες φωτιάς, την καμπύλη θερμοκρασίας χρόνου, ISO-834, και μια πειραματική καμπύλη παροχής καυσίμου-χρόνου που προσομοιάζει την καμπύλη ISO-834 για πυροδιαμέρισμα με τις συγκεκριμένες διαστάσεις, κατασκευασμένο με άκαυστα υλικά. Έπειτα πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων.

ABSTRACT

In this thesis, the influence of fire curves and the ceiling material on the thermal and flow characteristics of fire in a fire compartment was studied. In conducting the experimental study, a total of 8 experiments were carried out using an experimental fire compartment setup under 1/3 scale of the ISO 9705 standard, which was built in the Laboratory of Heterogeneous Mixtures and Combustion Systems. Measuring instruments were used, suitably placed in different positions inside the fire compartment, in the opening and inside the walls (106 thermocouples, 4 bidirectional velocity meters, 2 Pitot - Static tubes, 3 heat flow meters, 2 digital flow meters, 1 exhaust gas analyzer and 1 exhaust gas flow meter). The measuring instruments were connected to the laboratory's computer in order to record, store and process the data for the purpose of studying them and extracting results and information. The use of two different building materials for the ceiling was studied, a non-combustible ceramic slab and a cross-laminated timber panel roof. The two different ceiling materials were subjected to two fire curves, the temperature- time curve, ISO-834, and an experimental fuel flow rate-time curve simulating the ISO-834 curve for a fire compartment of the specified dimensions constructed with non-combustible materials. A comparison of the obtained results was then made.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

Σύμβολο	Μέγεθος	Μονάδες
A	Εμβαδόν Διατομής	m ²
A _{base}	Εμβαδόν δαπέδου	m ²
A _{dct}	Εμβαδόν επιφάνειας σταυρωτής επικολλητής ξυλείας	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 _p	Ειδική θερμοχωρητικότητα	J/kg*K
E	Ευαισθησία μετρητή ροής θερμότητας	m ² *V/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
H _N	Ύψος ουδέτερου επιπέδου στο άνοιγμα	m
H _o	Ύψος ανοίγματος	m
H _u	Κατώτερη θερμογόνο δύναμη	kJ/kg
k _P	Σταθερά του αισθητήρα μέτρησης πίεσης	m
l	Κλίμακα μήκους	m
M _a	Μοριακή μάζα αέρα	kg/kmol
M _{O2}	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
P	Πίεση	Pa
P _s	Τάση ατμών	Pa
\dot{Q}	Θερμική ισχύς	W
\dot{Q}_{max}	Μέγιστη θερμική ισχύς	W
\dot{q}''	Θερμοροή	W/m ²
R	Παγκόσμια σταθερά αερίων	J/mol
RFR _f	Μέγιστη ανηγμένη θερμοροή στο δάπεδο	W/m ²
RH	Σχετική υγρασία του αέρα	-
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
$t_{70\%}$	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	Θερμοκρασία	K
T_a	Θερμοκρασία αέρα περιβάλλοντος	K
T_b	Θερμοκρασία βρασμού	K
T_{TC}	Μετρούμενη θερμοκρασία θερμοστοιχείου	K
u	Ταχύτητα στο άνοιγμα	m/s
V	Παροχή καυσίμου	L/min
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	-
$X_{O_2}^{Aa}$	Μετρούμενο γραμμομοριακό κλάσμα οξυγόνου στον αέρα καύσης	-
$X_{O_2}^{Ae}$	Μετρούμενο γραμμομοριακό κλάσμα οξυγόνου στα καυσαέρια	-
$X_{CO_2}^{Aa}$	Μετρούμενο γραμμομοριακό κλάσμα διοξειδίου του άνθρακα στον αέρα καύσης	-
$X_{CO_2}^{Ae}$	Μετρούμενο γραμμομοριακό κλάσμα διοξειδίου του άνθρακα στα καυσαέρια	-
X_{CO}^{Ae}	Μετρούμενο γραμμομοριακό κλάσμα μονοξειδίου του άνθρακα στα καυσαέρια	-
y	Απόσταση κατά τον άξονα πλάτους του πυροδιαμερίσματος	mm
$Y_{O_2}^a$	Κλάσμα μάζας του οξυγόνου στον αέρα καύσης	-
$Y_{O_2}^e$	Κλάσμα μάζας του οξυγόνου στα προϊόντα της καύσης	-
z	Απόσταση κατά τον άξονα ύψους του πυροδιαμερίσματος	mm
a	Συντελεστής ογκομετρικής μεταβολής	-
ΔP	Διαφορά πίεσης	Pa
ρ	Πυκνότητα	kg/m ³
φ	Παράγοντας Κατανάλωσης Οξυγόνου	-

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Φωτιά σε Διαμέρισμα

1.1.1 Γενικά χαρακτηριστικά

Φωτιές σε διαμέρισμα (compartment fires) αντιστοιχούν σε ανεξέλεγκτες φωτιές στη μακρο-κλίμακα, σε χώρους πεπερασμένων διαστάσεων. Τα διαμερίσματα αυτά μπορεί να είναι ενός χώρου, πολλών χωρών ή ακόμη και πολυώροφα κτίρια. Οι χώροι αυτοί ονομάζονται και πυροδιαμερίσματα, ενώ η διάταξη τους επηρεάζει την παροχή του αέρα και το θερμικό περιβάλλον της φωτιάς. Η επιρροή της διάταξης του πυροδιαμερίσματος παρουσιάζεται στην σύγκριση των παρακάτω εικόνων, μιας φωτιάς σε μονοκατοικία (Εικόνα 1.1) και πολυώροφου κτιρίου (Εικόνα 1.2). Η φύση του πυροδιαμερίσματος σαφώς επηρεάζει και την αντιμετώπιση της κάθε πυρκαγιάς.



Εικόνα 1.1 Φωτιά σε μονοκατοικία, Campbell River Mirror News(2018)



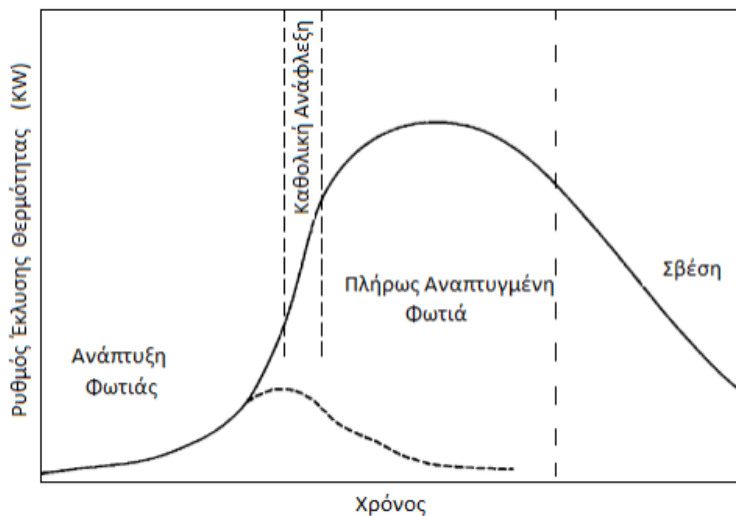
Εικόνα 1.2 Φωτιά σε πολυκατοικία, Waltham Fire Dept. (2017)

Οι κυρίως τομείς που επηρεάζονται από την διάταξη είναι:

- Ο ρυθμός εξαπλώσης
- Ο μέγιστος ρυθμός καύσης
- Η διάρκεια της φωτιάς

Η μελέτη της φωτιάς σε διαμέρισμα συμπεριλαμβάνει τη μελέτη τεσσάρων βασικών φαινομένων που επικρατούν. Τη μελέτη των χημικών αντιδράσεων, της μεταφοράς θερμότητας, της δομικής μηχανικής και της μηχανικής των ρευστών.

Για την μελέτη της φωτιάς σε ένα διαμέρισμα, αυτή χωρίζεται σε 5 βασικά στάδια τα οποία καθορίζονται από την καθολική ανάφλεξη. Η έναυση(ignition), το στάδιο πριν την καθολική ανάφλεξη (developing fire), στο οποίο η φωτιά αναπτύσσεται, η ίδια η καθολική ανάφλεξη(flashover), το στάδιο μετά την καθολική ανάφλεξη (fully developed fire), και η σβέση(cooling phase) όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 1.3.



Εικόνα 1.3 Στάδια ανάπτυξης φλόγας

Η φωτιά στην αρχή αναπτύσσεται σταδιακά, ενώ στον χώρο επικρατούν χαμηλές σχετικά θερμοκρασίες και δεν αποτελούν απειλή για τα δομικά στοιχεία, ενώ κύριο μέλημα αποτελεί η διάσωση των ανθρώπινων ζώων και η εκκένωση του κτιρίου (Harmathy, Mehaffey, 1983).

Αν δεν συμβεί κάποια δράση ως προς την καταστολή της, θα αυξηθεί τελικά σε ένα μέγιστο μέγεθος που ελέγχεται από την ποσότητα του καυσίμου που υπάρχει (ελεγχόμενο καύσιμο) ή την ποσότητα του αέρα που διατίθεται μέσω των ανοιγμάτων αερισμού (περιορισμένος αερισμός) (Quintiere, 2006). Η πυρκαγιά θα αποκτήσει και θα διατηρήσει τη μέγιστη θερμική ισχύ της, μέχρι το στάδιο της σβέσης όπου η σταδιακή μείωση του οξυγόνου ή του καυσίμου οδηγεί νομοτελειακά στη εξάλειψη της και στην πτώση των θερμοκρασιών.

1.1.2 Παράμετροι επίδρασης

Η πλήρως ανεπτυγμένη φωτιά σύμφωνα με τον Quintiere, 2006, επηρεάζεται από τις εξής παραμέτρους:

- 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.
- Η διάταξη του διαμερίσματος.

1.2 Δομικά υλικά σε περιβάλλον φωτιάς

1.2.1 Συμπεριφορά ξύλου σε συνθήκες φωτιάς

Το ξύλο ως δομικό υλικό, είναι ευρέως διαδεδομένο, ιδιαίτερα στην Βόρεια Αμερική όπου, οι ξύλινες κατασκευές αντιπροσώπευαν το 97% του μεριδίου αγοράς των μονώροφων έως τετραώροφων πολυκατοικιών (κατοικιών) κτιρίων που κατασκευάστηκαν το 2018 σε Καναδά και 94% στις Ηνωμένες Πολιτείες (Buchanan, 2022). Όμως, ένα από τα πιο επίφοβα προβλήματα τις χρήσης ξυλείας στις κατασκευές είναι η συμπεριφορά της σε περίπτωση πυρκαγιάς.

Ως στερεό καύσιμο στην κατηγορία της βιομάζας, περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα χημικών ενώσεων, τόσο καύσιμες όσο και άκαυστες (Φούντη, Κολαΐτης, 2014). Όταν εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες από εξωτερικές πηγές, παράγει καύσιμα αέρια και τέφρα. Σε περίπτωση καύσης, το ξύλο δημιουργεί πυρκαγιές με φλόγα, αλλά και υφέρπουσες πυρκαγιές χωρίς φλόγα, οι οποίες πολλές φορές μπορεί να περάσουν απαρατήρητες. Στο στάδιο της υφέρπουσας φλόγας, με λάθος χειρισμό μπορεί η πυρκαγιά να οδηγηθεί ξανά σε πλήρως αναπτυγμένη. Παραδείγματα των δυο καύσεων παρουσιάζονται στις εικόνες 1.4 και 1.5.



Εικόνα 1.4 Ενεργή φλόγα



Εικόνα 1.5 Υφέρπουσα φωτιά

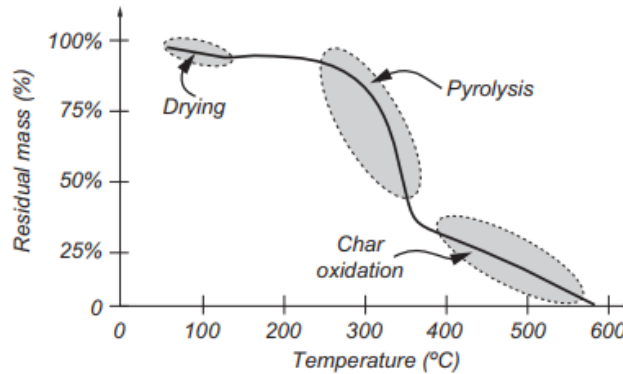
1.2.2 Φυσικά και χημικά φαινόμενα κατά την καύση του ξύλου

Η καύση των στερεών καυσίμων είναι μια διαδικασία πολύπλοκη και πολυβάθμια. Τα στάδια αυτά, είναι, φαινόμενα φυσικά και χημικά. Στην πιο βασική τους αλληλουχία είναι η ξήρανση (drying), η πυρόλυση (pyrolysis), η έναυση της καύσης (ignition), η καύση των πτητικών (combustion of volatiles) και η καύση του εξανθρακώματος (combustion of residual coke). Τα στάδια αυτά δεν συμβαίνουν απαραίτητα διαδοχικά, αλλά είναι δυνατόν να εξελίσσονται παράλληλα. Πιο αναλυτικά:

- Η ξήρανση είναι η εξατμική της μικρής ποσότητας του νερού, η οποία μπορεί να υπάρχει είτε στην επιφάνεια είτε στους πόρους του υλικού. Το ξύλο είναι δυνατόν να εμφανίζει ποσοστά περιεχόμενης υγρασίας της τάξης του 40% (Φούντη,Κολαίτης,2014).
- Η πυρόλυση είναι μια χημική διεργασία αποτελούμενη από πολλαπλές αντιδράσεις κατά την οποία τα στερεά καύσιμα αποσυντίθενται και απελευθερώνουν εύφλεκτα πτητικά αέρια.
- Η έναυση ορίζει την πρακτική έναρξη της καύσης, όταν τα πτητικά αέρια αναμειχθούν με το οξυγόνο και δημιουργήσουν εύφλεκτο μείγμα.
- Ως καύσεις των πτητικών ονομάζονται οι ταχύτερες χημικές αντιδράσεις των πτητικών με το οξυγονούχο περιβάλλον. Το χρονικό διάστημα του σταδίου αυτού εξαρτάται κυρίως από τον ρυθμό παραγωγής των πτητικών και της ανάμειξής τους με το περιβάλλον.
- Η καύση του εξανθρακώματος αποτελεί το στάδιο που εμφανίζεται αφού ολοκληρωθεί η έκλυση των πτητικών. Εξανθράκωμα (char), ονομάζεται το στερεό υπόλειμμα το οποίο απομένει, στου οποίου την επιφάνεια εμφανίζονται ετερογενείς αντιδράσεις λόγω της παραμένουσας υψηλής θερμοκρασίας. Οξυγόνο από το περιβάλλον διαχέεται στην επιφάνεια του εξανθρακώματος,

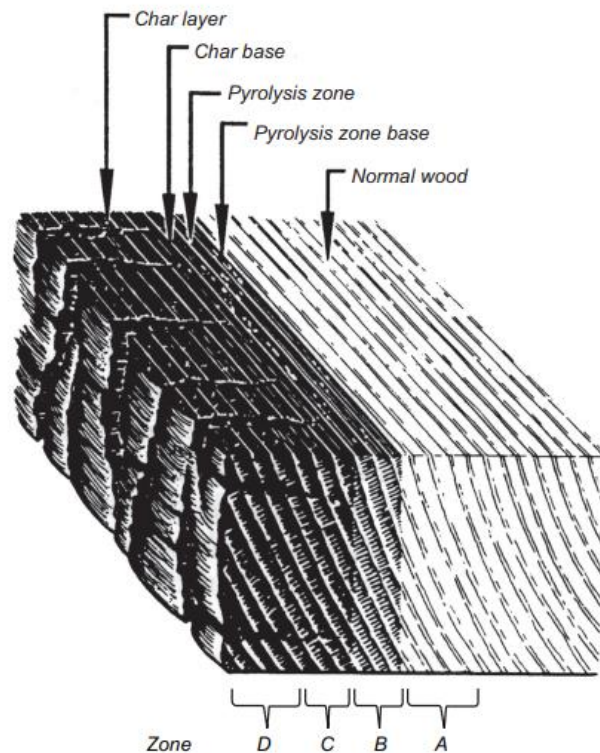
προσροφάται και αντιδρά με τις παρούσες στερεές χημικές ενώσεις, εκλύοντας προϊόντα καύσης.

Στην εικόνα 1.6, απεικονίζονται τα στάδια καύσης του ξύλου συναρτήσει θερμοκρασίας:



Εικόνα 1.6 Διάγραμμα σταδίων καύσης του ξύλου, Law, Hadden, 2020

Πιο συγκεκριμένα στην εικόνα 1.7 παρατηρούνται οι διάφορες ζώνες επάνω στο υλικό που αναπτύσσονται κατά την καύση του ξύλου.



Εικόνα 1.7 Ζώνες κατά την καύση ξύλου, White, 2016

- Ζώνη Α: Μέχρι και σε θερμοκρασίες 200°C συμβαίνει η ξήρανση του ξύλου απελευθερώνοντας υδρατμούς και διάφορες μη καύσιμες αέριες ουσίες όπως το διοξείδιο του άνθρακα, το μυρμηγκικό και το οξικό οξύ. Ανάμεσα στους 100°C με 200°C υπάρχει σημαντική πτώση της στατικής αντοχής του υλικού. (Buchanan,2022)
- Ζώνη Β: Η εμφάνιση του σκούρου καφέ χρώματος σηματοδοτεί την αρχή της πυρόλυσης, στους βαθμούς 200-280°C. Απελευθερώνονται και πάλι υδρατμοί και μη καύσιμα αέρια, μαζί με μικρές ποσότητες μονοξειδίου του άνθρακα.
- Ζώνη Γ: Η διεργασίες της πυρόλυσης αυξάνουν ρυθμό στους βαθμούς 280-500°C. Παράγονται εύφλεκτα αέρια όπως μονοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο και φορμαλδεΐδη.
- Ζώνη Δ: Σε θερμοκρασίες άνω των 500°C, το εξανθράκωμα συνοδεύεται από πρόσθετες αντιδράσεις που περιλαμβάνουν τα αέρια προϊόντα και τα άκαυστα που προέρχονται από βαθύτερα στρώματα πυρολύονται περαιτέρω για να παράγουν πιο εύφλεκτα προϊόντα, δηλαδή το διοξείδιο του άνθρακα και ο υδρατμός αντιδρούν με τον άνθρακα για να σχηματίσουν μονοξείδιο του άνθρακα, υδρογόνο και φορμαλδεΐδη(Buchanan,2022).

1.3 Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η πειραματική μελέτη ροϊκών και θερμικών χαρακτηριστικών φωτιάς σε πυροδιαμέρισμα υπό κλίμακα 1/3. Σε πρώτη φάση θα χρησιμοποιηθεί αδρανές υλικό, ενώ στη συνέχεια η οροφή θα αντικατασταθεί από οροφή σταυρωτής επικολλητής ξυλείας(CLT), ώστε να γίνει σύγκριση δεδομένων και αποτελεσμάτων, οδηγώντας σε εμφάνιση των υπαρκτών γνώσεων για την συμπεριφορά του CLT σε περίπτωση πυρκαγιάς. Για τις δυο περιπτώσεις διαμερίσματος, στο πρώτο μέρος των πειραμάτων θα χρησιμοποιηθεί η καμπύλη ISO 834 η οποία επιτεύχθηκε με πειραματική προσομοίωση με σύστημα αυτόματου ελέγχου. Στο δεύτερο μέρος θα χρησιμοποιηθεί μια καμπύλη παροχής χρόνου V-t, η οποία βρέθηκε με παρεμβολή μέσω λογισμικού από τα δεδομένα των πειραμάτων με το αδρανές διαμέρισμα υπό την καμπύλη ISO 834. Στόχος ήταν η μετατροπή της καμπύλης θερμοκρασίας ISO 834 T-t σε καμπύλη παροχής καυσίμου-χρόνου V-t με τον περιορισμό ότι ισχύει μόνο για την παρούσα διάταξη. Μελετώνται επίσης η θερμορροή στα τοιχώματα, οι ταχύτητες αερίων στο άνοιγμα καθώς και ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας, χάρη στην συλλογή των καυσαερίων.

2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ

2.1 Φυσικά φαινόμενα

2.1.1 Αναπτυσσόμενο ροϊκό πεδίο

Η ροή των καυσαερίων φωτιάς ενός διαμερίσματος ακολουθεί την άνω κατεύθυνση λόγω της θερμικής άνωσης. Τα καυσαέρια είναι θερμά και λιγότερο πυκνά από τον αέρα περιβάλλοντος. Αγγίζοντας την οροφή, τα καυσαέρια αρχίζουν και κινούνται ακτινικά, δημιουργώντας ένα στρώμα υψηλής θερμοκρασίας.

Διαμέρισμα χωρίς άνοιγμα

Χωρίς άνοιγμα στο πυροδιαμέρισμα, τα καυσαέρια παραμένουν στο χώρο και το στρώμα τους μεγαλώνει συνεχώς. Η πιθανότητα σβέσης είναι υψηλή καθώς το στρώμα καπνού εμποδίζει την ανάμειξη του καυσίμου με το οξυγόνο του δωματίου.

Διαμέρισμα με άνοιγμα



Εικόνα 2.1 Ροϊκό πεδίο φωτιάς σε διαμέρισμα με άνοιγμα

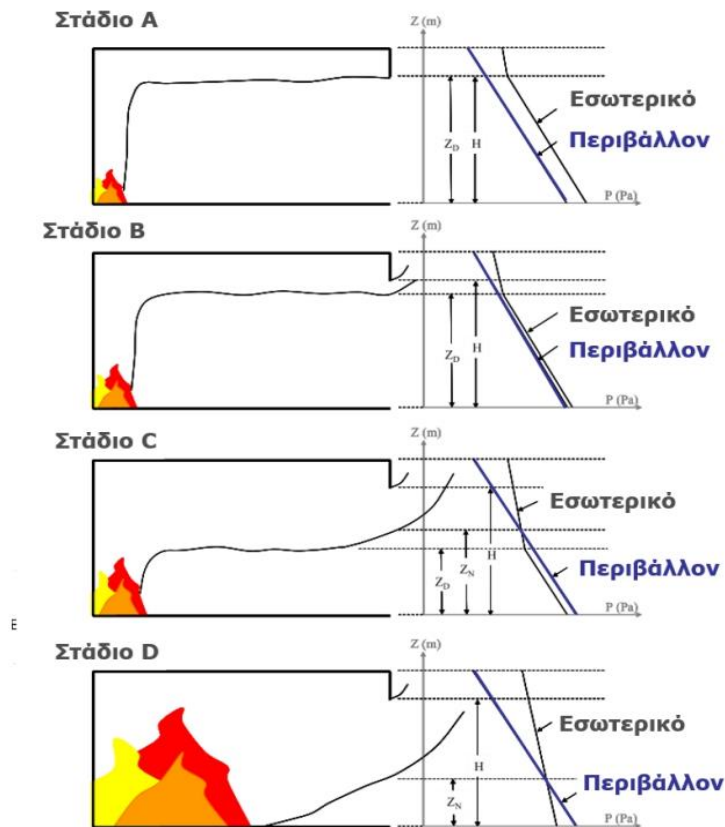
Στην εικόνα 2.1 παρατηρείται ένα τυπικό ροϊκό πεδίο φωτιάς σε πυροδιαμέρισμα με πιθανό άνοιγμα στην οροφή ή και σε τοίχο.

Η ροή μέσω ενός ανοίγματος καθορίζεται από τη διαφορά πιέσεων εκατέρωθεν του ανοίγματος. Η ροή έχει πάντα την κατεύθυνση από την περιοχή της 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.

Πιο συγκεκριμένα σε διαμέρισμα με άνοιγμα στον τοίχο η φωτιά μπορεί να διακριθεί σε 4 στάδια τα οποία απεικονίζονται στην εικόνα 2.2.



Εικόνα 2.2 Στάδια ανάπτυξης του ροϊκού πεδίου φωτιάς.

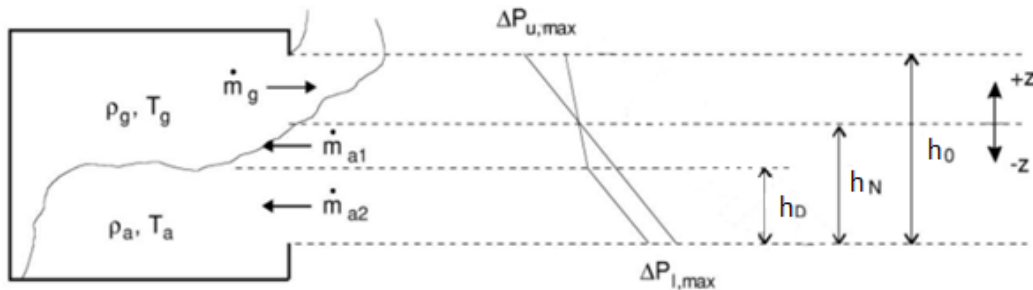
- Κατά το στάδιο A η φωτιά βρίσκεται στο στάδιο ανάπτυξης. Δημιουργείται το θερμό στρώμα καυσαερίων στην οροφή. Η ροή βρίσκεται ακόμη σε μεταβατική κατάσταση, ενώ τα καυσαέρια εξέρχονται διαμέσου του ανοίγματος. Υψηλότερη πίεση βρίσκεται στο εσωτερικό του διαμερίσματος.
- Στο στάδιο B, η ροή βρίσκεται ακόμη στη μόνιμη κατάσταση, ενώ διαρκεί για λίγα δευτερόλεπτα. Σταδιακά δημιουργείται και δέσμη εξόδου των καυσαερίων στην άνω μεριά του ανοίγματος.
- Μόνιμη ροή επέρχεται στο στάδιο C, όπου εισέρχεται ψυχρός αέρας περιβάλλοντος διαμέσου της κάτω πλευράς του ανοίγματος. Εισάγεται η έννοια του ουδέτερου επιπέδου στο οποίο η ταχύτητες είναι 0. Η πίεση στο εσωτερικό

είναι μεγαλύτερη του περιβάλλοντος επάνω από το ουδέτερο επίπεδο και μικρότερη από κάτω.

- Στο στάδιο D, πλέον η ροή βρίσκεται στο στάδιο της πλήρως ανεπτυγμένης φωτιάς. Αφού συμβεί η καθολική ανάφλεξη, η δέσμη οροφής καταλαμβάνει πλήρως το δωμάτιο. Η ροή είναι μόνιμη και οι συνθήκες στο διαμέρισμα είναι ομοιόμορφες.

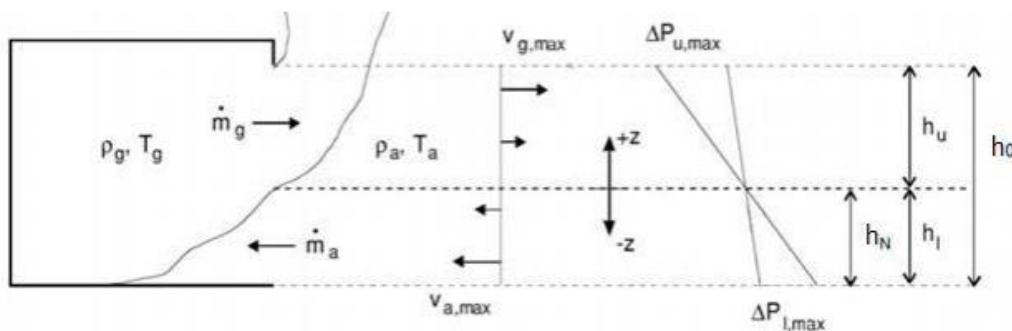
Για καλύτερη μελέτη των φαινομένων που αλληλοεπιδρούν στα στάδια C και D, έχουν δημιουργηθεί 2 μοντέλα προσομοίωσης, το διζωνικό και το μονωζονικό μοντέλο αντίστοιχα.

Το διζωνικό μοντέλο, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 2.3, σύμφωνα με το οποίο το εσωτερικό του διαμερίσματος χωρίζεται σε δύο ζώνες, την άνω ζώνη που αντιστοιχεί στο θερμό στρώμα καυσαερίων και την κάτω, τον εισερχόμενο ψυχρό αέρα. Εφαρμόζεται σε φωτιές πριν την καθολική ανάφλεξη, στο στάδιο της ανάπτυξης. Το μοντέλο αυτό προσφέρει διάφορους τύπους για εύρεση ταχυτήτων και ροής μάζας, είτε του θερμού εξερχόμενου στρώματος καυσαερίων είτε του ψυχρού εισερχομένου αέρα.



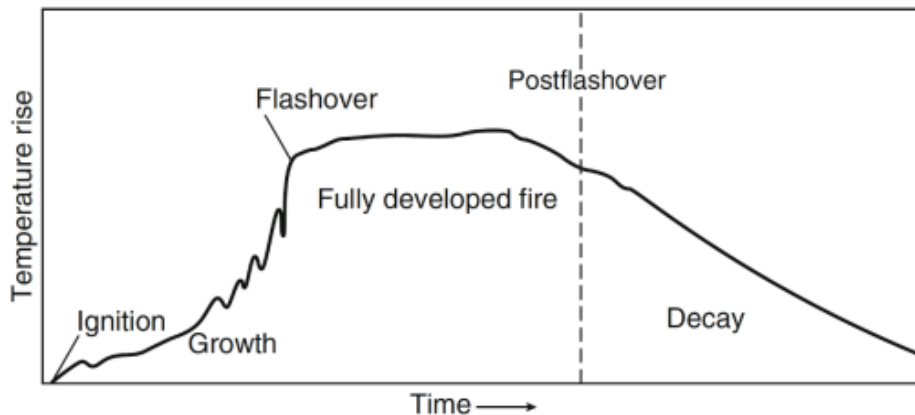
Εικόνα 2.3 Διζωνικό Μοντέλο προσομοίωσης

Το μονοζωνικό μοντέλο (εικόνα 2.4), σύμφωνα με το οποίο η δέσμη οροφής καταλαμβάνει όλο το δωμάτιο (μία ζώνη), εφαρμόζεται σε πυρκαγιά στο πλήρως ανεπτυγμένο στάδιο, μετά την καθολική ανάφλεξη. Υπάρχουν αντίστοιχοι τύποι και σχέσεις για τα μεγέθη ενδιαφέροντος.



Εικόνα 2.4 Μονοζωνικό Μοντέλο προσομοίωσης

2.1.2 Αναπτυσσόμενο θερμικό πεδίο

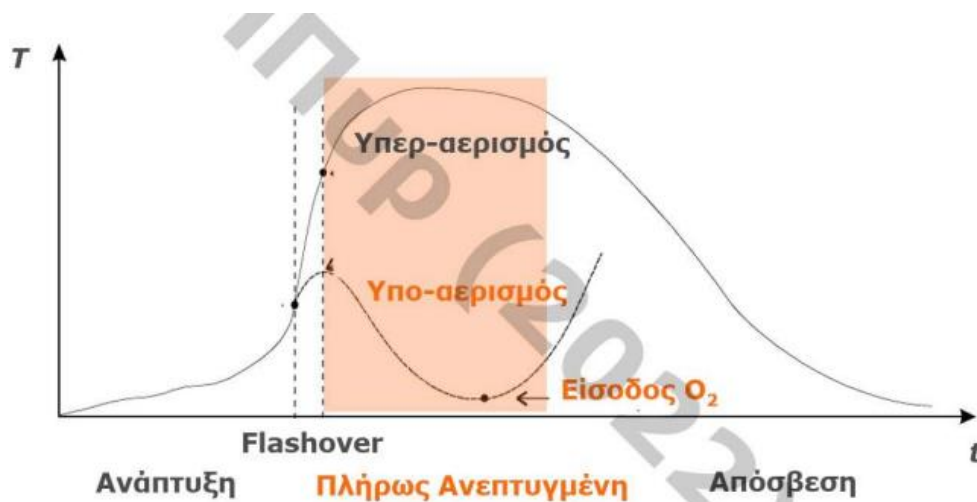


Εικόνα 2.5 Λεπτομερές Διάγραμμα σταδίων ανάπτυξης φωτιάς

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 1.1.1, ένα διαμέρισμα υπό πυρκαγιά διέρχεται από 5 τυπικά στάδια. Την ανάφλεξη, την ανάπτυξη, τον καθολική ανάφλεξη, το στάδιο πλήρως ανεπτυγμένης φωτιάς και την σβέση.

- Στάδιο Ανάφλεξης: Επισημάνει την έναρξη της πυρκαγιάς. Η ύπαρξή της καθορίζεται από τα όρια αναφλεξιμότητας και τις θερμοκρασίες ανάφλεξης/αυτανάφλεξης.
- Στάδιο Ανάπτυξης: Χαρακτηρίζεται από σταδιακή αύξηση στη θερμοκρασία και στο μέγεθος της φλόγας. Δημιουργείται το θερμό στρώμα οροφής. Σε αυτό το στάδιο υπάρχουν τρεις περιπτώσεις εξέλιξης.
 - I. Σβέση, χωρίς την περαιτέρω καύση άλλων καύσιμων υλικών, ειδικά στην περίπτωση που η έναυση γίνεται σε απομονωμένη καύσιμη ύλη.
 - II. Απουσία επαρκούς αερισμού, είναι δυνατόν να παρατηρηθεί σβέση ή καύση με πολύ αργό ρυθμό.
 - III. Σε συνθήκες επαρκούς αερισμού, η φωτιά μπορεί να εξαπλωθεί σε ολόκληρο το διαμέρισμα, με την ανάφλεξη όλων των καύσιμων υλών.
- Καθολική ανάφλεξη: Η τοπική φλόγα εξαπλώνεται και οδηγεί σε ολική ανάφλεξη κάθε καύσιμης ύλης του δωματίου, ενώ παράλληλα η φωτιά μεταβαίνει από υπέρ αεριζόμενη σε υπό αεριζόμενη. Η φωτιά διαδίδεται στη δέσμη οροφής, από όπου η θερμοκρασία ακτινοβολεί στο διαμέρισμα. Σε συνθήκες ισχυρού υπο-αερισμού, η φλόγα εξέρχεται και από το άνοιγμα. Η φωτιά με περιορισμένο εξαερισμό μπορεί να έχει καύση κυρίως στους αεραγωγούς και να προκύψουν σημαντικά ζητήματα τοξικότητας λόγω της ατελούς διαδικασίας καύσης (Buchanan, 2022).
- Πλήρως ανεπτυγμένη φωτιά: Στο στάδιο αυτό επιτυγχάνεται μέγιστος ρυθμός έκλυσης θερμότητας (HRR) και η μέγιστη θερμοκρασία καυσαερίων (700-1200°C). Αναφλέγεται κάθε πιθανή καύσιμη ύλη στο διαμέρισμα. Οι παράγοντες που καθορίζουν τα χαρακτηριστικά της πυρκαγιάς στο στάδιο αυτό αναγράφονται στην παράγραφο 1.1.2. Ανάλογα με τον διαθέσιμο αερισμό:

1. Σε συνθήκες υπέρ-αερισμού υπάρχει περίσσεια οξειδωτικού. Ο ρυθμός καύσης καθορίζεται από το είδος, την ποσότητα και την θέση του καυσίμου.
2. Σε συνθήκες ύπο-αερισμού, δηλαδή έλλειψη ανοιγμάτων, υπάρχει περίσσεια καυσίμου. Ο ρυθμός καύσης ρυθμίζεται από τον αερισμό του διαμερίσματος, ο οποίος προέρχεται από μικρές χαραμάδες ή ρωγμές. Οι καύσεις είναι ατελείς, ενώ συσσωρεύονται προϊόντα ατελούς καύσης, αναφλέξιμα αέρια σε θερμοκρασία μεγαλύτερη του σημείου ανάφλεξης. Υπό τις ίδιες συνθήκες αυτό οδηγεί σε σβέση, καθώς μηδενίζει ο ρυθμός καύσης. Αν στο στάδιο αυτό όμως εισαχθεί απότομα οξειδωτικό, συμβαίνει επανέναρξη της καύσης παράλληλα με εκρηκτική εκτόνωση του μείγματος. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται Backdraft. Οι δυο περιπτώσεις ανάπτυξης της πυρκαγιάς συναρτηθεί του αερισμού παρουσιάζονται στην εικόνα 2.6.



Εικόνα 2.6 Περιπτώσεις υπέρ και υπο αερισμού

- Σβέση: Η εξάντληση του καυσίμου οδηγεί σε σταδιακή πτώση του ρυθμού καύσης. Στο σημείο αυτό μπορεί να παρατηρηθεί smouldering, η καύση να συνεχίζεται χωρίς φανερό φλόγα. Οι θερμοκρασίες μπορεί να διατηρηθούν υψηλές για μεγάλα διαστήματα. Σε μια υπο-αεριζόμενη φωτιά, η μείωση του καυσίμου στο στάδιο αυτό μπορεί να οδηγήσει σε συνθήκες υπέρ-αερισμού.

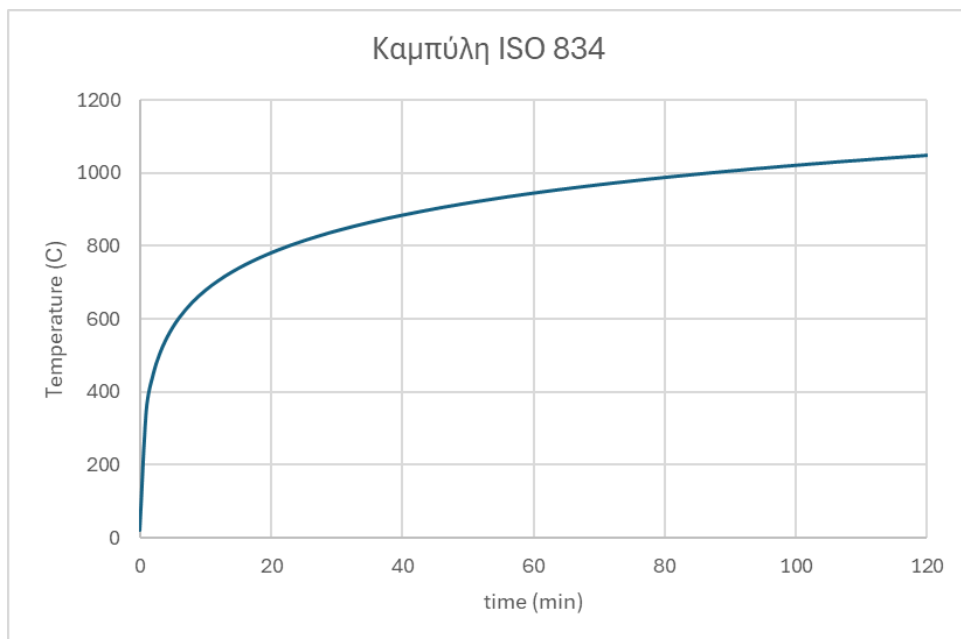
Η μεταφορά θερμότητας σε περίπτωση φωτιάς σε διαμέρισμα συμβαίνει και με τους τρεις τρόπους, αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία. Η αγωγή ανάμεσα στα στερεά εμφανίζει τον μικρότερο ρόλο. Τα καυσαέρια μεταφέρουν θερμότητα στο χώρο μέσω συναγωγής, ενώ κυριότερα, τα άκαυστα σωματίδια αιθάλης πυρακτώνονται και ακτινοβολούν θερμότητα προς όλες τις κατευθύνσεις. Για τον υπολογισμό μεγεθών απαιτείται η γνώση κατανομών θερμοκρασίας, σύστασης καυσαερίων και συγκέντρωσης και κοκκομετρικής κατανομής σωματιδίων αιθάλης (Quintiere, 2006).

2.2 Πρότυπες καμπύλες φωτιάς

2.2.1 Καμπύλη ISO 834

Το πρότυπο ISO 834, του οποίου η πρώτη εκδοχή δημιουργήθηκε στις αρχές του 1930, δημιουργήθηκε από την ανάγκη μιας τυποποίησης στα πειράματα αντοχής υλικών σε φωτιά. Οι ερευνητές συλλέξαν δεδομένα από διάφορα πειράματα πάνω σε πυρκαγιές υπό πραγματική φωτιά και δημιούργησαν μια πειραματική καμπύλη θερμοκρασίας χρόνου T-t, την πρότυπη καμπύλη ISO 834, γνωστή και ως Cellulosic curve. Η καμπύλη αυτή προσομοιάζει την φωτιά στο πλήρως ανεπτυγμένο στάδιο. Αναπαρίσταται στην εικόνα 2.7 και δίνεται από τον ακόλουθο τύπο, όπου T(°C) η θερμοκρασία και t(min) ο χρόνος.

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

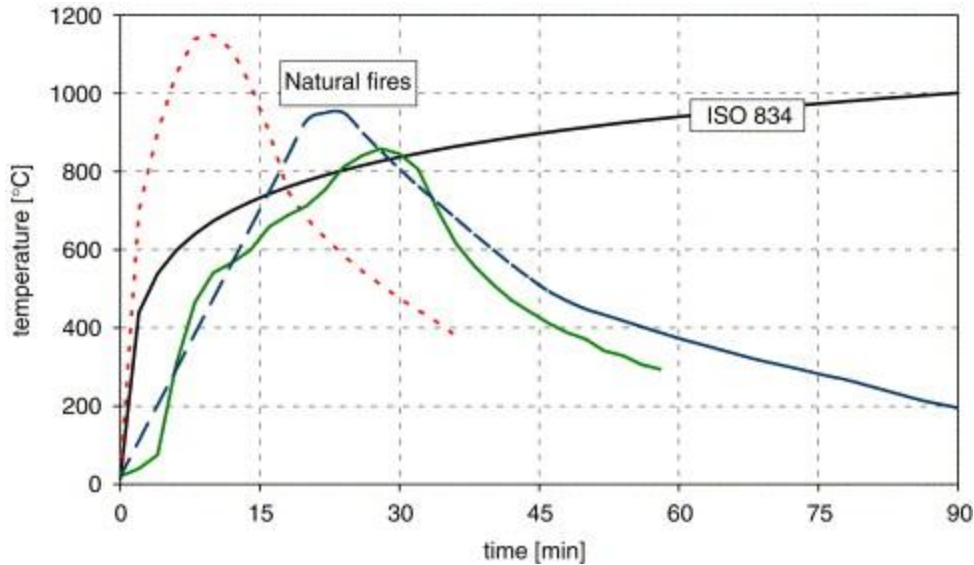


Εικόνα 2.7 Καμπύλη ISO 834

Οι θερμοκρασίες στην καμπύλη αυξάνονται συνεχώς, κάτι που δεν παρατηρείται σε τυπική φωτιά διαμερίσματος. Το στάδιο της σβέσης είναι ανύπαρκτο ενώ η ίδια η καμπύλη δεν λαμβάνει υπόψιν τις διάφορες γεωμετρίες του πυροδιαμερίσματος και των ανοιγμάτων, καθώς και την φύση του καυσίμου.

Όταν δημιουργήθηκε η καμπύλη ISO 834, το ξύλο ήταν η κύρια πηγή καυσίμου, ενώ πλέον τα σύγχρονα κτίρια περιέχουν επίσης και θερμοπλαστικά υλικά, συνθετικούς αφρούς και υφάσματα (Ariyanayagam, Mahendran,2013).

Μάλιστα, κάποια πειράματα έχουν δείξει πως η μέγιστη θερμοκρασία φυσικής φωτιάς μπορεί να ξεπεράσει την καμπύλη ISO, αλλά μετά το μέγιστο η θερμοκρασία μειώνεται, ενώ στην καμπύλη αυξάνεται συνεχώς (Zehlfuss,Hosser,2006). Το φαινόμενο αυτό παριστάνεται στην εικόνα 2.8.



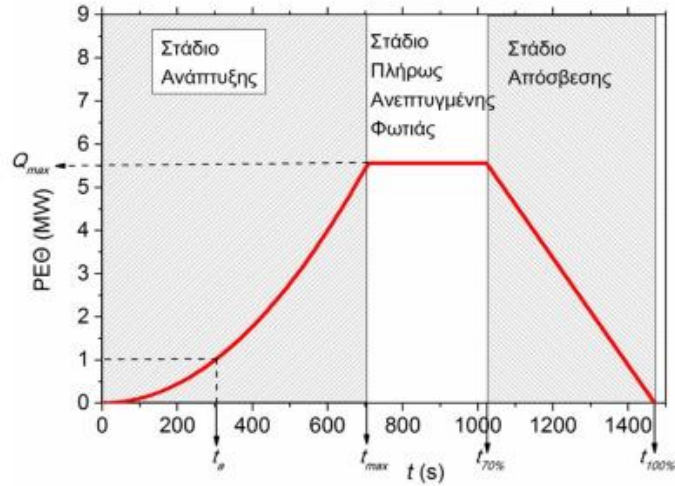
Εικόνα 2.8 Σύγκριση της καμπύλης ISO 834 με καμπύλες φυσικής φωτιάς, Zehlfuss,Hosser,2006

2.2.2 Παραμετρικές καμπύλες

Προκειμένου να λυθούν κάποια από τα προβλήματα της καμπύλης ISO 834, μέσω της Ευρωπαϊκής Ένωσης δημιουργήθηκε το πρότυπο EN 1991-1-2 (2002): Eurocode 1: Actions on structures. Στη δημοσίευση αυτή παρουσιάστηκαν 2 πρότυπες παραμετρικές καμπύλες για την μελέτη φωτιάς σε διαμέρισμα, η καμπύλη Q-t θερμικής ισχύος και χρόνου, και η καμπύλη T-t θερμοκρασία-χρόνου.

2.2.2.1 Παραμετρική καμπύλη Q-t, θερμικής ισχύος-χρόνου.

Στο παράρτημα E του προτύπου EN 1991-1-2 (2002) δίνεται η καμπύλη θερμικής ισχύος-χρόνου Q-t στην οποία παρουσιάζεται ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας συναρτήσεως του χρόνου. Σε αντίθεση με την καμπύλη ISO 834, η καμπύλη του Ευρωκώδικα χωρίζεται σε τρία μέρη, και αντικατοπτρίζει το στάδιο αναπτυσσόμενης φωτιάς, το στάδιο πλήρως ανεπτυγμένης φωτιάς και το στάδιο σβέσης, με αποτέλεσμα μια πιο ρεαλιστική προσομοίωση φωτιάς σε διαμέρισμα. Στην εικόνα 2.9 δίνεται το διάγραμμα της καμπύλης.



Εικόνα 2.9 Καμπύλη Q-t , EN 1991-1-2 (2002)

Στο πρώτο στάδιο, το στάδιο της ανάπτυξης για $t < t_{max}$, ο ρυθμός έκλυσης ισχύος χαρακτηρίζεται από παραβολική συνάρτηση ακόλουθου τύπου.

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

Οι μεταβλητές της εξίσωσης:

- \dot{Q} (W): Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας.
- t(s): Χρόνος.
- t_a(s): Χρόνος έως την επίτευξη ρυθμού έκλυσης θερμότητας 1MW.
- t_{max}(s): Χρόνος μέχρι την επίτευξη μέγιστου ρυθμού έκλυσης θερμότητας.

Στο δεύτερο στάδιο, το στάδιο πλήρως ανεπτυγμένης φωτιάς ισχύει η εξίσωση:

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

Όπου:

- \dot{Q}_{max} (W): Ο μέγιστος ρυθμός έκλυσης θερμότητας.
- RFR_f (W/m²): Μέγιστη ανηγμένη θερμοροή στο δάπεδο.
- A_f (m²): Εμβαδόν δαπέδου.

$$\dot{Q}_{max} = RFR_f \times A_f \quad (2.4)$$

Για τον χρόνο επίτευξης μέγιστου ρυθμού έκλυσης θερμότητας ισχύει:

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

Το πρότυπο δίνει ένα πίνακα (2.1) ενδεικτικών τιμών t_a και RFR_f για διαφορετικές χρήσεις κλειστών χώρων.

Πίνακας 2.1: Χρόνος έως την επίτευξη ρυθμού έκλυσης θερμότητας 1MW και μέγιστη ανηγμένη θερμορροή στο δάπεδο για διαφορετικά είδη κτιρίων.

Χρήση	t_a (s)	RFR _f (W/m ²)
Κατοικία	300	250000
Νοσοκομείο	300	250000
Ξενοδοχείο	300	250000
Βιβλιοθήκη	150	500000
Γραφείο	300	250000
Σχολική Αίθουσα	300	250000
Εμπορικό Κέντρο	150	250000
Θέατρο	150	500000

Το τρίτο στάδιο, προσομοιάζει το στάδιο σβέσης μιας φυσικής φωτιάς σε διαμέρισμα και ακολουθεί γραμμική πτώση με τον ακόλουθο τύπο.

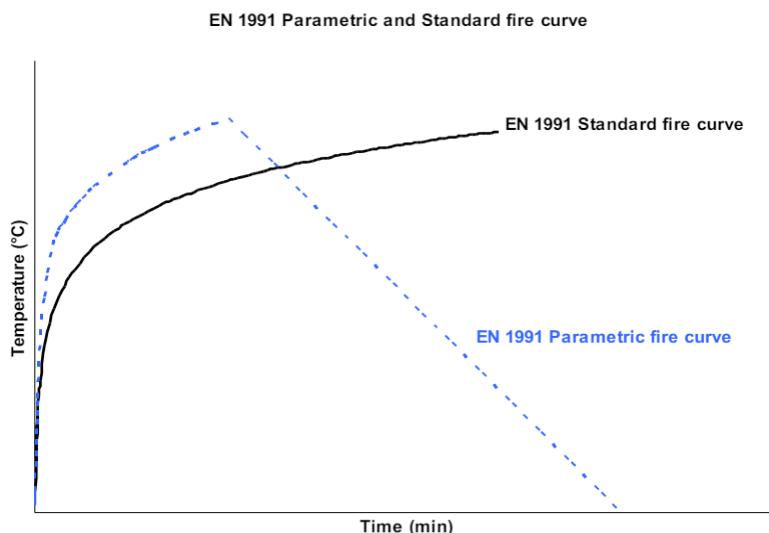
$$\dot{Q} = \frac{\dot{Q}_{max}}{t_{70\%}-t_{100\%}} \times (t - t_{100\%}) \quad (2.6)$$

Όπου,

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

2.2.2.2 Παραμετρική καμπύλη T-t, θερμοκρασίας-χρόνου.

Στο παράρτημα A του προτύπου EN 1991-1-2 (2002) δίνεται η καμπύλη θερμοκρασίας χρόνου T-t στην οποία παρουσιάζεται η θερμοκρασία των καυσαερίων συναρτήσει του χρόνου. Χωρίζεται σε δύο μέρη, το μέρος θέρμανσης που προσομοιάζει το στάδιο πλήρως ανεπτυγμένης φωτιάς και το μέρος ψύξης που προσομοιάζει το στάδιο σβέσης.



Εικόνα 2.9 Σύγκριση καμπύλης ISO 834 με παραμετρική T-t, EN 1991-1-2 (2002)

Στο στάδιο της θέρμανσης για $t < t_{max}$, η θερμοκρασία καυσαερίων δίνεται από τον ακόλουθο τύπο.

$$T_g = 20 + 1325 \times (1 - 0.324e^{-0.2t^*} - 0.204e^{-1.7t^*} - 0.472e^{-19t^*}) \quad (2.7)$$

- t^* (hr): Τροποποιημένος χρόνος, όπου

$$t^* = 8.41 \times 10^8 \times t \times \frac{A_o^2 \times H_o}{A_t^2 \times \rho \times k \times c_p} \quad (2.8)$$

- A_o (m²): Συνολικό εμβαδόν ανοιγμάτων.
- A_t (m²): Συνολικό εμβαδόν των εσωτερικών επιφανειών
- H_o (m): Μέσο ύψος ανοιγμάτων.
- ρ (kg/m³): Πυκνότητα των τοιχωμάτων.
- k (W/m*K): Θερμική αγωγιμότητα τοιχωμάτων
- c_p (J/kg*K): Ειδική θερμοχωρητικότητα τοιχωμάτων.

Σημειικά, για $t = t_{max}$, παριστάνεται το στάδιο πλήρως ανεπτυγμένης φωτιάς, για το οποίο επικρατεί η μέγιστη θερμοκρασία καυσαερίων $T_g = T_{g,max}$.

$$T_{g,max} = 20 + 1325 \times (1 - 0.324e^{-0.2t_{max}^*} - 0.204e^{-1.7t_{max}^*} - 0.472e^{-19t_{max}^*}) \quad (2.9)$$

- t_{max} (hr): Χρόνος επίτευξης μέγιστης θερμοκρασίας.
- $T_{g,max}$ (°C): Μέγιστη θερμοκρασία καυσαερίων.
- t_{max}^* (hr): Τροποποιημένος χρόνος επίτευξης μέγιστης θερμοκρασίας.

$$t_{max} = 2 \times 10^{-4} \times \frac{Q'' \times A_t}{A_o \times \sqrt{H_o}} \quad (2.10)$$

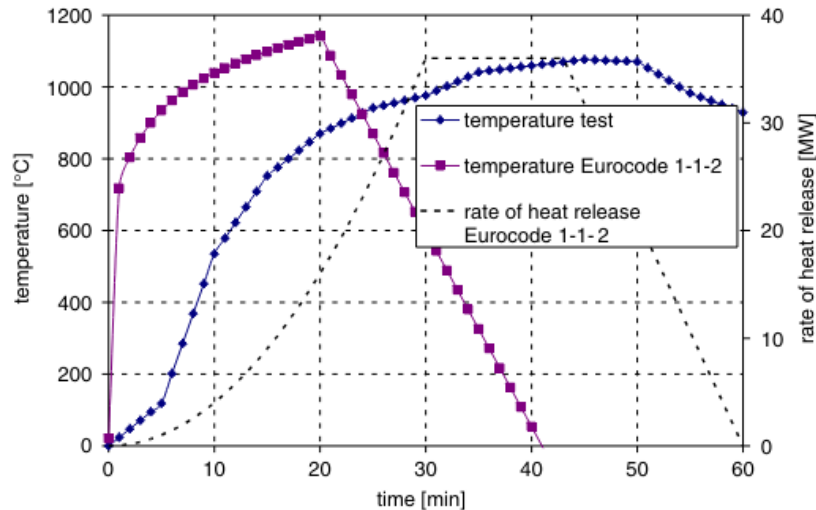
- Q'' (MJ/m²): Πυκνότητα θερμικού φορτίου ανηγμένη στην A_t .

$$t_{max}^* = 168200 \times \frac{Q'' \times A_o \times \sqrt{H_o}}{\rho \times k \times c_p \times A_t} \quad (2.11)$$

Στο τελευταίο στάδιο, το στάδιο ψύξης, η πτώση της θερμοκρασίας είναι γραμμική και εξαρτάται από τον τροποποιημένο χρόνο χρόνος επίτευξης μέγιστης θερμοκρασίας.

$$T_g = \begin{cases} T_{g,max} - 625(t^* - t_{max}^*), & t_{max}^* \leq 0.5 \\ T_{g,max} - 250(3 - t_{max}^*)(t^* - t_{max}^*), & 0.5 \leq t_{max}^* \leq 2 \\ T_{g,max} - 250(t^* - t_{max}^*), & t_{max}^* \geq 2 \end{cases} \quad (2.12)$$

Να σημειωθεί πως, οι δύο παραμετρικές καμπύλες, θερμοκρασίας-χρόνου και ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας-χρόνου, ούτε ταιριάζουν μεταξύ τους ούτε είναι χρονικά όμοιες. (Zehlfuss, Hosser, 2006). Ακολουθεί, κοινό συγκριτικό διάγραμμα(εικόνα 2.10) για τις δύο καμπύλες παράλληλα με πειραματική μέτρηση.



Εικόνα 2.10 Σύγκριση καμπυλών EN 1991-1-2 (2002), Zehlfuss,Hosser,2006

2.3 Νόμοι ομοιότητας

Στη σημερινή εποχή, έχει γιγαντωθεί η τάση της διεξαγωγής πειραμάτων υπό κλίμακα, η χρήση δηλαδή μικρότερου πυροδιαμερίσματος. Οι πραγματικές φωτιές σαφώς και συμβαίνουν σε φυσική κλίμακα(full-scale), όμως για μια εργαστηριακή ομάδα η χρήση πραγματικής κλίμακας δημιουργεί αρκετά εμπόδια. Το χρηματικό κόστος, ο χρονικός παράγοντας εκτέλεσης, οι δυσκολίες στο στήσιμο του πειράματος ως προς τον χώρο είναι κάποια από τα προβλήματα τα οποία οδηγούν τους ερευνητές στη διεξαγωγή πειραμάτων υπό κλίμακα. Η χρήση κλίμακας απαιτεί γνώση της φυσικής για την ένταξη και τον διαχωρισμό των πρωτεύουσων μεταβλητών(Quintiere, 2006). Επομένως, και τα πειράματα υπό κλίμακα, μπορούν να παρουσιάσουν ρεαλιστικά αποτελέσματα, και πιο συγκεκριμένα για πειράματα φωτιάς σε διαμέρισμα να δείξουν ένα λειτουργικό ροϊκό και θερμικό πεδίο.

Ο Quintiere (2006) ανέπτυξε τη μεθοδολογία μοντελοποίησης των φαινομένων φωτιάς σύμφωνα με την θεωρία των Π του Buckingham. Από τις εξισώσεις διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας εξαγεί αδιάστατες ομάδες(μεταβλητές) με τη βοήθεια των οποίων δημιουργεί προσεγγιστικές σχέσεις οι οποίες λύνουν το πρόβλημα μοντελοποίησης των φαινομένων που απαρτίζουν μια φωτιά.

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.

2.3.1 Ομοιότητα διαστάσεων

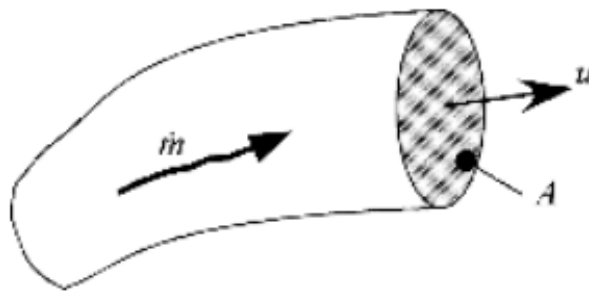
Η αδιαστατοποίηση ενός σημείου (x,y,z) της γεωμετρίας του πυροδιαμερίσματος συμβαίνει με τον ακόλουθο τρόπο $\hat{x} = x/l^*$. Η μεταβλητή \hat{x} πλέον είναι αδιάστατη και ανεξάρτητη.

Σύμφωνα με Quintiere (2006) αποδεικνύεται πως η θερμοκρασία είναι ανεξάρτητη από τις φυσικές διαστάσεις της κλίμακας και δεν επηρεάζεται από αυτή.

Αρχή διατήρησης της μάζας

Η αρχή διατήρησης μάζας δίνεται στον ακόλουθο τύπο.

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



Εικόνα 2.11 Παροχή μάζας

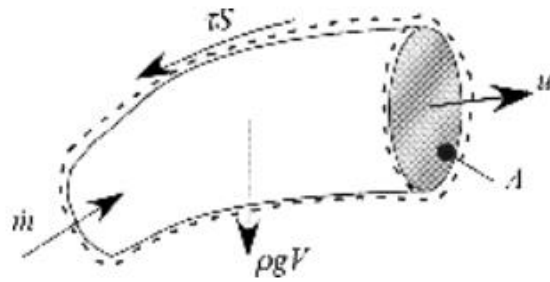
Εφόσον η επιφάνεια διατομής είναι ανάλογη του l , δηλαδή $A \sim l^2$, το ίδιο ισχύει και για τον όγκο $V \sim l^3$.

2.3.2 Ομοιότητα χρόνου

Η μεταβλητή του χρόνου, όπως και του μήκους αποτελεί μια ανεξάρτητη μεταβλητή.

Αρχή διατήρησης της ορμής

Η απλοποιημένη μορφή της εξίσωσης διατήρησης της ορμής κατά τον κάθετο άξονα εκφράζεται από την ακόλουθη εξίσωση και παρουσιάζεται στην εικόνα 2.12.



Εικόνα 2.12 Διατήρηση ορμής

$$\rho V \frac{du}{dt} + \dot{m}u \sim (\rho_\infty - \rho)gV + PA + \tau_s \quad (2.14)$$

Η σχέση μεταξύ των όρων της Εξίσωσης (2.14) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κανονικοποίηση παραμέτρων.

$$\rho u^2 l^2 \sim (\rho_\infty - \rho)gl^3 \quad (2.15)$$

Από τον νόμο τέλειων αερίων υπό σταθερή πίεση:

$$\frac{\rho_\infty - \rho}{\rho} = \frac{T - T_\infty}{T_\infty} \quad (2.16)$$

Με τις εξισώσεις (2.15) και (2.16) προκύπτει:

$$u \sim \sqrt{\left(\frac{T - T_\infty}{T_\infty} gl\right)} \sim \sqrt{gl} \quad (2.17)$$

Κανονικοποιείται λοιπόν η ταχύτητα:

$$u^* = \sqrt{gl} \quad (2.18)$$

Εξισώνοντας τον όρο ορμής με την άνωση, λαμβάνεται η χρονική κλίμακα:

$$t^* \sim \frac{u^*}{g} \sim \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (2.19)$$

2.3.3 Ομοιότητα θερμικής ισχύος

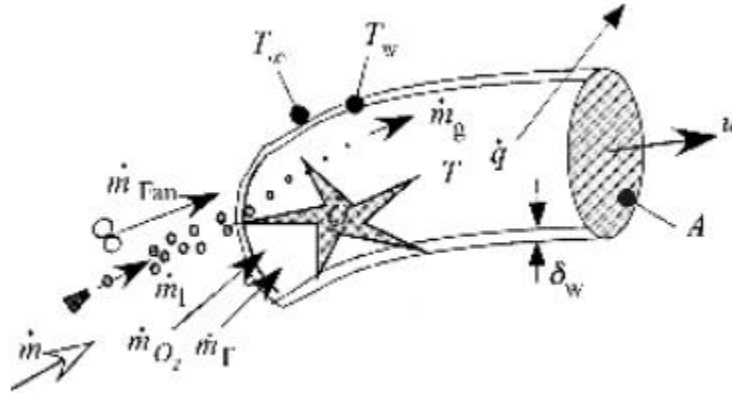
Οι εξίσωση της ενέργειας δημιουργεί ακόμη περισσότερες αδιάστατες ομάδες μέσω των φαινομένων της καύσης, μεταφοράς θερμότητας και εξάτμισης. Η παροχή μάζας περιλαμβάνει το καύσιμο (F), το οξυγόνο (O_2), το υγρό νερό (l), τον ατμοποιημένο υδρατμό (g) και εξαναγκασμένες ροές (fan). Η χημική ενέργεια ή η θερμική ισχύς της φωτιάς συμβολίζεται ως \dot{Q} και οι απώλειες θερμότητας ως \dot{q} .

Αρχή διατήρησης της ενέργειας

Σύμφωνα με Quintiere, (2006) η απλοποιημένη μορφή της εξίσωσης ενέργειας είναι η ακόλουθη:

$$\rho c_p V \frac{dT}{dt} + \dot{m}c_p(T_\infty - T) \sim \dot{Q} - \dot{q} - \dot{m}_w h_{fg} \quad (2.20)$$

Όπου h_{fg} (J/kg) η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης του νερού στον όγκο ελέγχου και c_p (J/kg*K) η ειδική θερμοχωρητικότητα.



Εικόνα 2.13 Μεταφορά Ενέργειας

Συσχετίζοντας τον όρο ενέργειας με τη θερμική ισχύ, δίνεται μια νέα αδιάστατη ομάδα Π, συχνά αναφερόμενη και ως Q^* .

$$Q_l^* \equiv \Pi_2 = \frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g} l^{5/2}} \sim \frac{\text{θερμική ισχύς}}{\text{Ρυθμός ροής ενθαλπίας}} \quad (2.21)$$

Όπου το Q_l^* βασίζεται στη κλίμακα μήκους l .

3. ΣΤΑΥΡΩΤΗ ΕΠΙΚΟΛΛΗΤΗ ΞΥΛΕΙΑ

3.1 Χαρακτηριστικά CLT

Η σταυρωτή επικολλητή ξυλεία αποτελεί ένα ανερχόμενο, ως προς τη χρήση του, δομικό υλικό, κυρίως στη Βόρεια Ευρώπη και στη Βόρεια Αμερική. Το μεγαλύτερο μέρος του CLT στο Ηνωμένο Βασίλειο χρησιμοποιείται για την κατασκευή κτιρίων χαμηλού έως μεσαίου ύψους, δηλαδή μικρές πολυκατοικίες, σχολεία, παιδικούς σταθμούς και ιδιωτικές κατοικίες, ενώ αρχίζει επίσης να χρησιμοποιείται και για άλλες κατασκευές, όπως γραφεία και αθλητικά κέντρα (CLT handbook, 2022). Αποτελεί υποκατάστατο των συμβατικών δομικών υλικών όπως το σκυρόδεμα και ο χάλυβας, λόγω της ευκολίας παραγωγής και των ευνοϊκών χαρακτηριστικών του.

Η διασταυρούμενη ξυλεία, crosslam, CLT ή X-Lam είναι κοινές ονομασίες που αναφέρονται στη σταυρωτή επικολλητή ξυλεία. Αποτελούν πάνελ πλακών ξύλου που κολλιούνται μεταξύ τους εναλλάξ, υπό γωνία 90° μοιρών. Το ξύλο προέρχεται από κωνοφόρα ή φυλλοβόλα δέντρα και για να θεωρηθεί CLT το προϊόν χρειάζεται να κολλήσουν τουλάχιστον τρεις ξεχωριστές πλάκες. Ο όρος πλάκα στην αγγλική ορολογία ονομάζεται lamella. Στις παρακάτω εικόνες, παρουσιάζονται αναπαραστάσεις του δομικού αυτού υλικού για την καλύτερη κατανόηση του.



Εικόνα 3.1 Αναπαράσταση της δομής της σταυρωτής επικολλητής ξυλείας (Reid Middleton, 2017).



Εικόνα 3.2 Πλάκες για κατασκευή CLT.



Εικόνα 3.3 CLT 7 στρώσεων.

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται προδιαγραφές διαθέσιμων προϊόντων CLT και πλακών στην αγορά (CLT handbook, 2022).

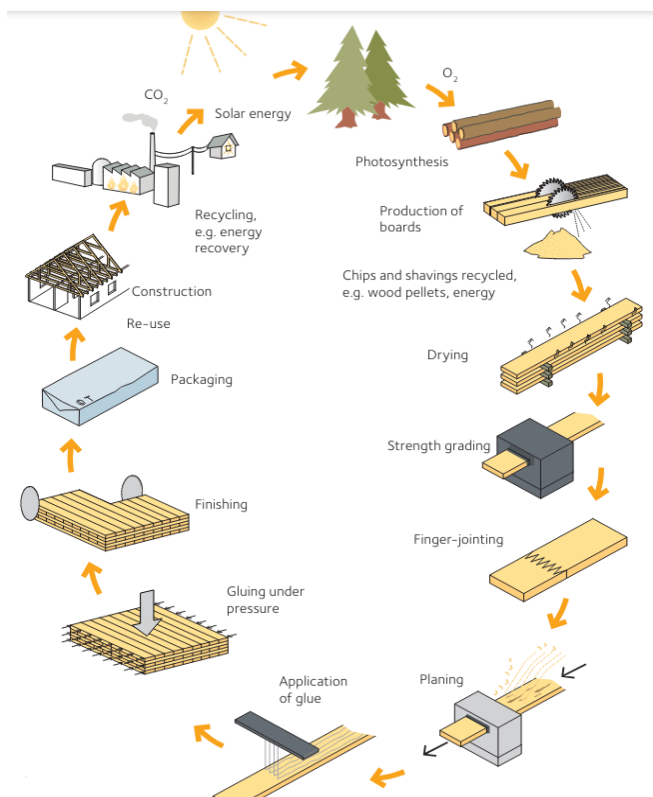
Πίνακας 3.1 Προδιαγραφές διαθέσιμων προϊόντων CLT (CLT handbook, 2022).

Παράμετρος	Σύνηθες	Διαθέσιμο
Πάχος πλάκας	20-45mm	20-60mm
Πλάτος πλάκας	80-200mm	40-300mm
Κλάση αντοχής πλάκας	C14-C30	-
Πάχος CLT	80-300mm	60-500mm
Πλάτος CLT	1.2-3.6m	έως 4.8m
Μήκος CLT	20m	έως 30m
Αριθμός στρώσεων	3,5,7,9	έως 25

Η κλάση αντοχής της ξυλείας ορίζεται από το πρότυπο BS-EN 14081-1. Ξεχωριστά για το κάθε προϊόν CLT, ο κάθε κατασκευαστής παρέχει δικά του πρότυπα αντοχής και δύναμης. Όσον αφορά τη συγκόλληση των πλακών, σημασία έχει η υγρασία τους. Αναλόγως την χρησιμοποιούμενη κόλλα, πρέπει να κυμαίνεται στο 8-15%. Η περιεκτικότητα σε υγρασία των γειτονικών πλακών δεν πρέπει να διαφέρει περισσότερο από 5%. Η αντοχή της συγκόλλησης είναι καλύτερη όταν η περιεκτικότητα σε υγρασία είναι κοντά στην τιμή ισορροπίας της τελικής κατασκευής (CLT handbook, 2022). Προτείνεται, οι πλάκες υψηλότερες αντοχής να χρησιμοποιούνται στις εξωτερικές στρώσεις στην κύρια διεύθυνση του φορέα, όπου οι τάσεις είναι συνήθως οι μεγαλύτερες. Σε ένα πάνελ CLT, η πλευρά με το μεγαλύτερο μήκος είναι η πλευρά υψηλότερης αντοχής.

Συναρμολόγηση ενός πάνελ

Οι μεμονωμένες πλάκες κολλιούνται στα άκρα τους και σχηματίζουν μακριές πλάκες. Οι μακριές πλάκες συλλέγονται σε παρτίδες, μεταφέρονται στο χώρο συγκόλλησης και συναρμολογούνται σε μεγάλα φύλλα που συγκολλούνται μεταξύ τους υπό πίεση. Η συμπίεση συμβαίνει είτε σε κενό αέρος είτε με υδραυλική πρέσα. Η συμπίεση υπό κενό παρέχει σταθερή πίεση και σε μη επίπεδες επιφάνειες, αλλά η πίεση είναι χαμηλή. Στην περίπτωση της υδραυλικής συμπίεσης, αυτή μπορεί να συμβεί ψυχρή ή και θερμή. Αφού σκληρύνει η κόλλα, τα πάνελ οδηγούνται σε εργαλειομηχανές CNC για τις προβλεπόμενες κατεργασίες.



Εικόνα 3.4 Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας κατασκευής και χρήσης CLT. (CLT handbook, 2022)

Καθώς οι κατασκευαστές πρέπει να μπορούν να επιβεβαιώσουν τα χαρακτηριστικά των πάνελ τους, υπήρχε η ανάγκη δημιουργίας προτύπων και τυποποιήσεων στην κατασκευή του CLT. Το Μάρτιο του 2020 αναρτήθηκε στο επίσημο journal της Ε.Ε. το άρθρο EN 16351 Timber structures – Cross laminated timber – Requirements, ώστε να λειτουργήσει ως πρότυπο, με αποτέλεσμα οι κατασκευαστές να μπορούν να πιστοποιήσουν τα προϊόντα τους με την σφραγίδα CE της Ε.Ε.

Μηχανικές ιδιότητες/Αντοχή CLT

Το CLT ως προϊόν ξυλείας χαρακτηρίζεται από τους παρακάτω κανόνες (CLT handbook, 2022):

- Η αντοχή ποικίλλει ανάλογα με τη γωνία μεταξύ της εφαρμοζόμενης τάσης και της διεύθυνσης των ινών, καθιστώντας το υλικό ορθοτροπικό.
- Η αντοχή μειώνεται ελαφρώς καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα σε υγρασία.
- Η αντοχή μειώνεται όσο αυξάνεται η διάρκεια της φόρτισης.
- Καθώς πρόκειται για φυσικό υλικό, οι ιδιότητες του υλικού ποικίλλουν ανάλογα τις μικρές διαφοροποιήσεις στην χημική του σύσταση.

Η διαστρωμάτωση της διατομής επηρεάζει στο μεγαλύτερο βαθμό την αντοχή του CLT αλλά και την επίτευξη της ζητούμενης δυσκαμψίας του τελικού προϊόντος. Σημαντικά μεγέθη είναι η αντοχή σε εφελκυσμό των εξωτερικών πλακών και η αντοχή σε διάτμηση κύλισης των εγκάρσιων στρώσεων. Η βάση για τον στατικό σχεδιασμό του CLT και των ξύλινων κατασκευών είναι μια χαρακτηριστική τιμή αντοχής ή δυσκαμψίας, η οποία καθορίζεται μέσω δοκιμών σε εργαστηριακές συνθήκες και μέσω ενός καθορισμένου αριθμού δειγμάτων. Για τους υπολογισμούς αντοχής χρησιμοποιείται η τιμή που δεν επιτυγχάνεται στατιστικά σε 5 πειραματικές δοκιμές από τις 100. Έχοντας γνωστή την χαρακτηριστική αυτή τιμή αντοχής, η τιμή σχεδιασμού (design value) για κάθε μεμονωμένη περίπτωση προσδιορίζεται στη συνέχεια, με τη χρήση διαφόρων μερικών συντελεστών και συντελεστών μετατροπής (partial coefficients and conversion factors). Αντίστοιχα για μεγέθη δυσκαμψίας, όπως το μέτρο ελαστικότητας και το μέτρο διάτμησης, χρησιμοποιείται η μέση τιμή των δοκιμών.

Ακολουθεί πίνακας που παρουσιάζει τις μηχανικές ιδιότητες των πλακών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του CLT ανάλογα με την κατηγορία αντοχής.

Πίνακας 3.2 Χαρακτηριστικές τιμές για ξυλεία που χρησιμοποιείται για την κατασκευή CLT (CLT handbook, 2022).

Ιδιότητες πλάκας	C14	C16	C24	C30
Χαρακτηριστικές τιμές αντοχής (MPa)				
Αντοχή σε κάμψη	14	16	24	30
Αντοχή σε εφελκυσμό κατά μήκος των ινών	7.2	8.5	14.5	19
Αντοχή σε εφελκυσμό κάθετα των ινών	0.4	0.4	0.4	0.4
Αντοχή σε θλίψη κατά μήκος των ινών	16	17	21	24
Αντοχή σε θλίψη κάθετα των ινών	2	2.2	2.5	2.7

Αντοχή σε διάτμηση	3	3.2	4	4
Τιμές δυσκαμψίας (MPa)				
Μέση τιμή μέτρου ελαστικότητας κατά μήκος των ινών	7000	8000	11000	12000
Τιμή πέμπτου εκατοστημορίου μέτρου ελαστικότητας κατά μήκος των ινών	4700	5400	7400	8000
Μέση τιμή μέτρου ελαστικότητας κάθετα των ινών	230	270	370	400
Μέση τιμή μέτρου διάτμησης	440	500	690	750
Πυκνότητα (kg/m³)				
Τιμή πέμπτου εκατοστημορίου πυκνότητας	290	310	350	380
Μέση τιμή πυκνότητας	350	370	420	460

3.2 Χρήση CLT στις Κατασκευές

Η χρήση του CLT ως δομικό υλικό στη σημερινή εποχή παρέχει σημαντικά προνόμια που διευκολύνουν την κατασκευή ενός κτιρίου. Οι μοναδικές του ιδιότητες ως υλικό σε συνδυασμό με σύγχρονες τεχνικές κατασκευής οδηγούν:

- Στην ύπαρξη της δυνατότητας προκατασκευής των κτιρίων.
- Σε στενές ανοχές κατασκευής και καλή σταθερότητα διαστάσεων.
- Σε εγγενή αντοχή στη φωτιά για καθορισμένο χρονικό διάστημα, χάρη στις θερμομονωτικές ιδιότητες της ξυλείας και στους χαμηλούς ρυθμούς εξανθράκωσης της.
- Σε χαμηλότερα κόστη μεταφοράς, συναρμολόγησης και θεμελίωσης.
- Σε ικανότητα ανοχής σε χημικά επιθετικά περιβάλλοντα.
- Καθώς και σε κτίρια υψηλών αντοχών σε σχέση με το βάρος τους.

Από την αρχιτεκτονική πλευρά, η ύπαρξη του CLT προσφέρει μια καλή εναλλακτική απέναντι στη μονοτονία των πιο κλασικών δομικών υλικών, όπως το σκυρόδεμα, ο χάλυβας και η πέτρα. Ελκυστική για τους αρχιτέκτονες είναι η δυνατότητα του ξύλου να υποστεί επεξεργασία με μεγάλη λεπτομέρεια. Εφόσον τα εξαρτήματα πρέπει να προκατασκευαστούν, ο αρχιτέκτονας έχει μεγάλη ελευθερία στο να εκφράσει τη δημιουργικότητά του. Το CLT καλλιεργεί μια νέα κουλτούρα στο εργοτάξιο με τη σύγχρονη ψηφιακή τεχνολογία να προσφέρει νέες επιλογές και υψηλά επίπεδα ακρίβειας.

Στις εικόνες 3.5 και 3.6 παρουσιάζονται παραδείγματα σύγχρονου σχεδιασμού και αρχιτεκτονικής κτιρίων από CLT.



Εικόνα 3.5 Trafalgar place apartments, Λονδίνο, Αγγλία.



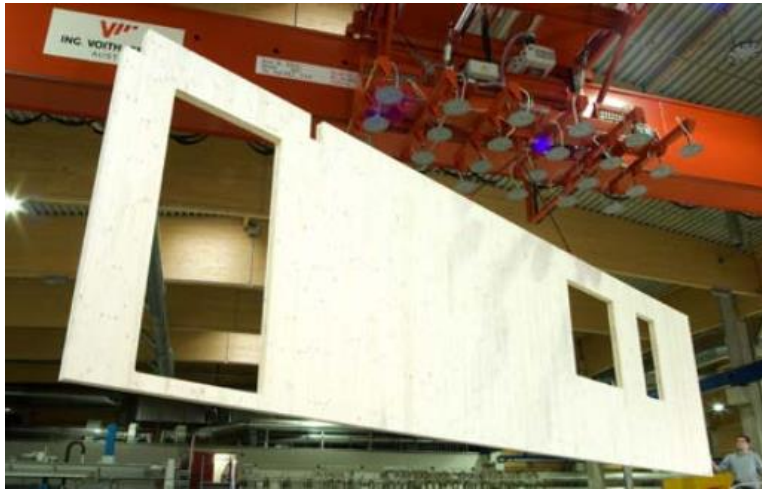
Εικόνα 3.6 Wintringham Academy, St Neots, Αγγλία.

Τα πάνελ CLT χρησιμοποιούνται στην κατασκευή τοίχων, οροφών και δαπέδων. Δομικά λειτουργούν όπως και τα στοιχεία από σκυρόδεμα, αλλά με πολύ χαμηλότερο ίδιο βάρος (CLT handbook, 2022). Το CLT ως δομικό υλικό έχει ευρεία χρήση, καθώς είναι φιλικό προς το περιβάλλον και ανακυκλώσιμο. Σε περίπτωση αποδόμησης της κατασκευής, υπάρχει η δυνατότητα, τα πάνελ να επαναχρησιμοποιηθούν ή και να καούν για παραγωγή ενέργειας.

Το χαρακτηριστικό γνώρισμα των δομικών στοιχείων από CLT – για τοίχους και δάπεδα – είναι το μέγεθός τους. Χάρη στις μεγάλες διατομές των στοιχείων CLT, μπορεί να εξασφαλισθεί υψηλή ικανότητα αντοχής φορτίων, αλλά και δυσκαμψία, καθιστώντας τα κατάλληλα για τη σταθεροποίηση του κτιρίου. Όπως προαναφέρθηκε, η δυνατότητα προκατασκευής των υλικών ξυλείας και συγκεκριμένα

των CLT επιφέρουν αξιοσημείωτα πλεονεκτήματα, διευκολύνοντας τις εργασίες εδάφους, τη μεταφορά και τη συναρμολόγηση.

Η κατασκευή ανοιγμάτων και η τοποθέτηση των στερεώσεων είναι απλή και δεν χρειάζεται υψηλή τεχνογνωσία από τους τεχνίτες. Επιπλέον καθώς μπορεί να εφαρμοστεί μονωτικό στρώμα σε όλο τον εξωτερικό τοίχο, δεν δημιουργούνται θερμογέφυρες. Για την επίτευξη καλής ηχομόνωσης σε δάπεδα και τοίχους, συνήθως απαιτείται προσθήκη πρόσθετων στρωμάτων. Στην εικόνα 3.7 παρουσιάζεται η προκατασκευή ενός τοίχου CLT, ο οποίος έχει ειδη υποστεί τις ζητούμενες κατεργασίες, με σκοπό την απευθείας χρήση του.



Εικόνα 3.7 Κατασκευή τοίχου CLT.

Το CLT είναι ιδιαίτερα χρήσιμο και σε ανακατασκευές και ανακαινίσεις κτιρίων. Το χαμηλό βάρος των πάνελ επιτρέπει την ανακατασκευή χωρίς την ενίσχυση των θεμελίων. Η μεταφορά και η ανύψωση τους στο εργοτάξιο είναι πιο εύκολη. Χρησιμοποιείται και σε κάθετες επεκτάσεις κτιρίων για τους λόγους αυτούς.

Το ξύλο είναι μερικές φορές η μόνη βιώσιμη εναλλακτική λύση σε ορισμένες τοποθεσίες, όπως σε κτίρια όπου το υλικό εκτίθεται σε επιθετικό περιβάλλον ή όπου η μηχανική φθορά είναι πολύ μεγάλη για άλλα υλικά.

Τα πάνελ CLT έχουν την ιδιαίτερη δυνατότητα να συνδυάζουν την υψηλή αντοχή σε φορτία με την ικανότητα εξατομικευμένης επεξεργασίας, πράγμα που σημαίνει ότι το προϊόν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κιγκλιδώματα σε περιβάλλοντα όπου το υλικό της επιφάνειας υπόκειται σε μεγάλη μηχανική φθορά.

Τα τελευταία χρόνια, αναπτύσσονται μέθοδοι και για χρήση του CLT σε υψηλά πολυώροφα κτίρια, εκμεταλλευόμενοι την ευελιξία του υλικού. Μια τέτοια νέα δυνατότητα είναι η χρήση στοιχείων CLT σε συνδυασμό με πυρήνα από σκυρόδεμα και δομικά υποστυλώματα σε πολύ ψηλά κτίρια, δηλαδή ένα ουρανοξύστης από ξύλο και σκυρόδεμα.(J.W.G. van de Kuilen et al, 2011). Το CLT, λοιπόν, μπορεί να αποτελέσει ανεκτίμητη εναλλακτική και σε αναπτυσσόμενες πόλεις στις οποίες υπάρχει ανάγκη για υψηλές πολυώροφες κατασκευές.

Επιπρόσθετο πλεονέκτημα της χρήσης δομικών υλικών CLT για την κατασκευή κτιρίων είναι ο αντίκτυπος που έχει στη θερμική άνεση του κτιρίου αυτού. Το εσωτερικό κλίμα ενός κτιρίου πρέπει να λειτουργεί θετικά προς τους κατοίκους. Το CLT παρέχει χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, δίνοντας μια άνετη αίσθηση στην αφή. Δεδομένου ότι υπάρχουν λίγες θερμογέφυρες (τουλάχιστον σε σύγκριση με τα παλαιότερα κτίρια) και οι ξύλινες επιφάνειες δεν επηρεάζονται σημαντικά από το κρύο, η εσωτερική θερμοκρασία μπορεί γενικά να μειωθεί κατά έως και μερικούς βαθμούς παραμένοντας άνετη (CLT handbook, 2022).

Η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα του CLT το καθιστά ισχυρό μονωτικό υλικό σε σύγκριση με τα υπόλοιπα δομικά υλικά, μειώνοντας έτσι την κατανάλωση ενέργειας από τον κλιματισμό. Η υψηλή θερμική χωρητικότητα του CLT (πίνακας 3.3), η οποία εξαρτάται από την πυκνότητα και την θερμική αγωγιμότητα του υλικού, ποσοτικοποιεί την θερμική μάζα (thermal mass) του κτιρίου. Οι επιφάνειες CLT έχουν μεγαλύτερη ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας με αποτέλεσμα τυχόν διακυμάνσεις θερμοκρασίας μέσα στη μέρα να εξομαλύνονται. Το φαινόμενο αυτό οδηγεί σε χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας και μειωμένα κόστη για τους κατοίκους.

Πίνακας 3.3 Τυπικά χαρακτηριστικά δομικών υλικών (CLT handbook, 2022).

Υλικό	Πυκνότητα(kg/m ³)	Ειδική θερμοχωρητικότητα (c) (J/kg*K)	Θερμική αγωγιμότητα (W/m*K)
CLT	500	1380	0.1
Πετροβάμβακας	10	710	0.04
Γυψοσανίδα	800	840	0.2
Τούβλο	1700	800	0.8
Σκυρόδεμα	2300	840	2

Ακολουθούν μερικές εικόνες πολύπλοκων κατασκευών από CLT.



Εικόνα 3.8 Rosersberg, Σουηδία.



Εικόνα 3.9 Elefantenpark, Ζυρίχη, Ελβετία.

3.3 Συμπεριφορά CLT κατά την Καύση

3.3.1 Αποκόλληση και Δεύτερη Καθολική Ανάφλεξη

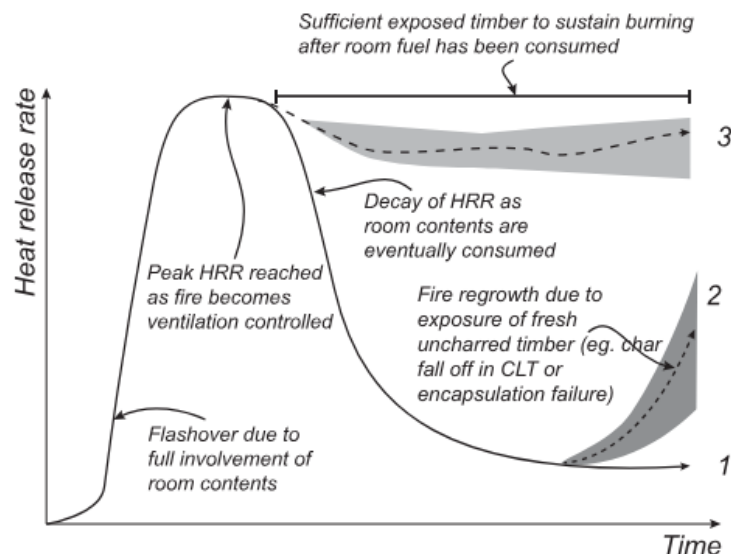
Στις παραγράφους 1.2 και 2.1 παρουσιάστηκαν με λεπτομέρεια το φαινόμενο καύσης ξυλείας και τα στάδια μιας πυρκαγιάς σε πυροδιαμέρισμα. Το CLT αποτελείται από στρώματα ξυλείας οι οποίες κολλιούνται μεταξύ τους. Το ξύλο, λοιπόν, από το οποίο συναρμολογείται ένα πάνελ CLT, συμπεριφέρεται σε περίπτωση πυρκαγιάς με τον τρόπο που έχει ήδη αναφερθεί. Κάθε στρώμα ξυλείας υφίσταται ξήρανση, πυρόλυση, έναυση της καύσης, καύση των πτητικών και καύση του εξανθρακώματος.

Μία μέθοδος προστασίας του ξύλου από την πυρκαγιά είναι η επικάλυψή του (encapsulation) με μια ή και παραπάνω στρώσεις άκαυστου υλικού. Το υλικό αυτό στη βιβλιογραφία είναι κυρίως η γυψοσανίδα, ενώ η κάθε μονή στρώση κυμαίνεται περίπου στα 12mm, όπως παρατηρείται στα πειράματα των Hadden et al, 2017, Gorska et al, 2021 και πολλών άλλων. Η επικάλυψη δεν είναι απαραίτητο να είναι πλήρης. Στην αγορά, υπάρχουν είδη γυψοσανίδας συγκεκριμένα για την χρήση αυτή,

όπως είναι το type X gypsum board. Εκτός της γυψοσανίδας μπορεί να χρησιμοποιηθούν και υλικά όπως ο πετροβάμβακας.

Μείζονος σημασίας είναι η κόλλα που θα χρησιμοποιηθεί στην παραγωγή του CLT. Η συγκολλητική ουσία, μπορεί να είναι θερμοανθεκτική ή και όχι. Η απόδοση στη φωτιά μιας συγκεκριμένης κόλλας εξαρτάται από τη χημική σύνθεση και όχι από την ομάδα συγκολλητικών ουσιών στην οποία ανήκει (CLT handbook, 2022). Συγκολλητικές ουσίες ανθεκτικές στη θερμότητα (δηλ. χωρίς αποκόλληση) είναι κυρίως φαινολικές και αμινοπλαστικές κόλλες, αλλά διατίθενται πλέον και κάποιες κόλλες πολυουρεθάνης. Όμως, η χρήση θερμοανθεκτικών κολλών δεν είναι καθιερωμένη από τους παραγωγούς CLT και εφόσον απαιτείται, πρέπει να επαληθεύεται από τον χρήστη ότι όντως το εκάστοτε προϊόν παράγεται με την κατάλληλη κόλλα.

Σε περιπτώσεις που δεν χρησιμοποιείται κόλλα με την κατάλληλη χημική σύνθεση, στις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται σε διαμέρισμα υπό πυρκαγιά, η σταυρωτή επικολλητή ξυλεία CLT μπορεί να παρουσιάσει αποκόλληση των εξανθρακωμένων στρωμάτων. Ορισμένες δοκιμές πυρκαγιών μεγάλης κλίμακας με πυροδιαμερίσματα με δάπεδο και οροφή, CLT έδειξαν ότι η αστοχία της συγκόλλησης με τη χρήση ορισμένων θερμοπλαστικών συγκολλητικών ουσιών μπορεί να οδηγήσει σε πτώση των εκτεθειμένων στη φωτιά στρώσεων, προσθέτοντας πρόσθετη καύσιμη ύλη σε μια πυρκαγιά σε σβέση, προκαλώντας μια δεύτερη αναζωπύρωση και εξαλείφοντας τη δυνατότητα σβέσης της πυρκαγιάς (Brandon & Dagenais, 2018). Ουσιαστικά συμβαίνει μια δεύτερη καθολική ανάφλεξη καθώς προστίθεται νέο καύσιμο, το οποίο προηγουμένως δεν είχε επαφή με την φωτιά.



Εικόνα 3.10 Διάγραμμα παραγωγής θερμότητας-χρόνου για πιθανά σενάρια πυρκαγιάς σε πυροδιαμέρισμα με και χωρίς CLT, Barber et al. (2021) .

Το σχήμα 3.10 απεικονίζει πιθανές καμπύλες ανάπτυξης πυρκαγιάς για διαφορετικές ποσότητες εκτεθειμένου ξύλου (Barber et al., 2021). Η καμπύλη 1 αντιπροσωπεύει τις τυπικές περιπτώσεις φωτιάς σε διαμερίσματα όπου οι επιφάνειες του δωματίου

είναι άκαυστες ή αν υπάρχει ξυλεία, είναι επικαλυμμένη. Μόλις το καύσιμο υλικό καταναλωθεί, το στάδιο της σβέσης είναι σταθερό και προβλέψιμο. Σε περιπτώσεις με κάποιο εκτεθειμένο ξύλο, μπορεί να υπάρξει σβέση, αλλά στη συνέχεια η φωτιά μπορεί να αναγεννηθεί, λόγω πιθανής αστοχίας της κόλλας του CLT (πτώση στρώματος άνθρακα) ή την αποτυχία οποιουδήποτε προστατευτικής στρώσης του CLT (καμπύλη 2) (Buchanan, 2022). Η καμπύλη 3 αναπαριστά τις περιπτώσεις όπου για μεγάλες ποσότητες ξύλου ή περιοχές ξύλου εκτεθειμένες μεταξύ τους που προάγουν την επανα-ακτινοβολία, το στάδιο της σβέσης παραλείπεται. Το δωμάτιο θα συνεχίσει να καίγεται παρόλο που το περιεχόμενο του μπορεί να έχει καεί πλήρως.

Πιο αναλυτικά για τις συνδετικές κόλλες, παραδοσιακά εύχρηστες είναι οι κόλες φαινολικής ρεσορκινόλης-φορμαλδεΰδης (RF/PRF). Συνδυάζουν κατάλληλα δομικά χαρακτηριστικά, μακροπρόθεσμη αντοχή και αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες. Πιο πρόσφατα, έχουν διαδοθεί νεότεροι τύποι συγκολλητικών όπως η μελαμίνη-(ουρία)-φορμαλδεΰδη (MF/MUF), ισοκυανικό πολυμερές γαλάκτωμα (EPI) και πολυουρεθάνη (PUR). Υπερτερούν των RF/PRF, με χαμηλότερο κόστος παραγωγής μικρότερους χρόνους σκλήρυνσης και την ικανότητα πλήρωσης κενών. Όμως, κάποιες από τις παραπάνω ουσίες δεν παρουσιάζουν καλή αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες που προκύπτουν σε μια πυρκαγιά και η χρήση τους μπορεί να οδηγήσει στο φαινόμενο που ήδη αναφέρθηκε, μια δεύτερη καθολική ανάφλεξη. Χαμηλή αντοχή στη φωτιά παρουσιάζουν επίσης και οι συνδετικές κόλλες πολυουρεθάνης ενός συστατικού (1C-PUR), οι οποίες μαλακώνουν σε θερμοκρασίες πριν από την εξανθράκωση της ξυλείας.

Οι νεότερες πιο ανθεκτικές στη θερμοκρασία συνδετικές κόλλες βρίσκονται υπό ενεργή ανάπτυξη, κυρίως λόγω επικείμενων αλλαγών στους κώδικες για τη χρήση CLT στη Βόρεια Αμερική που απαιτούν συμμόρφωση με το ANSI PRG 320-18. Στην Ευρώπη, η επόμενη έκδοση του Ευρωκώδικα 5 (prEN 1995-1-2, 2021) θα περιέχει μια μέθοδο για τον ποσοτικό προσδιορισμό της ακεραιότητας σε πυρκαγιά της συγκολλητικής στρώσης ενός συγκολλημένου προϊόντος ξυλείας (Buchanan, 2022).

4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Οι συχνότερες πειραματικές μελέτες πάνω στο CLT, αφορούν τη χρήση ενός πυροδιαμερίσματος, στο οποίο οι τοίχοι και η οροφή πιθανώς να είναι κατασκευασμένοι από CLT. Ανάλογα με το αντικείμενο της εκάστοτε μελέτης, σκοπός μπορεί να είναι η σύγκριση αποτελεσμάτων για πυροδιαμερίσματα που διαφέρουν στο ποιες πλευρές είναι κατασκευασμένες από CLT (Hadden et al, 2017, Gorska et al, 2021, και λοιπών), η σύγκριση CLT με διαφορετικά πάχη στρώσεων (Crielaard et al, 2019) ή και η σύγκριση CLT κατασκευασμένα με διαφορετικές κόλλες (Hopkin et al, 2022).

Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 9705 ως πραγματική κλίμακα παρουσιάζεται ένα πυροδιαμέρισμα με τυποποιημένες εσωτερικές διαστάσεις: μήκος 3,6m, πλάτος 2,4m και ύψος 2,4m περιλαμβάνοντας επίσης ένα άνοιγμα (πόρτα) με διαστάσεις 0,80m πλάτος και 2,00m ύψος.

Στη βιβλιογραφική ανασκόπηση παρατηρήθηκε πως κάθε εργαστηριακή ομάδα αναλόγως με το σκοπό της έρευνας, κατασκευάζει το αντίστοιχο της πυροδιαμέρισμα με εξατομικευμένες διαστάσεις. Με στόχο την ομαδοποίηση των πειραμάτων για την σύγκριση των αποτελεσμάτων, μελέτες μεγάλης κλίμακας θα θεωρηθούν πυροδιαμερίσματα με διαστάσεις σχετικά κοντινές ή μεγαλύτερες με αυτές του προτύπου, ενώ μελέτες μικρής κλίμακας θα θεωρηθούν μελέτες μόνο με αρκετά μικρότερες διαστάσεις.

Τα μετρούμενα μεγέθη κατά κύριο λόγο είναι οι θερμοκρασίες αέρα μέσα στο πυροδιαμέρισμα, ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας και οι θερμοκρασίες τοπικά στο CLT. Μερικές εργαστηριακές ομάδες μετρούν επιπλέον τις ταχύτητες του αέρα στο άνοιγμα, τη ροή θερμότητας και τον ρυθμό απώλειας μάζας, όμως τα δεδομένα αυτά πολλές φορές δεν δίνονται στα αντίστοιχα άρθρα.

4.1 Πειραματικές μελέτες μικρής κλίμακας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι πειραματικές μελέτες μεγάλης κλίμακας αν και προτιμότερες, για διάφορους παράγοντες, όπως το κόστος και χρονικοί περιορισμοί, δεν μπορούν πάντα να υλοποιηθούν, με αποτέλεσμα οι ερευνητές να οδηγούνται προς την υλοποίηση πειραμάτων υπό κλίμακα.

Επάνω στο αντικείμενο του CLT, ο αριθμός των πειραματικών μελετών μικρής κλίμακας είναι χαμηλός, αλλά επαρκής για την εξαγωγή χρήσιμων δεδομένων προς τη διεύρυνση των γνώσεων της επιστημονικής κοινότητας.

Οι Gorska et al, 2021 και Crielaard et al, 2019 στις αντίστοιχες μελέτες, εξετάζουν περιπτώσεις με διαφορετική επιφάνεια CLT εκτεθειμένη στη φωτιά, είτε προστατεύοντας τις υπόλοιπες επιφάνειες με επικαλύψεις είτε εναλλάσσοντας το CLT με πλάκες κατασκευασμένες από άκαυστο υλικό. Επιπλέον οι Crielaard et al, 2019 σε

ένα πείραμα χρησιμοποιούν CLT με μεγαλύτερου πάχους εξωτερικές στρώσεις. Οι Nothard et al, 2022, μελετούν την αλλαγή που προκαλεί η ύπαρξη δοκών στην μέση και στην άκρη του πυροδιαμερίσματος (edge and middle beams). Ο επόμενος πίνακας παρουσιάζει μια σύνοψη των πειραμάτων.

Πίνακας 4.1: Σύνοψη των πειραμάτων μικρής κλίμακας.

Τίτλος	Συγγραφείς	Διαστάσεις Διαμερίσματος (ΠxΜxΥ)(m)	Διαστάσεις Ανοίγματος (ΠxΥ)(m)	Λεπτομέρειες
Self-extinguishment of cross-laminated timber	Roy Crielaard, Jan-Willem van de Kuilen, Karel Terwel, Geert Ravenshorst, Pascal Steenbakkers	0,5x0,5x0,5	0,18x0,5	Πέντε πειράματα με διαφορετική εκτεθειμένη επιφάνεια CLT ή μεγαλύτερου πάχους lamella.
Fire dynamics in mass timber compartments	Carmen Gorska , Juan P. Hidalgo , Jose L. Torero	0,5x0,5x0,37	0,3x0,28	Οκτώ πειράματα με διαφορετική εκτεθειμένη επιφάνεια, το ένα με χωρίς επιφάνεια CLT.
Factors influencing the fire dynamics in open-plan compartments with an exposed timber ceiling	Sam Nothard, David Lange, Juan P. Hidalgo, Vinny Gupta, Martyn S. McLaggan, Felix Wiesner, Jose L. Torero	2,22x0,8x0,4	2,2x0,4 ή 2,2x0,33	Τρία πειράματα με σταθερή επιφάνεια CLT, το ταβάνι. Ύπαρξη δοκών στο δεύτερο και το τρίτο πείραμα, με μικρότερο άνοιγμα. Τρία πειράματα χωρίς CLT.

Στην εικόνα 4.1 παρατηρείται το πείραμα των Crielaard et al 2019 με τρεις τοίχους από CLT.



Εικόνα 4.1 Πείραμα με 3 CLT τοίχους, Crielaard et al 2019

Παρατηρήθηκε πως, παρόλο που το CLT συνεισφέρει σημαντικά στην αύξηση του συνολικού ρυθμού έκλυσης θερμότητας στη φωτιά, αύξηση της εκτεθειμένης επιφάνειας CLT δεν σημαίνει απαραίτητα μεγαλύτερες θερμοκρασίες μέσα στο πυροδιαμέρισμα (Gorska et al, 2021, Crielaard et al, 2019).

Οι Gorska et al, 2021 παρατήρησαν πως καθώς απελευθερώνονται αέρια πυρόλυσης η φωτιά από υπέρ-αεριζόμενη (fuel controlled) μεταβαίνει σε υπό-αεριζόμενη (ventilation controlled). Η μετάβαση αυτή προκαλεί χαμηλότερο ρυθμό καύσης του ξύλου της οροφής σε σύγκριση με τις άλλες εκτεθειμένες ξύλινες επιφάνειες. Επομένως, εάν πρόκειται να εκτεθούν ξύλινες επιφάνειες σε ένα διαμέρισμα, η έκθεση της οροφής οδηγεί στην ασφαλέστερη επιλογή για το σχεδιασμό. Το φαινόμενο αυτό υποδηλώνει ότι η έκθεση της ξυλείας δεν είναι συνάρτηση της εκτεθειμένης επιφάνειας ξυλείας αφού ανάλογα με τη θέση του (οροφή έναντι κάθετου τοίχου) ο ρυθμός καύσης αλλάζει (Gorska et al, 2021).

Σύμφωνα με τα συμπεράσματα των Nothard et al, 2022, η θερμική αδράνεια των υλικών της οροφής παρατηρείται ότι επηρεάζει τους ρυθμούς εξάπλωσης της φλόγας. Υψηλότερα ποσοστά εξάπλωσης παρατηρούνται στις δοκιμές μη εύφλεκτων υλικών ωστόσο, μόλις η οροφή CLT οροφή αναφλέγεται, ο ρυθμός εξάπλωσης της φλόγας σε αυτές τις δοκιμές αυξάνεται σημαντικά σε σύγκριση με τα πειράματα χωρίς φλεγόμενα υλικά.

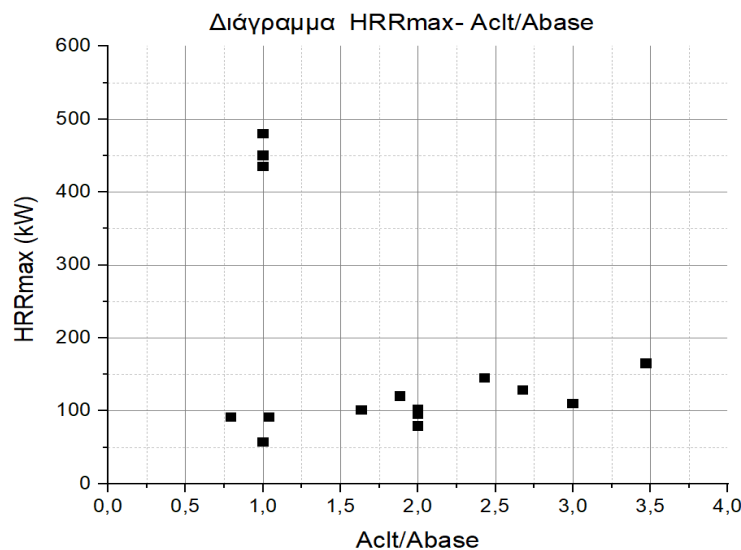
Ενδιαφέρον είχε η πειραματική μελέτη των Crielaard et al, 2019, η οποίοι επικεντρώθηκαν στην πιθανή σβέση του CLT, στη αποκόλληση των στρωμάτων και στην δεύτερη καθολική ανάφλεξη που μπορεί να συμβεί, όπως αναφέρεται στην παράγραφο 3.3. Παρατηρήθηκε αποκόλληση, όπως φαίνεται στη εικόνα 4.2, σε κάθε πείραμα εκτός του μοναδικού στο οποίο χρησιμοποιήθηκε CLT με εξωτερικές lamellae πάχους 40mm. Από τα πειράματα στα οποία υπήρχε αποκόλληση, το ένα οδηγήθηκε ξανά σε καθολική ανάφλεξη και χρειάστηκε σβέση με ανθρώπινη επέμβαση. Σβέση με ανθρώπινη επέμβαση χρειάστηκε και το πείραμα με τη μεγαλύτερη επιφάνεια εκτεθειμένου CLT (3 τοίχοι CLT).



Εικόνα 4.2 Αποκόλληση lamella μέχρι και στο πέμπτο στρώμα, Crielaard et al 2019

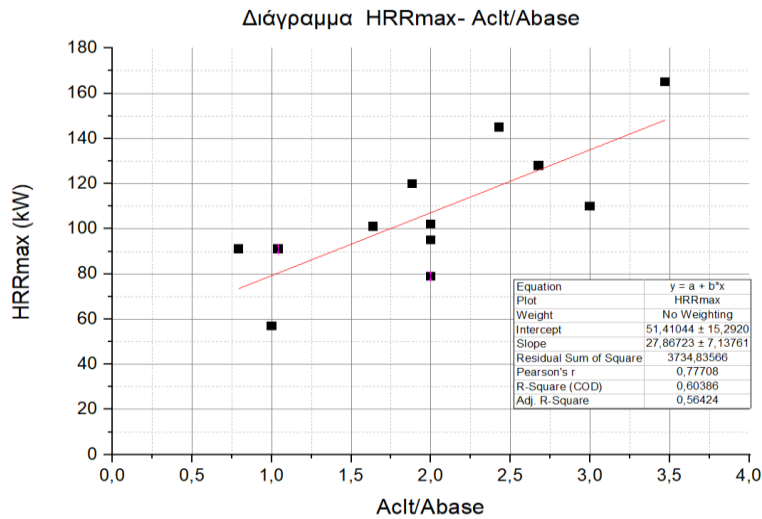
Η φυσική σβέση του CLT ακολουθεί διάφορες φάσεις. Μόλις το περιεχόμενο του δωματίου έχει καταναλωθεί σε μεγάλο βαθμό και η αρχική πυρκαγιά εξασθενεί, η συνεισφορά του CLT αναμένεται να μειωθεί, η φωτιά μετατρέπεται σε υφέρπουσα φλόγα. Υπάρχει η δυνατότητα φυσικής σβέσης του CLT που σιγοκαίει εάν η ροή θερμότητας που δέχεται το CLT είναι κάτω από $5-6 \text{ kW/m}^2$ και η ροή του αέρα πάνω από την επιφάνεια περιορίζεται σε ταχύτητα $0,5 \text{ m/s}$ για θερμικές ροές κάτω από 6 kW/m^2 . Η πτώση των εξανθρακωμένων πλακών-lamellae του CLT μπορεί να διατηρήσει την πλήρως ανεπτυγμένη φωτιά ή να μετατρέψει την υφέρπουσα φλόγα σε πλήρως ανεπτυγμένη φωτιά. Αυτό εμποδίζει το CLT να φτάσει σε κατάσταση σβέσης φυσικά. Η αποκόλληση αυτή μπορεί να αποτραπεί αυξάνοντας το πάχος του εξωτερικού lamella. Έτσι εξασφαλίζεται ότι η εξανθράκωση δεν φτάνει στην κόλλα πολυουρεθάνης, γεγονός που θα είχε ως αποτέλεσμα την απώλεια της συγκόλλησης. (Crielaard et al, 2019).

Ακολουθούν διαγράμματα τα οποία συσχετίζουν την μέγιστη θερμοκρασία αερίων και τον μέγιστο ρυθμό έκλυσης θερμότητας προς την ανηγμένη επιφάνεια εκτεθειμένου CLT, δηλαδή στην περίπτωση αυτή, την επιφάνεια εκτεθειμένου CLT διαιρούμενη με το εμβαδό του δαπέδου του εκάστοτε πυροδιαμερίσματος.



Διάγραμμα 4.1 Διάγραμμα μέγιστου ρυθμού έκλυσης θερμότητας προς την ανηγμένη επιφάνεια εκτεθειμένου CLT, για πειράματα μικρής κλίμακας.

Τα τρία σημεία με πολύ υψηλότερα HRR_{max} ανήκουν στην έρευνα των Nothard et al, 2022, στην οποία το πυροδιαμέρισμα αν και μικρής κλίμακας λόγω του πολύ χαμηλού ύψους, ήταν πάλι αρκετά μεγαλύτερο σε σχέση με τα υπόλοιπα, οδηγώντας σε περισσότερο CLT και σε υψηλότερα HRR γενικώς. Αφαιρώντας τα 3 σημεία, και με τη βοήθεια του προγράμματος Origin, προσδιορίζεται συνάρτηση των δύο μεγεθών που ίσως μπορεί να εφαρμοστεί προσεγγιστικά σε πυροδιαμερίσματα παρομοίων διαστάσεων (κοντά στο 0,5x0,5x0,5).

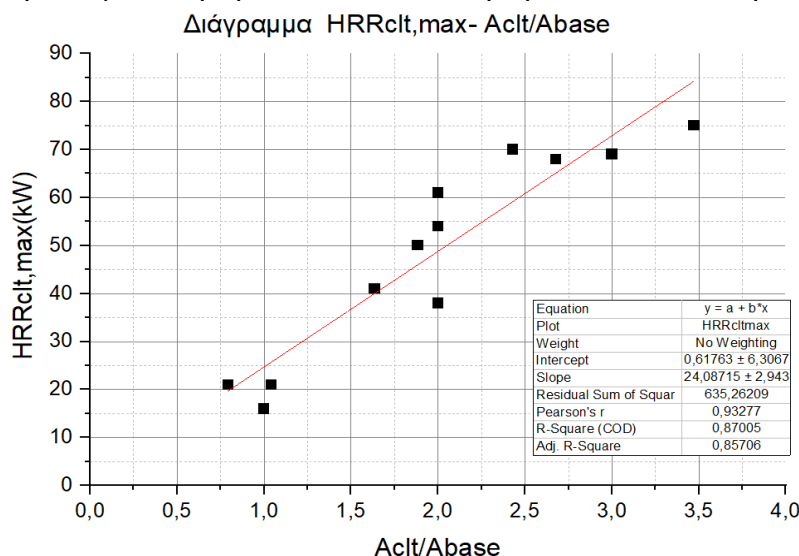


Διάγραμμα 4.2 Διορθωμένο διάγραμμα μέγιστου ρυθμού έκλυσης θερμότητας προς την ανηγμένη επιφάνεια εκτεθειμένου CLT, για πειράματα μικρής κλίμακας. Η εξίσωση που προκύπτει είναι η εξής:

$$HRR_{max}(kW) = 27,867 * \frac{A_{clt}}{A_{base}} + 51.41 \quad (4.1)$$

Η εξίσωση 4.1 σαφώς και δεν λαμβάνει υπόψιν μεταβλητές όπως, το πάχος του εκάστοτε CLT και την πηγή φωτιάς σε κάθε πείραμα.

Οι ερευνητικές ομάδες στα άρθρα δίνουν και το μέγιστο HRR καθαρά του CLT.

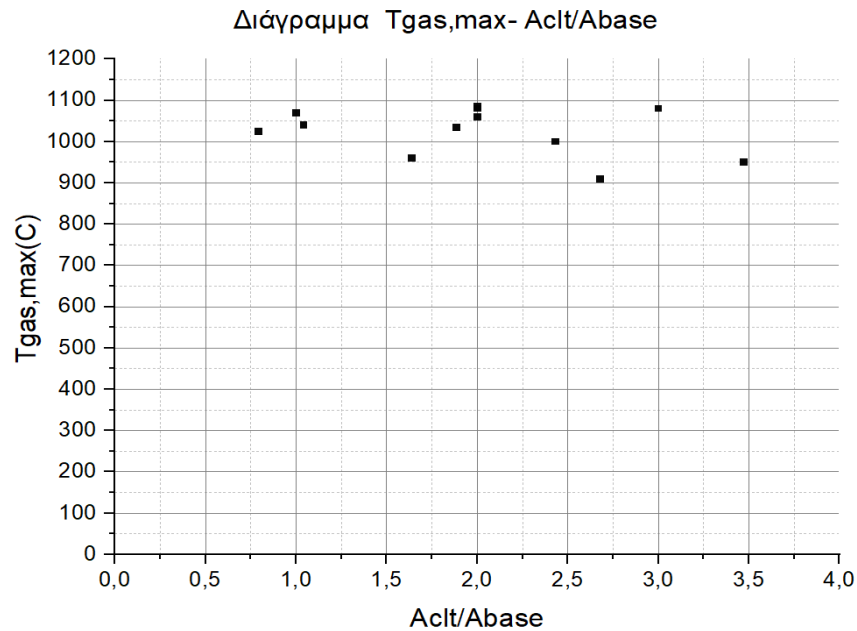


Διάγραμμα 4.3 Διάγραμμα μέγιστου ρυθμού έκλυσης θερμότητας από το CLT προς την ανηγμένη επιφάνεια εκτεθειμένου CLT, για πειράματα μικρής κλίμακας.

Η εξίσωση που προκύπτει είναι η εξής:

$$HRR_{cltmax}(kW) = 24,087 * \frac{A_{clt}}{A_{base}} + 0.6176 \quad (4.2)$$

Η εξίσωση 4.2 έχει τους ίδιους περιορισμούς με την 4.1 και μπορεί να εφαρμοστεί προσεγγιστικά σε πυροδιαμερίσματα παρομοίων διαστάσεων (κοντά στο 0,5x0,5x0,5).



Διάγραμμα 4.4 Διάγραμμα μέγιστης θερμοκρασίας αερίων προς την ανηγμένη επιφάνεια εκτεθειμένου CLT, για πειράματα μικρής κλίμακας.

Από το διάγραμμα θερμοκρασίας, δεν υπάρχει ανάγκη εύρεσης κάποιας σχέσης μεταξύ των μεγεθών. Οι θερμοκρασίες κυμαίνονται από 900-1100 βαθμούς Κελσίου. Οι Nothard et al δεν παρουσίαζαν στο άρθρο τους μέγιστες τιμές θερμοκρασιών αερίων. Επιβεβαιώνεται το συμπέρασμα ότι περισσότερη επιφάνεια CLT δεν οδηγεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες.

4.2 Πειραματικές μελέτες πλήρους κλίμακας

Οι πειραματικές μελέτες πλήρους κλίμακας προσφέρουν αποτελέσματα κοντά στην πραγματικότητα και για τον λόγο αυτό είναι προτιμότερες. Ο αριθμός των πειραμάτων ήταν αρκετά μεγαλύτερος σε σχέση με μελέτες μικρής κλίμακας. Οι περισσότερες ομάδες επικεντρώθηκαν στην προσθήκη περισσότερου εκτεθειμένου CLT για το ίδιο πυροδιαμέρισμα (πάλι είτε προστατεύοντας τις υπόλοιπες επιφάνειες με επικαλύψεις είτε εναλλάσσοντας το CLT με πλάκες κατασκευασμένες από άκαυστο υλικό) (Hadden et al, 2017, Medina Hevia, 2014, Xiao Li et al, 2016, Pope et al, 2023). Οι McNamee et al, 2019, μελέτησαν 3 διαφορετικά ανοίγματα για το ίδιο διαμέρισμα με την ίδια επιφάνεια εκτεθειμένου CLT, ενώ ενδιαφέρουσα ήταν η έρευνα των Horikin et al, 2022, όπου χρησιμοποίησαν CLT από 3 διαφορετικές κόλλες πολυουρεθάνης PUR.

Πίνακας 4.2: Σύνοψη των πειραμάτων πλήρους κλίμακας.

Τίτλος	Συγγραφείς	Διαστάσεις Διαμερίσματος (ΠxΜxΥ)(m)	Διαστάσεις Ανοίγματος (ΠxΥ)(m)	Λεπτομέρειες
Effects of exposed cross laminated timber on compartment fire dynamics	R.M. Hadden, A.I. Bartlett, J.P. Hidalgo, S. Santamaria, F. Wiesner, L.A. Bisby, S. Deeny, B. Lane	2,72x2,72x2,77	1,84x0,76	Πέντε πειράματα. Τρεις περιπτώσεις διαφορετικής εκτεθειμένης επιφάνειας CLT.
Enclosure fire dynamics with a cross-laminated timber ceiling	Robert McNamee Jochen Zehfuss Alastair I. Bartlett Mohammad Heidari Fabienne Robert Luke A. Bisby	4x6x2,52	2 των 2,5x2 ή 3 των 1,25x1,2 ή 1,1x2	Έξι πειράματα. Τρία με CLT οροφή, τρία με σκυρόδεμα.

Description of small and large-scale cross laminated timber fire tests	Richard Emberley, Carmen Gorska Putynska, Aaron Bolanos, Andrea Lucherini, Angela Solarte, Diana Soriguer, Mateo Gutierrez Gonzalez, Kathryn Humphreys, Juan P. Hidalgo, Cristian Maluk, Angus Law, Jose L. Torero	3,5x3,5x2,7	0,85x2,1	Ένα πείραμα, το πυροδιαμέρισμα είχε και κάθετη πρόσοψη.
CONTRIBUTION OF CROSS LAMINATED TIMBER PANELS TO ROOM FIRES	Cameron McGregor, George Hadjisophocleous, Steven Craft	3,5x4,5x2,5	1,07x2	Δύο πειράματα με εκτεθειμένο CLT, ένα με προπάνιο και ένα με έπιπλα. Τρία με επικαλυμμένο CLT.
Large-Scale Enclosure Fire Experiments Adopting CLT Slabs with Different Types of Polyurethane Adhesives: Genesis and Preliminary Findings	Danny Hopkin, Wojciech Wegrzynski, Michael Spearpoint, Ian Fu, Harald Krenn, Tim Sleik, Carmen Gorska and Gordian Stapf	3,75x7,6x2,4	7,6x2	Δύο πειράματα με διαφορετικού τύπου κόλλα PUR. Στο ένα οι άκρες των στρωμάτων δεν είχαν επικολληθεί. Επιπλέον πείραμα με προστατευμένο CLT.
FIRE RESISTANCE OF PARTIALLY PROTECTED CROSS-LAMINATED TIMBER ROOMS	ALEJANDRO R. MEDINA HEVIA	3,5x4,5x2,5	1,069x2	Τρία πειράματα με διαφορετική εκτεθειμένη επιφάνεια CLT.

REAL-SCALE FIRE TESTS ON TIMBER CONSTRUCTIONS	Xiao Li, Cameron McGregor, Alejandro Medina, Xiaoqian Sun, David Barber, George Hadjisophocleous	3,5x4,5x2,5	1,1x2	Δύο πειράματα με προπάνιο και πέντε με έπιπλα. Από τα επτά τα δύο ήταν με πλήρως προστατευμένο CLT. Τρία επιπλέον πειράματα με άλλου είδους ξυλεία.
Fully developed compartment fire dynamics in large-scale mass timber compartments	Ian Pope, Vinny Gupta, Hangyu Xu, Felix Wiesner, David Lange, José L. Torero, Juan P. Hidalgo	3,15x3,15x2,7	0,85x2,1	Τρία πειράματα CLT με δύο περιπτώσεις διαφορετικής εκτεθειμένης επιφάνειας CLT. Επιπλέον δύο με πλήρως προστατευμένη επιφάνεια CLT.

Τιμητική αναφορά πρέπει να δοθεί στην ομάδα των McGregor et al, 2013, για την εξαγωγή μιας από τις πρώτες ερευνητικές μελέτες χρήσης CLT υπό φωτιά σε πυροδιαμέρισμα παγκοσμίως. Μελετώντας ένα πυροδιαμέρισμα μεγάλης κλίμακας με CLT στους τοίχους και στην οροφή, πειραματίστηκαν με δύο είδους καυσίμων, ενώ στα πειράματα τους δοκίμασαν περιπτώσεις όπου το CLT ήταν πλήρως επικαλυμμένο. Τα συμπεράσματα στα οποία κατέληξαν υπήρξαν η βάση για τις υπόλοιπες ομάδες, ώστε να μπορούν να εμβαθύνουν και να διευρύνουν τις γνώσεις της επιστημονικής κοινότητας στον τομέα.

Σύμφωνα με τους McGregor et al, 2013 η ύπαρξη εκτεθειμένου CLT οδηγεί στην αύξηση των ρυθμών ανάπτυξης της πυρκαγιάς, δηλαδή στην επιτάχυνση των φαινομένων που χαρακτηρίζουν μια πυρκαγιά. Τα φαινόμενα αυτά δεν παρατηρήθηκαν στο επικαλυμμένο CLT (encapsulated). Ταυτόχρονα υπήρχε αύξηση των φορτίων πυρκαγιάς, του συνολικού ρυθμού έκλυσης θερμότητας και της παραγωγής πτητικών ουσιών και καπνού. Μετά την αρχική ανάφλεξη/εμπλοκή του CLT, τα πειράματα με εκτεθειμένο CLT παρήγαγαν μέγιστο HRR που ήταν έως και τρεις φορές μεγαλύτερο από εκείνο με επένδυση γυψοσανίδας (Hopkin et al, 2022). Ίδια συμπεριφορά εμφανίστηκε και στα πειράματα του Medina Hevia, 2014, όπου ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας κατά τη διάρκεια των δοκιμών με δύο εκτεθειμένα τοιχώματα ήταν πολύ μεγαλύτερος από τον ρυθμό έκλυσης θερμότητας της δοκιμής με ένα μόνο εκτεθειμένο τοίχωμα. Μάλιστα, το HRR ήταν μεγαλύτερο για απροστάτευτους απέναντι τοίχους σε σχέση με απροστάτευτους τοίχους που ήταν δίπλα ο ένας στον άλλο.

Οι θερμοκρασίες των διαμερισμάτων δεν διαφέρουν ουσιαστικά από εκείνες που προβλέπονταν από τους υπάρχοντες συσχετισμούς, υποδηλώνοντας ότι οι εκτεθειμένες ξύλινες επιφάνειες έχουν μικρή μόνο επιρροή στις θερμοκρασίες του διαμερίσματος. Ωστόσο, ο συνολικός ρυθμός έκλυσης θερμότητας βρέθηκε ότι ήταν υψηλότερος από ό,τι προβλεπόταν με τη χρήση των υφιστάμενων μεθοδολογιών που αναπτύχθηκαν για διαμερίσματα με αδρανή επένδυση και φορτία καυσίμου που βρίσκονται στο δάπεδο (Hadden et al, 2017).

Παρόμοια φαινόμενα παρατήρησαν και οι Xiao Li et al, 2016 όπου τα δωμάτια με εκτεθειμένα πάνελ CLT είχαν διπλάσια παραγωγή ενέργειας. Διαπιστώθηκε ότι στην πλήρως αναπτυγμένη περίοδο της πυρκαγιάς μεγάλο μέρος της συνολικής έκλυσης θερμότητας (πάνω από 75%) παράχθηκε από εξωτερική καύση, ενώ στα πλήρως προστατευμένα δωμάτια επικρατούσαν ελαφρώς υπο-αεριζόμενες συνθήκες καύσης και το μεγαλύτερο μέρος της καύσης συνέβη στο εσωτερικό του δωματίου. Επιπλέον, ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας κατά τη διάρκεια των δοκιμών με δύο τοίχους εκτεθειμένους ήταν πολύ μεγαλύτερος από αυτόν για ένα μόνο τοίχο.

Σε περιπτώσεις παρατεταμένης έκθεσης όπου σημειώθηκε αποκόλληση, αυξήθηκε η ένταση και διάρκεια της πυρκαγιάς, η οποία θα μπορούσε δυνητικά να οδηγήσει σε δομική αστοχία (McGregor et al, 2013). Αποκόλληση του εξανθρακώματος που εκθέτει τη νωπή ξυλεία στις υψηλές ροές θερμότητας στο εσωτερικό του διαμερίσματος επιτρέπει την ταχεία πυρόλυση και την αύξηση του HRR. Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας και η φυσική σβέση θα γίνουν στη συνέχεια συνάρτηση της επιφάνειας αποκόλλησης και του πάχους των πλακών (Hadden et al, 2017). Στη μελέτη των Emberley et al, 2017, σημειώθηκε πως εάν αποτραπεί η αποκόλληση, μπορεί να επέλθει φυσική σβέση σε ένα διαμέρισμα με εκτεθειμένο CLT σε τοίχο και οροφή. Στο πείραμά τους η σβέση του τοίχου και της οροφής από CLT συνέβη όταν η μέγιστη προσπίπτουσα ροή θερμότητας μειώθηκε κάτω από 45 kW/m². Η σβέση ξεκίνησε από την βάση της εκτεθειμένης επιφάνειας και κατέληξε στην οροφή.

Όπου η εξανθράκωση προκάλεσε αποκόλληση των πάνελ CLT, οι ρυθμοί έκλυσης θερμότητας αυξήθηκαν παρατείνοντας τη διάρκεια της πυρκαγιάς στο δωμάτιο (Xiao Li et al, 2016). Η αποκόλληση των πάνελ CLT παρέχει καύσιμη ύλη στη φωτιά, καθώς αποκαλύπτει άκαυστο ξύλο, το οποίο θα μπορούσε να οδηγήσει σε αναζωπύρωση του δωματίου. Στα πειράματα των Xiao Li, 2016, πρόωρη αποκόλληση των στρώσεων CLT εμφανίστηκε στις δοκιμές του πλήρως απροστάτευτου δωματίου και σε δύο δωμάτια με 2 απροστάτευτους τοίχους. Μερική αποκόλληση του πρώτου στρώματος της εκτεθειμένης πλευράς του πάνελ CLT εμφανίστηκε και στην μελέτη των Hadden et al, 2017 σε πείραμα με εκτεθειμένο τον πίσω τοίχο και την οροφή. Δεν συνέβη όμως δομική αστοχία.

Δοκιμές των μερικώς προστατευμένων δωματίων CLT έδειξαν ότι ένα ορισμένο ποσοστό της εσωτερικής επιφάνειας του δωματίου μπορεί να παραμείνει απροστάτευτο χωρίς να αυξηθεί ο κίνδυνος εξάπλωσης της πυρκαγιάς ή να αυξηθεί η ένταση της πυρκαγιάς (Xiao Li et al, 2016). Για πείραμα όπου η απροστάτευτη επιφάνεια CLT ήταν το 29,7% του συνολικού εμβαδού των τοιχωμάτων, η φωτιά συμπεριφέρθηκε όμοια με φωτιά σε πλήρως προστατευμένο δωμάτιο. Παρομοίως, το πείραμα με έναν απροστάτευτο τοίχο του Medina Hevia, 2014 έσβησε φυσικά και η

πυρκαγιά είχε συμπεριφορά που έμοιαζε με το πείραμα με πλήρως προστατευμένο δωμάτιο των McGregor et al, 2013.

Διαπιστώθηκε ότι η επικάλυψη με γυψοσανίδα βελτιώνει σημαντικά την απόδοση των πάνελ CLT στη φωτιά. Δύο στρώσεις προστασίας από πυρίμαχες γυψοσανίδες 12,7mm, θα μπορούσαν να παρέχουν καθυστέρηση της έναρξης εξανθράκωσης του CLT κατά περισσότερα από 40 λεπτά. Οι γυψοσανίδες έδειξαν ανεπαρκή προστασία των πάνελ CLT οροφής, όπου διαπιστώθηκαν σοβαρές ζημιές στις περιοχές που βρίσκονταν ακριβώς πάνω από τη φωτιά. Μια άλλη διαπίστωση είναι ότι η πτώση των γυψοσανίδων συνήθως δεν συνέβαινε ταυτόχρονα με την αστοχία τους (τη στιγμή που τελείωνε η διαδικασία αφυδάτωσης του γύψου), αλλά πολύ αργότερα κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς. Παρ' όλα αυτά, οι γυψοσανίδες είχαν χάσει το μεγαλύτερο μέρος της μονωτικής τους ικανότητας μετά την αφυδάτωσή τους. (Xiao Li et al, 2016).

Ιδιαίτερο φαινόμενο στην ερευνητική μελέτη των Hadden et al, 2017, παρατηρήθηκε αστοχία της επικάλυψης (encapsulation) (δύο στρώσεις γυψοσανίδας τύπου F από 12,5mm) σε τέτοιο βαθμό, όπου σε πείραμα όπου το ταβάνι και ο ένας πλάγιος τοίχος είχαν αρχικά επικαλυφθεί, εν τελεί εκτέθηκαν πλήρως στη φωτιά. Στα επόμενα πειράματα ενισχύθηκε η επικάλυψη γυψοσανίδας και με επιπλέον στρώσεις γυψοσανίδας και πετροβάμβακα.

Η μελέτη των Pope et al, 2023, επικεντρώθηκε στο ροϊκό πεδίο που δημιουργείται στο πυροδιαμέρισμα υπό πυρκαγιά και στην επιρροή της αύξησης της επιφάνειας της εκτεθειμένης ξυλείας στο διαμέρισμα. Ο μηχανισμός που επεξηγεί τις μεταβολές στο πεδίο ροής συνδέεται με τα καιγόμενα κατακόρυφα τοιχώματα που δημιουργούν αναφλεγόμενες τυρβώδεις ροές οριακού στρώματος, οι οποίες προσθέτουν μια τοπική κατακόρυφη συνιστώσα ορμής. Αυτά τα καιγόμενα τοιχώματα οδηγούν επίσης το ουδέτερο επίπεδο κάτω και έλκουν μέρος του εισερχόμενου αέρα προς αυτά, σταματώντας έτσι την εισροή που κατευθύνεται προς το πλούμιο καυσίμου κηροζίνης με αποτέλεσμα τη μείωση της κλίσης του πλούμιου προς το πίσω τοίχωμα (Pope et al, 2023). Αύξηση του εκτεθειμένου CLT παράγει περισσότερα αέρια πυρόλυσης, αυξάνοντας τις ταχύτητες εκροής, ενώ οι εισροές μειώνονται ελαφρώς λόγω του προαναφερθέντος φαινομένου ακινητοποίησης. Επομένως η ροή στο άνοιγμα της πόρτας δεν κόβεται ούτε φτάνει σε οριακή κατάσταση παρά το συνεχώς μειούμενο ύψος του ουδέτερου επιπέδου. Σύμφωνα με τα συμπεράσματα της μελέτης, οι συμβατικές παραδοχές πως οι θερμικές συνθήκες για πυρκαγιές υπο-αεριζόμενων διαμερισμάτων είναι σχετικά ομοιογενείς και ελέγχονται από τον παράγοντα ανοίγματος αντιφάσκουν τις πραγματικότητες. Οι χωρικές κατανομές και οι χρονικές εξελίξεις της θέρμανσης εντός του διαμερίσματος είναι εξαιρετικά ετερογενείς και εξαρτώνται από τη διαρρύθμιση των εκτεθειμένων ξύλινων επιφανειών.

Οι McNamee et al, 2021 μελέτησαν την παρουσία οροφής CLT και σύγκριναν τα αποτελέσματά τους με τα παραμετρικά μοντέλα φωτιάς EN 1991-1-2 και iBMB. Το παραμετρικό μοντέλο πυρκαγιάς EN 1991-1-2 υπερεκτίμησε τις θερμοκρασίες αερίων στο πυροδιαμέρισμα στο στάδιο της ανάπτυξης πυρκαγιών ελεγχόμενου αερισμού(υπο-αερισμός), ενώ υπο-εκτίμησε τις θερμοκρασίες στο στάδιο σβέσης. Τα αποτελέσματα του παραμετρικού μοντέλου EN 1991-1-2 ταίριαζαν καλύτερα στα

αποτελέσματα των πειραμάτων με άκαυστη οροφή. Αντίθετα το μοντέλο iBMB έδωσε λογικές προβλέψεις και για τις δύο περιπτώσεις οροφών από σκυρόδεμα και CLT κατά τη φάση ανάπτυξης της πυρκαγιάς. Υπερεκτιμήθηκε όμως η διάρκεια της φάσης πλήρους ανάπτυξης για το CLT στις περιπτώσεις με ελεγχόμενο αερισμό, λόγω της απλοποιημένης παραδοχής πως η καμένη ξυλεία θεωρείται απλώς ως πρόσθετο φορτίο φωτιάς.

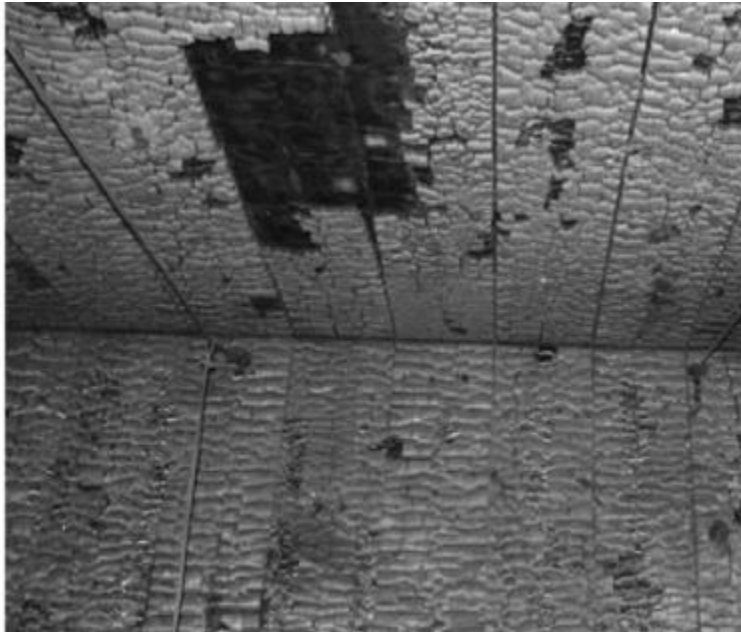
Στα δύο πειράματα των Horikin et al, 2022, με εκτεθειμένο CLT χρησιμοποιήθηκαν πάνελ με διαφορετικές κόλλες (adhesive). Το ένα πείραμα είχε CTL με PUR Henkel Loctite HB S, τυπική κόλλα της βιομηχανίας CLT, όπου οι άκρες των στρωμάτων (lamella) δεν είχαν επικολληθεί. Το άλλο πείραμα είχε CTL με PUR Henkel Loctite HB X με επικολλημένες τις άκρες. Το πείραμα με Henkel Loctite HB S είχε πολύ χειρότερη αποκόλληση εξανθρακώματος, σε βαθμό που είχε γίνει ορατό το τρίτο στρώμα του CLT στο τέλος του πειράματος, φαινόμενο που δεν παρατηρήθηκε στο CLT με PUR Henkel Loctite HB X.

Στην εικόνα 4.3 αριστερά παρουσιάζεται το εσωτερικό του πυροδιαμερίσματος πριν την εκκίνηση του πειράματος των Hadden et al, 2017 και δεξιά το πείραμα των Horikin et al, 2022 κατά την καύση.



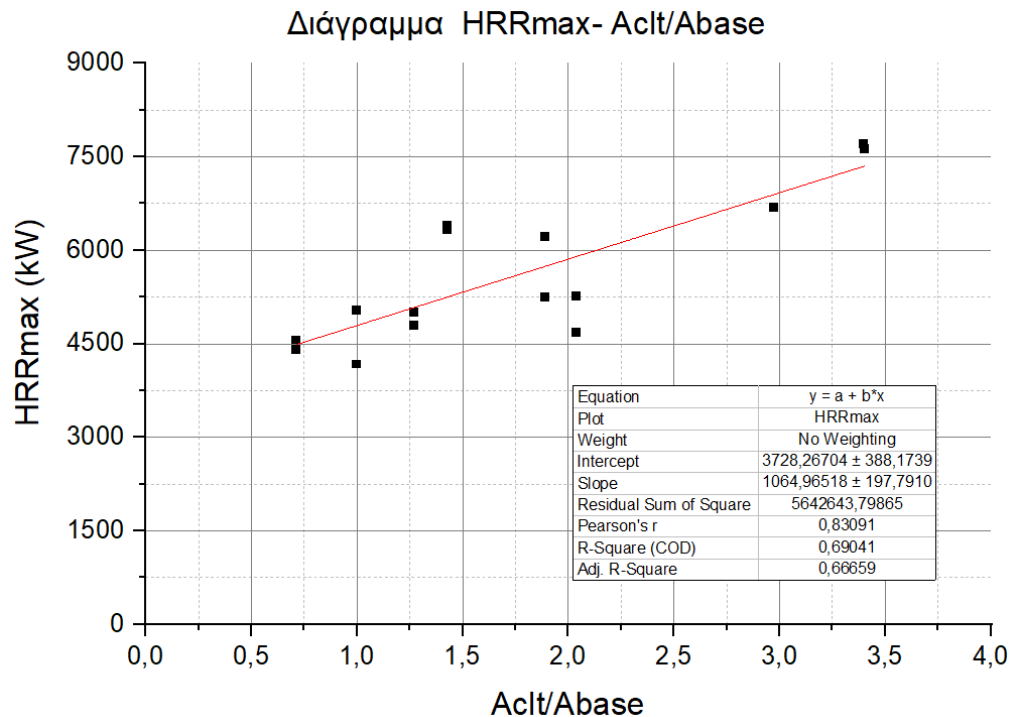
Εικόνα 4.3 Εσωτερικό του πυροδιαμερίσματος πριν το πείραμα με τοποθετημένα τα cribs ξυλείας, Hadden et al, 2017 (Αριστερά) και (Δεξιά) Κατά τη διάρκεια του πειράματος οι φλόγες καυστήρα επιδρούν στην οροφή CLT, Horikin et al, 2022

Στην εικόνα 4.4 παρατηρείται το εσωτερικό του πυροδιαμερίσματος των Hadden et al, 2017 μετά την καύση, καθώς και η τοπική αποκόλληση των στρωμάτων του CLT.



Εικόνα 4.4 Εικόνα στο τέλος του πειράματος με τοπική αποκόλληση στρωμάτων, Hadden et al, 2017

Δημιουργούνται τα ίδια διαγράμματα όπως πριν.



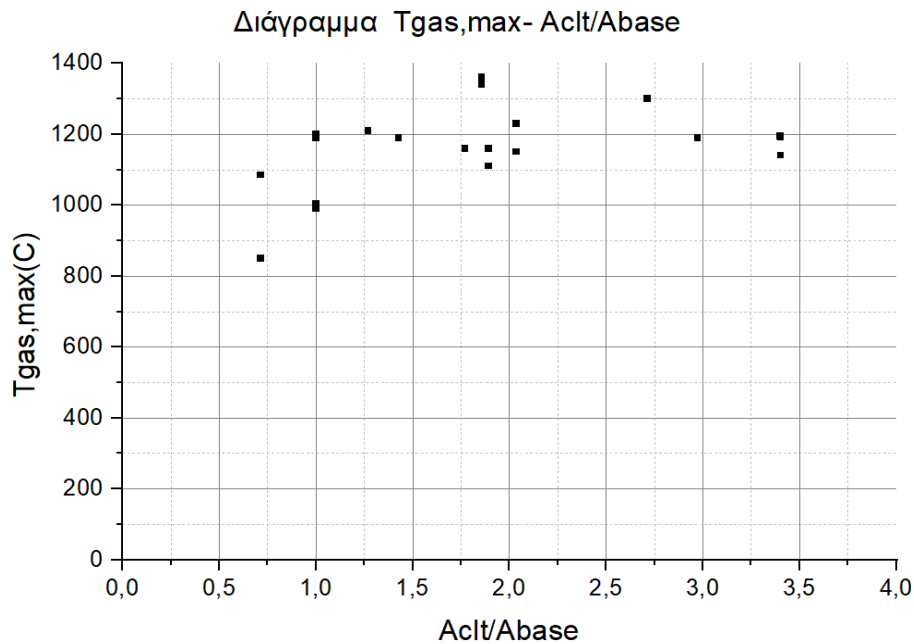
Διάγραμμα 4.5 Διάγραμμα μέγιστου ρυθμού έκλυσης θερμότητας προς την ανηγμένη επιφάνεια εκτεθειμένου CLT, για πειράματα πραγματικής κλίμακας.

Όπως και στις πειραματικές μελέτες μικρής κλίμακας, με την βοήθεια του προγράμματος Origin, βρίσκεται συνάρτηση που συσχετίζει τα δύο μεγέθη. Ισχύουν οι προαναφερθέντες περιορισμοί.

Η εξίσωση που προκύπτει είναι η εξής:

$$HRR_{max}(kW) = 1065 * \frac{A_{clt}}{A_{base}} + 3728,3 \quad (4.3)$$

Το μέγιστο HRR καθαρά από CLT δίνεται δυστυχώς σε ελάχιστα άρθρα (Πρακτικά δύο όπου το ένα έχει μόνο ένα πείραμα).



Διάγραμμα 4.6 Διάγραμμα μέγιστης θερμοκρασίας αερίων προς την ανηγμένη επιφάνεια εκτεθειμένου CLT, για πειράματα πραγματικής κλίμακας.

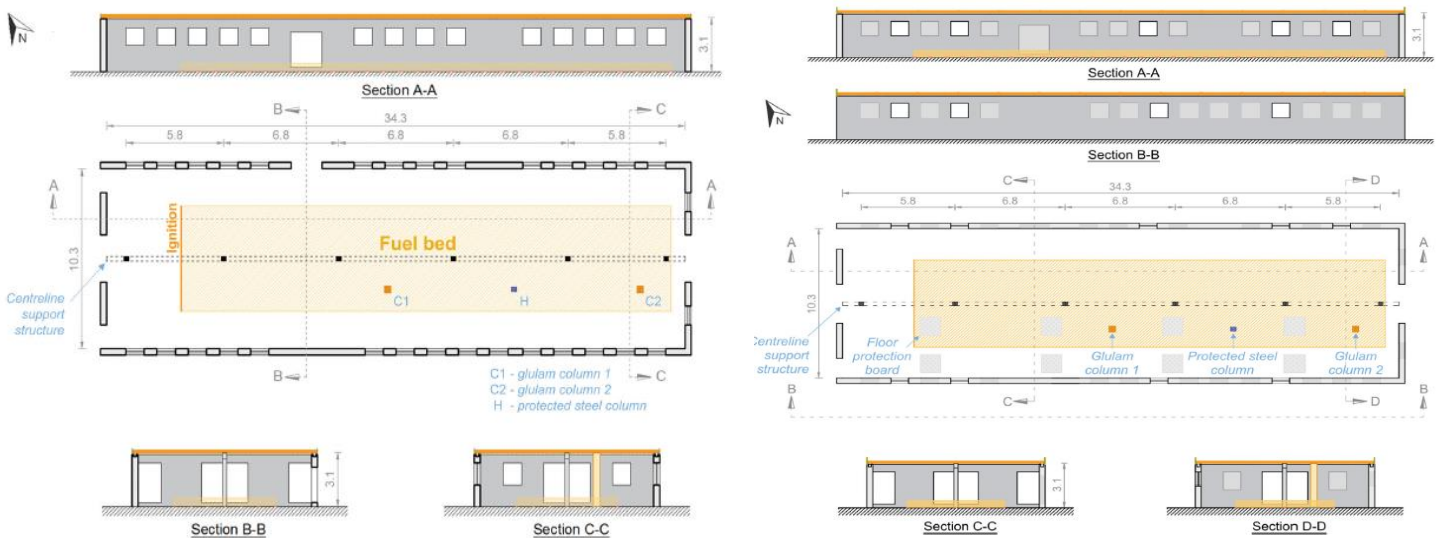
Οι θερμοκρασίες κυμαίνονται από περίπου 1000 σε 1300 βαθμούς, με εξαίρεση ένα πείραμα του Medina Henvia με έναν εκτεθειμένο τοίχο CLT.

4.3 Σύνθετες πειραματικές μελέτες πλήρους κλίμακας

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν και πειραματικές μελέτες, σύνθετες, που υπερβαίνουν την κλασική κλίμακα. Το πιο αξιοσημείωτο παράδειγμα των μελετών αυτών είναι τα πειράματα CodeRed των Kotsovinos et al, 2022. Αν και υψηλότερου επιπέδου από την διπλωματική εργασία, θα γίνει μια μικρή αναφορά σε αυτά. Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκε ένα σημαντικά μεγαλύτερο πυροδιαμέρισμα από τα συνηθισμένα μήκους 34,27m και πλάτους 10,27m με ύψος 3,1m. Η οροφή ήταν από CLT ενώ υπήρχαν δύο κολόνες από gluelam, ένα υλικό ξυλείας σαν το CLT χωρίς όμως τα ξεχωριστά στρώματα να είναι τοποθετημένα κατά 90°. Στο πείραμα CodeRed #1 το 20,5% της συνολικής επιφάνειας τοίχου ήταν ανοίγματα ενώ στο πείραμα CodeRed #2 μόνο το 10%.



Εικόνα 4.5 Εσωτερικό του πυροδιαμερίσματος CodeRed #1 , Kotsovinos et al, 2022



Εικόνα 4.6 Σύγκριση των δύο διατάξεων CodeRed #1(αριστερά) και #2(δεξιά) , Kotsovinos et al, 2022

Και στα δύο πειράματα χρησιμοποιήθηκαν cribs ξυλίας που κάλυπταν 174m^2 με πυκνότητα φορτίου καυσίμου $377\text{MJ}/\text{m}^2$.

Το δεύτερο πείραμα είχε περίπου την μισή ανοιχτή επιφάνεια, ώστε να μπορεί να γίνει σύγκριση μεταξύ των δεδομένων. Μερικά από τα συμπεράσματα που βρέθηκαν: το δεύτερο πείραμα είχε 20% μεγαλύτερη διάρκεια πυρκαγιάς. Η μέγιστη θερμοκρασία και οι προσπίπτουσες ροές θερμότητας στο εσωτερικό του διαμερίσματος παρέμειναν περίπου οι ίδιες, ωστόσο τα πρότυπα στην ανάπτυξη των

θερμοκρασιών στο CodeRed #2 είναι διαφορετικά. Το δεύτερο πείραμα είχε υποαεριζόμενη πυρκαγιά σε μεγαλύτερο βαθμό από το πρώτο, λογικό λόγω της μειωμένης επιφάνειας ανοίγματος. Οι ροές θερμότητας ήταν αρκετά χαμηλότερες με μεγαλύτερη υπολογιζόμενη ροή θερμότητας τη στιγμή που σταμάτησε η καύση του CLT με φλόγα να είναι 111 και 50 kW/m² για τα CodeRed #01 και #02 αντίστοιχα. Ο μέγιστος ρυθμός έκλυσης θερμότητας μετρήθηκε 121MW και 99MW αντίστοιχως.

Σε τέτοιου μεγέθους πυροδιαμερίσματα, σημαντικό ερώτημα είναι κατά πόσο μπορεί να επιτευχθεί φυσική σβέση της ξυλείας. Και στα δύο πειράματα παρατηρήθηκε υφέρπουσα φλόγα (smouldering flame) για τις επόμενες 60 ώρες, συγκεκριμένα στο CodeRed #1 υπήρχαν θερμά σημεία για τις επόμενες 7 μέρες. Στο δεύτερο πείραμα, μετά το τέλος της ορατής καύσης, παρατηρήθηκαν 7 θερμά σημεία, από τα οποία το ένα μετέβη ξανά σε καύση και χρειάστηκε κατάσβεση με νερό. Πειράματα σαν αυτά έχουν μεγάλη αξία για τα πυροσβεστικά σώματα, καθώς φανερώνουν τα πιο δυσμενή σημεία σε ένα κτίριο κατά τη διάρκεια ή και μετά το τέλος της πυρκαγιάς. Τα σημεία, αυτά στα οποία συνεχίζει υφέρπουσα φλόγα, αν δεν σβέσουν, μπορούν να οδηγήσουν σε αναζωπύρωση την πυρκαγιάς.

5. ΜΕΤΡΗΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

5.1 Βασικά χαρακτηριστικά μετρητικής διάταξης και πειραματικής εγκατάστασης

5.1.1 Διαστάσεις πυροδιαμερίσματος

Στο κεφάλαιο 4 αναφέρθηκε το πρότυπο διαμέρισμα ISO 9705 με εσωτερικές διαστάσεις μήκος 3,6 m, πλάτος 2,4 m και ύψος 2,4 m, ενώ περιλαμβάνει επίσης ένα άνοιγμα (πόρτα) με διαστάσεις 0,80 m πλάτος και 2,00 m ύψος. Λόγω των προαναφερθέντων αιτιών, για την διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών χρησιμοποιήθηκε πυροδιαμέρισμα υπό κλίμακα 1 προς 3 αυτής του προτύπου. Οι εσωτερικές διαστάσεις της εγκατάστασης κατέληξαν σε 1200 mm μήκος, 800 mm πλάτος και 800 mm ύψος, ενώ οι διαστάσεις του ανοίγματος ήταν 260 mm x 670 mm (πλάτος x ύψος).

5.1.2 Δομικά υλικά του πυροδιαμερίσματος

Για το στήσιμο του πυροδιαμερίσματος και για τη στήριξη των δομικών υλικών είχε κατασκευασθεί ένας χαλύβδινος σκελετός πάχους 4mm.



Εικόνα 5.1 Χαλύβδινος σκελετός της κατασκευής.

Το πυρίμαχο υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τα τοιχώματα και την οροφή ήταν κεραμική πλάκα πάχους 25mm και πυκνότητας 300kg/m³. Στα δύο πειράματα που η οροφή αντικαταστάθηκε με CLT, το CLT που τοποθετήθηκε ήταν πάχους 160mm, αποτελούμενο από 5 στρώσεις (lamellae) με κατανομή 40-20-40-20-40mm. Τα τυπικά χαρακτηριστικά μεγέθη του CLT αναγράφονται στον πίνακα 3.3 της παραγράφου 3.2.



Εικόνα 5.2 Πρόσοψη διαμερίσματος με αδρανή οροφή.



Εικόνα 5.3 Πρόσοψη και πλάγια όψη από αριστερά του πυροδιαμερίσματος με CLT οροφή.

Σε παλαιότερα πειράματα παρατηρήθηκε, πως φλόγες κατά την καύση του CLT, μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, έβγαιναν από κενά ανάμεσα στο CLT και στα τοιχώματα πάνω στα οποία είχε στερεωθεί. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως το CLT υπέστη συστολή, λόγω της ξήρανσης του. Για να αντιμετωπισθεί το φαινόμενο αυτό, στα σημεία επαφής του CLT με το τοίχωμα προστέθηκε στρώση κεραμικής κουβέρτας, και περιμετρικά των πλευρών του CLT τοποθετήθηκε γυψοσανίδα.



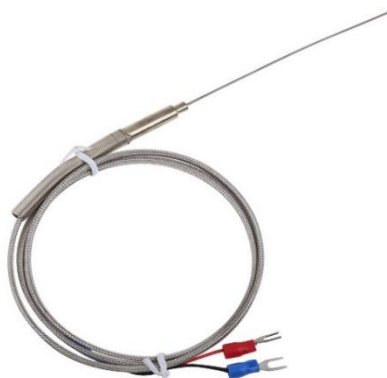
Εικόνα 5.4 Πρόσωση και πλάγια όψη από αριστερά του πυροδιαμερίσματος με οροφή CLT στα πειράματα της εργασίας.

5.2 Μετρητικές συσκευές

5.2.1 Θερμοστοιχεία

Τα θερμοστοιχεία είναι το κύριο όργανο μέτρησης θερμοκρασιών. Αποτελούνται από δύο πόλους (θετικό και αρνητικό). Χρησιμοποιήθηκαν τύπου K θερμοστοιχεία διαμέτρου 1,5mm με σύσταση θετικού πόλου 90% Ni – 10% Cr και αρνητικού 95% Ni – 2% Al – 3% Mn. Το ανώτερο όριο θερμοκρασίας που μπορούν να λειτουργήσουν είναι περίπου 1300°C. Η ανάγωση από Volt σε βαθμούς Κελσίου (°C) γίνεται με την παρακάτω εξίσωση:

$$T(C) = \frac{T(Volt)}{0.000041} \quad (5.1)$$



Εικόνα 5.5 Τυπικό θερμοστοιχείο τύπου K

5.2.2 Δικατευθυντικοί μετρητές ταχύτητας

Στο άνοιγμα τοποθετήθηκαν δικατευθυντικοί μετρητές ταχύτητας (bi-directional probes), οι οποίοι μετρούν την ταχύτητα εισόδου αέρα ή εξόδου των καυσαερίων. Έχουν το πλεονέκτημα πως μετρούν και στις δύο κατευθύνσεις (είσοδος-έξοδος), όπου η μια ορίζεται θετική και η δεύτερη αρνητική στο αρχείο που συλλέγονται τα δεδομένα.

Ένας δικατευθυντικός μετρητής 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 PX277, στα οποία η αναγωγή από τάση (Volt) σε πίεση (Pa) γίνεται με την εξίσωση που ακολουθεί:

$$\Delta P(Pa) = 2,49\Delta P(Volt) - 12,45 \quad (5.2)$$

Η τοπική ταχύτητα συσχετίζεται με την διαφορά πίεσης στο δικατευθυντικό μετρητή με την παρακάτω εξίσωση:

$$u = \frac{1}{K_p} \times \left(\frac{2\Delta P}{\rho} \right)^{0,5} \quad (5.3)$$

Η πυκνότητα ρ (kg/m^3) υπολογίζεται από την καταστατική εξίσωση τέλειων αερίων:

$$\rho = \frac{352,8}{T} \quad (5.4)$$

Για ατμοσφαιρική πίεση 1atm η παγκόσμια σταθερά αντιστοιχεί σε αυτή του ατμοσφαιρικού αέρα και η θερμοκρασία μετριέται σε Kelvin.

Το K_p σύμφωνα με την μελέτη των McCaffrey and Heskestad, 1976, εξαρτάται από παράγοντες όπως ο αριθμός Reynolds, το σχήμα του μετρητή και την κατεύθυνση τοποθέτησης, αλλά για μεγάλους αριθμούς Reynolds τείνει ασυμπτωτικά στο 1,08.



Εικόνα 5.6 Δικατευθυντικοί μετρητές τοποθετημένοι στο άνοιγμα.

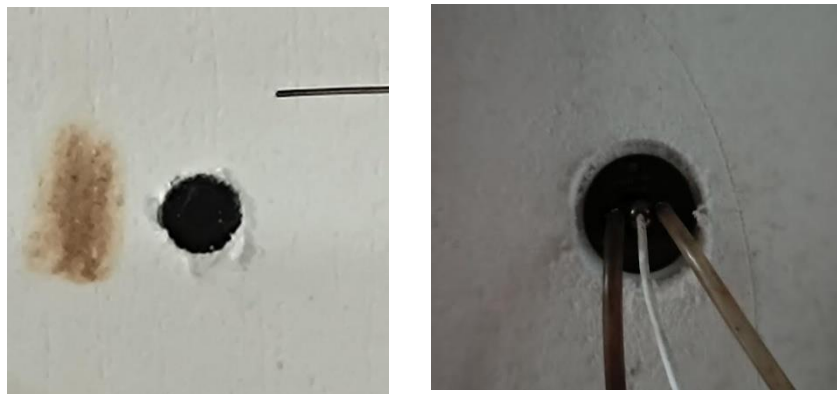
5.2.3 Θερμοροόμετρα

Θερμοροόμετρα (heat flux sensors) ονομάζονται οι μετρητικές συσκευές που μετρούν τη ροή θερμότητας μέσω ακτινοβολίας από το περιβάλλον στο οποίο έχουν τοποθετηθεί. Υπό κανονικές συνθήκες έχουν «οπτικό πεδίο» μέτρησης 180°. Στην παρούσα πειραματική μελέτη χρησιμοποιήθηκαν υδρόψυκτοι μετρητές θερμότητας τύπου Schmidt-Boelter, οι οποίοι είναι κατασκευασμένοι για μετρήσεις σε περιβάλλον υψηλών θερμοκρασιών. Οι συγκεκριμένοι παρουσιάζουν άνω όριο μέτρησης 200KW/m².

Η αναγωγή από Volt σε kW/m² γίνεται μέσω την ακόλουθη εξίσωση

$$q'' \left(\frac{KW}{m^2} \right) = q''(V) \times \frac{1}{E} \quad (5.5)$$

Όπου E η ευαισθησία του μετρητή (V*m²/KW).



Εικόνα 5.7 Πρόσοψη και πίσω όψη θερμοροόμετρου στο πυροδιαμέρισμα.

5.2.4 Σωλήνες Pitot – Static

Ένα ακόμη μετρητικό όργανο ταχύτητας καυσαερίων είναι οι σωλήνες Pitot. Στην πειραματική διάταξη συνδέονται με μικρομανόμετρα Kimo, στα οποία η αναγωγή των μετρούμενων τιμών από Volt σε Pascal γίνεται μέσω της εξίσωσης (5.6).

$$\Delta P(Pa) = 1000\Delta P(Volt) \quad (5.6)$$

Η τοπική ταχύτητα συσχετίζεται με την διαφορά πίεσης με την παρακάτω εξίσωση:

$$u = \left(\frac{2\Delta P}{\rho}\right)^{0,5} \quad (5.7)$$

Όπου η πυκνότητα υπολογίζεται με την εξίσωση (5.4).



Εικόνα 5.8 Δύο σωλήνες Pitot στο άνοιγμα του διαμερίσματος.

5.2.5 Αναλυτής καυσαερίων

Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκε αναλυτής αερίων τύπου ABB ACX Optima AO2000 Series, με τον οποίο μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις οξυγόνου, μονοξειδίου του άνθρακα και διοξειδίου του άνθρακα στα καυσαέρια που συλλέγονται. Το ακροφύσιο του, τοποθετείται στον αγωγό απαγωγής των καυσαερίων, μετά τον απορροφητήρα. Η καταγραφή των δεδομένων έχει μια καθυστέρηση 30 δευτερολέπτων, μέχρι τα καυσαέρια να ταξιδέψουν στον αναλυτή. Ο αναλυτής βρίσκεται σε λειτουργία ώρες πριν το πείραμα και χρειάζεται βαθμονόμηση πριν την εκκίνηση του πειράματος.



Εικόνα 5.9 Αναλυτής καυσαερίων (αριστερά), απαγωγός καυσαερίων (κέντρο), ακροφύσιο τοποθετημένο στο σωλήνα απαγωγής (δεξιά).

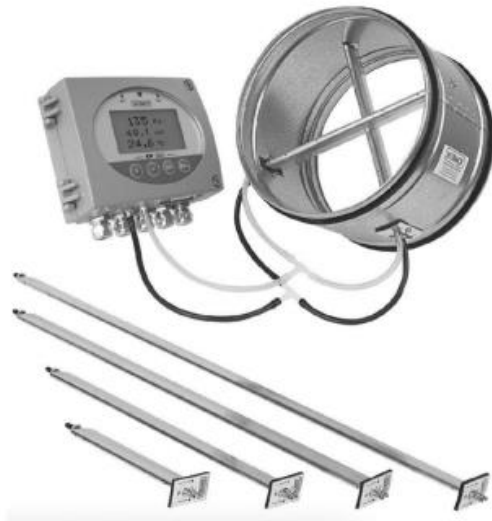
5.2.6 Παροχόμετρα καυσαερίων

Εντός του αγωγού απαγωγής καυσαερίων, προς το περιβάλλον, με διάμετρο 200mm υπάρχει εγκατεστημένο το μετρητικό όργανο KIMO DEBIMO με σκοπό τον υπολογισμό της ογκομετρικής παροχής καυσαερίων τα οποία αναρροφώνται από τον ανεμιστήρα. Το όργανο αυτό μέσω των οπών συλλέγει ένα σύνολο τιμών δυναμικής πίεσης και υπολογίζει αυτόματα τον μέσο όρο. Η αναγωγή από Volt σε Pascal γίνεται μέσω της ακόλουθης εξίσωσης.

$$\Delta P(Pa) = 100\Delta P(Volt) \quad (5.8)$$

Έπειτα, μέσω της εξίσωσης (5.3) υπολογίζεται η ταχύτητα, με $1/K_p=0,8165$. Εφόσον η διατομή του σωλήνα είναι γνωστή, υπολογίζεται η ογκομετρική παροχή.

$$\dot{V} = u \times A \quad (5.9)$$



Εικόνα 5.9 Συσσκευή Kimo Debimo

5.3 Διάταξη μετρητικών οργάνων στο διαμέρισμα

Οι μετρητικές συσκευές, τοποθετήθηκαν με τρόπο ώστε τα δεδομένα που συλλέγονται να αποτυπώνουν μια πλήρη εικόνα των φαινομένων στο πυροδιαμέρισμα. Στα πειράματα με αδρανές οροφή τοποθετήθηκαν 81 θερμοστοιχεία ενώ στα πειράματα με οροφή από CLT τοποθετήθηκαν 96, για καλύτερη χαρτογράφηση των θερμοκρασιών στην οροφή. Επιπλέον, τοποθετήθηκαν 4 δικατευθυντικοί μετρητές ταχύτητας, 2 θερμοροόμετρα, 2 παροχόμετρα και ο αναλυτής καυσαερίων. Στα 3 πρώτα πειράματα (ISO-inert) υπήρχαν και 2 σωλήνες Pitot που εν τέλει βρέθηκαν προβληματικοί και αφαιρέθηκαν.



Εικόνα 5.10 Διάταξη του πυροδιαμερίσματος με CLT οροφή.

Προκείμενου να γίνει η παράθεση των μετρητικών οργάνων είναι αναγκαίο να οριστεί ένα σύστημα συντεταγμένων. 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 της πρόσοψης, στο κάτω μέρος του ανοίγματος και στο κέντρο αυτού.

5.3.1 Θερμοστοιχεία

Τα θερμοστοιχεία που τοποθετήθηκαν διακρίνονται αρχικά σε δύο ομάδες, τα ελεύθερα θερμοστοιχεία και τα θερμοστοιχεία στα τοιχώματα.

Τα ελεύθερα θερμοστοιχεία διακρίνονται επιπλέον στις εξής κατηγορίες ανάλογα με τη θέση τους στον άξονα y .

- Θερμοστοιχεία κεντρικής γραμμής (Centerline): Τα θερμοστοιχεία αυτά είναι τοποθετημένα κατά μήκος του άξονα x για $y=0$, εσωτερικά του διαμερίσματος. Ακολουθεί ο πίνακας 5.1 με τις ακριβείς θέσεις.

Πίνακας 5.1 Θέσεις θερμοστοιχείων Centerline

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



Εικόνα 5.11 Θερμοστοιχεία centerline.

- Θερμοστοιχεία ανοίγματος (opening): Τα θερμοστοιχεία αυτά είναι τοποθετημένα για $\gamma=0$ στο επίπεδο του ανοίγματος. Είναι στερεωμένα πάνω στους μετρητές ταχύτητας. Ακολουθεί ο πίνακας 5.2 με τις ακριβείς θέσεις.

Πίνακας 5.2 Θέσεις θερμοστοιχείων Opening

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

Όταν αφαιρέθηκαν οι σωλήνες Pitot, αφαιρέθηκαν και δύο θερμοστοιχεία, τα 28 και 29. Στην εικόνα 5.2 παρουσιάζεται η παλαιά διάταξη, ενώ στην 5.3 η καινούρια. Στην ακόλουθη εικόνα απεικονίζεται η στερεοποίηση των θερμοστοιχείων.



Εικόνα 5.12 Στερεοποίηση θερμοστοιχείων ανοίγματος επάνω στους μετρητές ταχύτητας.

- Θερμοστοιχεία στο πλαϊνό τοίχωμα (Gas side wall): Θερμοστοιχεία στις θέσεις του πίνακα 5.4 σε απόσταση 10mm από το δεξί ως προς την πρόσοψη τοίχωμα.

Πίνακας 5.4 Θέσεις θερμοστοιχείων πλαϊνού τοιχώματος (Gas side wall)

A/a	x(mm)	z(mm)	y(mm)
32	600	660	390
33	900	400	390
34	900	530	390
35	600	270	390
36	600	400	390
37	600	530	390
38	300	400	390
39	300	530	390

Θερμοστοιχεία στα τοιχώματα τοποθετήθηκαν στην οροφή, στο δεξί ως προς την πρόσοψη τοίχωμα και στο πίσω τοίχωμα. Χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, εκτεθειμένα και μη εκτεθειμένα αναλόγως με το αν εκτίθενται στη φλόγα. Ακολουθούν πίνακες με τις ακριβείς τοποθεσίες.

Πίνακας 5.5 Θέσεις εσωτερικών θερμοστοιχείων πλαϊνού τοιχώματος

A/a	x(mm)	z(mm)	γ(mm)	Είδος
40	600	660	400	Εκτεθειμένα
41	900	400	400	
42	900	530	400	
43	600	270	400	
44	600	400	400	
45	600	530	400	
46	300	400	400	
47	300	530	400	
48	600	660	425	Μη Εκτεθειμένα
49	900	400	425	
50	900	530	425	
51	600	270	425	
52	600	400	425	
53	600	530	425	
54	300	400	425	
55	300	530	425	

Πίνακας 5.6 Θέσεις εσωτερικών θερμοστοιχείων πίσω τοιχώματος

A/a	x(mm)	z(mm)	γ(mm)	Είδος
56	1200	400	-267	Εκτεθειμένα
57	1200	530	-267	
58	1200	270	0	
59	1200	400	0	
60	1200	530	0	
61	1200	660	0	
62	1200	400	267	
63	1200	530	267	
64	1225	400	-267	Μη Εκτεθειμένα
65	1225	530	-267	
66	1225	270	0	
67	1225	400	0	
68	1225	530	0	
69	1225	660	0	
70	1225	400	267	
71	1225	530	267	

Τα παραπάνω θερμοστοιχεία ήταν στις ίδιες θέσεις σε όλες τις πειραματικές μελέτες. Τα θερμοστοιχεία που είχαν τοποθετηθεί εσωτερικά της οροφής τοποθετήθηκαν σε δύο διατάξεις, μια σταθερή για τα πειράματα με την οροφή από κεραμική πλάκα, και μια σταθερή διάταξη με την οροφή CLT.

Πίνακας 5.7 Θέσεις εσωτερικών θερμοστοιχείων οροφής για κεραμική πλάκα

A/a	x(mm)	z(mm)	y(mm)	Είδος
72	900	800	0	Εκτεθειμένα
73	600	800	0	
74	300	800	0	
75	900	825	0	Μη Εκτεθειμένα
76	600	825	0	
77	300	825	0	

Πίνακας 5.8 Θέσεις εσωτερικών θερμοστοιχείων οροφής για CLT

A/a	x(mm)	z(mm)	y(mm)
72	600	810	0
73	600	820	0
74	600	830	0
75	600	840	0
76	600	850	0
77	600	860	0
78	600	880	0
79	300	810	0
80	300	820	0
81	300	830	0
82	300	840	0
83	300	850	0
84	300	860	0
85	300	880	0
86	900	810	0
87	900	820	0
88	900	830	0
89	900	840	0
90	900	850	0
91	900	860	0
92	900	880	0
93	600	810	-267
94	600	820	-267
95	600	830	-267
96	600	840	-267
97	600	850	-267

98	600	860	-267
99	600	880	-267
100	600	810	267
101	600	820	267
102	600	830	267
103	600	840	267
104	600	850	267
105	600	860	267
106	600	880	267

Στα 106 συμπεριλαμβάνονται και τα δύο ανενεργά.

5.3.2 Θερμοροόμετρα

Για τον υπολογισμό της θερμοροής στα τοιχώματα τοποθετήθηκαν 2 θερμοροόμετρα, ένα στον πίσω και ένα στον στο δεξί ως προς την πρόσοψη τοίχο. Οι θέσεις φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα 5.9.

Πίνακας 5.9 Θέσεις θερμοροόμετρων

A/a	x(mm)	z(mm)	y(mm)	Ευαισθησία E (V*m²/KW)
1	600	530	400	0,0001591
2	1200	530	0	0,000167
3	1200	660	0	0,000141

5.3.3 Δικατευθυντικοί μετρητές ταχύτητας

Είναι τοποθετημένοι στο άνοιγμα για να μετρούν την οριζόντια ταχύτητα εισόδου αέρα ή εξόδου των καυσαερίων. Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις μετρητές. Μετά τα τρία πρώτα πειράματα που αφαιρέθηκαν οι Pitot, υπήρξε ανακατανομή των θέσεων. Οι θέσεις παρουσιάζονται στους πίνακες 5.10 και 5.11 και οι δύο διατάξεις φαίνονται στις εικόνες 5.2 και 5.3.

Πίνακας 5.10 Αρχικές 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

Πίνακας 5.11 Νέες θέσεις δिकाτευθυντικών μετρητών ταχύτητας

A/a	x(mm)	z(mm)	y(mm)
1	0	10	0
2	0	140	0
3	0	530	0
4	0	660	0

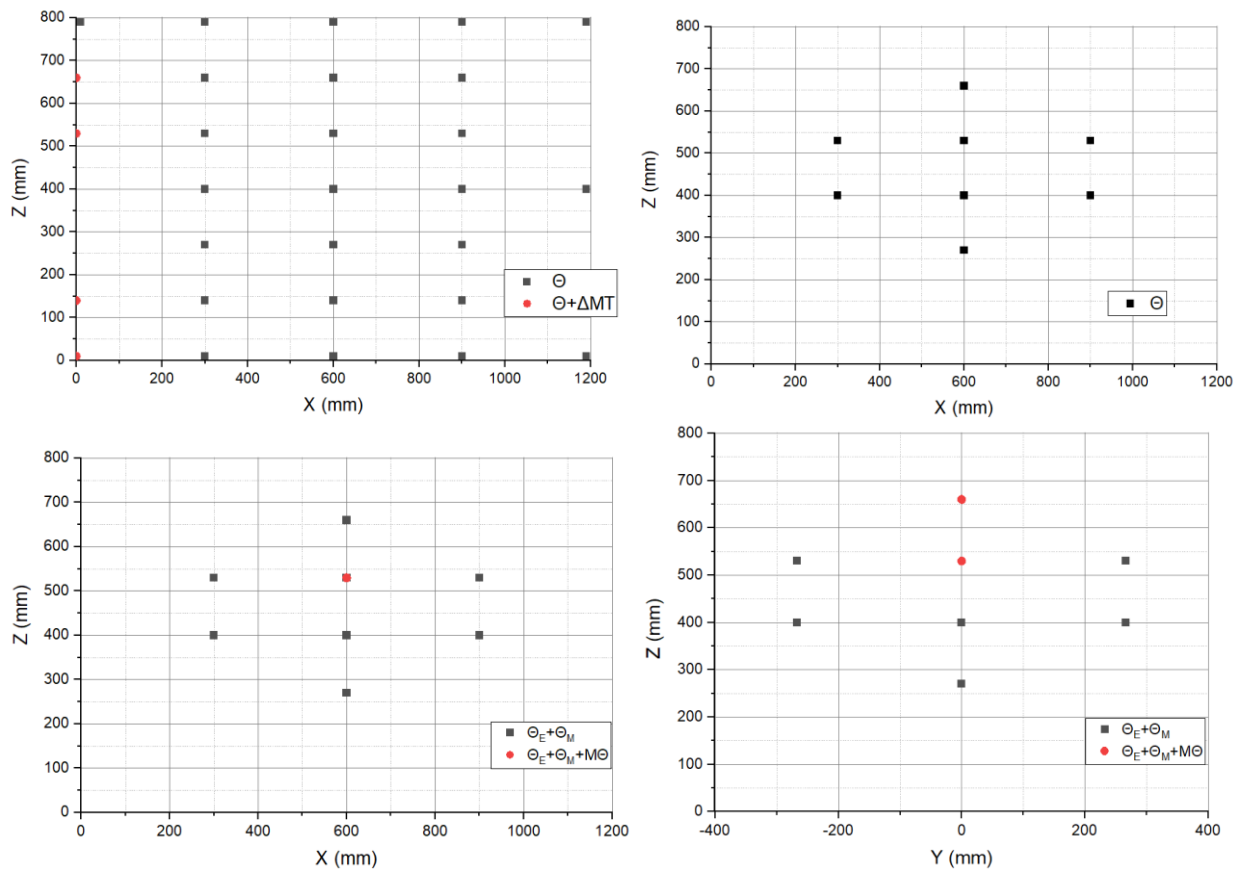
5.3.4 Σωλήνες Pitot-Static

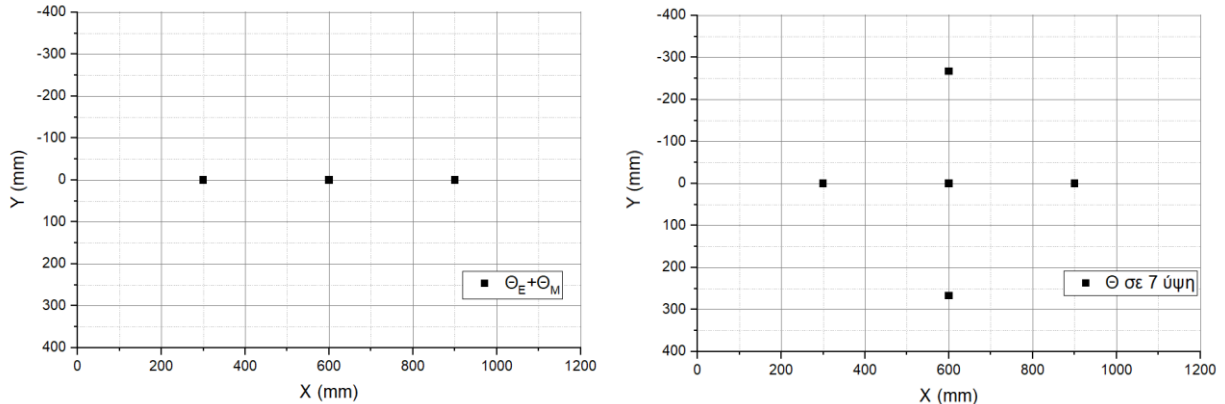
Πριν αφαιρεθούν, οι θέσεις τους παρουσιάζονται στον πίνακα 5.12.

Πίνακας 5.12 Θέσεις σωλήνων Pitot

A/a	x(mm)	z(mm)	y(mm)
1	0	530	0
2	0	660	0

Στο σχήμα 5.1 παρουσιάζονται γραφήματα με τις τελικές τοποθεσίες όλων των μετρητικών οργάνων.





Σχήμα 5.1 Θέσεις μετρητικών οργάνων: στην κεντρική ευθεία (πρώτη γραμμή, πρώτη στήλη), 10mm από τον πλαϊνό τοίχο (πρώτη γραμμή, δεύτερη στήλη), στον πλαϊνό τοίχο (δεύτερη γραμμή, πρώτη στήλη), στον πίσω τοίχο (δεύτερη γραμμή, δεύτερη στήλη), στην άκαυστη οροφή (τρίτη γραμμή, πρώτη στήλη) και στην οροφή CLT (τρίτη γραμμή, δεύτερη στήλη).

Ως Θ συμβολίζονται τα θερμοστοιχεία, Θ_E τα θερμοστοιχεία σε εκτεθειμένη επιφάνεια τοιχώματος, Θ_M τα θερμοστοιχεία σε μη εκτεθειμένη επιφάνεια, $M\Theta$ οι μετρητές θερμορροής και ΔMT οι δικατευθυντικοί μετρητές ταχύτητας.

5.4 Σύστημα παροχής καυσίμου

Το καύσιμο που χρησιμοποιήθηκε κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων ήταν το προπάνιο C_3H_8 . Οι θερμοφυσικές ιδιότητες του καυσίμου ακολουθούν στον πίνακα 5.13.

Πίνακας 5.13 Θερμοφυσικές ιδιότητες προπάνιου C_3H_8 στην αέρια φάση

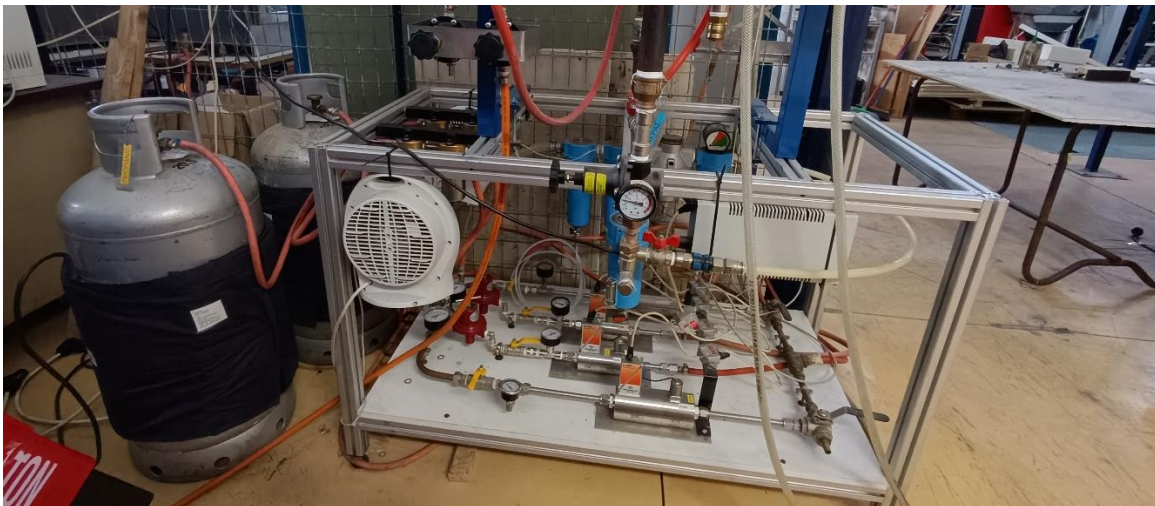
Μοριακή μάζα W (kg/mol)	44,09
Θερμοκρασία Βρασμού T_b ($^{\circ}C$)	-42,2
Ειδική θερμοχωρητικότητα c_p (kJ/kg* $^{\circ}C$)	1,67
Κατώτερη θερμογόνος δύναμη Δh_c (MJ/kg)	46,36
Μονάδα μάζας O_2 για καύση 1kg C_3H_8 r_o	3,629
Κατώτερη Θερμογόνος Δύναμη (kJ/kg)	46346
Πυκνότητα (kg/m ³)	2,01

5.4.1 Παροχόμετρα προπάνιου-Σύστημα παροχής

Το καύσιμο διοχετεύεται από φιάλες υψηλής πίεσης οι οποίες βρίσκονται αρχικά σε πίεση 10bar. Το καύσιμο οδηγείται σε μειωτήρα πίεσης για να κατέβει στα 3bar που λειτουργεί το παροχόμετρο. Για τη συνεχή ρύθμιση της ογκομετρικής παροχής κατά τη διεξαγωγή του πειράματος, χρησιμοποιήθηκαν δύο ψηφιακά παροχόμετρα Bronkhorst EL-Flow select F203AV, μοντέλα συγκεκριμένα για το προπάνιο. Τα παροχόμετρα είναι συνδεδεμένα με τον υπολογιστή για την αποθήκευση των δεδομένων. Το πλήρες σύστημα παρουσιάζεται στην εικόνα 5.13.



Εικόνα 5.13 Παροχόμετρο Bronkhorst EL-Flow select F203AV.



Εικόνα 5.14 Σύστημα παροχής καυσίμου.

5.4.2 Καυστήρας

Το προπάνιο έπειτα οδηγείται στον καυστήρα για την διοχέτευση του στο πυροδιαμέρισμα. Ο καυστήρας που χρησιμοποιήθηκε είναι κατασκευασμένος με τη χρήση χαλικιού (gravel), ώστε να προσομοιάζει τη διάχυση του καυσίμου που συμβαίνει σε πορώδεις καυστήρες. Αποτελείται από ένα τετράγωνο δοχείο κατασκευασμένο από ανοξείδωτο ασάλι, με διαστάσεις 150mmx150mm μήκος και πλάτος και 60mm ύψος. Το δοχείο αυτό είναι γεμάτο από κάτω προς τα πάνω με, διαδοχικά, ένα κενό 10 mm, ένα στρώμα από χαλίκια με κατανομή μεγέθους από 4 mm έως 8 mm έως το ύψος 30 mm, και ένα ανώτερο στρώμα άμμου με κατανομή μεγέθους από 2 mm έως 4 mm έως το ύψος 60 mm. Μεταλλικό διαχωριστικό πλέγμα χρησιμοποιείται για τη σταθεροποίηση των δύο στρωμάτων και την αποφυγή εισόδου των χαλικιών στην υποδοχή του αγωγού αερίου.



Εικόνα 5.15 Ο καυστήρας μέσα στο πυροδιαμέρισμα.

5.5 Σύστημα συλλογής δεδομένων

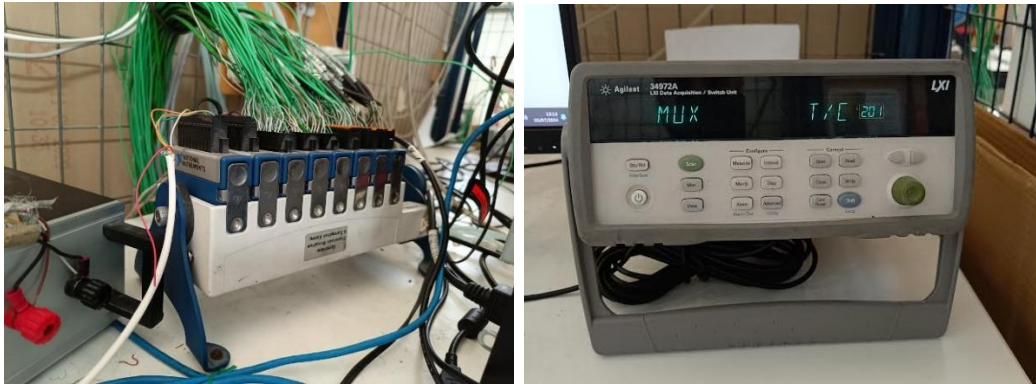
5.5.1 Συσκευές συλλογής δεδομένων

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 προσδιορίζεται στις συσκευές μέτρησης και με τις εξισώσεις που δόθηκαν για κάθε μετρητικό όργανο παρέχουν ως αποτέλεσμα, ψηφιακά, τη μέτρηση στις επιθυμητές μονάδες.

Χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά συστήματα. Το ένα σύστημα που χρησιμοποιήθηκε είναι σύστημα συλλογής δεδομένων NI cDAQ-9172 της εταιρίας National Instruments. Στο σύστημα αυτό είναι συνδεδεμένες 7 κάρτες με 16 κανάλια (channels) η κάθε μια, για την είσοδο σημάτων (signals) από τις μετρητικές συσκευές. Το σύστημα της National Instruments συνδέεται μέσω USB στον υπολογιστή στον οποίο είναι εγκατεστημένο αντίστοιχο λογισμικό της εταιρίας για οποιαδήποτε ρύθμιση και διαχείριση.

Το δεύτερο σύστημα συλλογής δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε είναι το Agilent 34972A της εταιρείας Agilent Technologies. Με αντίστοιχο τρόπο κάρτες δέχονται σήμα (signal) για καθένα από τα 20 κανάλια (channels) τα οποία διαθέτουν. Στις πειραματικές δοκιμές, χρησιμοποιήθηκε μία κάρτα. Αντίστοιχα, και αυτό το σύστημα συνδέεται στον υπολογιστή μέσω USB στον οποίο είναι εγκατεστημένο αντίστοιχο λογισμικό της εταιρίας.

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 με σκοπό οι μετρήσεις των δύο συστημάτων να είναι συγχρονισμένες.



Εικόνα 5.16 Τα δύο συστήματα συλλογής δεδομένων, το NI cDAQ-9172 (αριστερά) και Agilent 34972A (δεξιά).

5.5.2 Λογισμικό LabVIEW

Για την αποθήκευση, επεξεργασία και παρουσίαση των τιμών από τις κάρτες συλλογής δεδομένων των δυο συστημάτων συλλογής δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό LabVIEW. Η επιλογή αυτή είναι διευκολυντική, καθώς και τα δύο συστήματα συλλογής δεδομένων είναι διαχειρίσιμα στο ίδιο περιβάλλον και δεν χρησιμοποιούνται τα δύο ξεχωριστά προγράμματα διαχείρισης της εκάστοτε εταιρίας. Το πρόγραμμα LabVIEW είναι ένα περιβάλλον προγραμματισμού στο οποίο χρησιμοποιείται η γλώσσα προγραμματισμού G, η οποία είναι γλώσσα γραφικού σχεδιασμού. Έτσι, με το LabVIEW, δημιουργείται πρόγραμμα το οποίο έχει τη μορφή δομικών διαγραμμάτων όπως φαίνονται στις ακόλουθες εικόνες.

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). Εκτός των δομικών διαγραμμάτων, το LabVIEW παρέχει πίνακα ελέγχου στον οποίο ο χρήστης έχει τη δυνατότητα επικοινωνίας με το πρόγραμμα, είτε αλλαγή λειτουργιών είτε οπτικοποίηση των δεδομένων σε μορφή διαγραμμάτων. Η κατασκευή του δομικού διαγράμματος, διευκολύνεται με την ύπαρξη πολλών εργαλείων. Τα εργαλεία που παρέχονται, δίνουν τη δυνατότητα εισαγωγής μαθηματικών πράξεων, συναρτήσεων, δομικών στοιχείων όπως διακόπτες και μετρητές η ακόμη και επαναληπτικών βρόγχων. Σαφώς, για κάθε αλλαγή στη πειραματική διάταξη, πρέπει να διορθωθεί και το δομικό διάγραμμα στο LabVIEW.

5.5.2.1 Μεθοδολογία δημιουργίας προγράμματος για τις πειραματικές δοκιμές πρότυπης καμπύλης ISO 834

Και στις δύο πειραματικές δοκιμές καμπυλών που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία υπήρχε ανάγκη προσθήκης ενός υπο-προγράμματος ελέγχου παροχής καυσίμου. Το LabVIEW επικοινωνεί με το παροχόμετρο καυσίμου και αναλόγως των απαιτήσεων του κάθε πειράματος διαχειρίζεται την ογκομετρική παροχή.

Για τις πειραματικές δοκιμές πρότυπης καμπύλης ISO 834 στο δομικό διάγραμμα ήταν αναγκαία η προσθήκη 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. Προκειμένου να ακολουθηθεί πιστά η καμπύλη ISO 834 που έχει παρουσιαστεί στην παράγραφο 2.2.1, κάθε 1,1 δευτερόλεπτα συλλέγονταν οι τιμές 6 θερμοστοιχειών του centerline του πίνακα 5.14.

Πίνακας 5.14 Θέσεις θερμοστοιχειών προς χρήση στον PID

x(mm)	z(mm)	y(mm)
300	660	0
300	790	0
600	660	0
600	790	0
900	660	0
900	790	0

Από τις θερμοκρασίες αυτές αφαιρείται η μέγιστη και η ελάχιστη, και υπολογίζεται ο μέσος όρος. Η νέα τιμή αυτή συγκρίνεται κάθε 1,1 δευτερόλεπτα με την θεωρητική τιμή της καμπύλης ISO 834. Εάν η μετρούμενη θερμοκρασία είναι μικρότερη από την θεωρητική τότε το πρόγραμμα στέλνει σήμα στα παροχόμετρα καυσίμου να αυξηθεί η ογκομετρική παροχή. Εάν η μετρούμενη θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη της θεωρητικής, επέρχεται μείωση της ογκομετρικής παροχής.

5.5.2.2 Μεθοδολογία δημιουργίας προγράμματος για τις πειραματικές δοκιμές καμπύλης παροχής χρόνου, V-t.

Η καμπύλη V-t όπως αναφέρεται και στην παράγραφο 1.3 προέκυψε από τα πειραματικά δεδομένα των πειραμάτων με την καμπύλη ISO 834. Είναι μια αριθμητική συνάρτηση της παροχής του καυσίμου με μοναδική μεταβλητή τον χρόνο. Ανά 1,1 δευτερόλεπτα το πρόγραμμα LabVIEW υπολογίζει την νέα απαιτούμενη παροχή και στέλνεται σήμα στα παροχόμετρα, ώστε να εφαρμοστεί η νέα αυτή τιμή. Πιο αναλυτική παρουσίαση της καμπύλης αυτής θα συμβεί στο επόμενο κεφάλαιο.

5.6 Σύστημα δειγματοληψίας-θερμιδομετρία

Η πιο σημαντική παράμετρος για την ασφαλή εκτίμηση του κινδύνου μιας πυρκαγιάς είναι ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας (Heat Release Rate-HRR). Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση μιας συσκευής που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της εκλυόμενης θερμότητας ονομαζόμενη θερμιδομετρητής, ενώ η μέθοδος μέτρησης ονομάζεται θερμιδομετρία. Η ανάγκη εκτίμησης του κινδύνου μιας πυρκαγιάς ώθησε στη εύρεση δεδομένων υπολογισμού του ρυθμού έκλυσης θερμότητας, τα οποία να χαρακτηρίζονται από υψηλή ακρίβεια, με απαραίτητη προϋπόθεση τη χρήση κατάλληλων συσκευών και μεθόδων για την πραγματοποίηση αξιόπιστων μετρήσεων. 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 χρήση πειραματικών δεδομένων, διαστάσεων μικρής κλίμακας, κυρίως του ρυθμού έκλυσης θερμότητας, σε συνδυασμό με μία διαδικασία υπολογισμών για αναγωγή σε πραγματικό μέγεθος. Η δεύτερη προσέγγιση είναι αναμφίβολα περισσότερο ευέλικτη και λιγότερο χρονοβόρα και δαπανηρή. Η συνεχής βελτίωση της ακρίβειας των μοντέλων φωτιάς οδήγησε στην επικράτεια της δεύτερης μεθόδου.

5.6.1 Θερμιδομετρία κατανάλωσης οξυγόνου

Το 1917, ο Thornton έδειξε ότι κατά την τέλεια καύση ενός μεγάλου αριθμού οργανικών υγρών και αερίων, απελευθερώνεται ένα σχετικά σταθερό ποσό θερμότητας ανά μονάδα καταναλισκόμενου οξυγόνου (Thornton, 1917). Ο Hugget (1980) επιβεβαίωσε ότι αυτό ισχύει και για τα οργανικά στερεά και η σταθερά E_{O_2} λαμβάνει μία μέση τιμή ίση με 13.1 MJ/kg_{O_2} . Η τιμή αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πρακτικές εφαρμογές και είναι ακριβής, με πολύ λίγες εξαιρέσεις, με απόκλιση $\pm 5\%$. 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.

5.6.1.1 Κανόνας 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.

Από το βιβλίο SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2016 παρουσιάζεται ο πίνακας 5.13, ο οποίος καταγράφει τις τιμές εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα μάζας οξυγόνου, διοξειδίου και μονοξειδίου του άνθρακα, E_{O_2} , E_{CO_2} ή $E_{O_2'}$ και E_{CO} ή $E_{O_2''}$ μαζί με τιμές της ογκομετρικής διαστολής α .

Πίνακας 5.15 Τιμές εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα μάζας O_2 , CO_2 , CO (MJ/kg_{O_2}) και ογκομετρικής διαστολής α , SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2016

Κατηγορία	E_{O_2} (MJ/kg O_2)	α	E'_{O_2} (MJ/kg CO_2)	E''_{O_2} (MJ/kg CO)
Καύσιμα που περιέχουν C και H				
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
Καύσιμα που περιέχουν C, H και O				
Αλκοόλες	13.3	1.104	14.5	12.8
Αλδεΐδες	14.2	1.108	13.3	10.6
Κετόνες	13.2	1.088	13.2	11.1
Οξέα	14.2	1.245	9.7	5.4
Εστέρες	13.0	1.118	12.5	9.7
Λοιπά	13.9	1.076	12.2	8.9
Καύσιμα που περιέχουν C, H, O και S				
Καύσιμα C-H-N	11.5	1.055	15.4	14.1
Καύσιμα C-H-S	11.3	1.051	13.1	11.5
Πολυμερή υλικά				
C και H στη δομή	12.5	1.051	12.4	9.5
C, H, O και N στη δομή	12.5	1.085	10.9	7.2
C, H και Cl στη δομή	12.8	1.124	12.1	9.6
C, H και F στη δομή	11.3	1.293	9.2	-
C, H και Si στη δομή	13.7	1.083	14.8	13.3

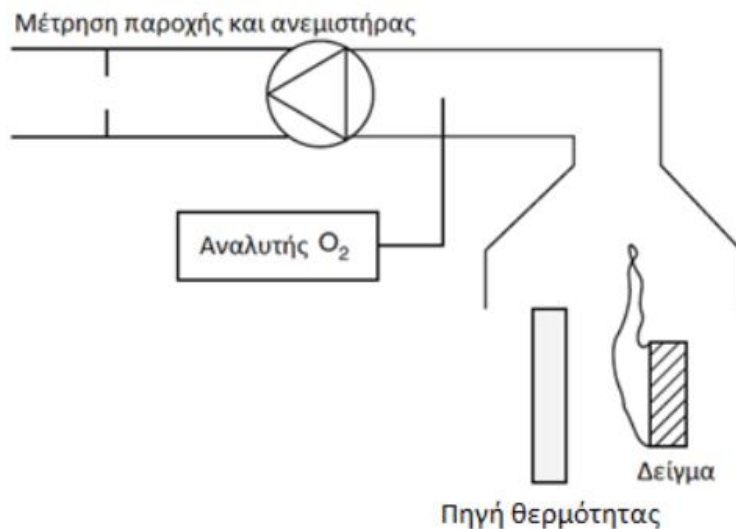
5.6.2 Εφαρμογή της Μεθόδου Κατανάλωσης Οξυγόνου

Για την εφαρμογή της μεθόδου καταναλισκόμενου οξυγόνου, αναγκαία προϋπόθεση είναι η συλλογή και καθοδήγηση των προϊόντων της καύσης διαμέσου ενός αγωγού καυσαερίων. Η σωστή τοποθέτηση του θερμιδομετρητή είναι κατάντι της ροής στον αγωγό καυσαερίων, αφού έχει επέλθει κατάλληλη απόσταση για επαρκής ανάμειξη, ώστε να μετρηθούν η παροχή μάζας και η σύνθεση των καυσαερίων. Στην εικόνα 5.17 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 στην Εικόνα 5.18 οδηγεί στην Εξίσωση 5.10 για το ρυθμό έκλυσης θερμότητας:

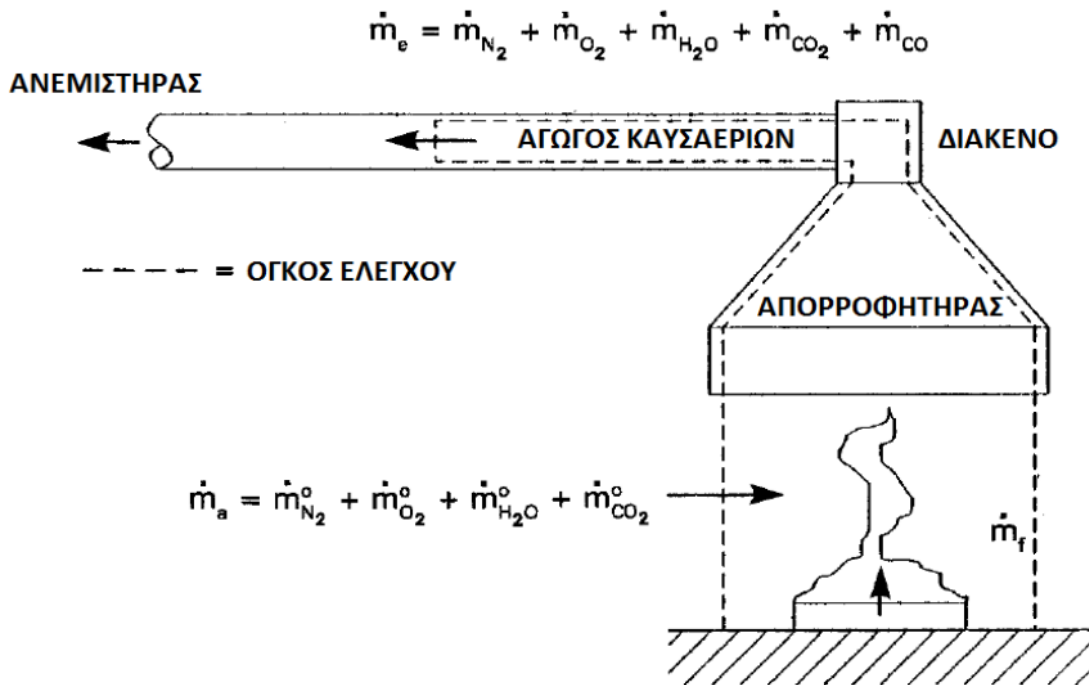
$$\dot{Q} = E_{O_2} (\dot{m}_a Y_{O_2}^a - \dot{m}_e Y_{O_2}^e) \quad (5.10)$$

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)



Εικόνα 5.17 Θερμιδομετρητής καταναλισκόμενου οξυγόνου.



Εικόνα 5.18 Εφαρμογή της αρχής διατήρησης μάζας σε σύστημα θερμιδομέτρησης

Η εφαρμογή της εξίσωσης (5.10) παρουσιάζει 3 προβλήματα.

- 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 καυσαερίων. 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.

Βελτιώσεις ανέπτυξαν οι Parker(1982) και Janssens(1991), αναπτύσσοντας εξισώσεις για τον υπολογισμό του HRR με τη μέθοδο του καταναλισκόμενου οξυγόνου για ποικίλες εφαρμογές. Οι εξισώσεις αυτές αποτελούν συνάρτηση της ανάλυσης των καυσαερίων. Αναγκαία προϋπόθεση είναι η μέτρηση της συγκέντρωσης του οξυγόνου, ενώ η γνώση των συγκεντρώσεων των υπολοίπων καυσαερίων βελτιώνουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

5.6.2.1 Μέτρηση μόνο του οξυγόνου

Με αφαίρεση υδρατμών (με ψυγείο και απορροφητής υγρασίας) και CO₂ (με χημικό απορροφητή) από τη ροή των καυσαερίων, μπορεί να γίνει μέτρηση του O₂. Υποθετικά, στην συγκεκριμένη περίπτωση, τα καυσαέρια αποτελούνται μόνο από O₂ και N₂. Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας υπολογίζεται με τον ακόλουθο τύπο:

$$\dot{Q} = E_{O_2} \frac{\varphi}{1+\varphi(\alpha-1)} \dot{m}_g \frac{M_{O_2}}{M_a} (1 - X_{H_2O}^a - X_{CO_2}^a) X_{O_2}^{A\alpha} \quad (5.11)$$

Και

$$\varphi = \frac{X_{O_2}^{A\alpha} - X_{O_2}^{Ae}}{(1 - X_{O_2}^{Ae}) X_{O_2}^{A\alpha}} \quad (5.12)$$

Όπου:

- φ : Παράγοντας κατανάλωσης οξυγόνου (κλάσμα της ποσότητας του εισερχόμενου αέρα για το οποίο καταναλώνεται πλήρως το οξυγόνο)
- α : 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
- $X_{O_2}^{A\alpha}$: Μετρούμενο γραμμομοριακό κλάσμα οξυγόνου στον αέρα καύσης
- $X_{O_2}^{Ae}$: 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 $\alpha=1$. Μία συνήθης μέση τιμή για τα καύσιμα του πίνακα 5.15 είναι $1,093 \pm 0,066$.

Το $X_{H_2O}^a$ μπορεί να μετρηθεί μέσω της σχετικής υγρασίας (Relative Humidity) και της θερμοκρασίας στο εργαστήριο σύμφωνα με την Εξίσωση (5.13). Τυπικά κυμαίνεται σε 1-2% σε εργαστήριο με ελεγχόμενη θερμοκρασία.

$$X_{H_2O}^a = \frac{RH}{100} \frac{P_s(T_a)}{P_a} \quad (5.13)$$

Όπου:

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

Σε ξηρό αέρα το $X_{CO_2}^a$ είναι περίπου 390ppm.

Η εξίσωση (5.11) παρουσιάζει σφάλμα της τάξης του 10%, υποθέτοντας τέλεια καύση. Το σφάλμα μπορεί να είναι μεγαλύτερο αν παραχθούν μετρήσιμες ποσότητες CO και αιθάλης ή αν τα προϊόντα της καύσης περιέχουν συστατικά εκτός των H₂O και CO₂ σε σημαντικές ποσότητες (για παράδειγμα HCl). Το σφάλμα εν μέρει οφείλεται στην αβεβαιότητα των μεταβλητών E_{O_2} και α .

5.6.2.2 Μέτρηση των O₂ και CO₂

Στην παρούσα περίπτωση δεσμεύονται μόνο οι υδρατμοί των καυσαερίων πριν φτάσουν στον αναλυτή. Σύννηθες φαινόμενο είναι η ποσότητα CO να είναι υπολογιστικά ασήμαντη. Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας υπολογίζεται από την εξίσωση (5.14).

$$\dot{Q} = E_{O_2} \frac{\varphi}{1+\varphi(\alpha-1)} \dot{m}_g \frac{M_{O_2}}{M_a} (1 - X_{H_2O}^a) X_{O_2}^{A\alpha} \quad (5.14)$$

Και

$$\varphi = \frac{X_{O_2}^{A\alpha}(1-X_{CO_2}^{Ae}) - X_{O_2}^{Ae}(1-X_{CO_2}^{A\alpha})}{(1-X_{O_2}^{Ae} - X_{CO_2}^{Ae})X_{O_2}^{A\alpha}} \quad (5.15)$$

Όπου

- $X_{CO_2}^{A\alpha}$: Μετρούμενο γραμμομοριακό κλάσμα διοξειδίου του άνθρακα στον αέρα καύσης
- $X_{CO_2}^{Ae}$: Μετρούμενο γραμμομοριακό κλάσμα διοξειδίου του άνθρακα στα καυσαέρια

5.6.2.3 Μέτρηση των O₂ , CO και CO₂

Η μεγαλύτερη βελτίωση της ακρίβειας του τύπου του ρυθμού έκλυσης θερμότητας συμβαίνει όταν συμπεριληφθεί και η μέτρηση του CO, δηλαδή όταν λαμβάνεται υπόψιν και η ατελής καύση. Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας υπολογίζεται από την διορθωμένη εξίσωση που ακολουθεί.

$$\dot{Q} = [E_{O_2}\varphi - (E_{CO} - E_{O_2}) \frac{1-\varphi}{2} \frac{X_{CO}^{Ae}}{X_{O_2}^{Ae}}] \frac{\dot{m}_g}{1+\varphi(\alpha-1)} \frac{M_{O_2}}{M_a} (1 - X_{H_2O}^a) X_{O_2}^{A\alpha} \quad (5.16)$$

Και

$$\varphi = \frac{X_{O_2}^{A\alpha}(1-X_{CO_2}^{Ae} - X_{CO}^{Ae}) - X_{O_2}^{Ae}(1-X_{CO_2}^{A\alpha})}{(1-X_{O_2}^{Ae} - X_{CO_2}^{Ae} - X_{CO}^{Ae})X_{O_2}^{A\alpha}} \quad (5.17)$$

Όπου:

- E_{CO} : Θερμότητα που εκλύεται ανά μάζα καταναλισκόμενου CO (17.6 MJ/kg)
- X_{CO}^{Ae} : Μετρούμενο γραμμομοριακό κλάσμα μονοξειδίου του άνθρακα στα καυσαέρια

5.7 Εκτίμηση πειραματικών σφαλμάτων

Υπάρχουν δύο είδη σφαλμάτων που εμφανίζονται σε πειραματικές μελέτες, 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.

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). Στην παρούσα εργασία, καθώς δεν συνέβησαν αρκετές επανειλημμένες μετρήσεις του ίδιου μεγέθους κάτω από αμετάβλητες συνθήκες, δεν έχει ουσία ο υπολογισμός του τυχαίου σφάλματος.

Αναφορικά, εδώ και δεκαετίες, αρκετοί μηχανικοί και στατιστικοί ανέπτυξαν διάφορα μοντέλα υπολογισμού των αβεβαιοτήτων στις μετρήσεις των οργάνων καθένα από τα οποία παρουσίαζε συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα (Dieck, 1997). Μερικά από τα μοντέλα αυτά είναι η αθροιστική μέθοδος (ICRPG, 1969), το μοντέλο ISO (International standards organization, 1993), το μοντέλο 95 (ASME, 1997) και το μοντέλο ASME (ASME, 1998). Η χρήση όμως ενός μοντέλου προϋποθέτει την γνώση του τυχαίου σφάλματος.

5.7.1 Συστηματικά Σφάλματα των μετρητικών οργάνων

Στην περίπτωση που υπάρχουν περισσότερες από μια ξεχωριστές πηγές συστηματικών σφαλμάτων, πρέπει να γίνει χρήση της ακόλουθης εξίσωσης για την εύρεση του συνολικού συστηματικού σφάλματος.

$$B_T = [B_1^2 + B_2^2 + B_3^2 + \dots]^{0,5} \quad (5.18)$$

Όπου B_1 , B_2 , κτλ είναι οι ξεχωριστές πηγές σφάλματος.

5.7.1.1 Θερμοστοιχεία

Στα πειράματα φωτιάς που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο, τα θερμοστοιχεία τύπου K που χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση θερμοκρασίας στο εσωτερικό του πυροδιαμερίσματος, εμφανίζουν συστηματικό σφάλμα από παράγοντες όπως, η ατελής βαθμονόμηση του οργάνου, η επικάθιση αιθάλης στο αισθητήριο, σφάλματα που οφείλονται στα καλώδια και στις προεκτάσεις αυτών, σφάλματα από τη σύνδεση των καλωδίων με τα συστήματα συλλογής δεδομένων, η θερμική αδράνεια του θερμοστοιχείου, καθώς και η ακτινοβολία.

Πιο συγκεκριμένα τα συστηματικά σφάλματα τα οποία εμφανίζονται με τις πηγές τους παρουσιάζονται παρακάτω.

- 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%).
- 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, σύνδεση με το σύστημα συλλογής δεδομένων. Τα καλώδια και οι προεκτάσεις που χρησιμοποιήθηκαν θεωρούνται ως τρίτη πηγή συστηματικού σφάλματος, το οποίο λαμβάνει την τιμή $\pm 2.2^\circ\text{C}$ ανεξαρτήτως της μετρούμενης τιμής (Nakos, 2004).

5.7.1.2 Αισθητήρες μέτρησης ταχύτητας

Όπως προαναφέρθηκε, στην πειραματική εγκατάσταση τοποθετήθηκαν τέσσερις δικατευθυντικοί μετρητές ταχύτητας και δύο σωλήνες Pitot-Static, οι οποίοι 2 αφαιρέθηκαν μετά τα τρία πρώτα πειράματα.

Η αβεβαιότητα στις μετρήσεις ενός αισθητήρα μέτρησης ταχύτητας 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 (5.3) 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 σύμφωνα με την εξίσωση που ακολουθεί.

$$U_u = \left[\left(\frac{\partial u}{\partial T} U_T \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial P} U_P \right)^2 \right]^{0,5} \quad (5.19)$$

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

5.7.1.3 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 $\pm 4 \text{ kW/m}^2$, αφού η μέγιστη τιμή της θερμοροής των μετρητών ήταν 200 kW/m^2 .
- 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/m^2) είναι η διαφορά της ροής θερμότητας που προσπίπτει μείον τη ροή θερμότητας που εκπέμπεται (σε kW/m^2 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 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ είναι $0,420 \text{ kW/m}^2$, οπότε κατά τη βαθμονόμηση, όπου οι θερμοκρασίες είναι άνω των $800 \text{ }^\circ\text{C}$, η συνεισφορά αυτή θεωρείται αμελητέα.

5.7.1.4 Ψηφιακά παροχόμετρα καυσίμου

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

- Ανάγνωσης: Το συστηματικό σφάλμα βαθμονόμησης είναι $\pm 0,5\%$.
- 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 50 l/min . Το συστηματικό σφάλμα πλήρους κλίμακας είναι $\pm 0,1\%$ και η τιμή $\pm 0,05 \text{ l/min}$ ισχύει για κάθε τιμή της ροής.

5.7.1.5 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 (5.9) 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 (5.20).

$$U_{\dot{V}} = \left[\left(\frac{\partial \dot{V}}{\partial T} U_T \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{V}}{\partial P} U_P \right)^2 \right]^{0,5} \quad (5.20)$$

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 5.16.

Πίνακας 5.16 Σύνοψη σφαλμάτων μετρητικών οργάνων

Αισθητήρας	Πηγή αβεβαιότητας	Συστηματικό Σφάλμα	Συνολικό συστηματικό σφάλμα
Θερμοστοιχεία	Βαθμονόμηση	$\pm 2,2^\circ\text{C}$, ή $\pm 0,75\%$ κάθε μέτρησης	Εξίσωση 5.18
	Σύνδεση	$\pm 0,5^\circ\text{C}$	
	Καλώδια	$\pm 2.2^\circ\text{C}$	
Δικατευθυντικοί μετρητές ταχύτητας	Γωνία πρόσπτωσης	$\pm 10\%$ κάθε μέτρησης	Εξίσωση 5.19
	Ψηφιακό μανόμετρο	$\pm 1\%$ μέγιστης	
Σωλήνες Static-Pitot	Γωνία πρόσπτωσης	$\pm 10\%$ κάθε μέτρησης	Εξίσωση 5.19
	Ψηφιακό μανόμετρο	$\pm 0,5\%$ μέγιστης	
Ροή θερμότητας	Βαθμονόμηση	$\pm 3\%$ κάθε μέτρησης	Εξίσωση 5.18

	Μη γραμμικότητα	$\pm 4 \text{ kW/m}^2$	
Παροχόμετρα καυσίμου	Ανάγνωσης	$\pm 0,5\%$ κάθε μέτρησης	Εξίσωση 5.18
	Πλήρους κλίμακας	$\pm 0,1\%$ της μέγιστης	
Παροχόμετρα Καυσαερίων	Ψηφιακό μανόμετρο	$\pm 5\%$ της μέγιστης	Εξίσωση 5.20

6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

6.1 Παραμετρικές μελέτες

Με σκοπό τη διεύρυνση των γνώσεων της επιστημονικής κοινότητας πάνω στην πυρκαγιά σε πυροδιαμέρισμα το οποίο περιέχει CLT πραγματοποιήθηκε πειραματική παραμετρική μελέτη. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν κατά τη διεκπεραίωση της διπλωματικής εργασίας ήταν δύο. Τα δομικά υλικά της οροφής και η καμπύλη ισχύος που ακολουθήθηκε.

6.1.1 Δομικά υλικά

Τα δομικά υλικά της οροφής που χρησιμοποιήθηκαν ήταν δύο. Η πρώτη οροφή ήταν κατασκευασμένη από άκαυστη κεραμική πλάκα 25mm και η δεύτερη οροφή από CLT με πάχος 160mm, 5 στρώματα και κατανομή 40-20-40-20-40 mm. Περισσότερες πληροφορίες για τα υλικά αυτά παρατίθενται στις παραγράφους 5.1.2 και 3.2.

6.1.2 Πρότυπες καμπύλες φωτιάς

Οι καμπύλες φωτιάς που εξετάστηκαν ήταν δύο. Η πρώτη ήταν η πρότυπη καμπύλη ISO-834 η οποία επιτυγχάνεται πειραματικά με τον τρόπο που εξηγείται στην παράγραφο 5.5.2.1. Η δεύτερη καμπύλη V-t είναι μια καμπύλη παροχής καυσίμου-χρόνου που προκύπτει από τα δεδομένα των τριών πρώτων πειραμάτων, στα οποία χρησιμοποιήθηκε κεραμική οροφή με την καμπύλη ISO-834. Συλλέγοντας τις τιμές της παροχής καυσίμου ανά χρονικά διαστήματα για τρία διαφορετικά πειράματα διάρκειας μιάμισης ώρας, με την χρήση του υπολογιστικού προγράμματος ORIGIN, η καμπύλη ISO-834, μια καμπύλη θερμοκρασίας χρόνου μετατράπηκε σε μια αριθμητική εξίσωση, μια καμπύλη παροχής καυσίμου-χρόνου V-t. Η αριθμητική αυτή εξίσωση δίνεται από τον τύπο 6.1.

$$\dot{V}(L/min) = -23,1333 \exp\left[\frac{-t(s)}{97,303015}\right] - 57,68987 \exp\left[\frac{-t(s)}{5749,78493}\right] + 86,48186 \quad (6.1)$$

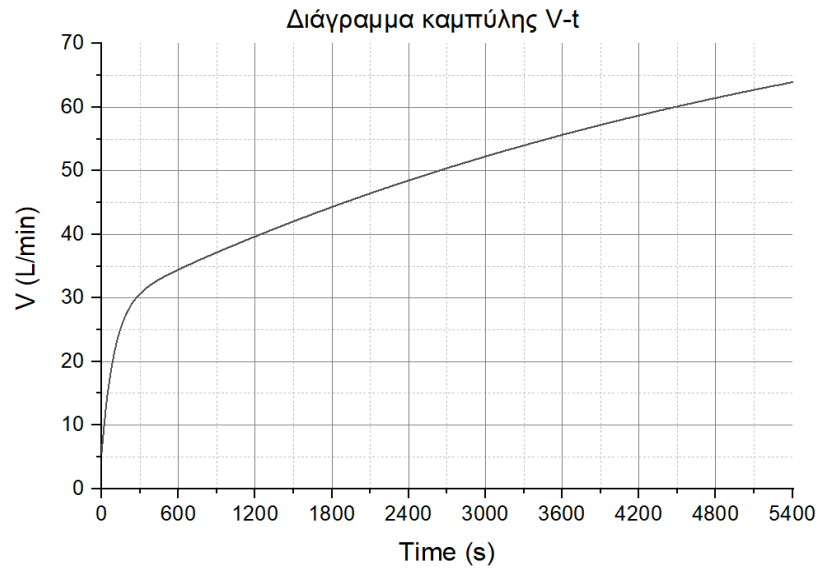
Για τον υπολογισμό της ισχύος Q από την παροχή V (L/min) ισχύει ο τύπος 6.2.

$$Q = \rho * \dot{V} * Hu \quad (6.2)$$

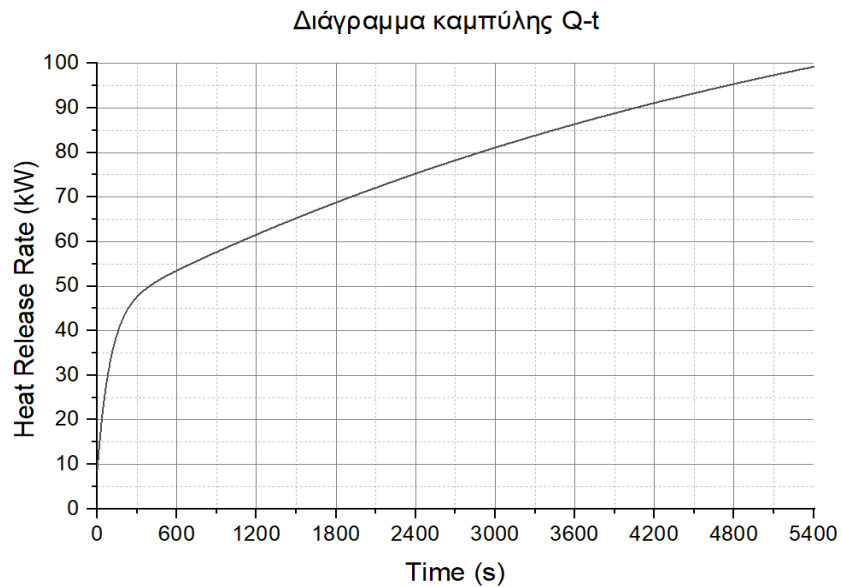
Η πυκνότητα και η κατώτερη θερμογόνοος δύναμη δίνονται στον πίνακα 5.13.

Η καμπύλη V-t μετατρέπεται σε μια καμπύλη ισχύς χρόνου Q-t. Η καμπύλη Q-t αυτή πρακτικά αντικατοπτρίζει την καμπύλη ISO-834 για την συγκεκριμένη πειραματική διάταξη, με άκαυστα τοιχώματα και οροφή.

Στα σχήματα 6.1 και 6.2 παρουσιάζονται τα διαγράμματα της καμπύλης παροχής καυσίμου V-t και της καμπύλης ισχύος Q-t στην οποία αντιστοιχεί.



Σχήμα 6.1 Διάγραμμα της καμπύλης παροχής χρόνου V-t.



Σχήμα 6.2 Διάγραμμα της καμπύλης ισχύος χρόνου Q-t.

Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της πειραματικής εργασίας δίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 6.1 Πληροφορίες πειραματικής μελέτης

ΚΩΔΙΚΗ ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	ΥΛΙΚΟ ΟΡΟΦΗΣ	ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΣΧΥΟΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ	ΔΙΑΡΚΕΙΑ
A1	Κεραμική Πλάκα	ISO-834	1 ώρα 30 λεπτά
A2	Κεραμική Πλάκα	ISO-834	1 ώρα 30 λεπτά
A3	Κεραμική Πλάκα	ISO-834	1 ώρα 30 λεπτά
B1	Κεραμική Πλάκα	Q-t	1 ώρα 30 λεπτά
B2	Κεραμική Πλάκα	Q-t	1 ώρα 30 λεπτά
B3	Κεραμική Πλάκα	Q-t	1 ώρα 30 λεπτά
C	CLT	ISO-834	1 ώρα 30 λεπτά
D	CLT	Q-t	1 ώρα

Το πείραμα D διακόπηκε εξαναγκασμένα στη μία ώρα λόγω της υψηλής ισχύος της φωτιάς, φαινόμενο που οδήγησε στην υψηλή παραγωγή καπνού και φλόγας που εξερχόταν από το άνοιγμα. Οι συνθήκες αυτές κατέστησαν τη συνέχιση του πειράματος επικίνδυνη.

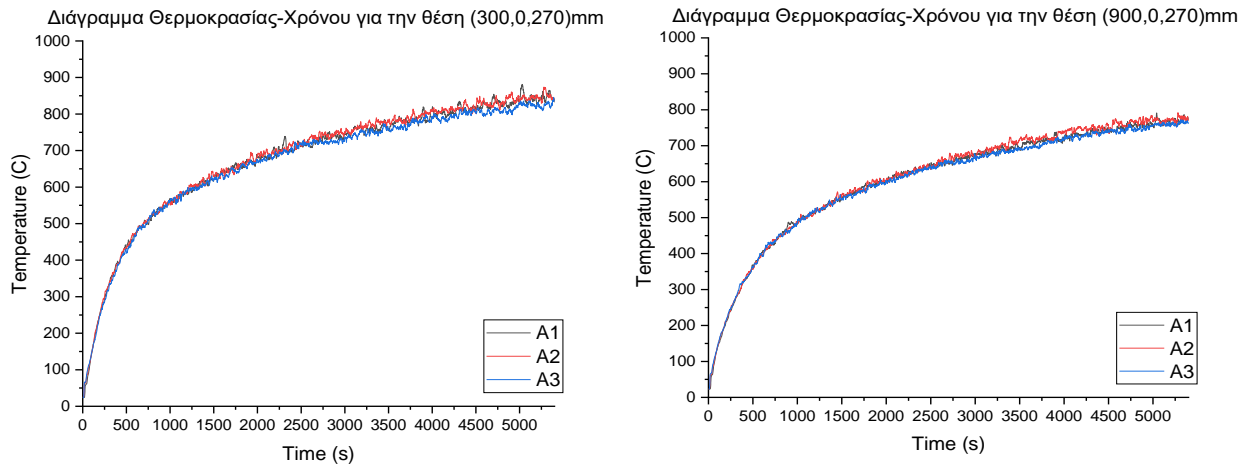
6.1.3 Επαναληψιμότητα

Με σκοπό την επαλήθευση των αποτελεσμάτων με σταθερές συνθήκες πραγματοποιήθηκαν συνολικά 6 πειράματα επαναληψιμότητας, τρία για τον συνδυασμό κεραμικής πλάκας-καμπύλης ISO-834 και τρία για τον συνδυασμό κεραμικής πλάκας-καμπύλης Q-t. Για την διευκόλυνση της σύγκρισης των δεδομένων που θα ακολουθήσει, βρίσκονται οι μέσοι όροι των δεδομένων που μετρήθηκαν. Πιο συγκεκριμένα υπολογίζονται οι μέσοι όροι από τα πειράματα A1, A2 και A3 και δημιουργείται το πείραμα A. Αντιστοίχως από τα πειράματα B1, B2 και B3 δημιουργείται το πείραμα B. Για να δικαιολογηθεί η πράξη αυτή παρουσιάζονται στη συνέχεια επιλεκτικά κάποια διαγράμματα θερμοκρασιών, ταχυτήτων και θερμορροών.

6.1.3.1 Πειράματα A1, A2 και A3

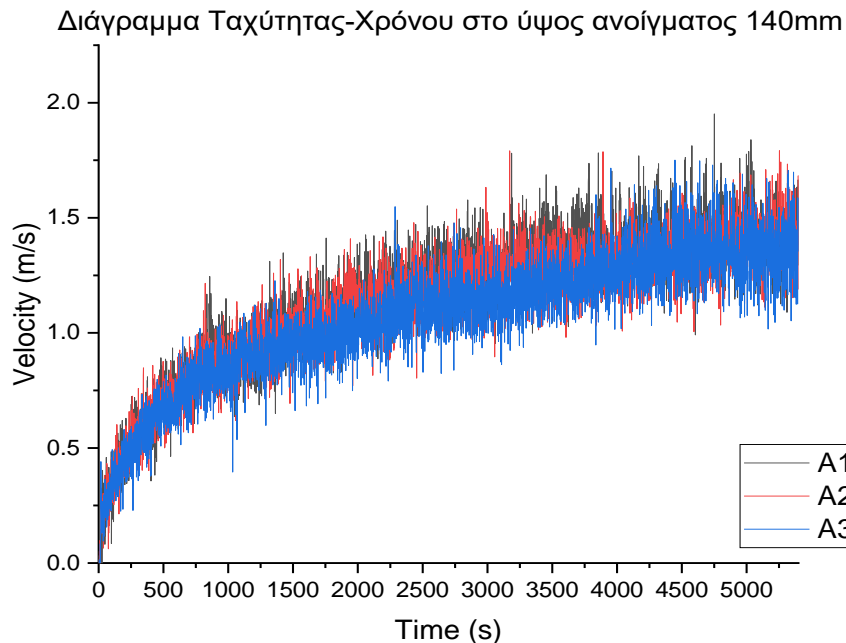
Θα συγκριθούν οι θερμοκρασίες στις θέσεις (x,y,z) (300,0,270)mm και (900,0,270)mm, η ταχύτητα στο άνοιγμα, στο ύψος 140mm και η θερμορροή στη θέση (1200,0,660)mm.

Ακολουθούν τα διαγράμματα:



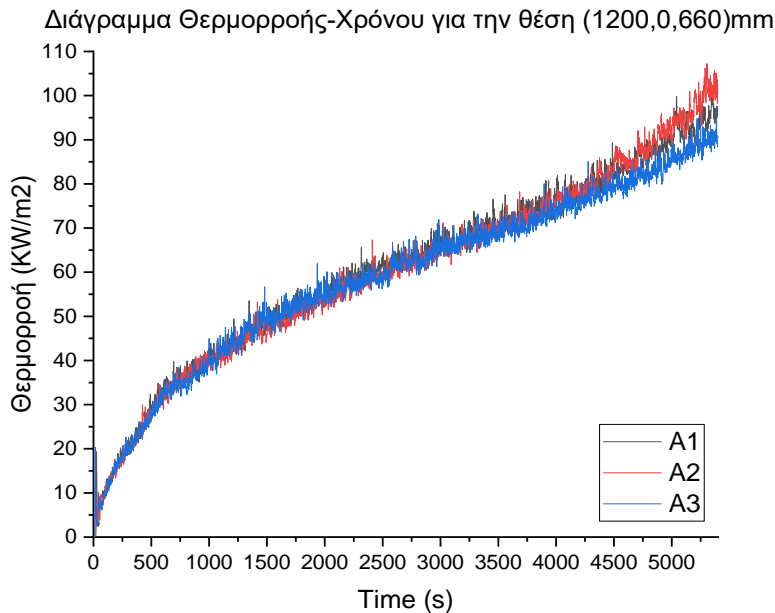
Σχήμα 6.3 Διαγράμματα θερμοκρασίας χρόνου στη θέση (300,0,270)mm (αριστερά) και στη θέση (900,0,270)mm (δεξιά) για τα πειράματα A1, A2 και A3.

Ο μέσος όρος των αποκλίσεων ανάμεσα στη μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία κάθε χρονικής τιμής ήταν 2,8% για την θέση (300,0,270)mm και 2,4% για την θέση (900,0,270)mm.



Σχήμα 6.4 Διάγραμμα ταχύτητας χρόνου στο ύψος ανοίγματος 140mm για τα πειράματα A1, A2 και A3.

Ο μέσος όρος των αποκλίσεων ανάμεσα στη μέγιστη και ελάχιστη ταχύτητα κάθε χρονικής τιμής ήταν 15,67%.



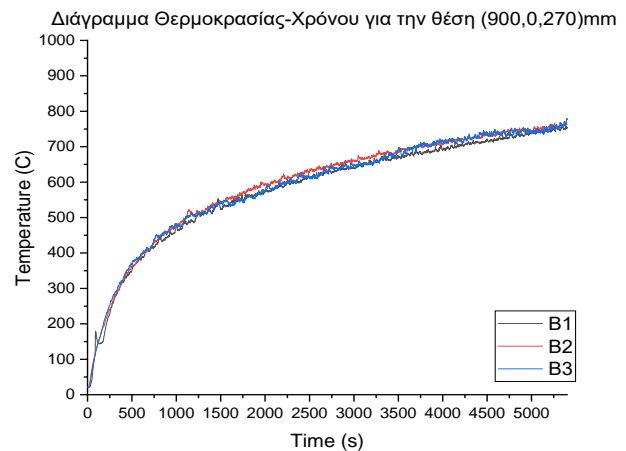
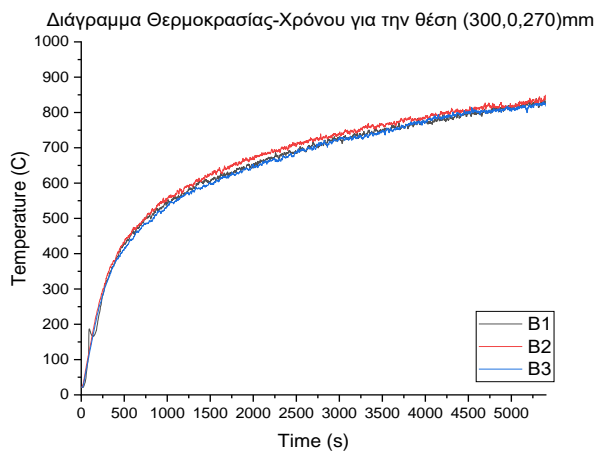
Σχήμα 6.5 Διάγραμμα θερμορροής χρόνου στη θέση (1200,0,660)mm για τα πειράματα A1, A2 και A3.

Ο μέσος όρος των αποκλίσεων ανάμεσα στη μέγιστη και ελάχιστη τιμή θερμορροής κάθε χρονικής τιμής ήταν 6,5%.

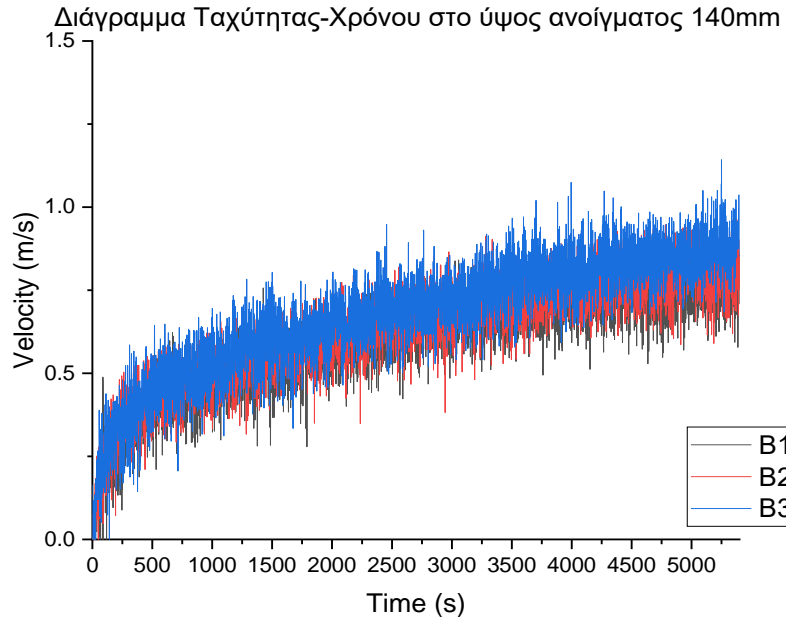
Από τα διαγράμματα και τις μικρές αποκλίσεις αποδικνύεται η επαναληψιμότητα των πειραμάτων για τις θερμοκρασίες με μικρές διαφορές, οφειλούμενες στα μετρητικά σφάλματα. Οι ταχύτητες συμπίπτουν με μεγάλη ακρίβεια (δεδομένων των μετρητικών σφαλμάτων) και αποδικνύεται η επαναληψιμότητα των πειραμάτων. Επιπλέον θετικό της εύρεσης των μέσων όρων στις ταχύτητες είναι η εξομάλυνση των διαγραμμάτων. Όμοια συμπεριφορά εμφανίζεται και στις θερμορροές, δεδομένου ότι τα μετρητικά όργανα των θερμορροών παρουσιάζουν πιθανώς μεγαλύτερα σφάλματα.

6.1.3.2 Πειράματα B1, B2 και B3

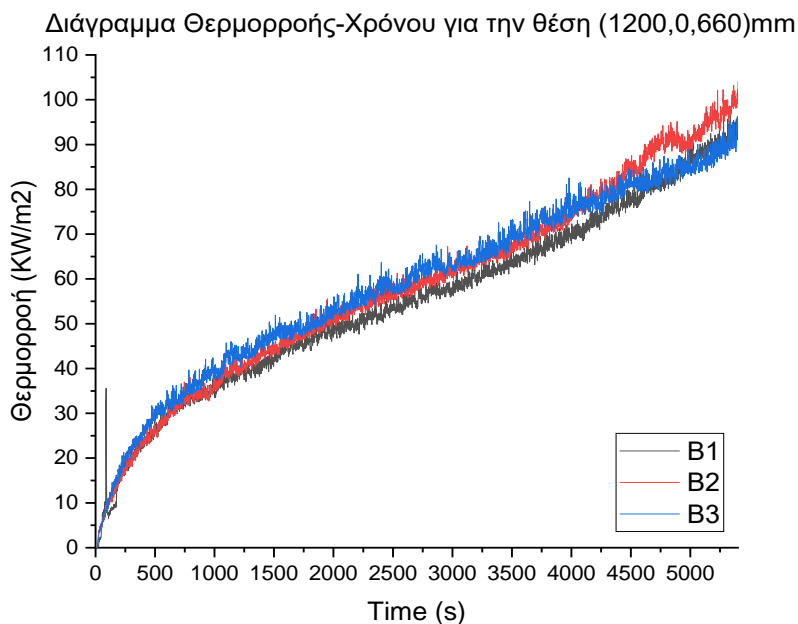
Συγκρίνονται τα δεδομένα στις ίδιες τοποθεσίες.



Σχήμα 6.6 Διαγράμματα θερμοκρασίας χρόνου στη θέση (300,0,270)mm (αριστερά) και στη θέση (900,0,270)mm (δεξιά) για τα πειράματα B1, B2 και B3. Ο μέσος όρος των αποκλίσεων ανάμεσα στη μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία κάθε χρονικής τιμής ήταν 3,6% για την θέση (300,0,270)mm και 3,5% για την θέση (900,0,270)mm.



Σχήμα 6.7 Διάγραμμα ταχύτητας χρόνου στο ύψος ανοίγματος 140mm για τα πειράματα B1, B2 και B3. Ο μέσος όρος των αποκλίσεων ανάμεσα στη μέγιστη και ελάχιστη ταχύτητα κάθε χρονικής τιμής ήταν 19,5%.



Σχήμα 6.8 Διάγραμμα θερμορροής χρόνου στη θέση (1200,0,660)mm για τα πειράματα B1, B2 και B3.

Ο μέσος όρος των αποκλίσεων ανάμεσα στη μέγιστη και ελάχιστη τιμή θερμορροής κάθε χρονικής τιμής ήταν 9,7%.

Όμοια με τα πειράματα A, αποδεικνύεται η επαναληψιμότητα των πειραμάτων για τις θερμοκρασίες με μικρές διαφορές, οφειλούμενες στα μετρητικά σφάλματα. Οι ταχύτητες συμπίπτουν με επαρκή ακρίβεια. Μεγάλη διακύμανση παρουσιάζεται στις τιμές των θερμορροών, όχι όμως εκτός των μετρητικών σφαλμάτων.

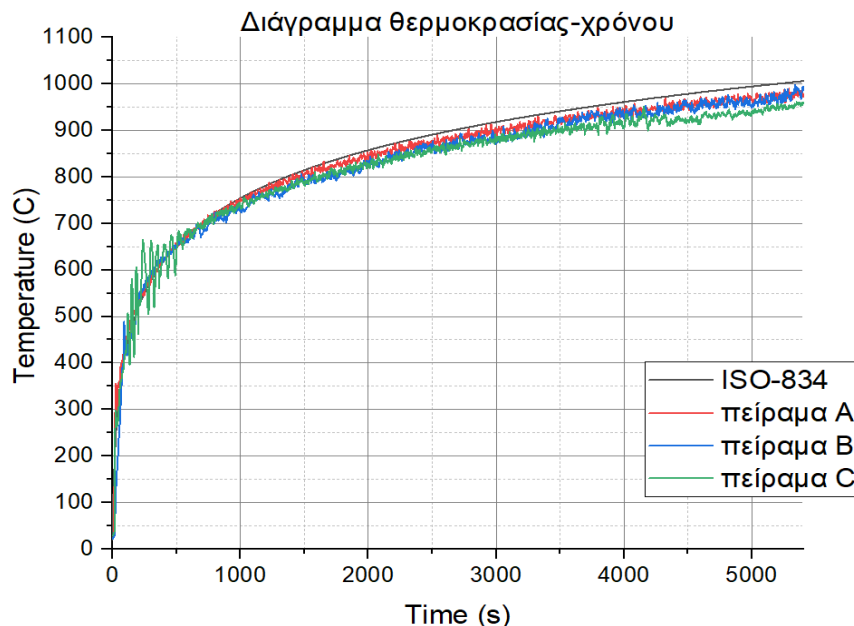
Επομένως δικαιολογείται η εύρεση μέσων όρων. Εν τέλει τα πειράματα τα οποία θα συγκριθούν είναι τα εξής:

Πίνακας 6.2 Πληροφορίες πειραματικής μελέτης

ΚΩΔΙΚΗ ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	ΥΛΙΚΟ ΟΡΟΦΗΣ	ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΣΧΥΟΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ	ΔΙΑΡΚΕΙΑ
A (average)	Κεραμική Πλάκα	ISO-834	1 ώρα 30 λεπτά
B (average)	Κεραμική Πλάκα	Q-t	1 ώρα 30 λεπτά
C	CLT	ISO-834	1 ώρα 30 λεπτά
D	CLT	Q-t	1 ώρα

6.1.4 Επιβεβαίωση καμπυλών φωτιάς

Συγκρίνοντας την καμπύλη ISO-834 με τις θερμοκρασίες ελέγχου (μέθοδος στην παράγραφο 5.5.2.1) των πειραμάτων A, B και C που την ακολουθούν, επαληθεύεται η ακεραιότητα της καμπύλης φωτιάς των πειραμάτων.



Σχήμα 6.9 Διάγραμμα θερμοκρασίας χρόνου.

Τα πειράματα ακολουθούν με μεγάλη ακρίβεια την καμπύλη ISO-834. Οι μικρές διαφορές στο διάγραμμα, πιθανώς οφείλονται σε μετρητικά σφάλματα των οργάνων.

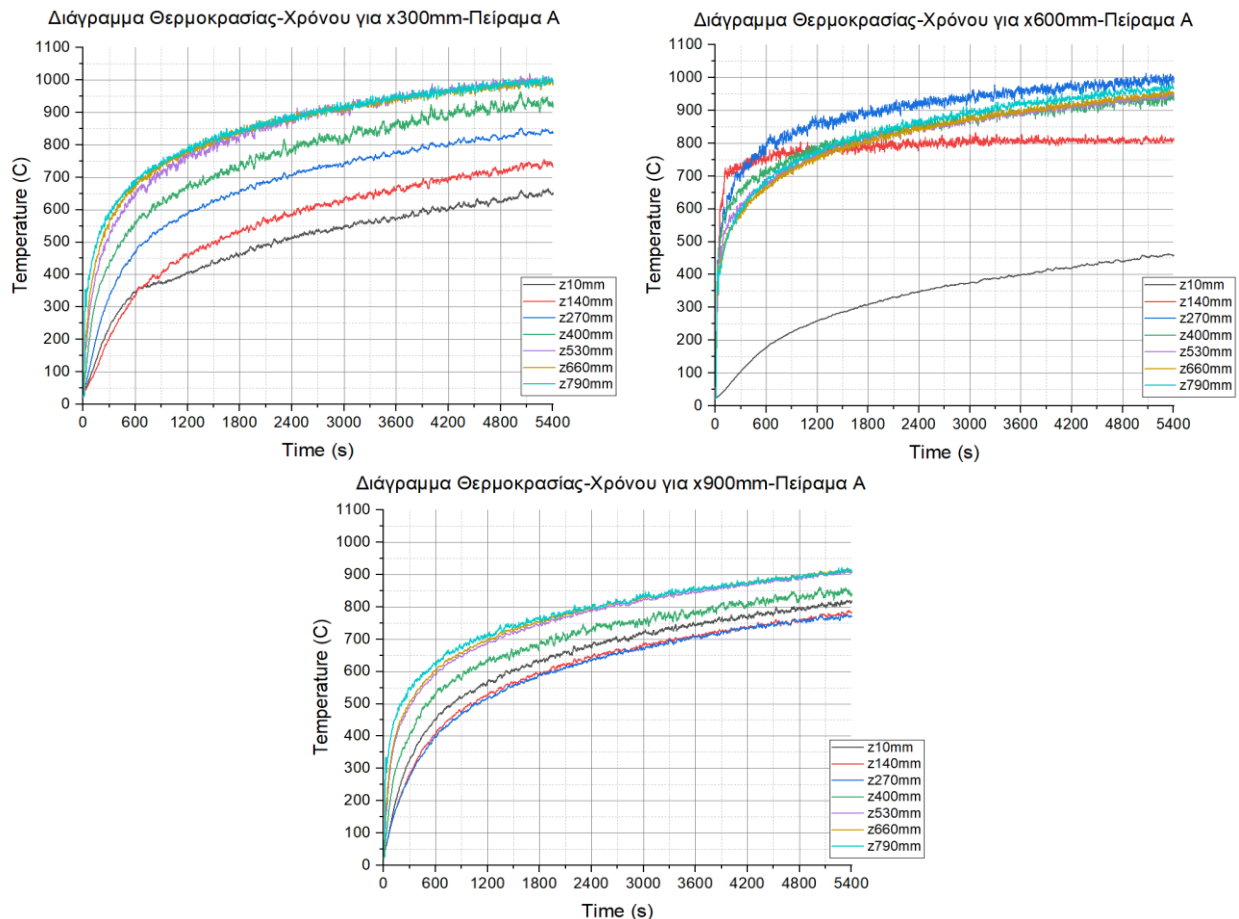
6.2 Αναπτυσσόμενο θερμικό πεδίο

Για την μελέτη του θερμικού πεδίου, το οποίο σχηματίζεται στο πυροδιαμέρισμα τοποθετήθηκαν τα θερμοστοιχεία που καταγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Για την "χαρτογράφηση" του αέριου περιβάλλοντος εντός του πυροδιαμερίσματος, χρησιμοποιούνται τα θερμοστοιχεία που ονομάστηκαν centerline και gas side wall. Αντίστοιχα για το άνοιγμα και τα τοιχώματα υπάρχουν τα, τοποθετημένα εκεί, θερμοστοιχεία.

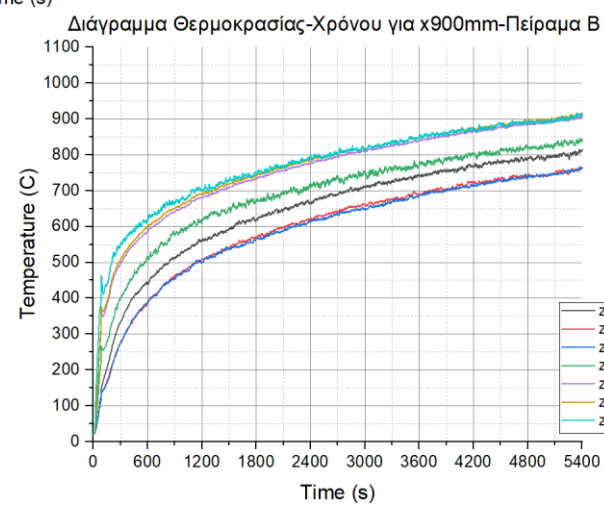
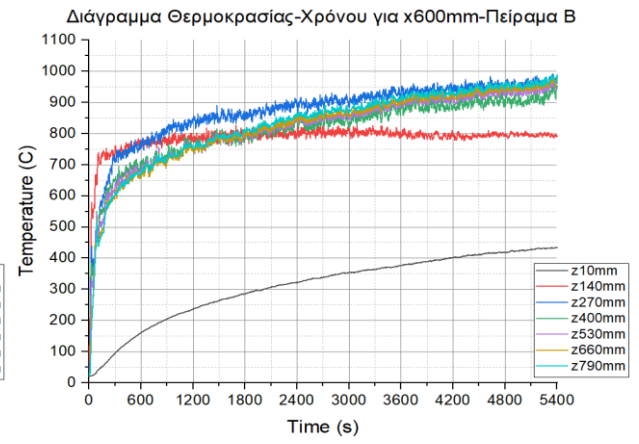
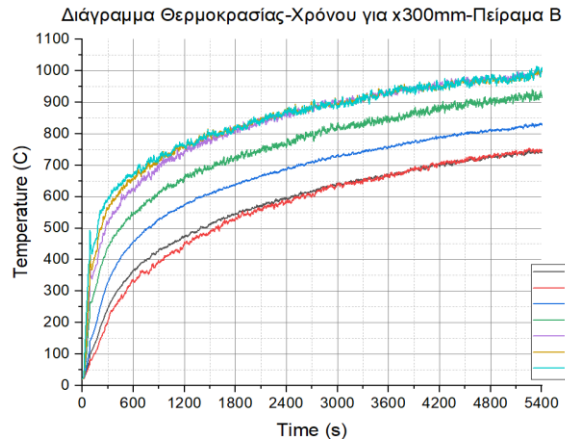
6.2.1 Αέριο περιβάλλον

6.2.1.1 Μονογραμμικά διαγράμματα κεντρικής ευθείας

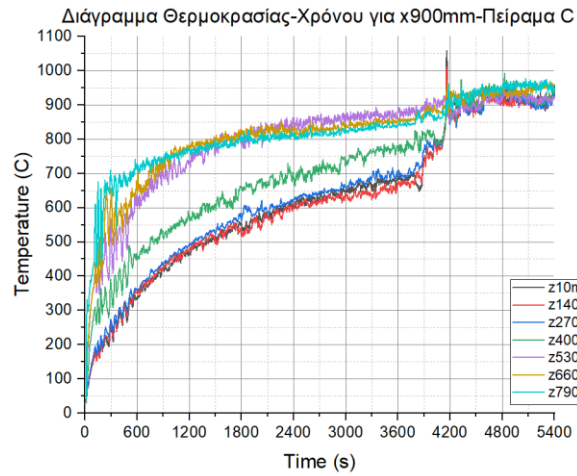
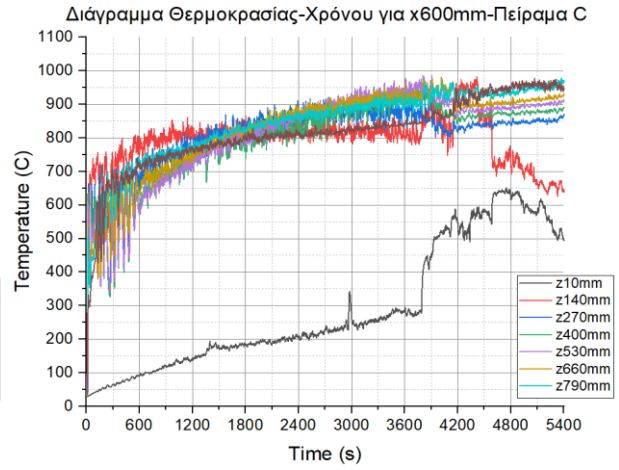
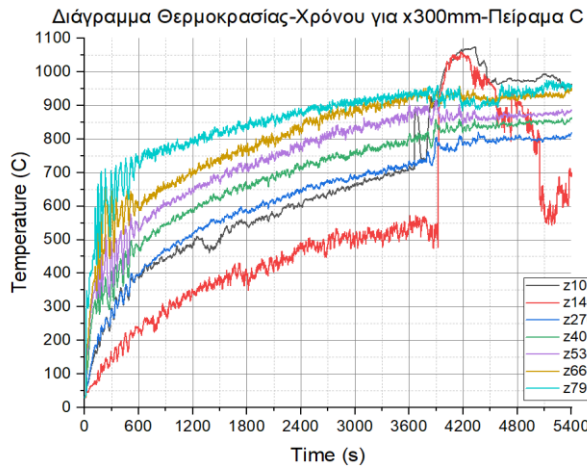
Τα κυριότερα θερμοστοιχεία που παρουσιάζουν πλήρως το αέριο περιβάλλον είναι αυτά για μήκος x 300,600 και 900mm, στα 7 διαφορετικά ύψη που έχουν τοποθετηθεί, στη κεντρική ευθεία του διαμερίσματος ($y=0$). Ακολουθούν τα διαγράμματα για τα 4 πειράματα A, B, C, D.



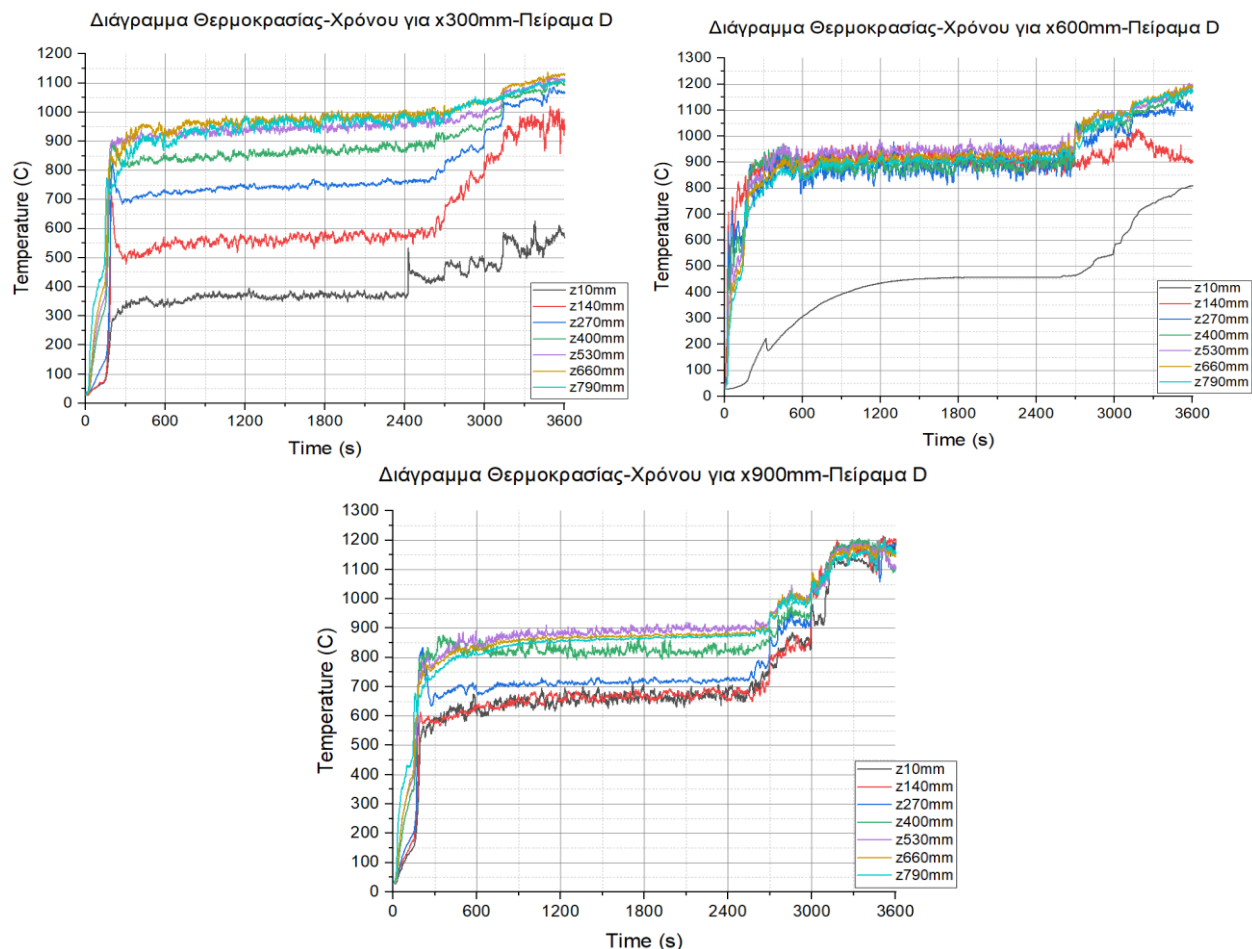
Σχήμα 6.10 Διαγράμματα θερμοκρασίας χρόνου στη θέση x300mm(αριστερά) x600mm(δεξιά) και x900mm(κάτω) της κεντρικής ευθείας για το πείραμα A.



Σχήμα 6.11 Διαγράμματα θερμοκρασίας χρόνου στη θέση x300mm(αριστερά) x600mm(δεξιά) και x900mm(κάτω) της κεντρικής ευθείας για το πείραμα Β.



Σχήμα 6.12 Διαγράμματα θερμοκρασίας χρόνου στη θέση x300mm(αριστερά) x600mm(δεξιά) και x900mm(κάτω) της κεντρικής ευθείας για το πείραμα C.



Σχήμα 6.13 Διαγράμματα θερμοκρασίας χρόνου στη θέση x300mm(αριστερά) x600mm(δεξιά) και x900mm(κάτω) της κεντρικής ευθείας για το πείραμα D.

Παρατηρήσεις:

Οι θερμοκρασίες στα πειράματα A και B ακολουθούν μια λογαριθμικής μορφής αύξηση που οφείλεται στην καμπύλη ISO-834. Οι θερμοκρασίες είναι μεγαλύτερες στα υψηλότερα σημεία λόγω του φαινομένου της θερμικής άνωσης. Το θερμοστοιχείο για x600mm και z10mm σε όλα τα πειράματα είναι τοποθετημένο κάτω από τον καυστήρα, με αποτέλεσμα η θερμοκρασία στο σημείο αυτό να είναι πολύ χαμηλότερη από τις υπόλοιπες, ενώ οι υπόλοιπες θερμοκρασίες για x600mm είναι όλες υψηλές και κοντά μεταξύ τους, καθώς τα θερμοστοιχεία βρίσκονται ακριβώς επάνω στην φλόγα.

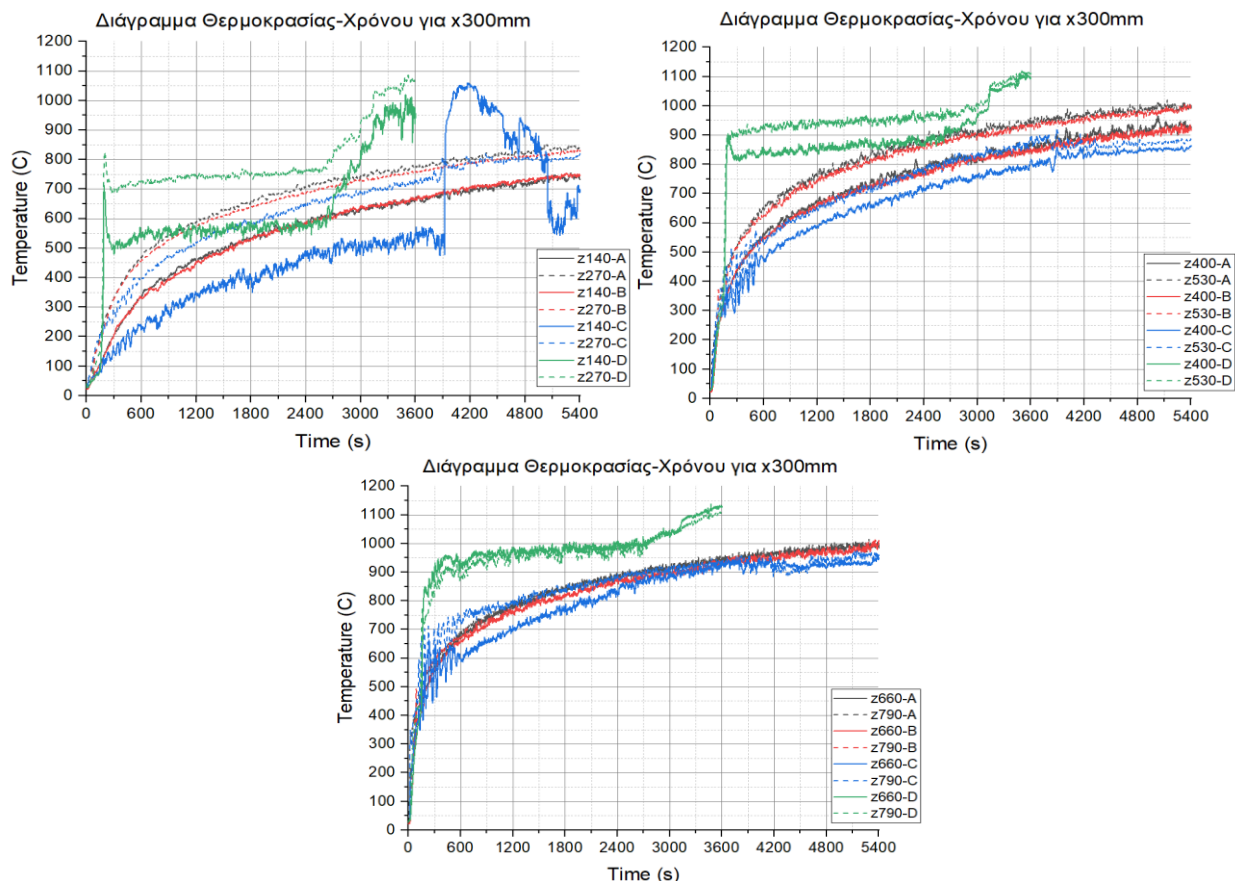
Τα διαγράμματα των πειραμάτων A και B είναι πανομοιότυπα καθώς η καμπύλη Q-t για το άκαυστο πυροδιαμέρισμα των συγκεκριμένων διαστάσεων ισοδυναμεί με την καμπύλη ISO-834.

Στο πείραμα C, η ίδια η καύση του CLT εκλύει θερμότητα με αποτέλεσμα ο βρόγχος ελέγχου να στέλνει αρκετά λιγότερο καύσιμο για να πετύχει την επιθυμητή θερμοκρασία της καμπύλης ISO-834.

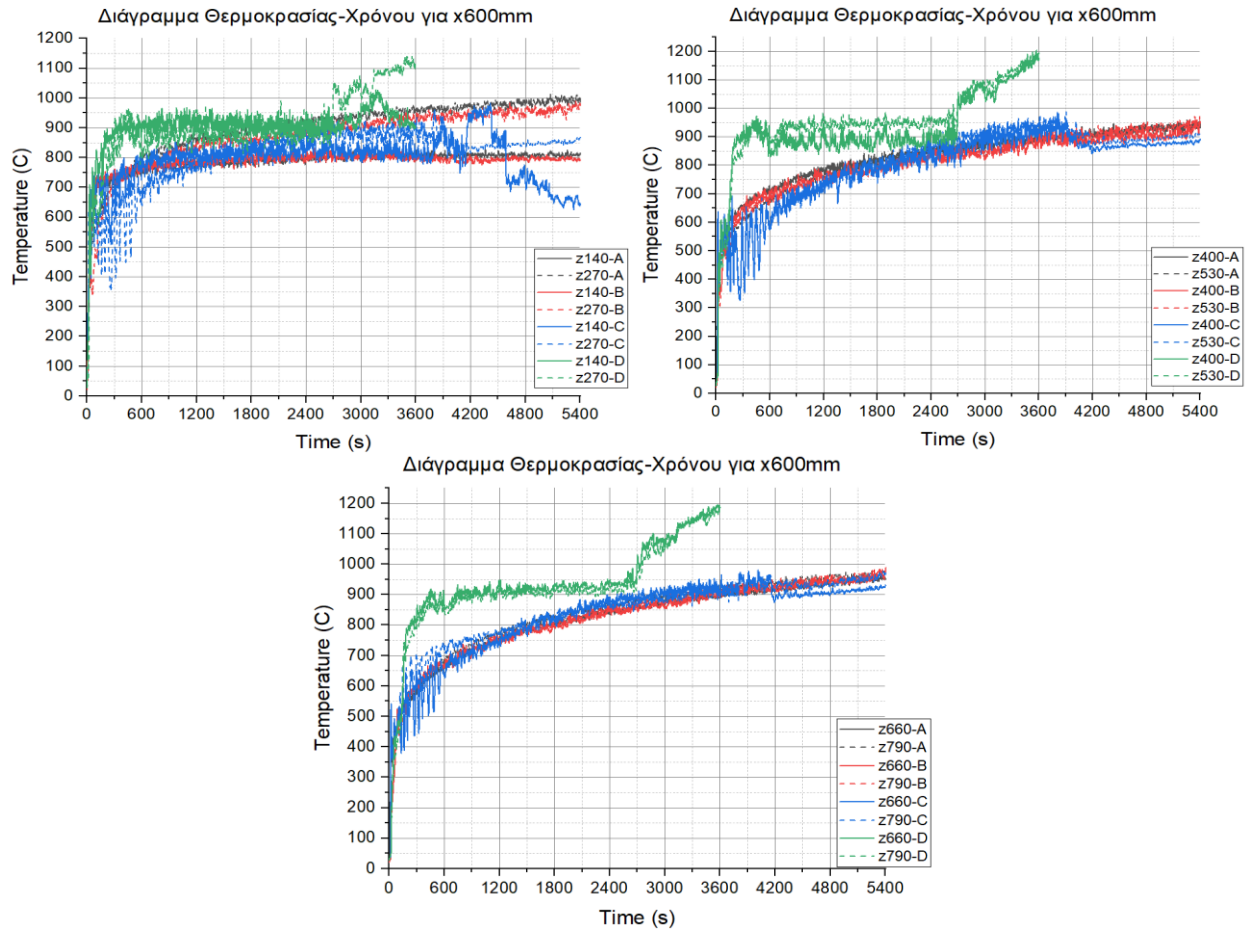
Και στα τρία διαγράμματα στο σχήμα 6.12, μετά την μία ώρα παρατηρείται μια ραγδαία αύξηση θερμοκρασίας στα δύο χαμηλά θερμοστοιχεία για z 10 και 140mm. Οι θερμοκρασίες κορυφώνονται στα 4200s. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται σε εξανθρακώματα τα οποία αποκολλήθηκαν και έπεσαν στο δάπεδο του πυροδιαμερίσματος, όπως παρουσιάστηκε ότι μπορεί να συμβεί σε προηγούμενα κεφάλαια. Τα εξανθρακώματα αυτά συνεχίζουν να καίγονται και να εκπέμπουν θερμότητα. Όταν σταματήσουν, οι θερμοκρασίες επανέρχονται

Το πείραμα D ακολουθεί την καμπύλη $Q-t$ η οποία δεν λαμβάνει υπόψιν της τη θερμοκρασία εντός του πυροδιαμερίσματος. Η συνεχής αύξηση της παροχής καυσίμου έχει ως αποτέλεσμα, στο τέλος της μιας ώρας όπου το πείραμα έληξε εξαναγκασμένα, οι θερμοκρασίες που μετρήθηκαν να είναι πολύ υψηλότερες από αυτές των υπολοίπων τριών πειραμάτων που διένυσαν ολόκληρη τη μιάμιση ώρα. Αποκόλληση εξανθρακώματος δικαιολογεί την αύξηση της θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου z_{10mm} και z_{600mm} στο σχήμα 6.13 το οποίο βρίσκεται κάτω από τον καυστήρα.

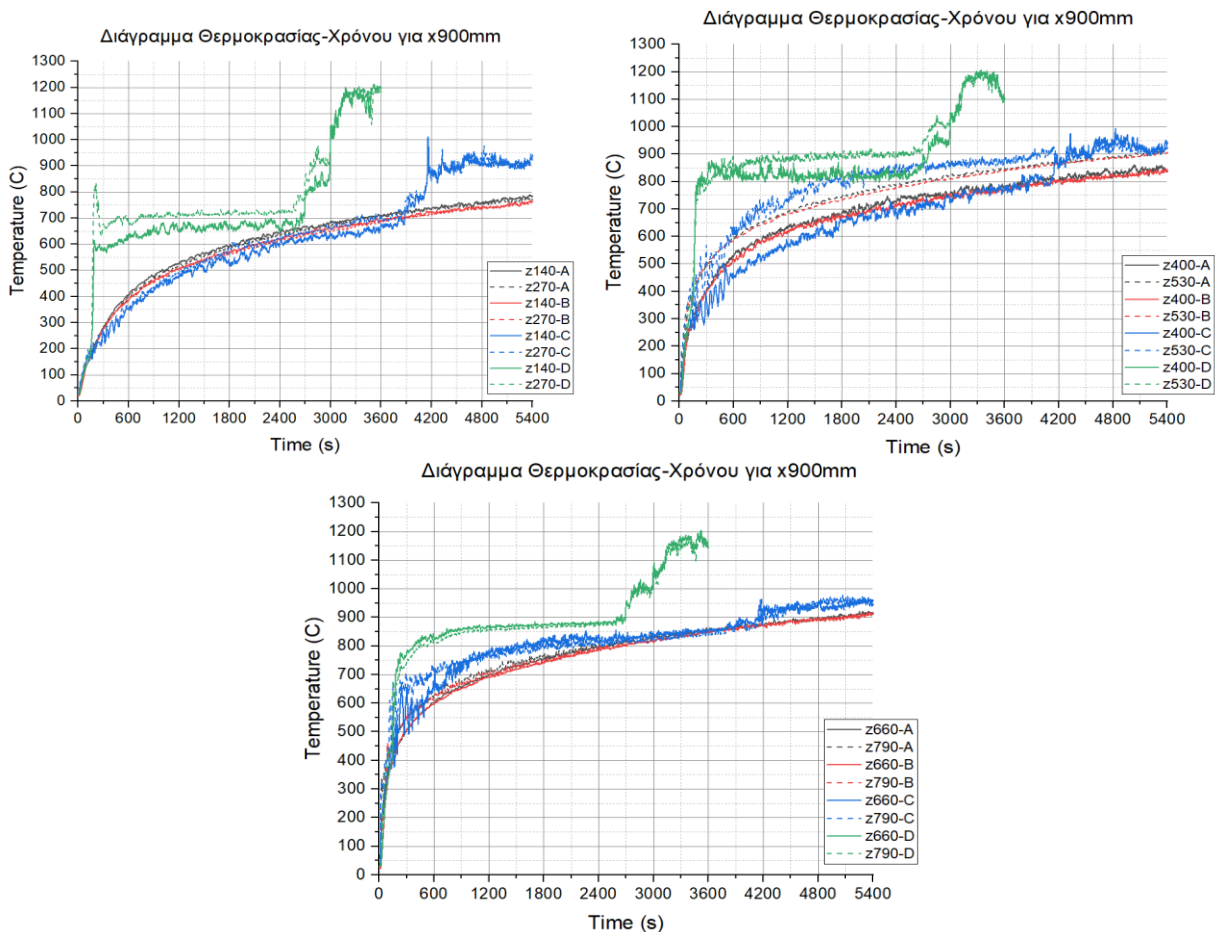
Για την ολοκληρωμένη παρουσίαση των διαφορών μεταξύ των τεσσάρων πειραμάτων, θα γίνουν κοινά διαγράμματα ανά ζεύγη θερμοστοιχείων. Τα ζεύγη θα είναι τα θερμοστοιχεία στα ύψη 140mm με 270mm, 400mm με 530mm και τέλος 600mm με 790mm. Στο πείραμα A αντιστοιχεί το χρώμα γκρι, στο B το κόκκινο, στο C το μπλε και στο D το πράσινο.



Σχήμα 6.14 Διαγράμματα θερμοκρασίας χρόνου στη θέση $x=300mm$ κεντρικής ευθείας για τα ύψη 140mm και 270mm (αριστερά), για τα ύψη 400mm και 530mm (δεξιά) και για τα ύψη 660mm και 790mm (κάτω).



Σχήμα 6.15 Διαγράμματα θερμοκρασίας χρόνου στη θέση x600mm κεντρικής ευθείας για τα ύψη 140mm και 270mm (αριστερά), για τα ύψη 400mm και 530mm (δεξιά) και για τα ύψη 660mm και 790mm (κάτω).



Σχήμα 6.16 Διαγράμματα θερμοκρασίας χρόνου στη θέση x900mm κεντρικής ευθείας για τα ύψη 140mm και 270mm (αριστερά), για τα ύψη 400mm και 530mm (δεξιά) και για τα ύψη 660mm και 790mm (κάτω).

Παρατηρήσεις:

Όπως ήταν αναμενόμενο οι θερμοκρασίες του πειράματος D ήταν αρκετά υψηλότερες λόγω της ισχύος της καμπύλης φωτιάς. Οι διαφορές αυτές κυμαίνονται περίπου από 100°C στα χαμηλά ύψη στο σχήμα 6.15 έως και 300 °C στα σχήματα 6.15 στα μεσαία ύψη. Η μέγιστη διαφορά παρατηρείται στα χαμηλά ύψη στο σχήμα 6.16 στους 400 °C ανάμεσα στα πειράματα D και A,B.

Στο σχήμα 6.14, στο διάγραμμα αριστερά, παρουσιάζεται η διαφορά που προκαλεί η ακτινοβολία των αποκολλημένων εξανθρακωμάτων με την απότομη αύξηση της θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου μετά τα 65 λεπτά στο ύψος 140mm στο πείραμα C

Αξίζει να σημειωθεί πως το πείραμα C παρουσίαζε ελαφρώς μικρότερες θερμοκρασίες από τα A και B της τάξεως των 50 °C με 100 °C, ειδικά στα μεσαία ύψη του διαμερίσματος για x300mm, ενώ για x900mm παρουσίαζε ελαφρώς μεγαλύτερες, πάλι της τάξεως των 50 °C υψηλά στο διαμέρισμα και των 100 °C στο υπόλοιπο.

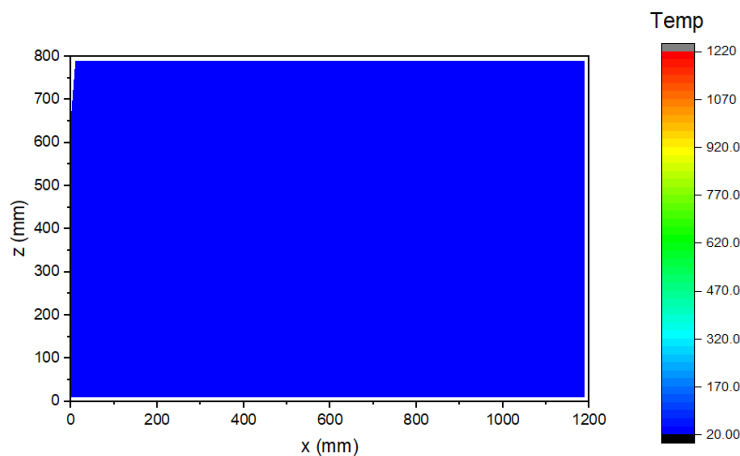
Ένα ενδιαφέρον φαινόμενο που παρατηρείται είναι πως στα πειράματα με οροφή CLT οι μέγιστες θερμοκρασίες αέρα παρατηρούνται στο οπίσθιο μέρος του πυροδιαμερίσματος. Το πείραμα C παρουσιάζει για x900mm υψηλότερες

θερμοκρασίες από τα πειράματα με άκαυστη οροφή. Το φαινόμενο αυτό πιθανώς να οφείλεται στην επιρροή της καύσης του CLT στο ροϊκό πεδίο του πυροδιαμερίσματος, το οποίο μεταβάλλει τη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή.

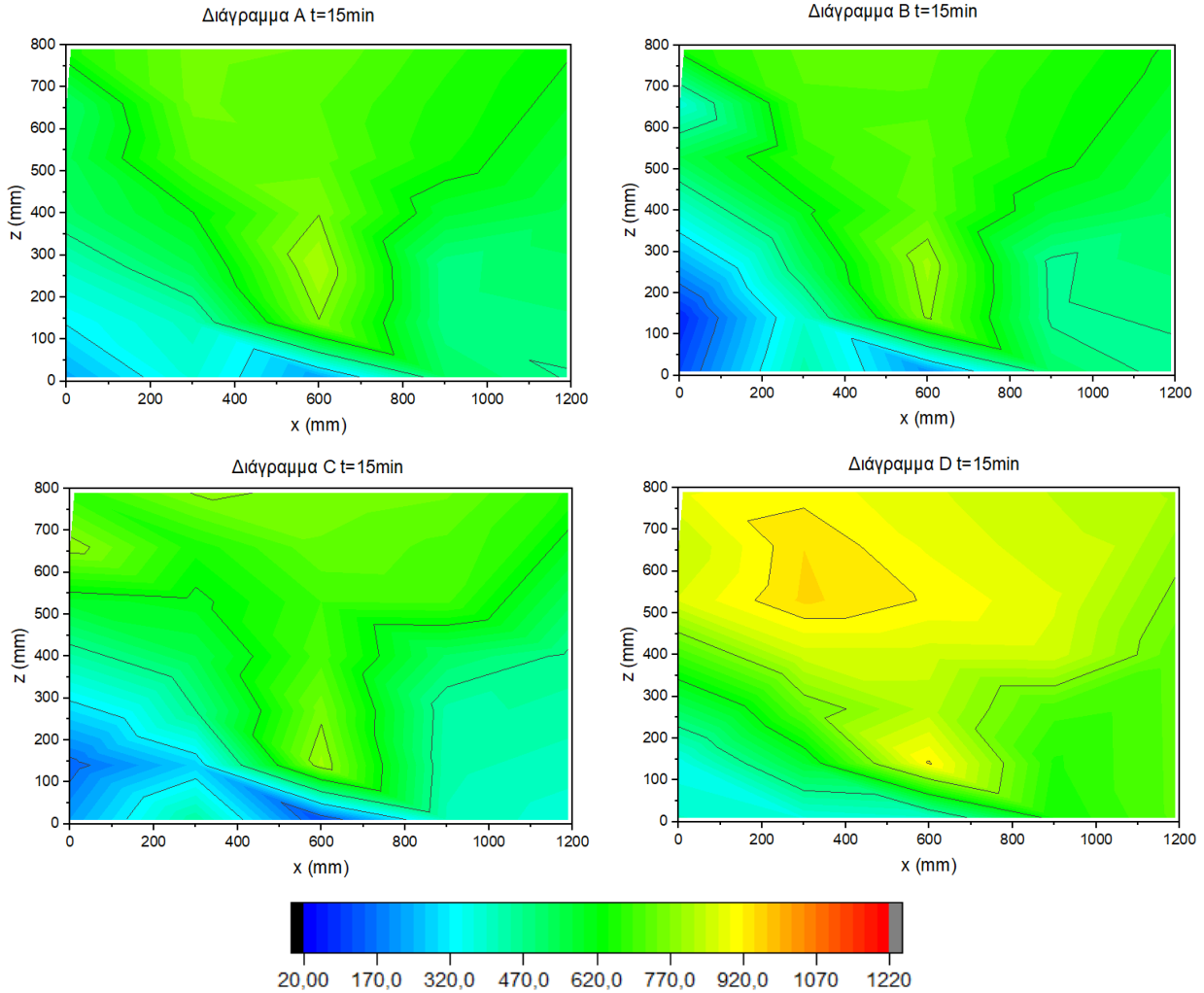
6.2.1.2 Ισοσταθμικά διαγράμματα κεντρικής ευθείας

Με τη βοήθεια του υπολογιστικού προγράμματος Origin, δημιουργούνται ισοσταθμικά διαγράμματα θερμοκρασίας, τα οποία παρουσιάζουν μια πλήρη εικόνα του θερμικού πεδίου στο διαμέρισμα στην κεντρική του ευθεία. Τα διαγράμματα αυτά σχηματίζονται ανά χρονικά διαστήματα 15 λεπτών.

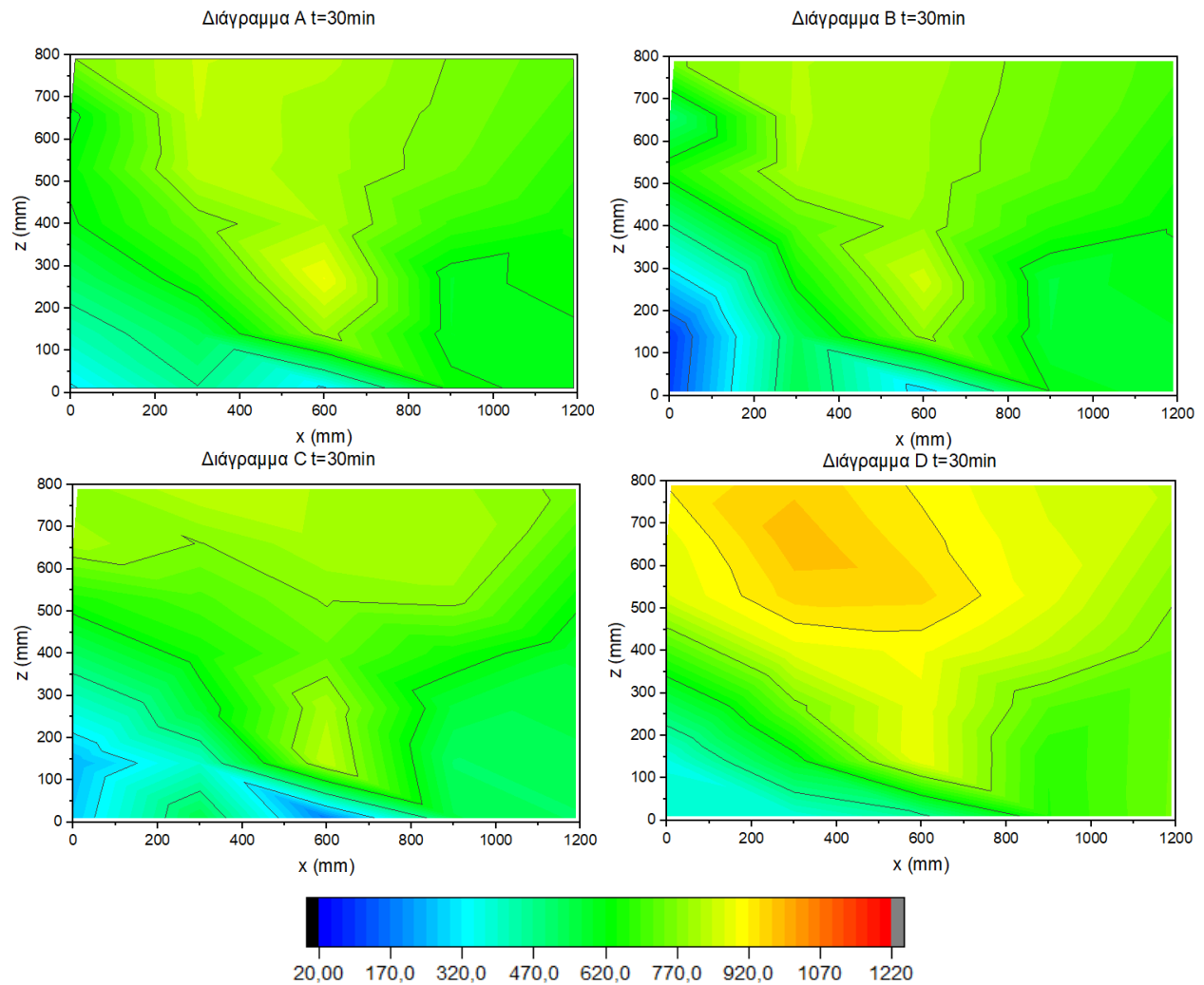
Στην αρχή των πειραμάτων, οι θερμοκρασίες κυμαινόντουσαν από 20 έως 28 °C οι οποίες αντιστοιχούν στο ακόλουθο διάγραμμα, το οποίο λειτουργεί ως διάγραμμα baseline.



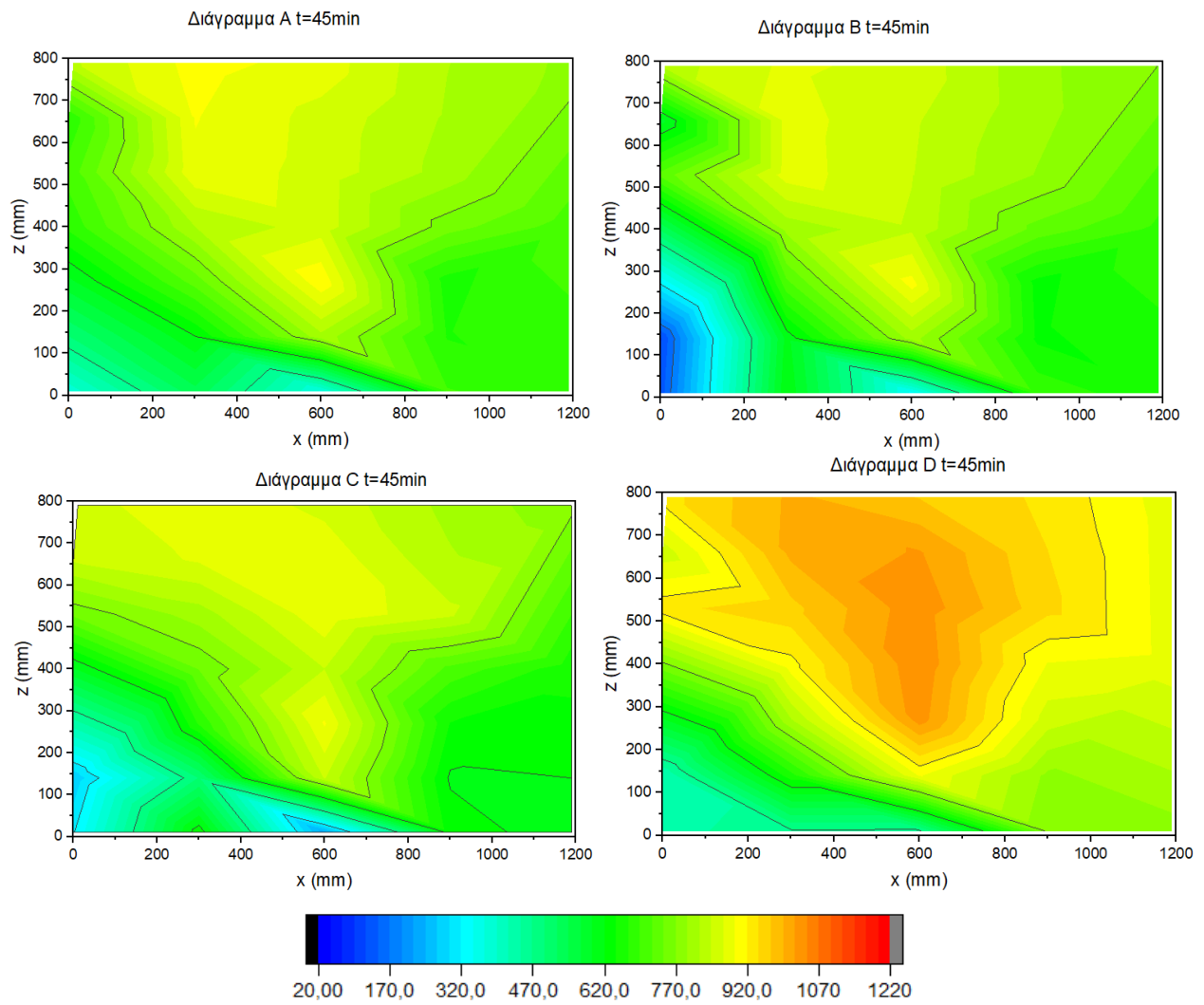
Σχήμα 6.17 Ισοσταθμικό διάγραμμα θερμοκρασίας της κεντρικής γραμμής στην αρχή των πειραμάτων (αριστερά) και απόλυτη κλίμακα θερμοκρασιών (δεξιά).



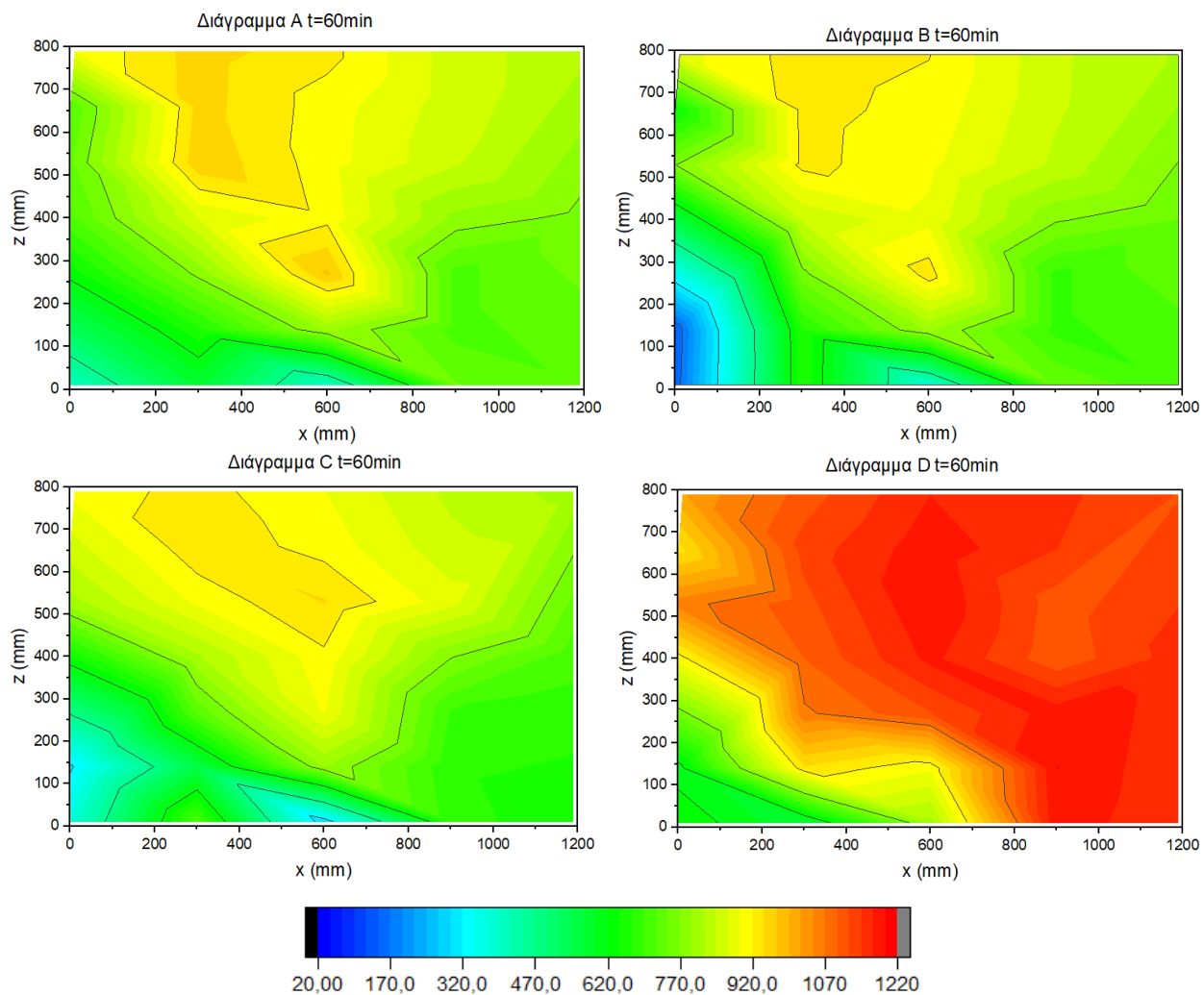
Σχήμα 6.18 Ισοσταθμικά διαγράμματα θερμοκρασίας της κεντρικής γραμμής για $t=15\text{min}$ των πειραμάτων A(πάνω αριστερά), B(πάνω δεξιά), C(κάτω αριστερά), D(κάτω δεξιά).



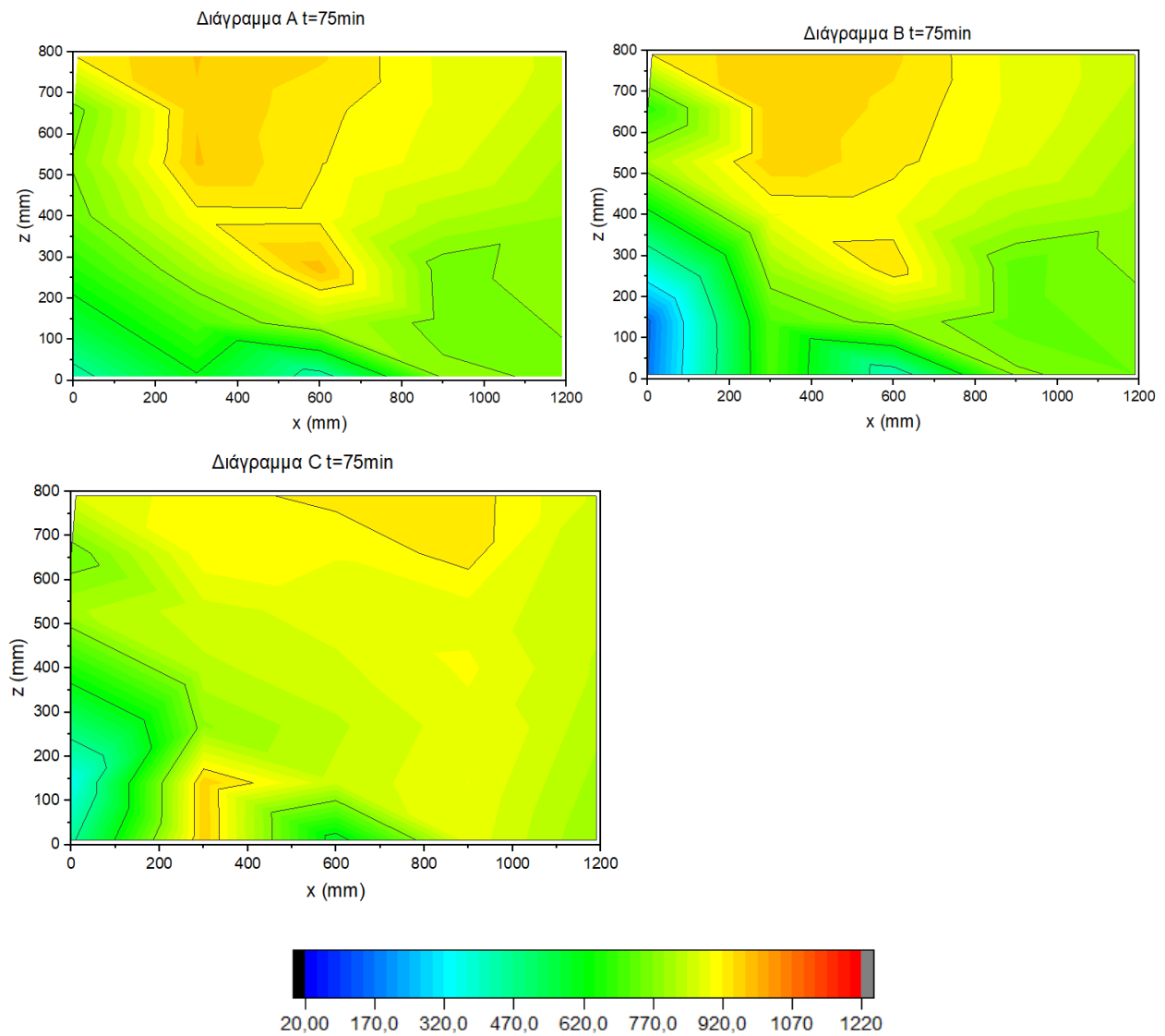
Σχήμα 6.19 Ισοσταθμικά διαγράμματα θερμοκρασίας της κεντρικής γραμμής για $t=30\text{min}$ των πειραμάτων A(πάνω αριστερά), B(πάνω δεξιά), C(κάτω αριστερά), D(κάτω δεξιά).



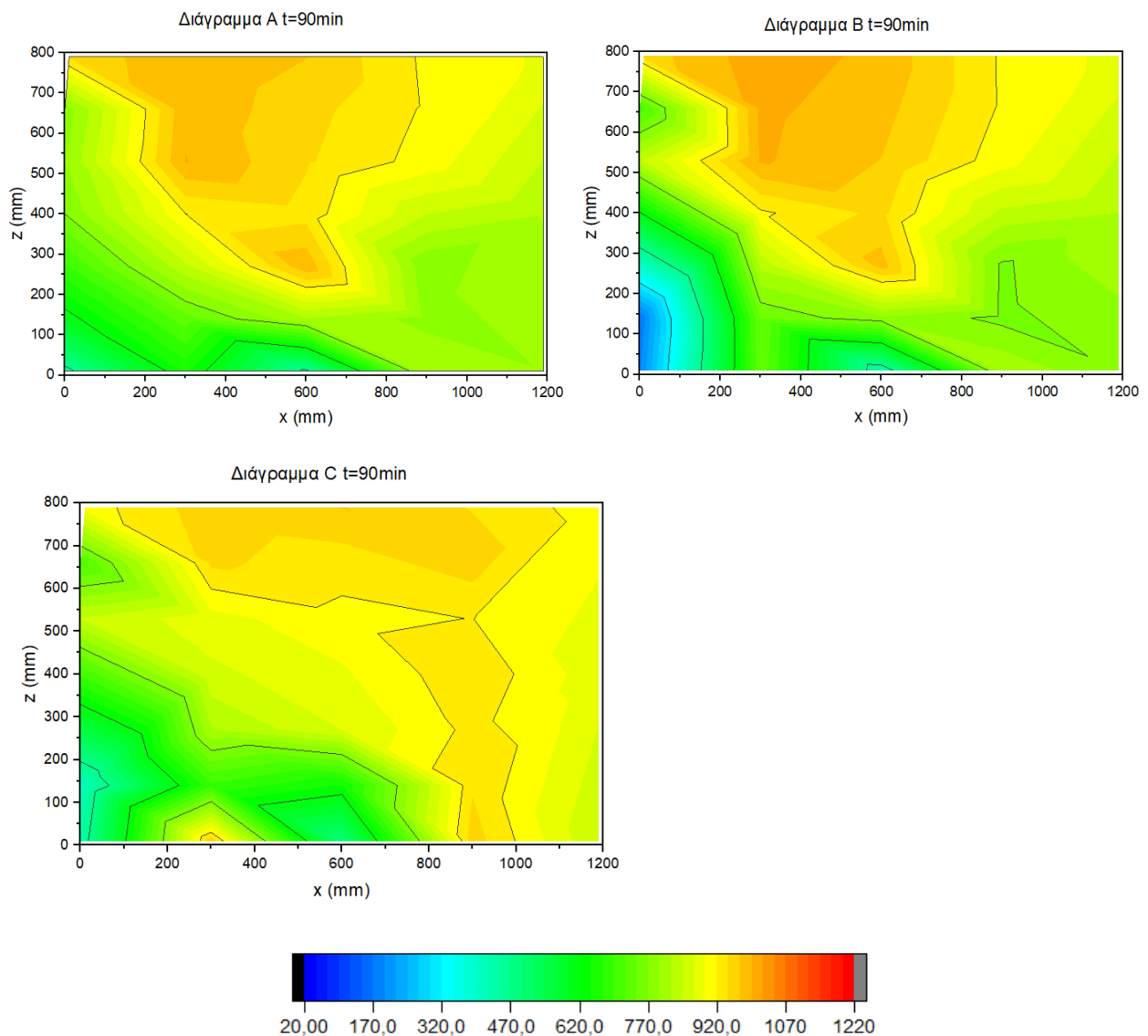
Σχήμα 6.20 Ισοσταθμικά διαγράμματα θερμοκρασίας της κεντρικής γραμμής για $t=45\text{min}$ των πειραμάτων A(πάνω αριστερά), B(πάνω δεξιά), C(κάτω αριστερά), D(κάτω δεξιά).



Σχήμα 6.21 Ισοσταθμικά διαγράμματα θερμοκρασίας της κεντρικής γραμμής για $t=60\text{min}$ των πειραμάτων A(πάνω αριστερά), B(πάνω δεξιά), C(κάτω αριστερά), D(κάτω δεξιά).



Σχήμα 6.22 Ισοσταθμικά διαγράμματα θερμοκρασίας της κεντρικής γραμμής για $t=75\text{min}$ των πειραμάτων A(πάνω αριστερά), B(πάνω δεξιά), C(κάτω αριστερά).



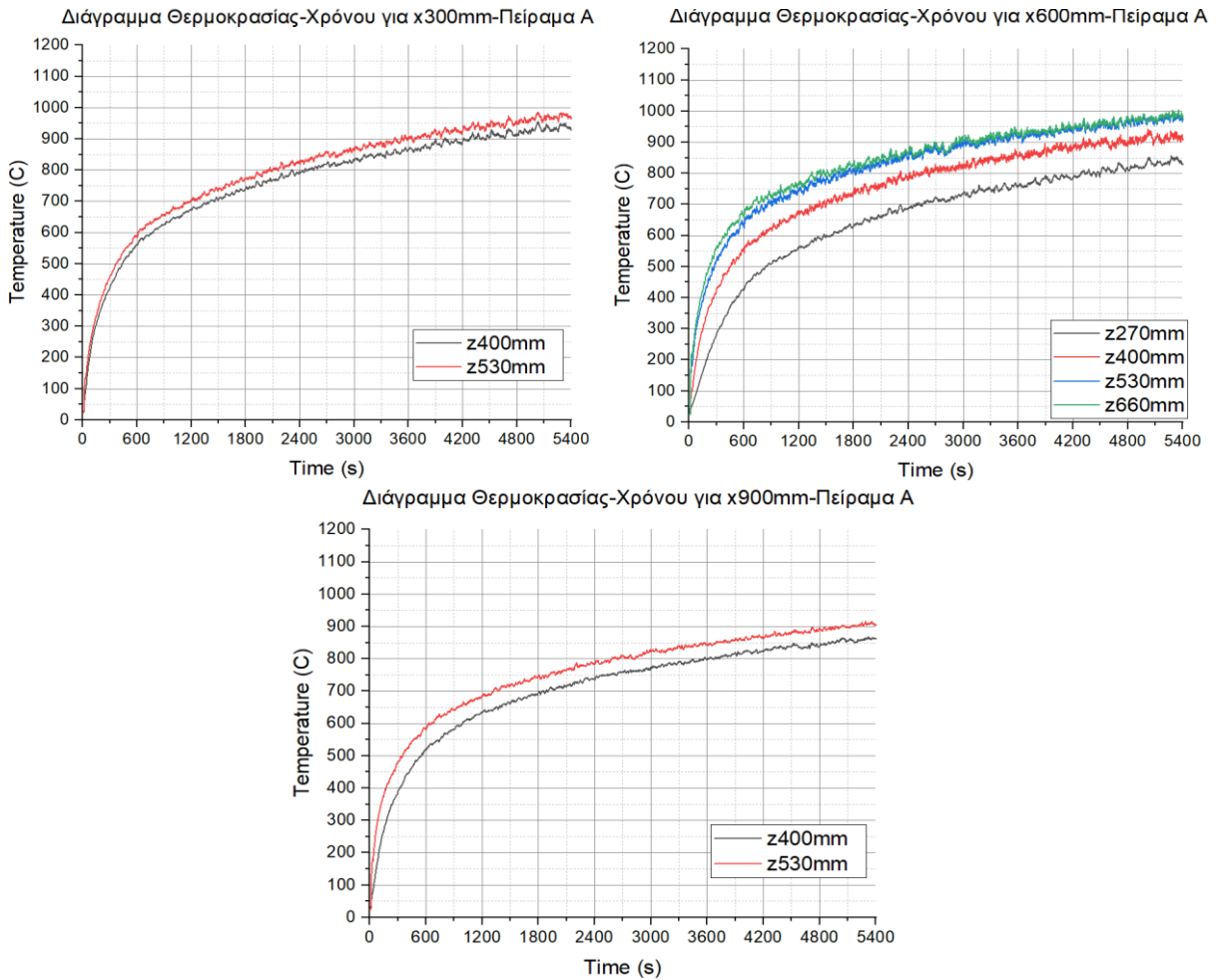
Σχήμα 6.23 Ισοσταθμικά διαγράμματα θερμοκρασίας της κεντρικής γραμμής για $t=90\text{min}$ των πειραμάτων A(πάνω αριστερά), B(πάνω δεξιά), C(κάτω αριστερά).

Παρατηρήσεις:

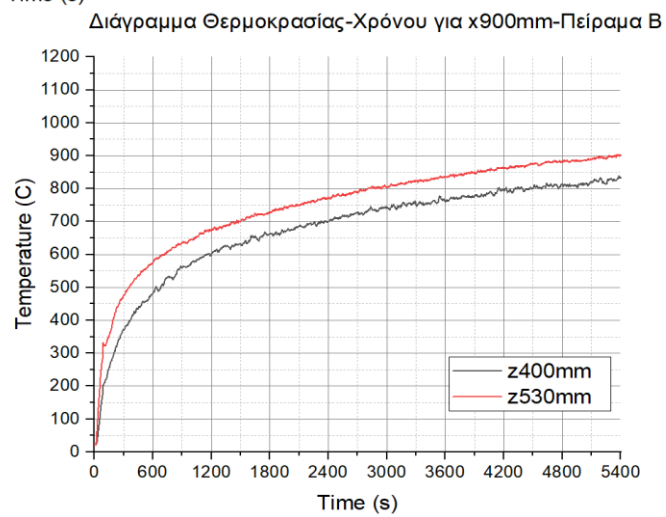
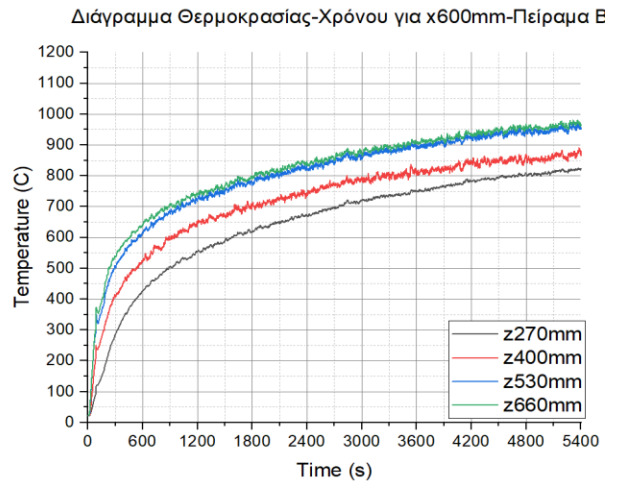
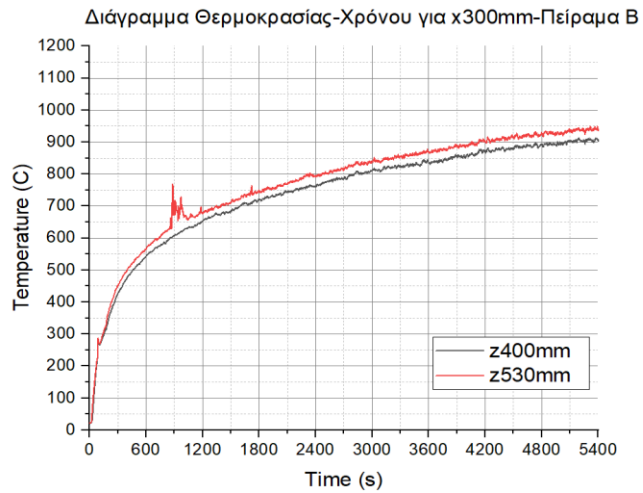
Τα πειράματα A και B παρουσιάζουν όμοιο θερμικό πεδίο. Στα ισοσταθμικά διαγράμματα θερμοκρασίας επιβεβαιώνεται η παρατήρηση πως στο πείραμα C, οι θερμοκρασίες είναι υψηλότερες στο οπίσθιο μέρος του διαμερίσματος σε σχέση με τα πειράματα A και B. Το πείραμα D έχει δραματικά διαφορετική εικόνα με πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες από τα πρώτα 15 λεπτά. Στο σχήμα 6.21 στο διάγραμμα του πειράματος D οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες πίσω και χαμηλά του πυροδιαμερίσματος οφείλονται σε αποκολλημένα εξανθρακώματα που ακτινοβολούν.

6.2.1.4 Μονογραμμικά διαγράμματα θερμοκρασιών αέρα πλαινού τοίχου

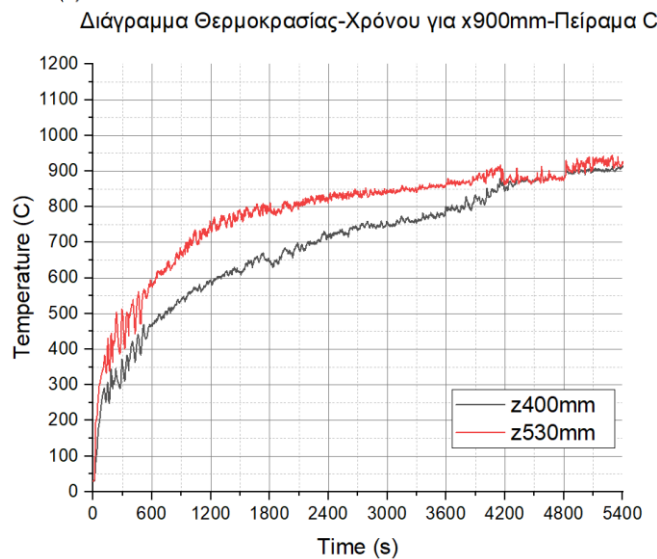
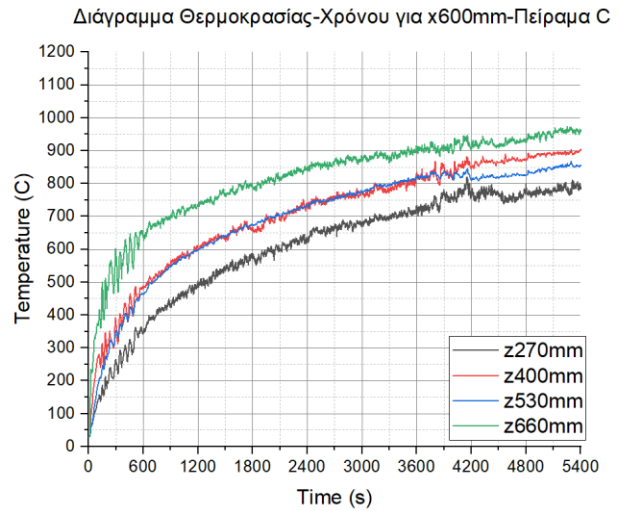
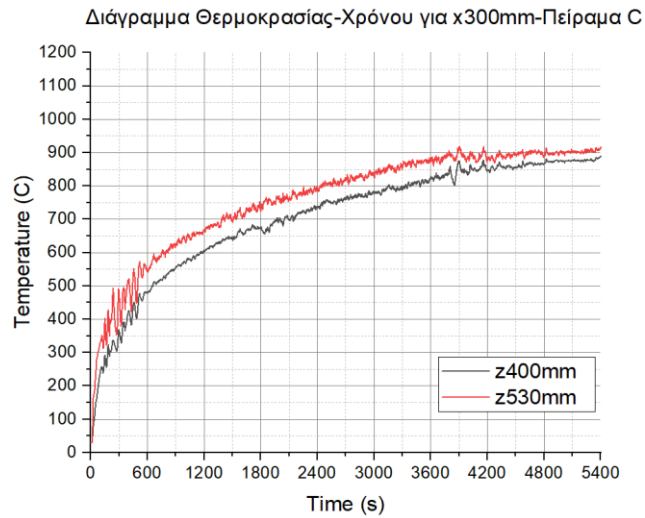
Ακολουθούν τα διαγράμματα για τα 4 πειράματα A, B, C, D, για τρία μήκη x 300mm, 600mm και 900mm, τοποθετημένα 10mm από τον πλαινό τοίχο. Οι θέσεις των θερμοστοιχείων αυτών καταγράφονται αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο.



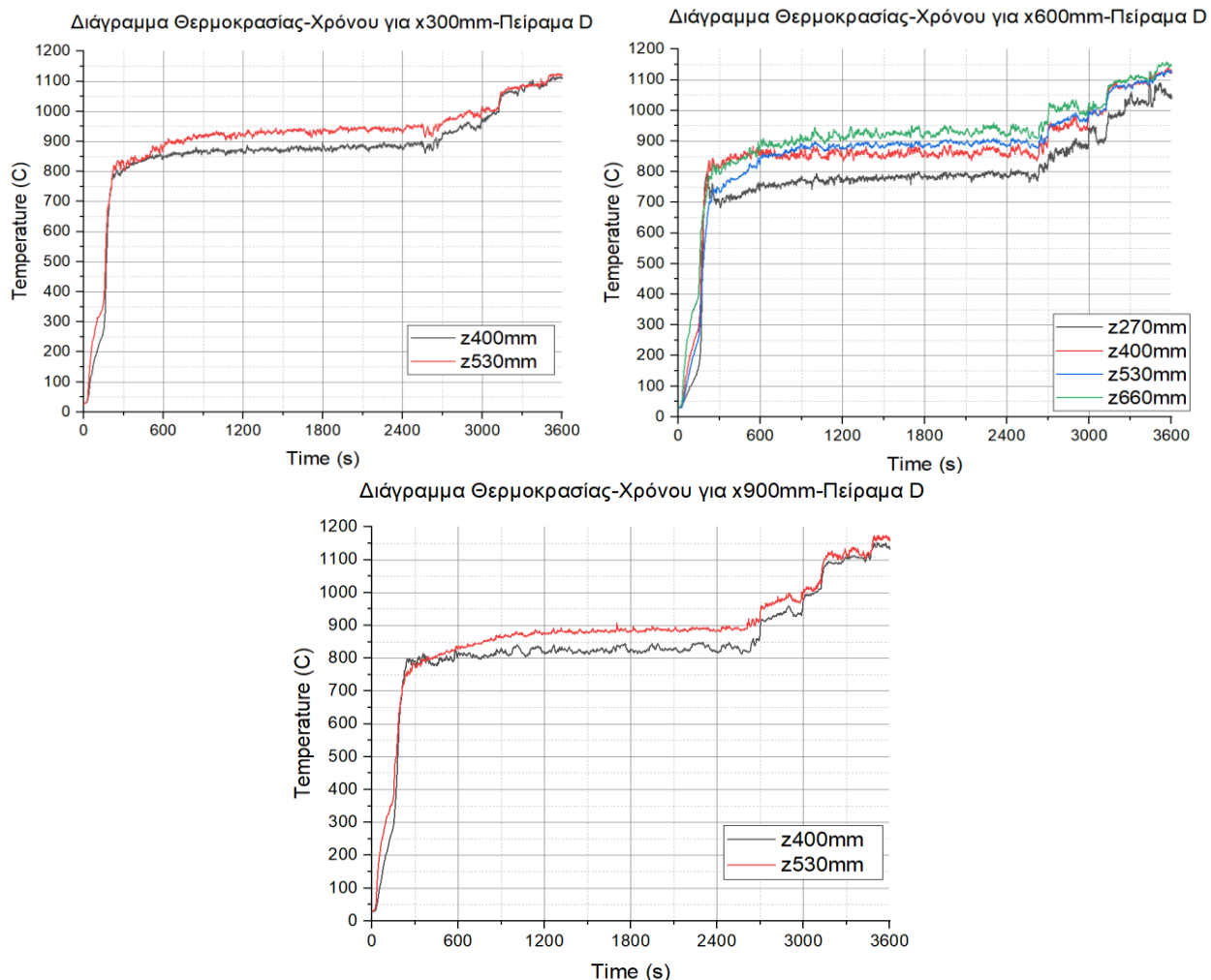
Σχήμα 6.24 Διαγράμματα θερμοκρασίας χρόνου στη θέση x300mm(αριστερά) x600mm(δεξιά) και x900mm(κάτω) στη θέση πλαινού τοίχου για το πείραμα A.



Σχήμα 6.25 Διαγράμματα θερμοκρασίας χρόνου στη θέση x300mm(αριστερά) x600mm(δεξιά) και x900mm(κάτω) στη θέση πλαϊνού τοίχου για το πείραμα Β.



Σχήμα 6.26 Διαγράμματα θερμοκρασίας χρόνου στη θέση x300mm(αριστερά) x600mm(δεξιά) και x900mm(κάτω) στη θέση πλαινού τοίχου για το πείραμα C.



Σχήμα 6.27 Διαγράμματα θερμοκρασίας χρόνου στη θέση x300mm(αριστερά) x600mm(δεξιά) και x900mm(κάτω) στη θέση πλαϊνού τοίχου για το πείραμα D.

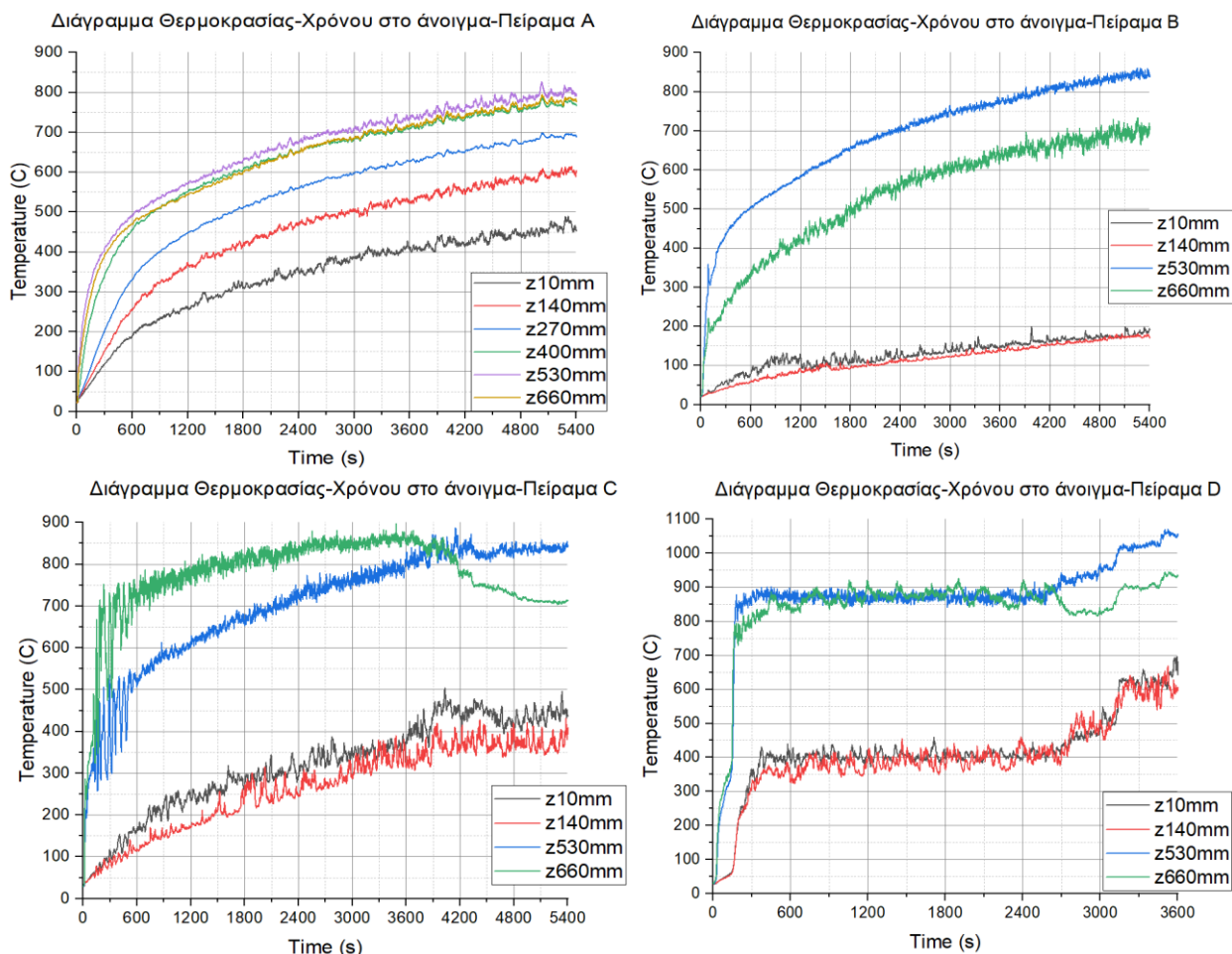
Παρατηρήσεις:

Τα διαγράμματα θερμοκρασίας αέρος πλαϊνού τοίχου επιβεβαιώνουν τα συμπεράσματα που λήφθηκαν από τα διαγράμματα κεντρικής ευθείας για το θερμικό πεδίο στο αέριο περιβάλλον. Τα πειράματα A και B οδηγούν σε παρόμοια αποτελέσματα. Το πείραμα C με CLT οροφή έχει λίγο διαφορετική κατανομή θερμοκρασιών από τα A και B (και τα τρία ακολουθούν την καμπύλη ISO-834), οι θερμοκρασίες του είναι λίγο χαμηλότερες μπροστά και λίγο υψηλότερες πίσω στο πυροδιαμέρισμα. Το πείραμα D παρουσιάζει πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες, διαφορές της τάξεως των 200 °C.

6.2.2 Άνοιγμα πυροδιαμερίσματος

Στο άνοιγμα επάνω στους μετρητές ταχύτητας, έχουν τοποθετηθεί θερμοστοιχεία στα ύψη που αναφέρονται στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Ακολουθούν τα διαγράμματα θερμοκρασιών.



Σχήμα 6.28 Διαγράμματα θερμοκρασίας χρόνου στο άνοιγμα για το πείραμα A(πάνω αριστερά), B(πάνω δεξιά), C(κάτω αριστερά) και D(κάτω δεξιά).

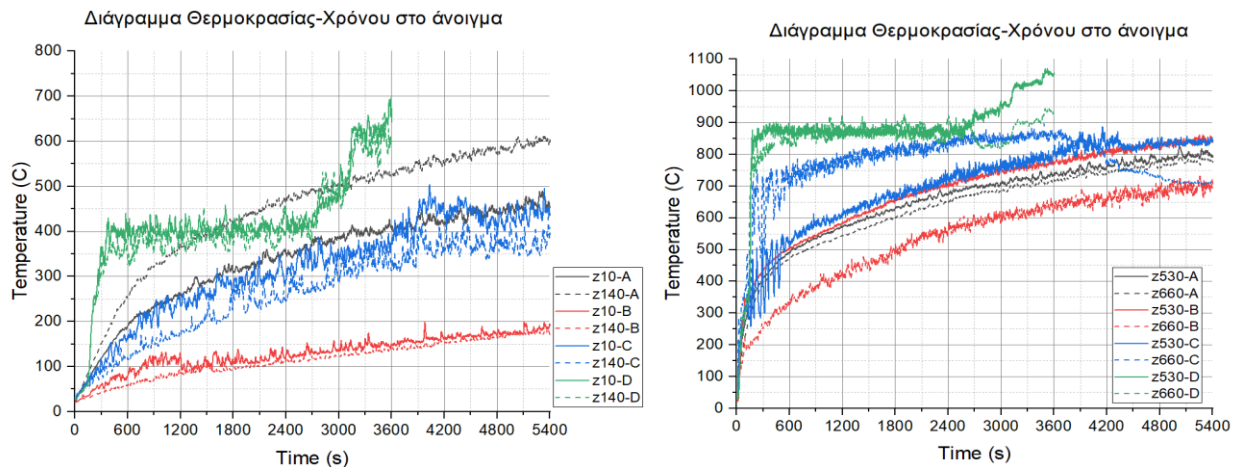
Παρατηρήσεις:

Στο άνοιγμα ενδιάμεσα δημιουργείται το οριακό στρώμα, το ουδέτερο επίπεδο καυσαερίων. Κάτω από αυτό εισάγεται ψυχρός αέρας και πάνω από αυτό εξέρχονται θερμά καυσαέρια. Λογικό είναι λοιπόν όσο αυξάνεται το ύψος να αυξάνεται και η θερμοκρασία αερίων στο άνοιγμα. Επιπλέον, σε όλα τα πειράματα και ειδικά στα C και D, εξέρχονταν φλόγες από το πάνω μέρος του ανοίγματος.

Στα διαγράμματα των πειραμάτων με οροφή CLT πιθανώς να ακτινοβολούν τα αποκολλημένα εξανθρακώματα και να θερμαίνουν τον εισερχόμενο αέρα. Ταυτόχρονα, στο πείραμα D η ισχύς της φλόγας και η θερμοκρασία εσωτερικά, θερμαίνουν απότομα τον ψυχρό αέρα κατά την είσοδό του.

Παρατηρείται στα διαγράμματα, το φαινόμενο πως η θερμοκρασία στο ύψος 530mm είναι υψηλότερη από αυτής στο ύψος 660mm. Στις εικόνες 5.3 και 5.6 του κεφαλαίου 5, η θέση του θερμοστοιχείου z660mm είναι πολύ κοντά στην άκρη του ανοίγματος. Στο τέλος του ανοίγματος η ταχύτητα του αέρα είναι μηδενική. Μικρότερες ταχύτητες οδηγούν σε μικρότερη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή, αιτιολογώντας τις χαμηλότερες θερμοκρασίες.

Ακολουθούν δύο συγκριτικά διαγράμματα, μεταξύ των πειραμάτων.



Σχήμα 6.29 Διαγράμματα θερμοκρασίας χρόνου στο άνοιγμα για τα ύψη 10mm και 140mm(αριστερά) και τα ύψη 530mm και 660mm(δεξιά).

Παρατηρήσεις:

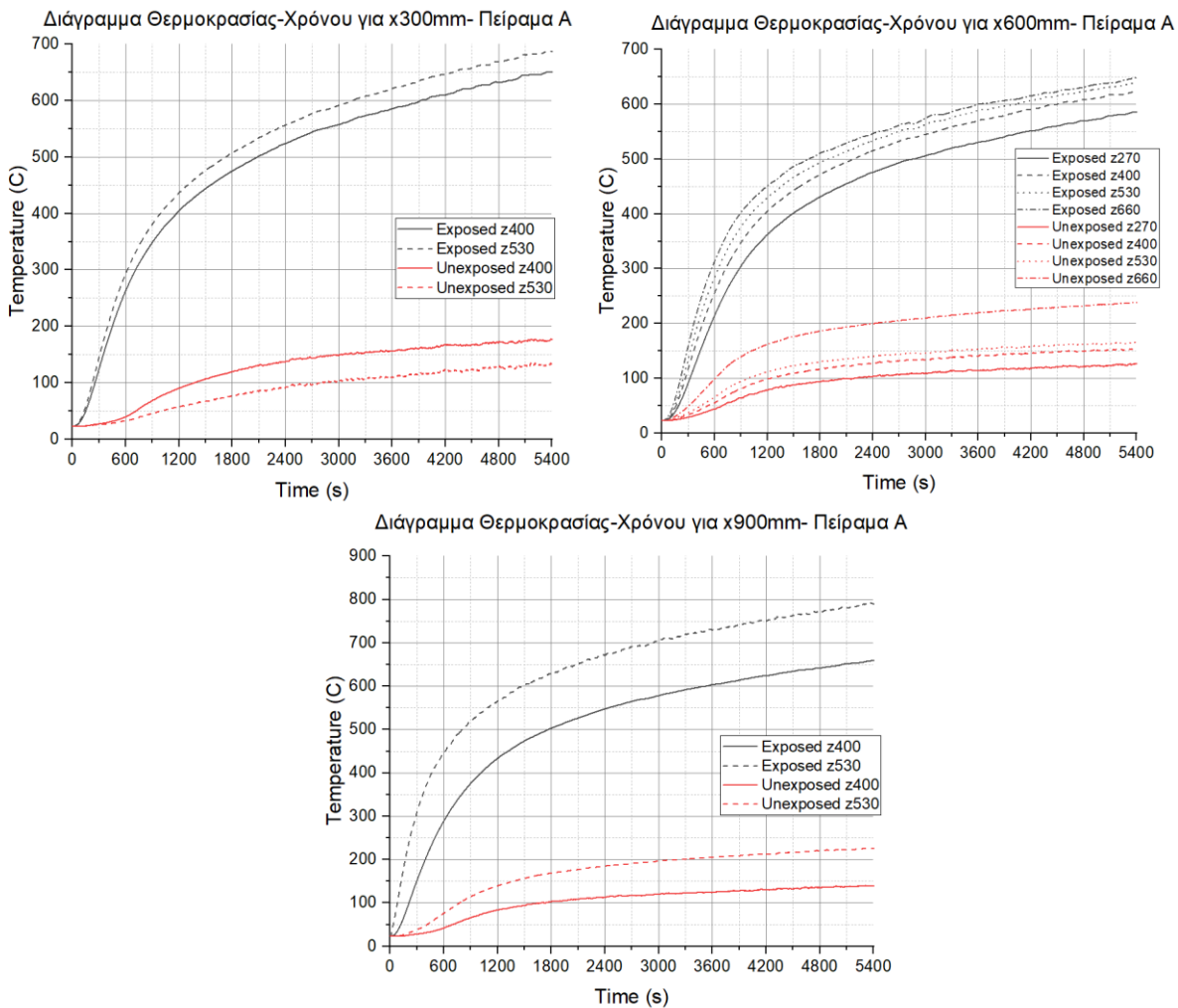
Οι θερμοκρασίες εισόδου αέρα του πειράματος A είναι αρκετά υψηλότερες από αυτές του B. Αυτό πιθανώς να οφείλεται στο γεγονός πως στα πειράματα A είχαν τοποθετηθεί θερμοκαλώδια αντί για θερμοστοιχεία, τα οποία δεν λειτουργούσαν κατάλληλα.

6.2.3 Τοιχώματα

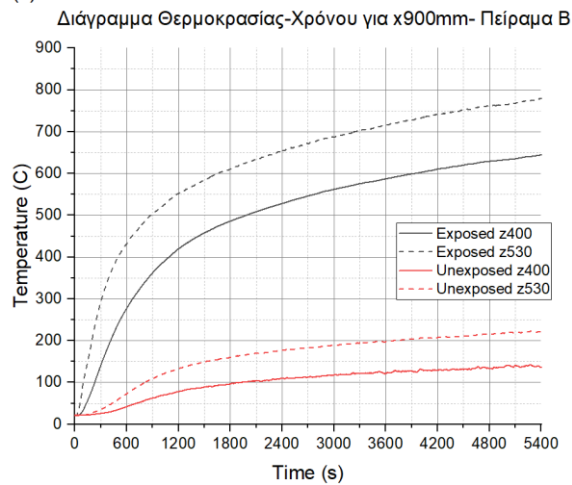
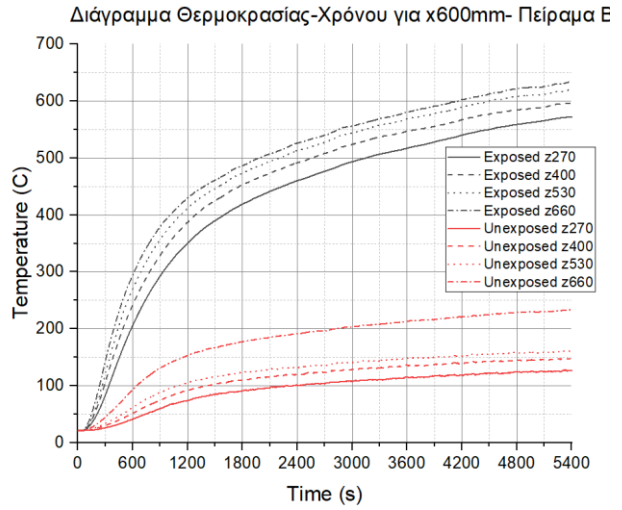
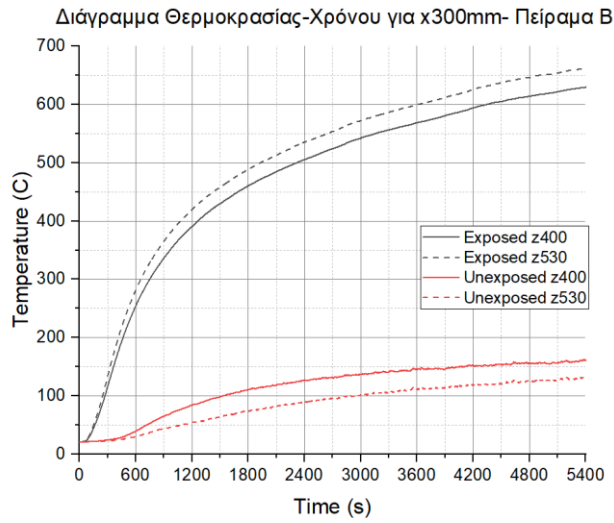
Στα δύο τοιχώματα (πίσω και δεξιά) έχουν τοποθετηθεί θερμοστοιχεία εκτεθειμένα και μη, καθώς και μετρητές θερμορροής.

6.2.3.1 Πλαϊνό τοίχωμα θερμοκρασίες-θερμορροές

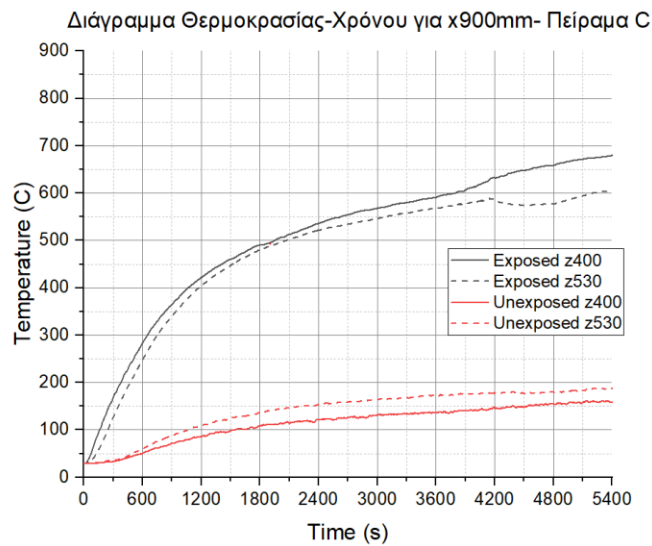
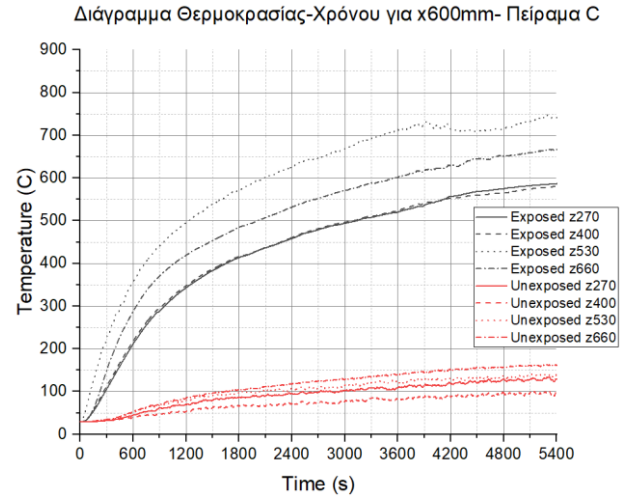
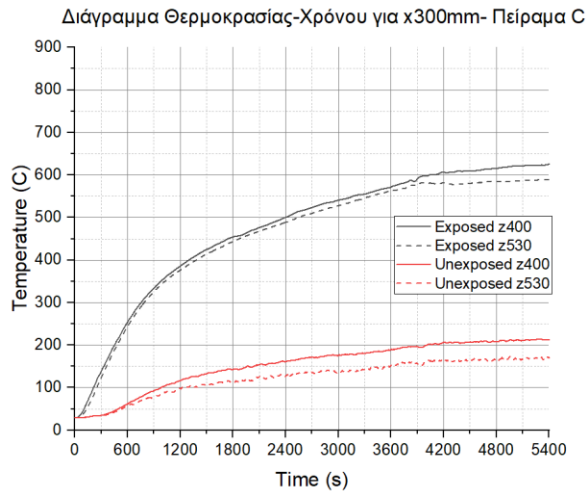
Ακολουθούν τα διαγράμματα θερμοκρασιών.



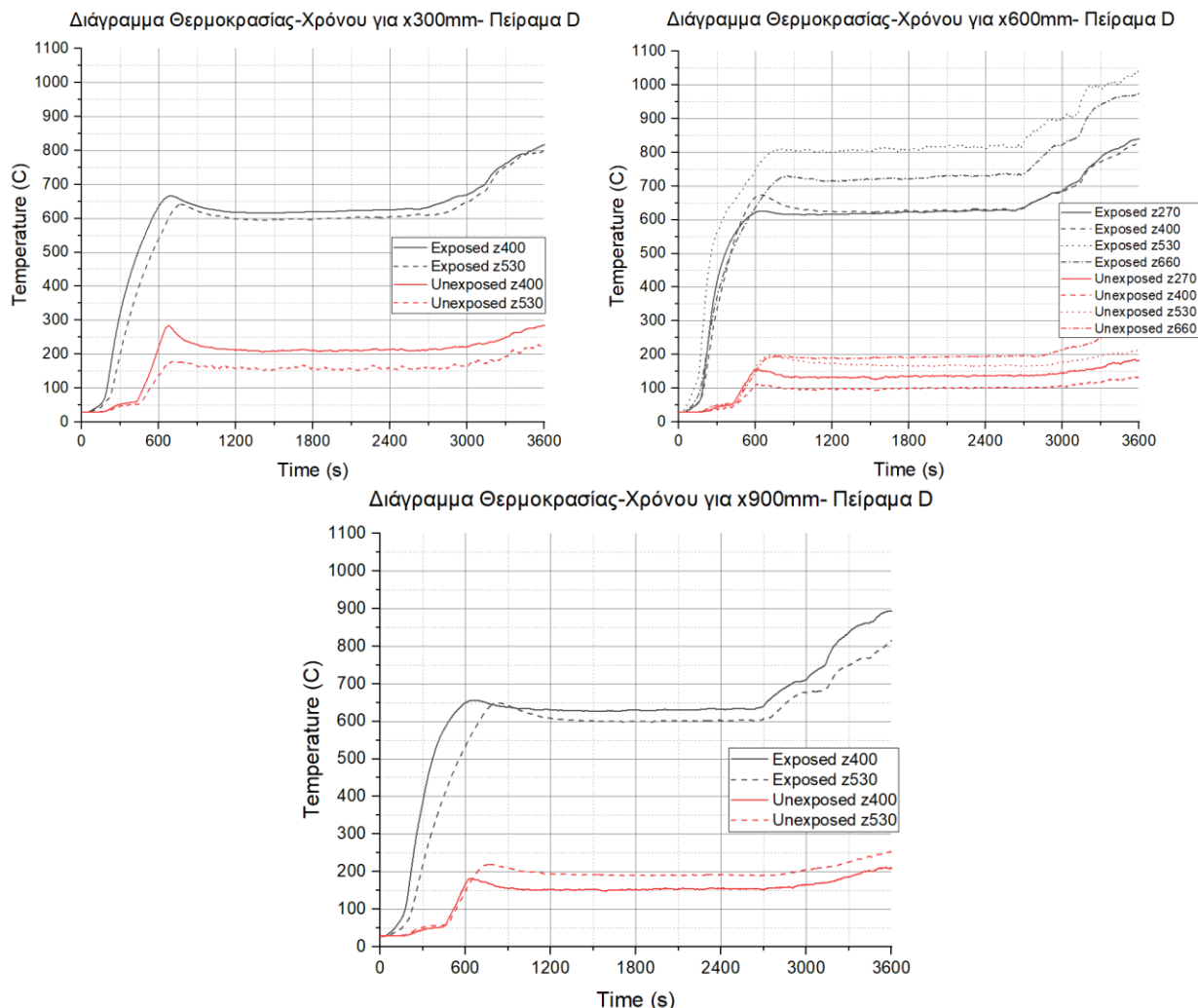
Σχήμα 6.30 Διαγράμματα θερμοκρασιών χρόνου του πλαϊνού τοιχώματος, στις θέσεις x 300mm(αριστερά), 600mm(δεξιά) και 900mm(κάτω) για διάφορα ύψη στο πείραμα A σε εκτεθειμένες και μη θέσεις.



Σχήμα 6.31 Διαγράμματα θερμοκρασιών χρόνου του πλαινού τοιχώματος, στις θέσεις x 300mm(αριστερά), 600mm(δεξιά) και 900mm(κάτω) για διάφορα ύψη στο πείραμα Β σε εκτεθειμένες και μη θέσεις.



Σχήμα 6.32 Διαγράμματα θερμοκρασιών χρόνου του πλαϊνού τοιχώματος, στις θέσεις x 300mm(αριστερά), 600mm(δεξιά) και 900mm(κάτω) για διάφορα ύψη στο πείραμα C σε εκτεθειμένες και μη θέσεις.



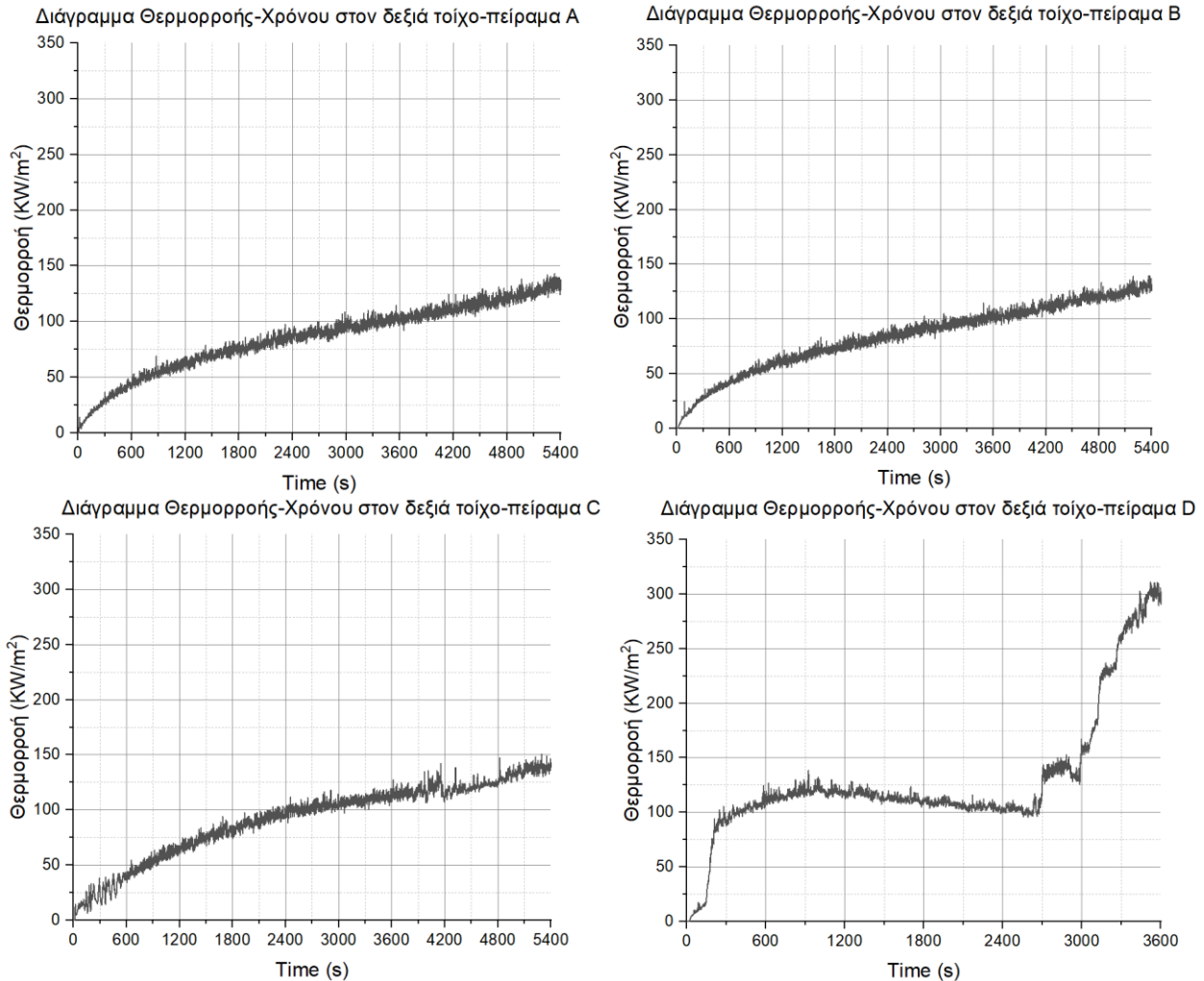
Σχήμα 6.33 Διαγράμματα θερμοκρασιών χρόνου του πλαϊνού τοιχώματος, στις θέσεις x 300mm(αριστερά),600mm(δεξιά) και 900mm(κάτω) για διάφορα ύψη στο πείραμα D σε εκτεθειμένες και μη θέσεις.

Παρατηρήσεις:

Στα πειράματα με οροφή την κεραμική πλάκα, οι υψηλότερες θερμοκρασίες στην εκτεθειμένη πλευρά του τοιχώματος παρατηρούνται για x900mm, για 100 με 150C. Αντίθετα στα πειράματα με οροφή από CLT, οι υψηλότερες θερμοκρασίες παρατηρούνται στη μέση του διαμερίσματος και του τοίχου, για x600mm. Στο πείραμα C που ακολουθούσε την καμπύλη ISO-834 με ταβάνι CLT, στα x300mm και x900mm οι θερμοκρασίες στην εκτεθειμένη πλευρά του τοιχώματος ήταν χαμηλότερες σε σύγκριση με τα πειράματα A και B που ακολουθούν επίσης την καμπύλη ISO-834. Τέλος ως αναμενόμενο, το πείραμα D παρουσίαζε τις υψηλότερες θερμοκρασίες.

Στην μη εκτεθειμένη πλευρά του τοιχώματος οι θερμοκρασίες κυμαίνονται σε όλα τα πειράματα από 150 °C έως 300 °C.

Ακολουθούν τα διαγράμματα θερμοροής.



Σχήμα 6.34 Διαγράμματα θερμοροών χρόνου του πλαϊνού τοιχώματος στο ύψος 530mm για το πείραμα A(πάνω αριστερά), πείραμα B(πάνω δεξιά), πείραμα C(κάτω αριστερά) και πείραμα D(κάτω δεξιά).

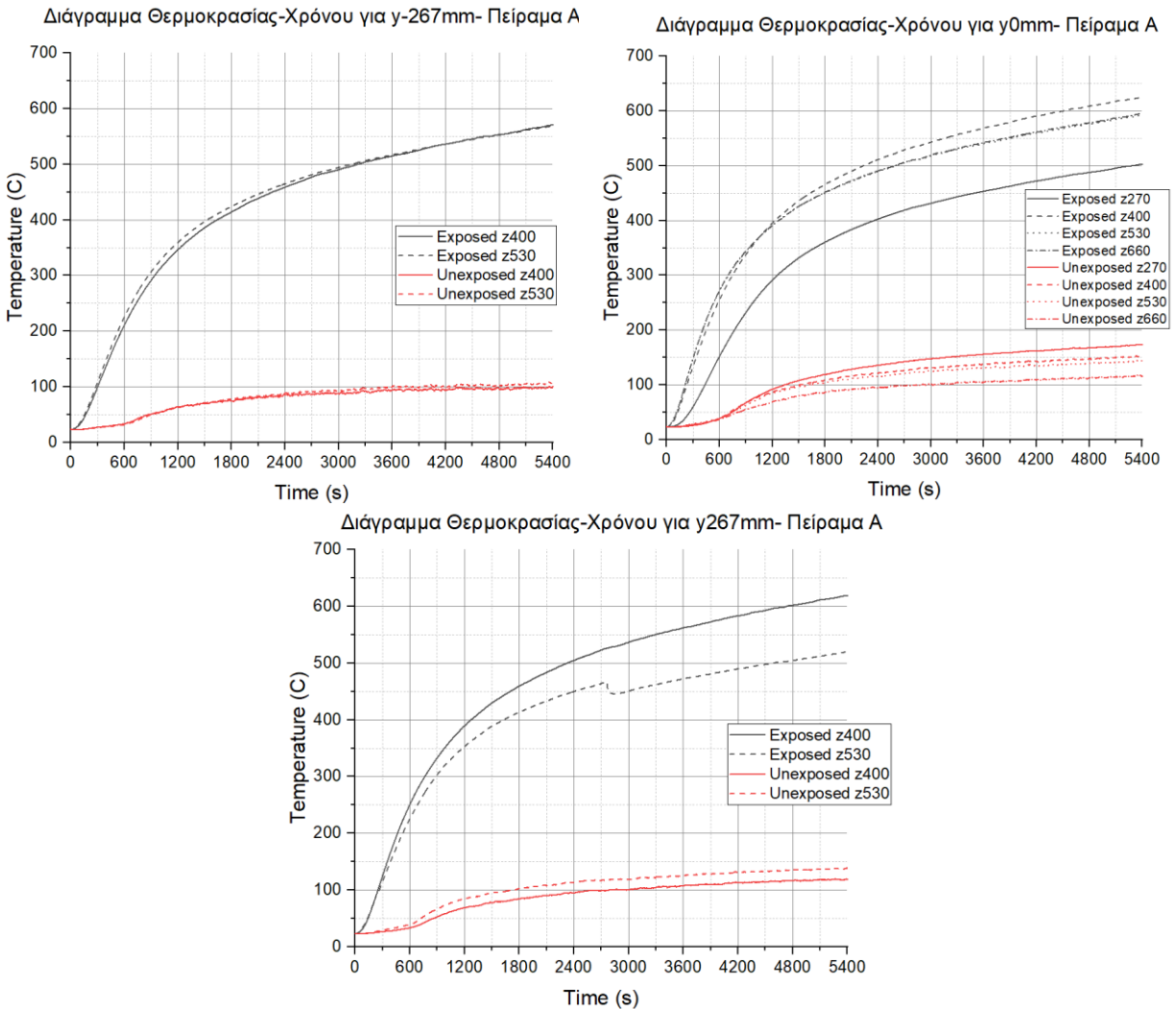
Παρατηρήσεις:

Τα πειράματα A, B και C παρουσιάζουν όμοιες καμπύλες θερμοροής, ενώ στο πείραμα D παρατηρείται διπλάσια τελική τιμή θερμοροής από τα προηγούμενα πειράματα.

6.2.3.2 Οπίσθιο τοίχωμα θερμοκρασίες-θερμορροές

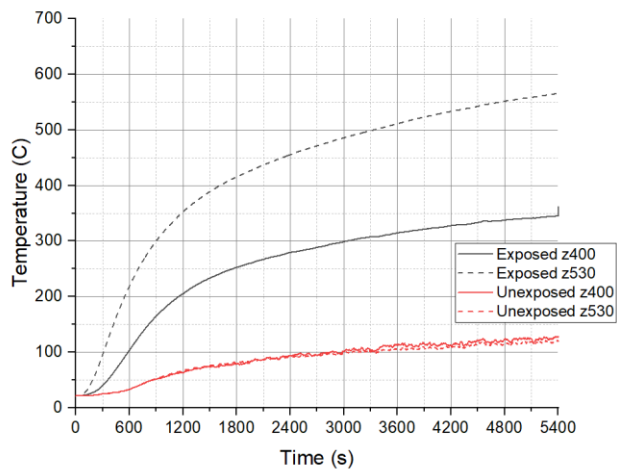
Τα θερμοστοιχεία είναι τοποθετημένα σε εκτεθειμένες και μη θέσεις στα $y = -267\text{mm}, 0$ και 267mm σε διάφορα ύψη. Στον οπίσθιο τοίχο είναι τοποθετημένοι και δύο μετρητές θερμορροής σε δύο ύψη.

Ακολουθούν τα διαγράμματα θερμοκρασιών.

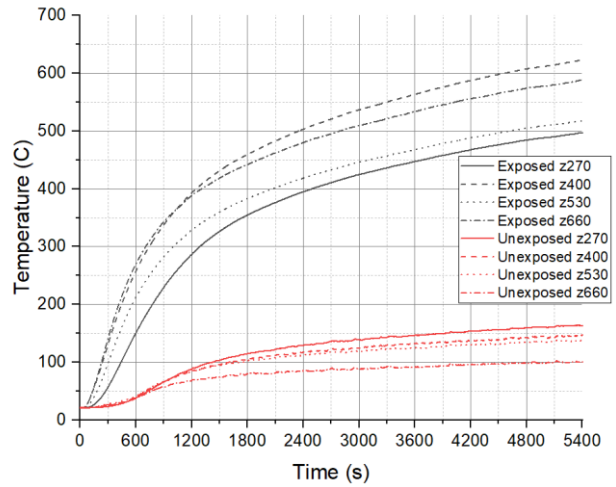


Σχήμα 6.35 Διαγράμματα θερμοκρασιών χρόνου του πίσω τοιχώματος, στις θέσεις $y = -267\text{mm}$ (αριστερά), 0mm (δεξιά) και 267mm (κάτω) για διάφορα ύψη στο πείραμα A σε εκτεθειμένες και μη θέσεις.

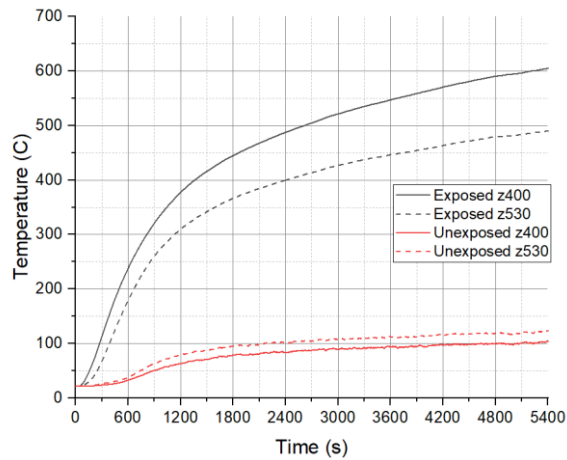
Διάγραμμα Θερμοκρασίας-Χρόνου για γ-267mm- Πείραμα Β



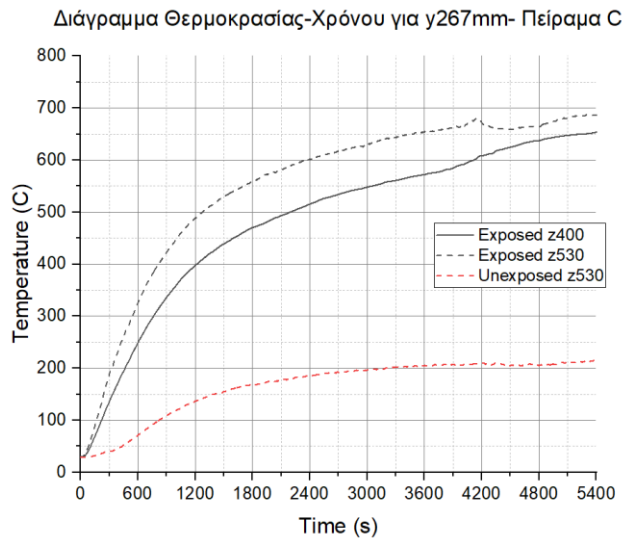
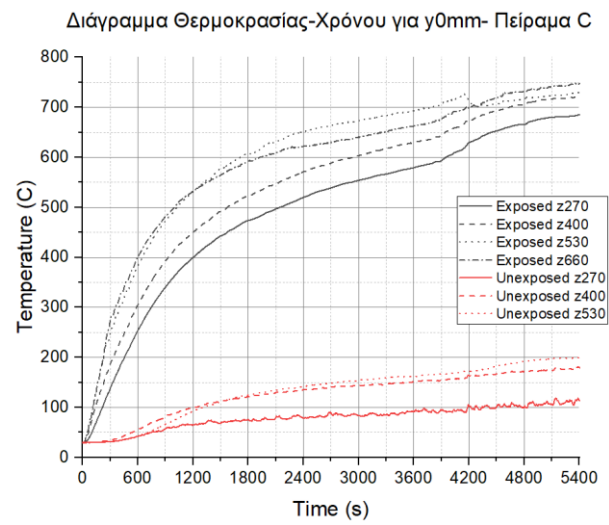
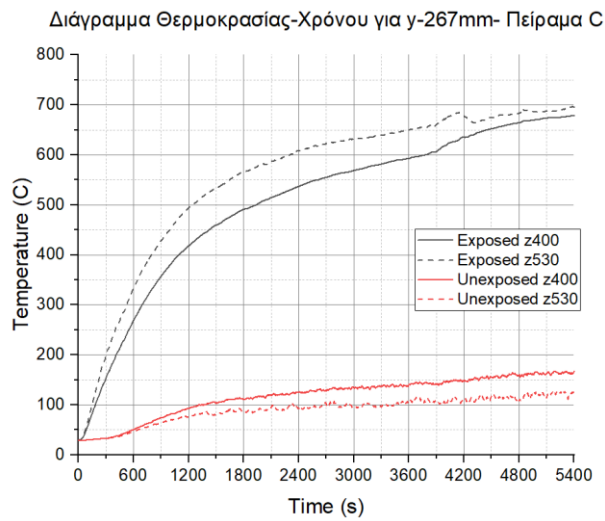
Διάγραμμα Θερμοκρασίας-Χρόνου για γ0mm- Πείραμα Β



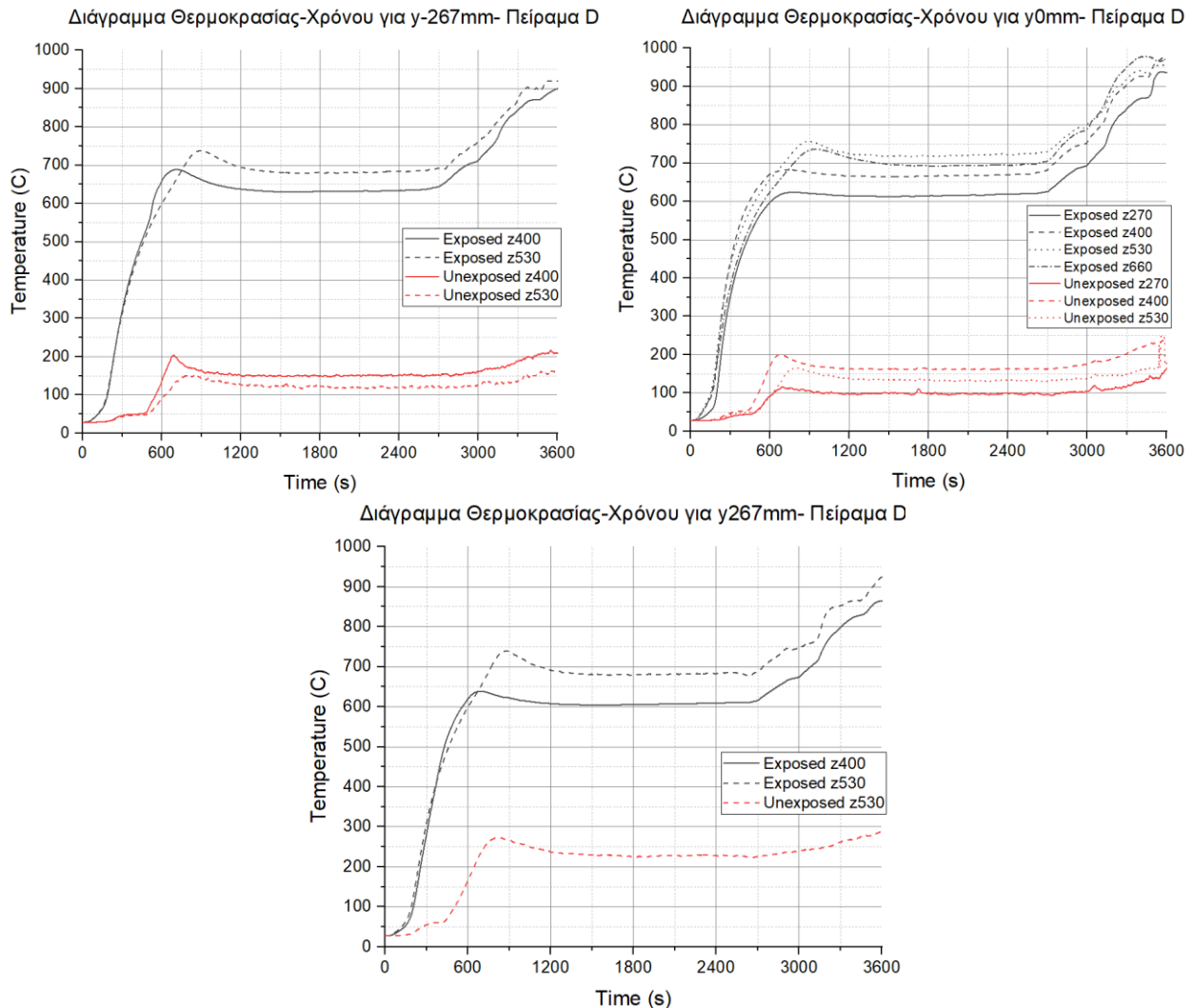
Διάγραμμα Θερμοκρασίας-Χρόνου για γ267mm- Πείραμα Β



Σχήμα 6.36 Διαγράμματα θερμοκρασιών χρόνου του πίσω τοιχώματος, στις θέσεις γ -267mm(αριστερά), 0mm(δεξιά) και 267mm(κάτω) για διάφορα ύψη στο πείραμα Β σε εκτεθειμένες και μη θέσεις.



Σχήμα 6.37 Διαγράμματα θερμοκρασιών χρόνου του πίσω τοιχώματος, στις θέσεις γ -267mm(αριστερά), 0mm(δεξιά) και 267mm(κάτω) για διάφορα ύψη στο πείραμα C σε εκτεθειμένες και μη θέσεις.



Σχήμα 6.38 Διαγράμματα θερμοκρασιών χρόνου του πίσω τοιχώματος, στις θέσεις γ -267mm(αριστερά), 0mm(δεξιά) και 267mm(κάτω) για διάφορα ύψη στο πείραμα D σε εκτεθειμένες και μη θέσεις.

Παρατηρήσεις:

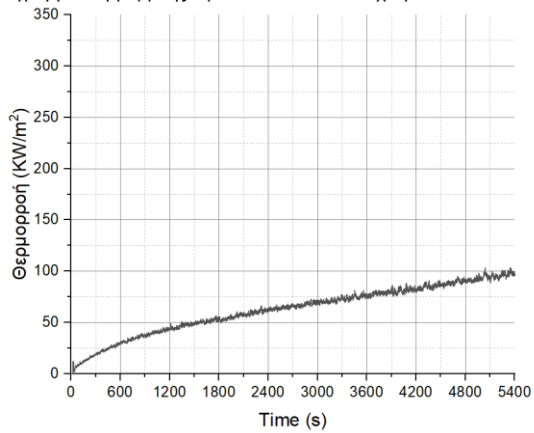
Οι θερμοκρασίες των εκτεθειμένων θέσεων στα πειράματα A και B είναι παρόμοιες. Η ύπαρξη CLT στο πείραμα C οδηγεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες στον οπίσθιο τοίχο από των A και B, ενώ οι μέγιστες θερμοκρασίες στις εκτεθειμένες θέσεις παρουσιάζονται, αναμενόμενα, στο πείραμα D.

Οι θερμοκρασίες των μη εκτεθειμένων θέσεων στον οπίσθιο τοίχο κυμαίνονται από 100 έως 300 °C.

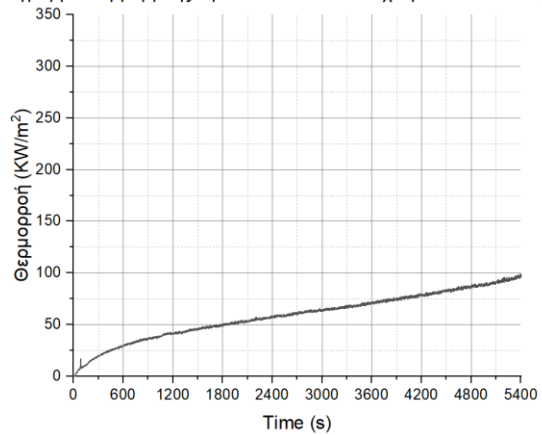
Το θερμοστοιχείο στο σχήμα 6.36 στο αριστερό διάγραμμα στη θέση z 400mm πιθανώς να είχε βγει από την θέση του λίγο πιο έξω με αποτέλεσμα να δείχνουν χαμηλότερες θερμοκρασίες. Οι τιμές στα θερμοστοιχεία στις μη εκτεθειμένες θέσεις γ 0mm, z 660mm και γ 267mm, z 400mm για τα πειράματα C και D δεν αποθηκεύτηκαν από το σύστημα.

Ακολουθούν τα διαγράμματα θερμοροής.

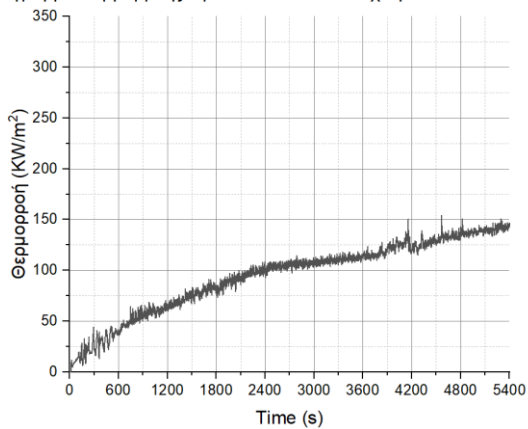
Διάγραμμα Θερμοροής-Χρόνου στον πίσω τοίχο για z530mm-Πείραμα A



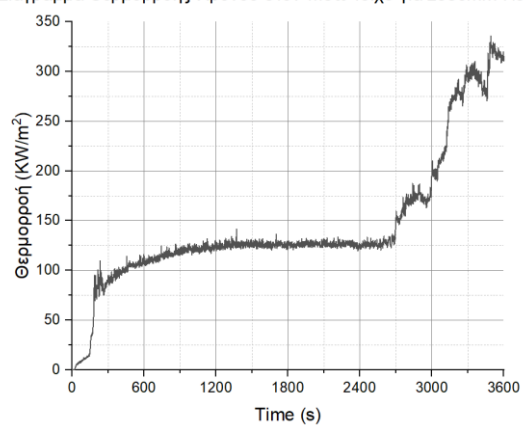
Διάγραμμα Θερμοροής-Χρόνου στον πίσω τοίχο για z530mm-Πείραμα B



Διάγραμμα Θερμοροής-Χρόνου στον πίσω τοίχο για z530mm-Πείραμα C

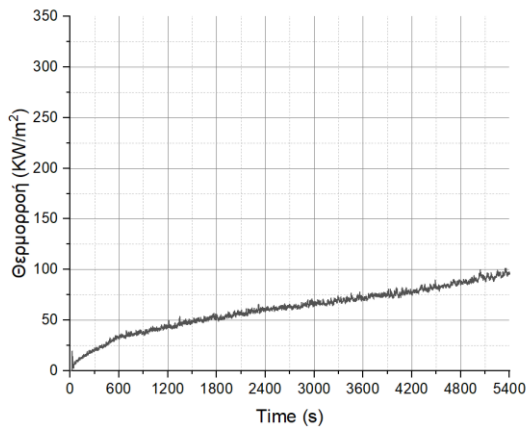


Διάγραμμα Θερμοροής-Χρόνου στον πίσω τοίχο για z530mm-Πείραμα D

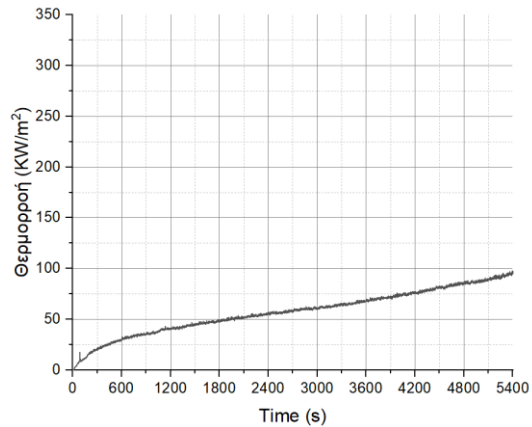


Σχήμα 6.39 Διαγράμματα θερμοροών χρόνου του οπίσθιου τοιχώματος στο ύψος 530mm για το πείραμα A(πάνω αριστερά), πείραμα B(πάνω δεξιά), πείραμα C(κάτω αριστερά) και πείραμα D(κάτω δεξιά).

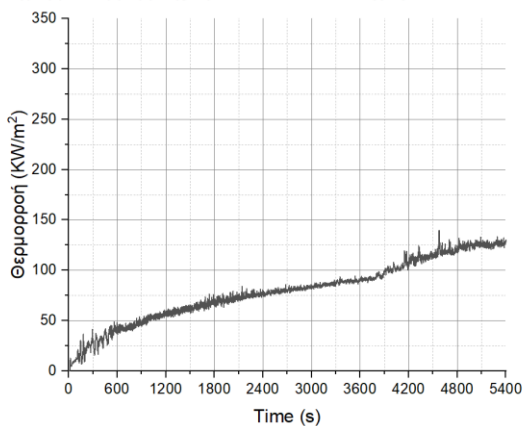
Διάγραμμα Θερμορροής-Χρόνου στον πίσω τοίχο για z660mm-Πείραμα A



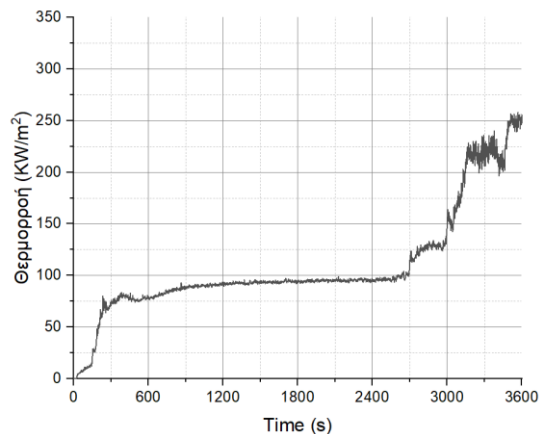
Διάγραμμα Θερμορροής-Χρόνου στον πίσω τοίχο για z660mm-Πείραμα B



Διάγραμμα Θερμορροής-Χρόνου στον πίσω τοίχο για z660mm-Πείραμα C



Διάγραμμα Θερμορροής-Χρόνου στον πίσω τοίχο για z660mm-Πείραμα D



Σχήμα 6.40 Διαγράμματα θερμορρών χρόνου του οπίσθιου τοιχώματος στο ύψος 660mm για το πείραμα A(πάνω αριστερά), πείραμα B(πάνω δεξιά), πείραμα C(κάτω αριστερά) και πείραμα D(κάτω δεξιά).

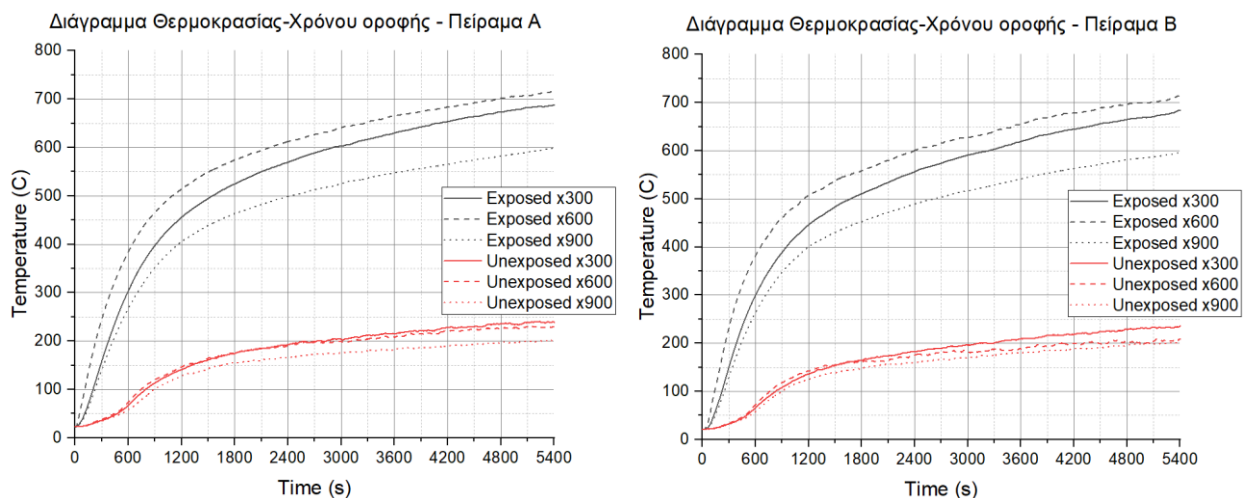
Παρατηρήσεις:

Τα πειράματα A, B παρουσιάζουν όμοιες καμπύλες θερμορροής, μικρότερες από αυτές του πλαϊνού τοιχώματος. Το πείραμα C εμφανίζει μεγαλύτερες θερμορροές από τα δύο προηγούμενα κατά 25 με 50%, ενώ το πείραμα D παρουσιάζει τις μέγιστες θερμορροές στα δύο ύψη, λόγω της ισχύος της καμπύλης Q-t και της καύσης του CLT. Οι μέγιστες τιμές του πειράματος D ήταν περίπου διπλάσιες από αυτές του C. Παράλληλα, στα πειράματα C και D μεγαλύτερες θερμορροές εμφανίστηκαν στο ύψος 530mm από τα 660mm.

6.2.4 Οροφή

6.2.4.1 Διαγράμματα Θερμοκρασίας οροφής

Ακολουθούν τα διαγράμματα των πειραμάτων A και B, με οροφή από κεραμική πλάκα.



Σχήμα 6.41 Διαγράμματα θερμοκρασιών χρόνου της οροφής, για x 300mm, 600mm και 900mm, στα πειράματα A(αριστερά) και B(δεξιά) σε εκτεθειμένες και μη θέσεις.

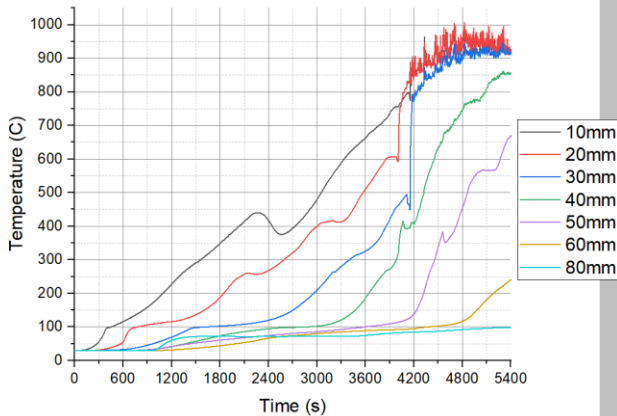
Παρατηρήσεις:

Τα δύο πειράματα ακολουθούν πανομοιότυπες καμπύλες θερμοκρασιών στην οροφή. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες σε εκτεθειμένες θέσεις παρουσιάζονται στο κέντρο για x 600mm και οι χαμηλότερες πίσω για x 900mm, όπως παρατηρήθηκε και στις θερμοκρασίες αέρος κεντρικής ευθείας.

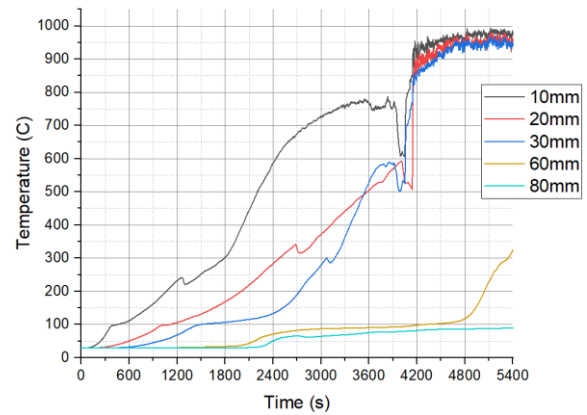
Οι θερμοκρασίες σε μη εκτεθειμένες θέσεις κυμαίνονται από 200 έως 250°C.

Ακολουθούν τα διαγράμματα των πειραμάτων C και D, με οροφή από CLT.

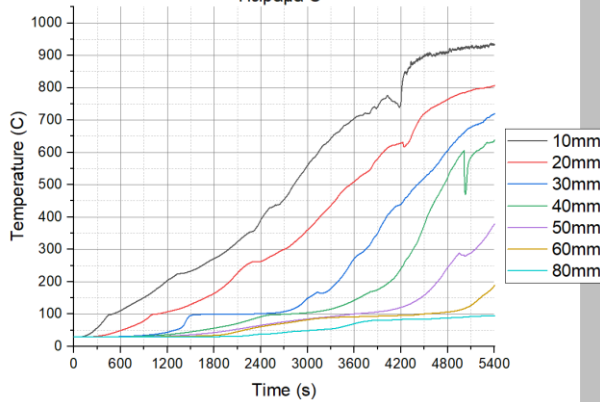
Διάγραμμα Θερμοκρασίας-Χρόνου της οροφής στην πίσω θέση-Πείραμα C



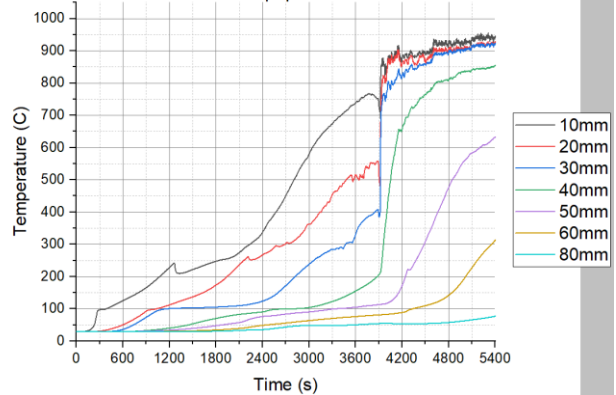
Διάγραμμα Θερμοκρασίας-Χρόνου της οροφής στο κέντρο-Πείραμα C



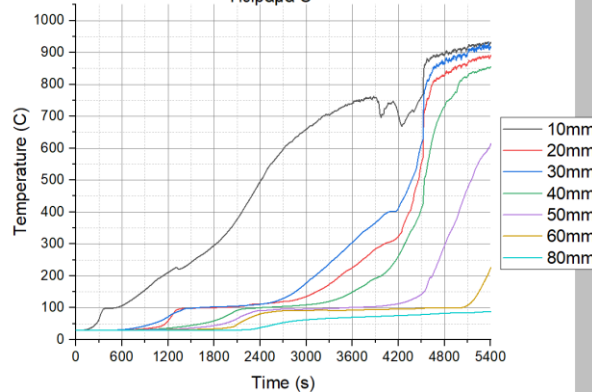
Διάγραμμα Θερμοκρασίας-Χρόνου της οροφής στην αριστερή θέση -Πείραμα C



Διάγραμμα Θερμοκρασίας-Χρόνου της οροφής στην μπροστινή θέση -Πείραμα C

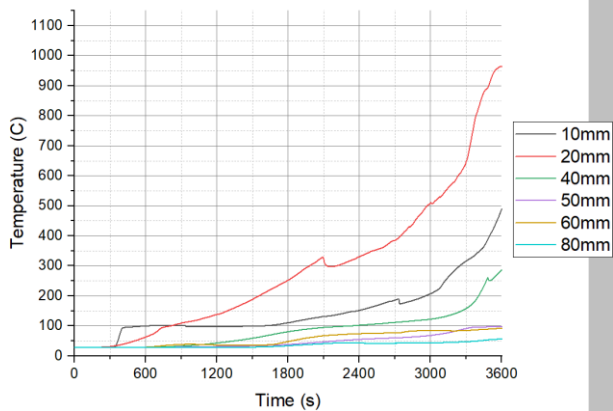


Διάγραμμα Θερμοκρασίας-Χρόνου της οροφής στην δεξιά θέση -Πείραμα C

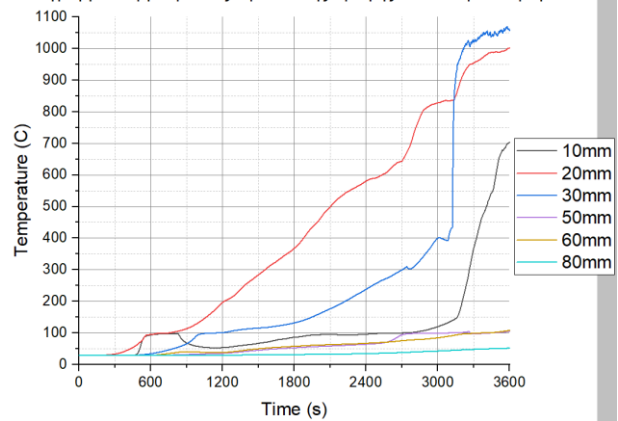


Σχήμα 6.42 Διαγράμματα θερμοκρασιών χρόνου της οροφής του πειράματος C, σε διάφορα ύψη από την εκτεθειμένη επιφάνεια της οροφής στις θέσεις (x,y): (900,0)mm(πρώτη γραμμή πρώτη στήλη), (600,0)mm(πρώτη γραμμή δεύτερη στήλη), (600,-267)mm(δεύτερη γραμμή πρώτη στήλη), (300,0)mm(δεύτερη γραμμή δεύτερη στήλη), (600,267)mm(τρίτη γραμμή).

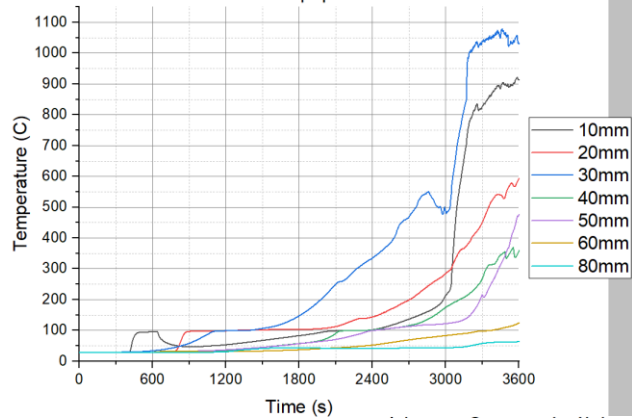
Διάγραμμα Θερμοκρασίας-Χρόνου της οροφής στην πίσω θέση-Πείραμα D



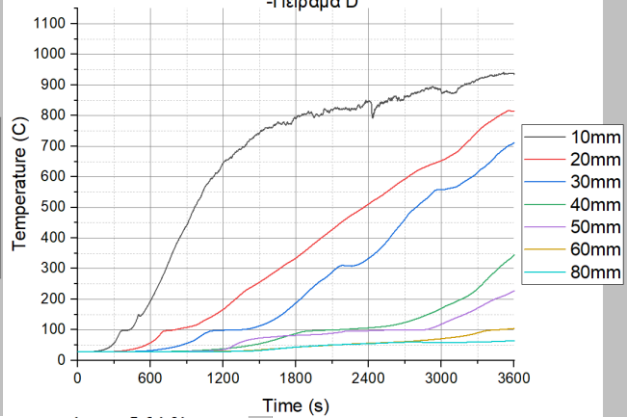
Διάγραμμα Θερμοκρασίας-Χρόνου της οροφής στο κέντρο-Πείραμα D



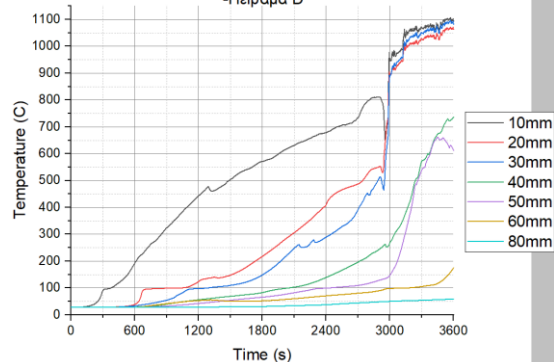
Διάγραμμα Θερμοκρασίας-Χρόνου της οροφής στην αριστερή θέση -Πείραμα D



Διάγραμμα Θερμοκρασίας-Χρόνου της οροφής στην μπροστινή θέση -Πείραμα D



Διάγραμμα Θερμοκρασίας-Χρόνου της οροφής στην δεξιά θέση -Πείραμα D



Σχήμα 6.43 Διαγράμματα θερμοκρασιών χρόνου της οροφής του πειράματος D, σε διάφορα ύψη από την εκτεθειμένη επιφάνεια της οροφής στις θέσεις (x,y): (900,0)mm(πρώτη γραμμή πρώτη στήλη), (600,0)mm(πρώτη γραμμή δεύτερη στήλη), (600,-267)mm(δεύτερη γραμμή πρώτη στήλη), (300,0)mm(δεύτερη γραμμή δεύτερη στήλη), (600,267)mm(τρίτη γραμμή).

Παρατηρήσεις:

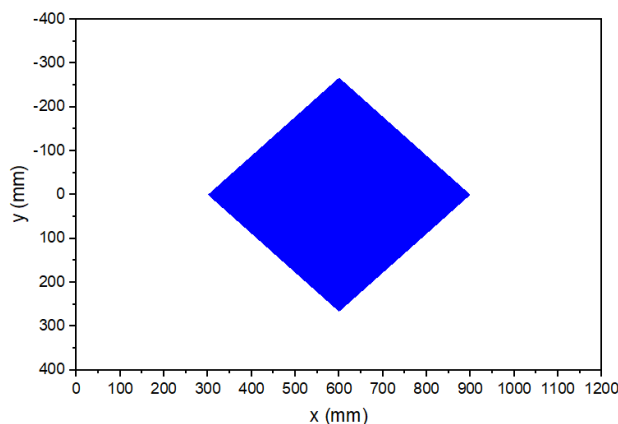
Πρέπει να αναφερθεί πως συνέβησαν λάθη κατά την τοποθέτηση των θερμοστοιχείων στο CLT κατά την ετοιμασία για το πείραμα D. Ως αποτέλεσμα, αρκετά θερμοστοιχεία δείχνουν λανθασμένες τιμές. Για παράδειγμα, στην πίσω θέση όπως φαίνεται στο σχήμα 6.43 η θερμοκρασίες με απόσταση 10mm από την εκτεθειμένη επιφάνεια είναι μικρότερες από τις θερμοκρασίες με απόσταση 20mm. Παρόμοια φαινόμενα παρατηρούνται στα περισσότερα διαγράμματα στο σχήμα 6.43. Οι δύο εξαιρέσεις είναι τα διαγράμματα θερμοκρασιών του πειράματος D στις θέσεις μπροστά και δεξιά, τα οποία παρουσιάζουν φυσιολογικές τιμές θερμοκρασιών στον χρόνο, ανά την απόσταση από την εκτεθειμένη επιφάνεια. Στο πείραμα C βρέθηκαν λανθασμένα μόνο δύο θερμοστοιχεία στο κέντρο με απόσταση 40mm και 50mm από την εκτεθειμένη επιφάνεια. Επομένως ολοκληρωμένη εικόνα για την καύση του CLT λαμβάνεται κυρίως από το πείραμα C.

Η θερμοκρασία αυξάνεται με τον χρόνο καθώς η ξυλεία υποβάλλεται στα στάδια της καύσης, την ξήρανση, την πυρόλυση, την έναυση της καύσης, την καύση των πτητικών και την καύση του εξανθρακώματος όπως αναφέρονται στην παράγραφο 1.1.2 του πρώτου κεφαλαίου. Οι μέγιστες θερμοκρασίες που παράγει η καύση ξυλείας και του εξανθρακώματός της είναι κοντά στους 600°C, μεγαλύτερες θερμοκρασίες επισημάνουν πως στο σημείο αυτό μετριέται πλέον θερμοκρασία του αέρα.

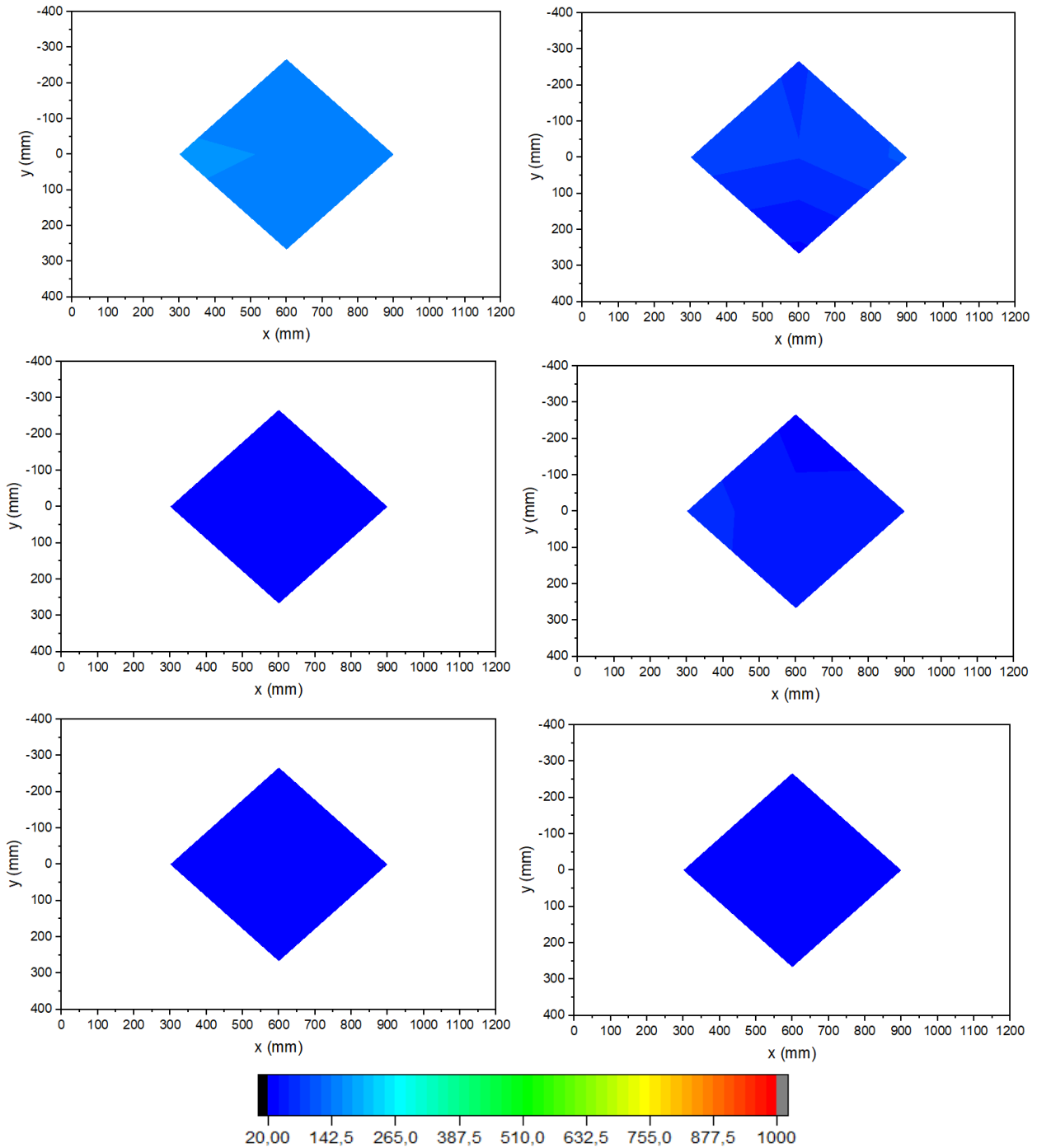
Μετά την μία ώρα στα διαγράμματα του πειράματος C παρατηρείται μια ραγδαία αύξηση της θερμοκρασίας στα θερμοστοιχεία που απέχουν λίγο από την εκτεθειμένη επιφάνεια του CLT, ενώ έπειτα η θερμοκρασία δεν αυξάνεται περαιτέρω. Εκεί πλέον έχει αποκολληθεί το εξανθράκωμα και μετριέται η θερμοκρασία αέρος.

Ένα δευτερεύον φαινόμενο που παρατηρείται από τα διαγράμματα είναι πως σε διάφορα θερμοστοιχεία οι μετρούμενες θερμοκρασίες παραμένουν 100 °C για κάποιο σημαντικό χρονικό διάστημα. Αυτό οφείλεται σε υγρασία που μπορεί να έχει παγιδευτεί στο σημείο αυτό, καθώς η θερμοκρασία νερού σε βρασμό παραμένει 100°C.

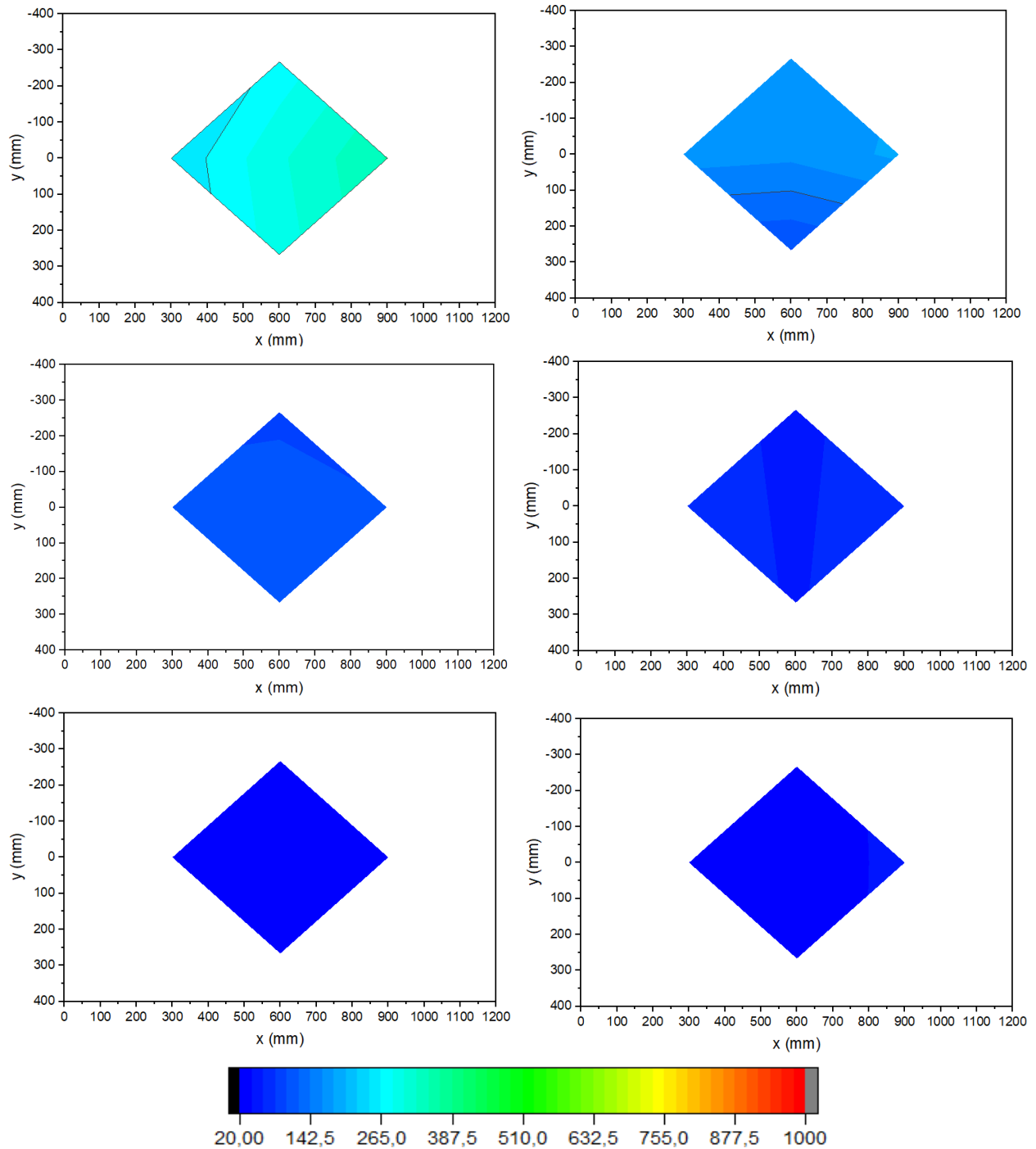
6.2.4.2 Ισοσταθμικά διαγράμματα θερμοκρασίας οροφής πειράματος C



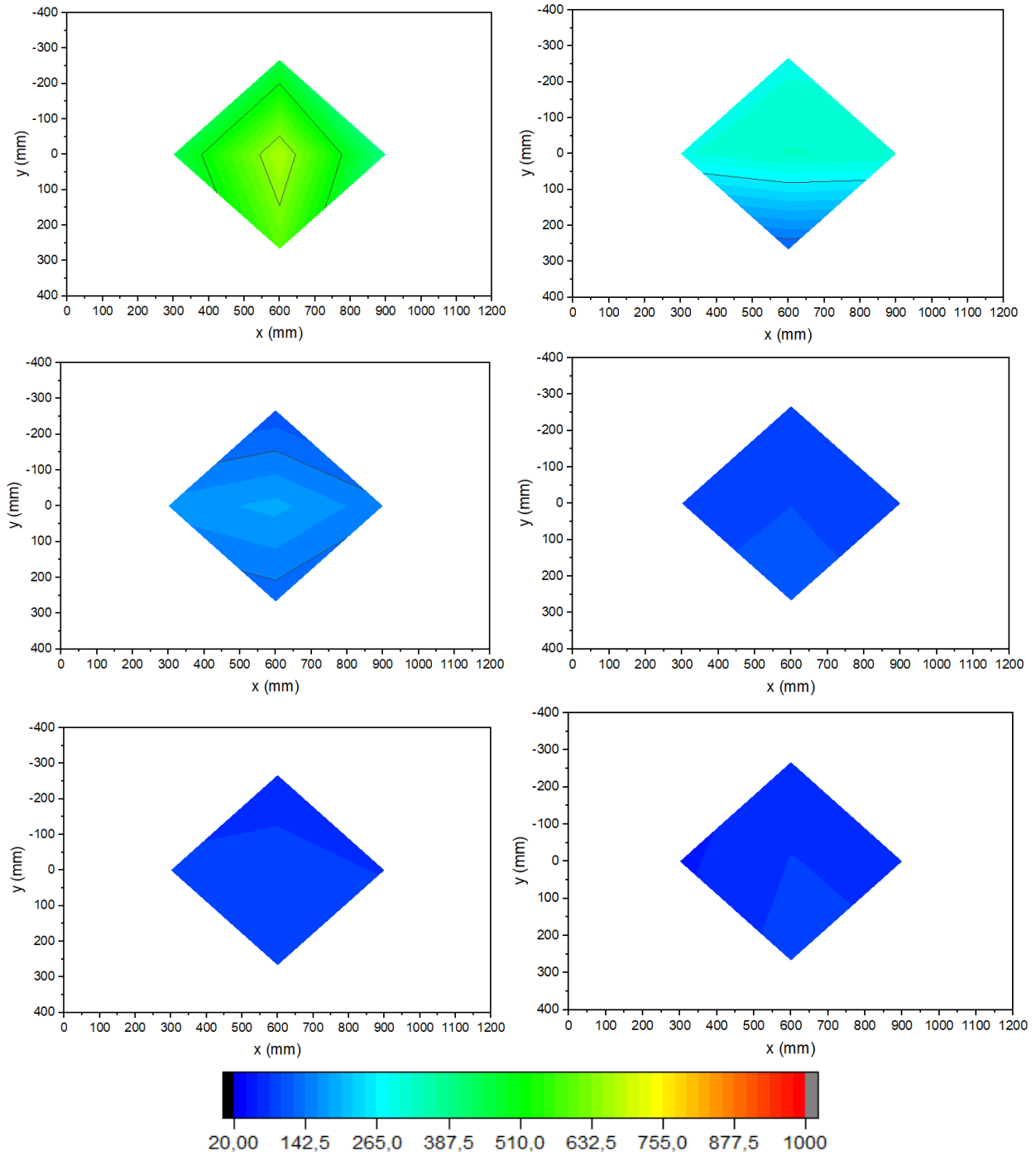
Σχήμα 6.44 Ισοσταθμικό διάγραμμα θερμοκρασίας της οροφής για $t=0$ του πειράματος C.



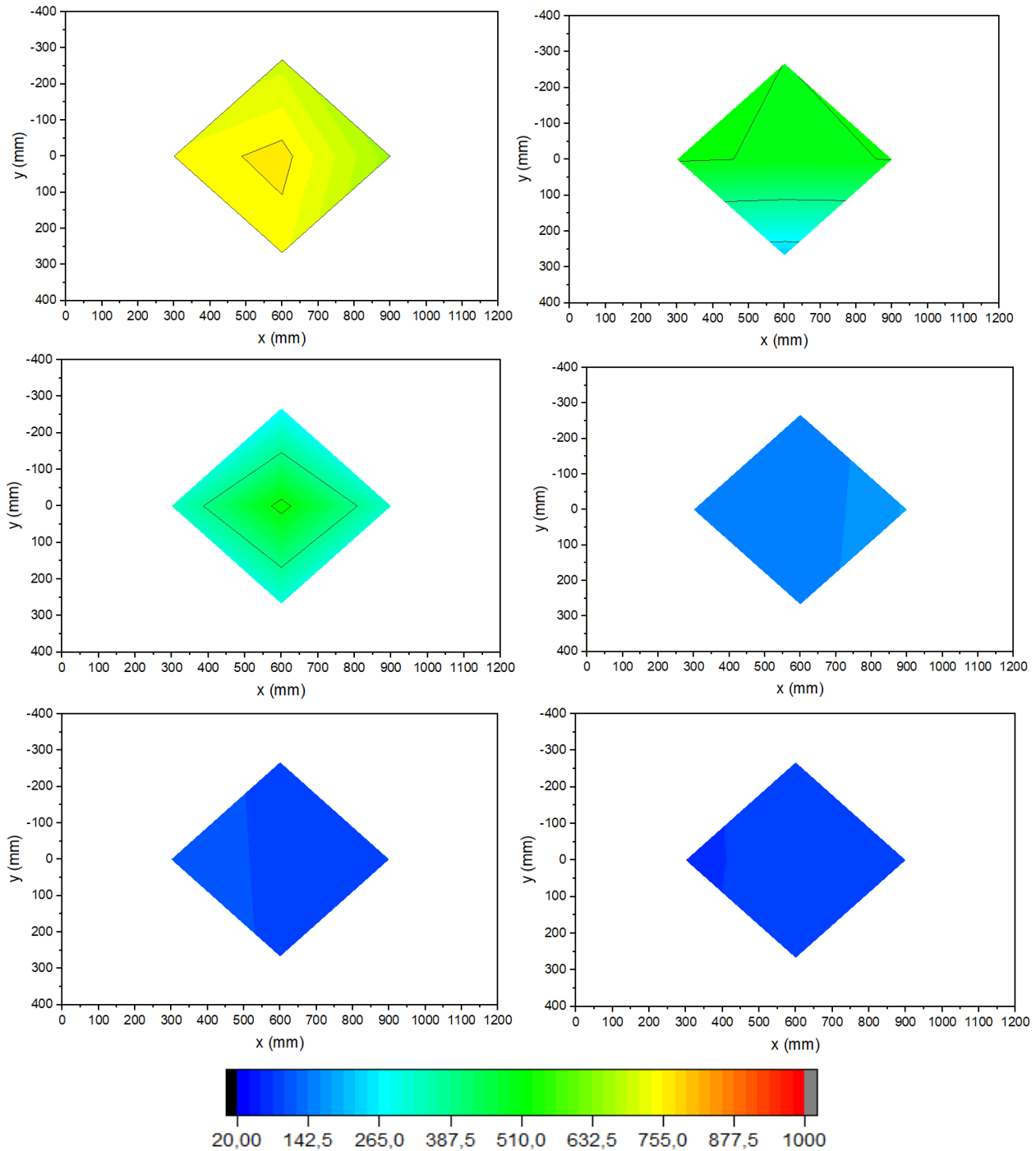
Σχήμα 6.45 Ισοσταθμικά διαγράμματα θερμοκρασίας της οροφής για $t=15\text{min}$ του πειράματος C, σε ύψος από την εκτεθειμένη επιφάνεια της οροφής 10mm(πρώτη γραμμή πρώτη στήλη), 20mm(πρώτη γραμμή δεύτερη στήλη), 30mm(δεύτερη γραμμή πρώτη στήλη), 40mm(δεύτερη γραμμή δεύτερη στήλη), 50mm(τρίτη γραμμή πρώτη στήλη), 60mm(τρίτη γραμμή δεύτερη στήλη).



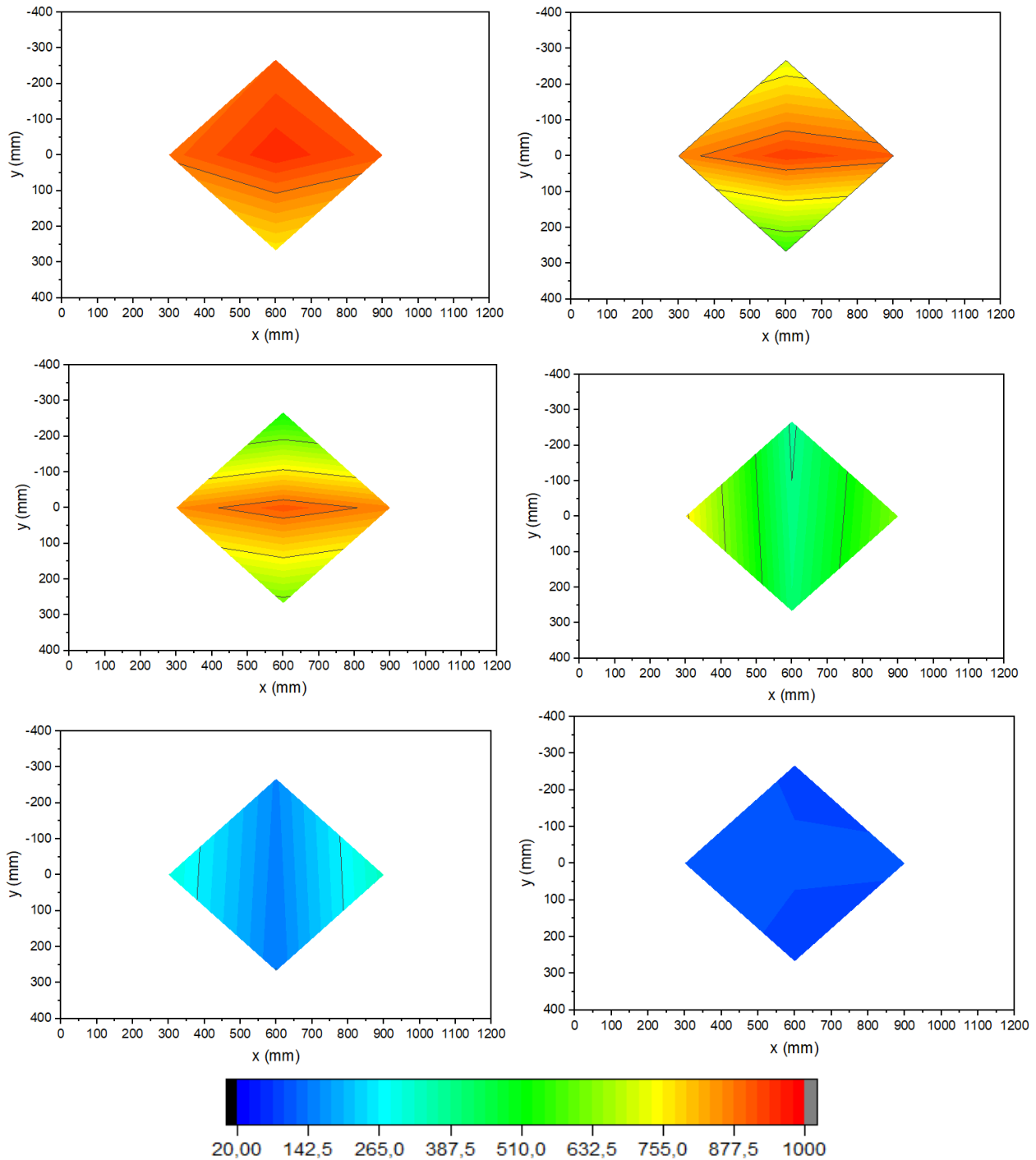
Σχήμα 6.46 Ισοσταθμικά διαγράμματα θερμοκρασίας της οροφής για $t=30\text{min}$ του πειράματος C, σε ύψος από την εκτεθειμένη επιφάνεια της οροφής 10mm(πρώτη γραμμή πρώτη στήλη), 20mm(πρώτη γραμμή δεύτερη στήλη), 30mm(δεύτερη γραμμή πρώτη στήλη), 40mm(δεύτερη γραμμή δεύτερη στήλη), 50mm(τρίτη γραμμή πρώτη στήλη), 60mm(τρίτη γραμμή δεύτερη στήλη).



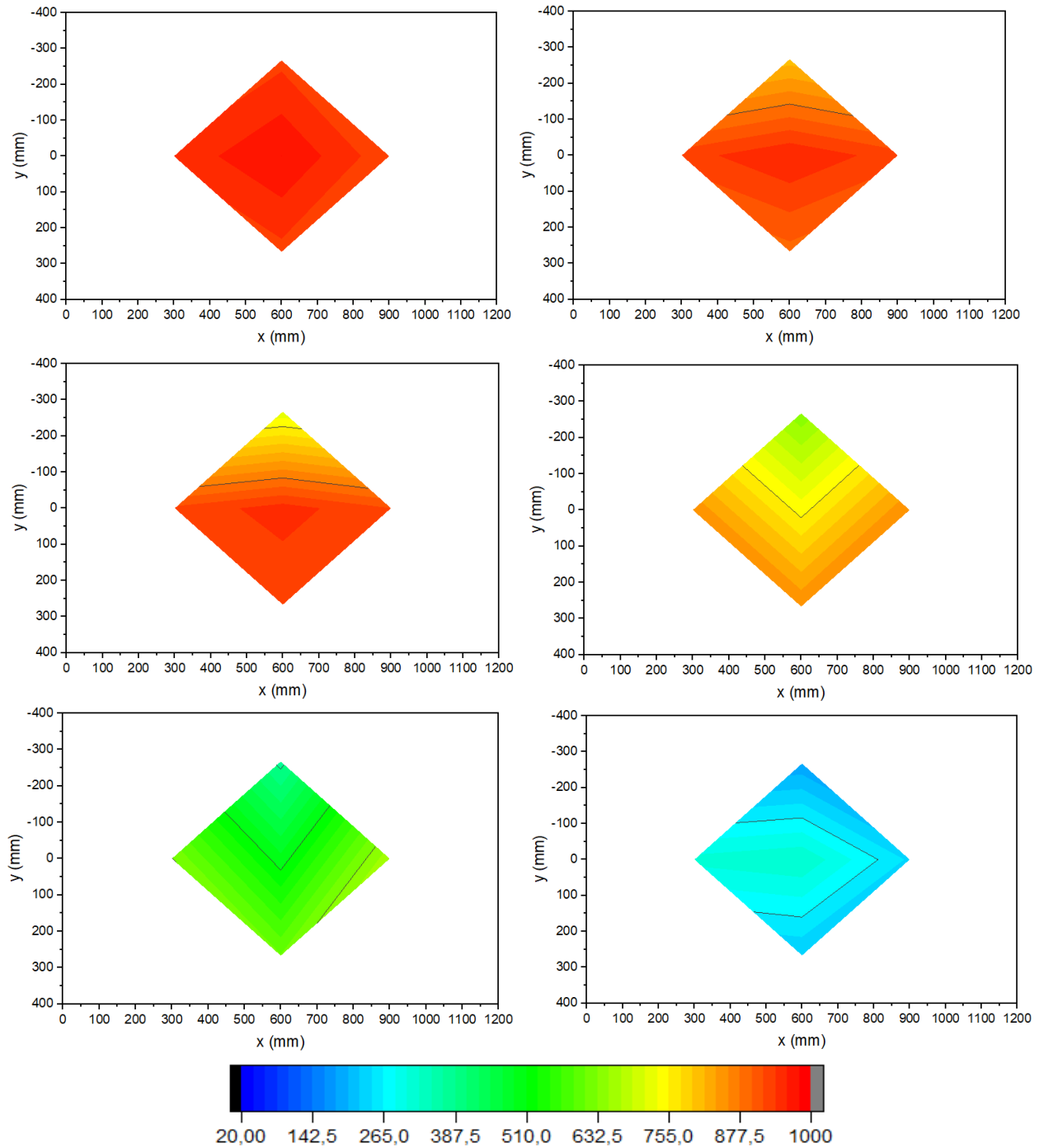
Σχήμα 6.47 Ισοσταθμικά διαγράμματα θερμοκρασίας της οροφής για $t=45\text{min}$ του πειράματος C, σε ύψος από την εκτεθειμένη επιφάνεια της οροφής 10mm(πρώτη γραμμή πρώτη στήλη), 20mm(πρώτη γραμμή δεύτερη στήλη), 30mm(δεύτερη γραμμή πρώτη στήλη), 40mm(δεύτερη γραμμή δεύτερη στήλη), 50mm(τρίτη γραμμή πρώτη στήλη), 60mm(τρίτη γραμμή δεύτερη στήλη).



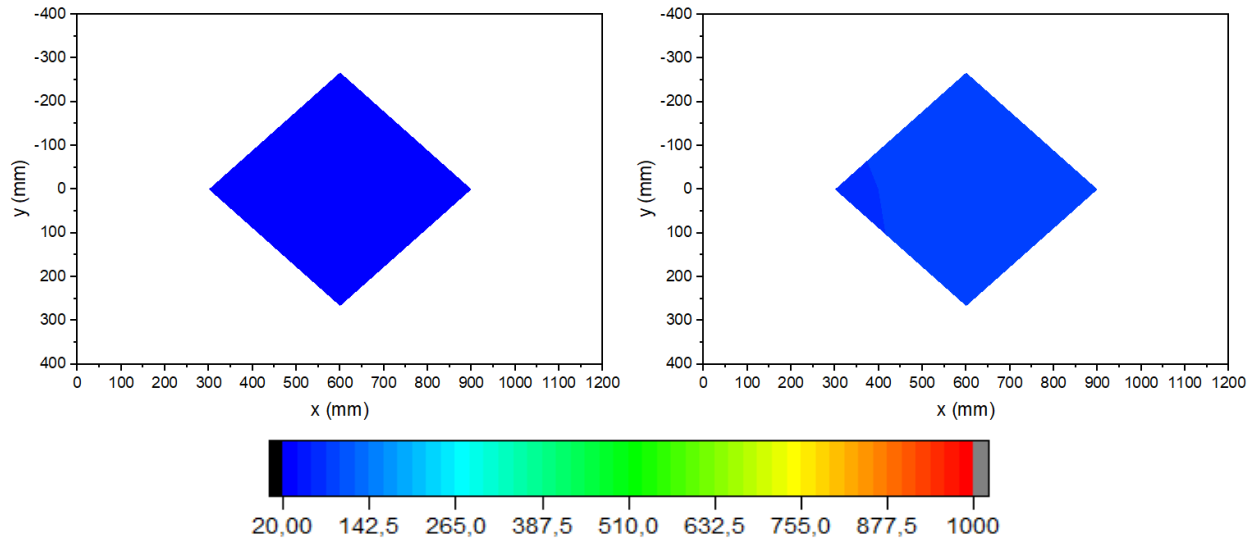
Σχήμα 6.48 Ισοσταθμικά διαγράμματα θερμοκρασίας της οροφής για $t=60\text{min}$ του πειράματος C, σε ύψος από την εκτεθειμένη επιφάνεια της οροφής 10mm(πρώτη γραμμή πρώτη στήλη), 20mm(πρώτη γραμμή δεύτερη στήλη), 30mm(δεύτερη γραμμή πρώτη στήλη), 40mm(δεύτερη γραμμή δεύτερη στήλη), 50mm(τρίτη γραμμή πρώτη στήλη), 60mm(τρίτη γραμμή δεύτερη στήλη).



Σχήμα 6.49 Ισοσταθμικά διαγράμματα θερμοκρασίας της οροφής για $t=75\text{min}$ του πειράματος C, σε ύψος από την εκτεθειμένη επιφάνεια της οροφής 10mm(πρώτη γραμμή πρώτη στήλη), 20mm(πρώτη γραμμή δεύτερη στήλη), 30mm(δεύτερη γραμμή πρώτη στήλη), 40mm(δεύτερη γραμμή δεύτερη στήλη), 50mm(τρίτη γραμμή πρώτη στήλη), 60mm(τρίτη γραμμή δεύτερη στήλη).



Σχήμα 6.50 Ισοσταθμικά διαγράμματα θερμοκρασίας της οροφής για $t=90\text{min}$ του πειράματος C, σε ύψος από την εκτεθειμένη επιφάνεια της οροφής 10mm(πρώτη γραμμή πρώτη στήλη), 20mm(πρώτη γραμμή δεύτερη στήλη), 30mm(δεύτερη γραμμή πρώτη στήλη), 40mm(δεύτερη γραμμή δεύτερη στήλη), 50mm(τρίτη γραμμή πρώτη στήλη), 60mm(τρίτη γραμμή δεύτερη στήλη).



Σχήμα 6.51 Ισοσταθμικά διαγράμματα θερμοκρασίας της οροφής του πειράματος C σε ύψος από την εκτεθειμένη επιφάνεια της οροφής 80mm για $t=15\text{min}$ (αριστερά) και $t=90\text{min}$ (δεξιά).

Τα ισοσταθμικά διαγράμματα θερμοκρασίας παρουσιάζουν μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα των θερμοκρασιών μιας οροφής CLT στον χρόνο, καθώς και τις διαφορές τους σε διάφορα βάθη του CLT.

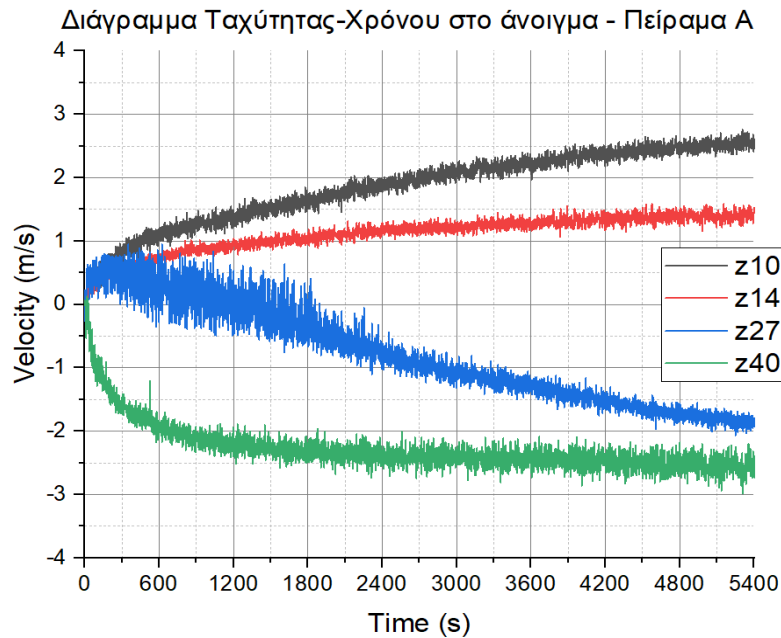
Γίνονται εμφανείς οι καλές θερμομονωτικές ιδιότητες του CLT καθώς στο σχήμα 6.51 δεξιά μετά από όλη τη διάρκεια του πειράματος επικρατούν ακόμη πολύ χαμηλές θερμοκρασίες σε σχέση με τις υπόλοιπες θέσεις, όπως είναι εμφανές στα σχήματα 6.45 έως 6.50.

6.3 Αναπτυσσόμενο ροϊκό πεδίο

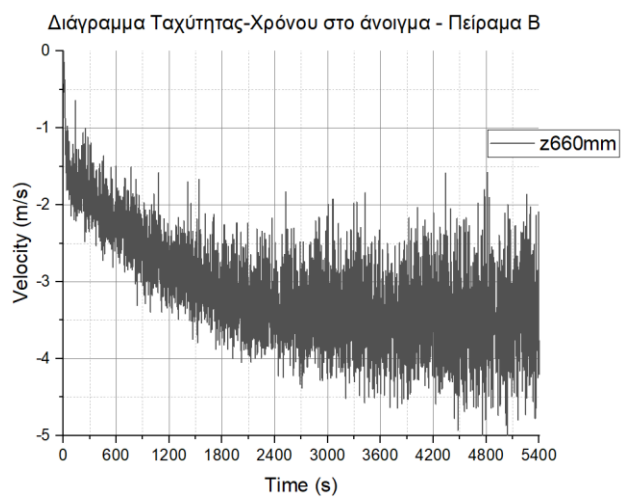
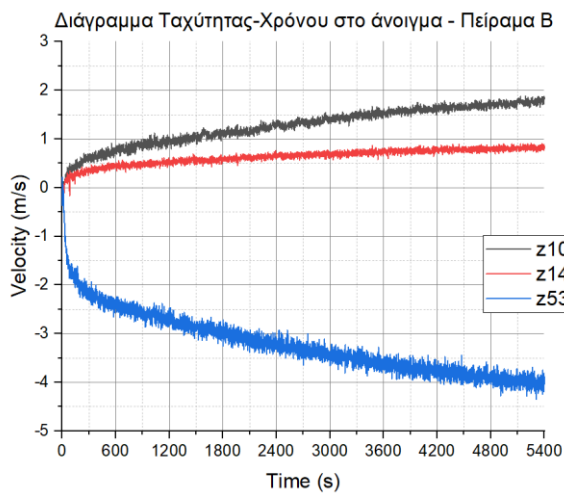
6.3.1 Άνοιγμα

6.3.1.1 Διαγράμματα ταχυτήτων στο άνοιγμα

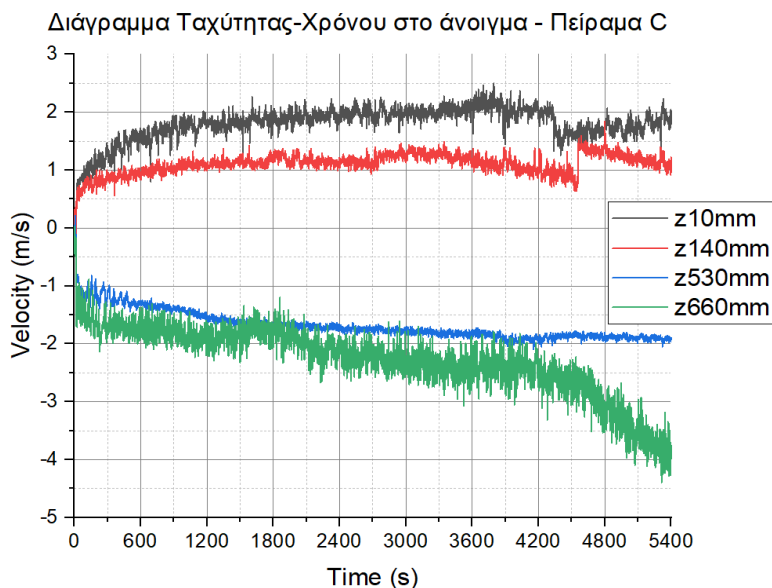
Ακολουθούν τα διαγράμματα ταχύτητας στο άνοιγμα του πυροδιαμερίσματος στις θέσεις που έχουν τοποθετηθεί οι μετρητές ταχύτητας.



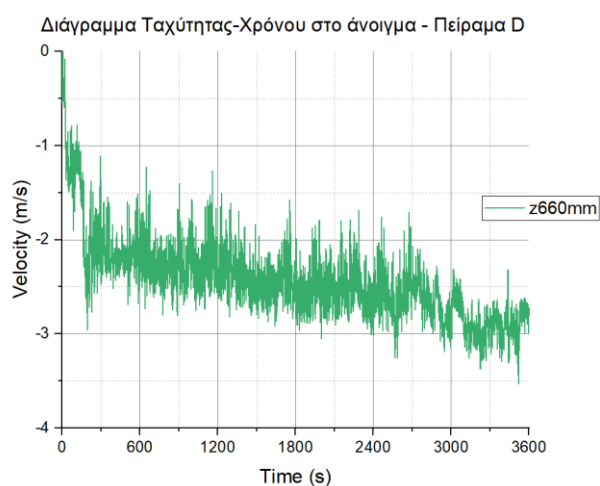
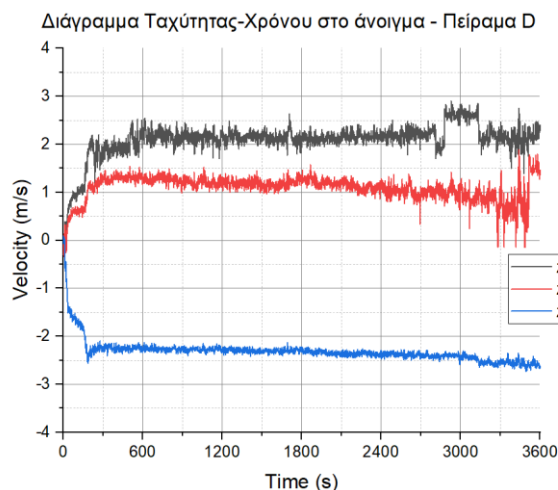
Σχήμα 6.52 Διάγραμμα ταχύτητας χρόνου στο άνοιγμα στο πείραμα A.



Σχήμα 6.53 Διαγράμματα ταχύτητας χρόνου στο άνοιγμα στο πείραμα B.



Σχήμα 6.54 Διάγραμμα ταχύτητας χρόνου στο άνοιγμα στο πείραμα C.



Σχήμα 6.55 Διαγράμματα ταχύτητας χρόνου στο άνοιγμα στο πείραμα D.

Παρατηρήσεις:

Στο πείραμα A απουσιάζουν οι τιμές ταχυτήτων στα ύψη 530mm και 660mm καθώς οι σωλήνες Pitot έδιναν λάθος τιμές.

Θετικές ταχύτητες αναφέρονται στον αέρα που εισέρχεται στο πυροδιαμέρισμα και αρνητικές στα καυσαέρια που εξέρχονται. Το ουδέτερο επίπεδο των καυσαερίων σχηματίζεται δευτερόλεπτα μετά την έναρξη των πειραμάτων. Ως γνωστόν στο σημείο εκείνο οι ταχύτητες είναι μηδενικές, άνω αυτού εξέρχονται τα καυσαέρια και κάτω του εισέρχεται φρέσκος αέρας.

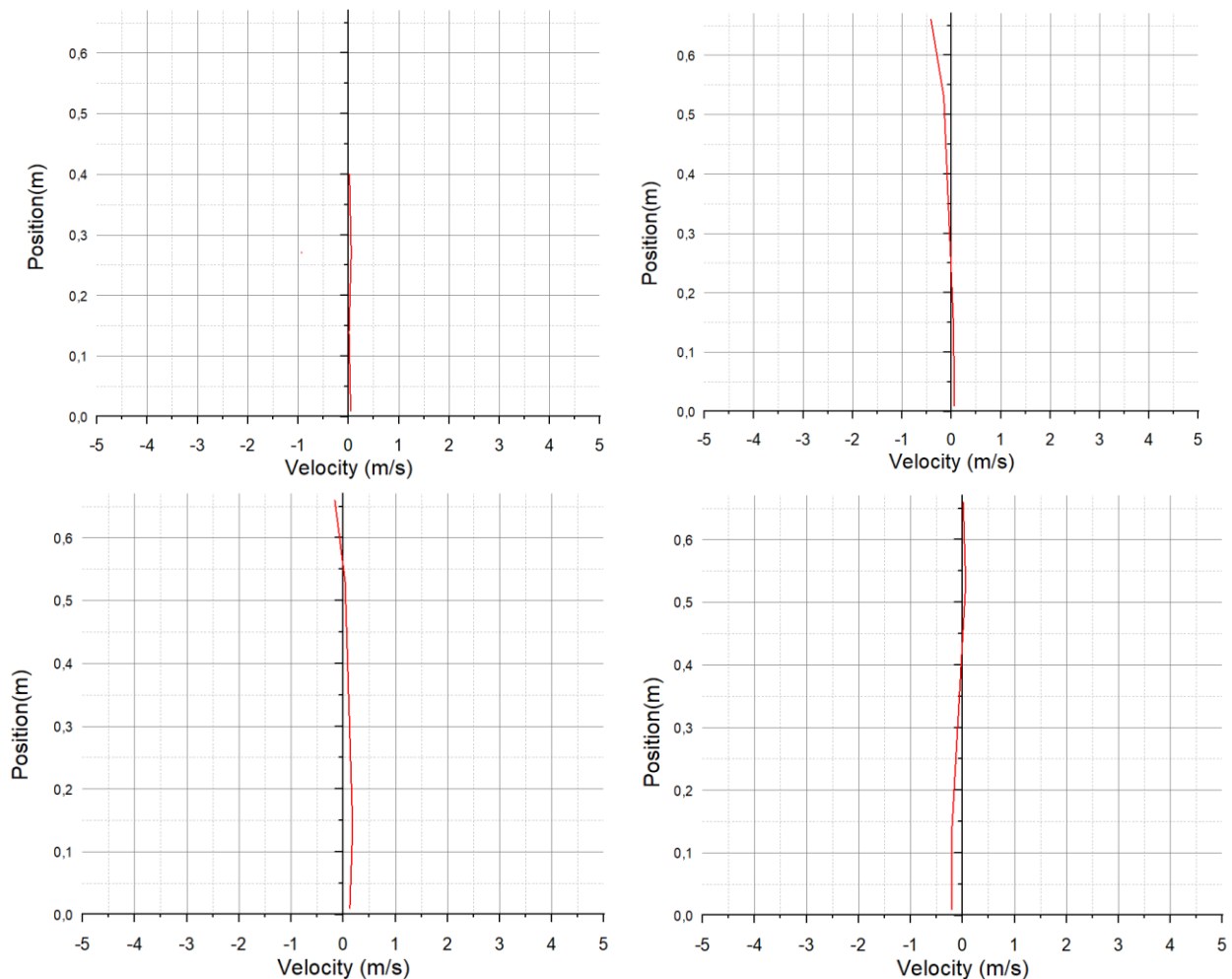
Οι ταχύτητες αυξάνονται κατά απόλυτη τιμή με το πέρασμα του χρόνου, καθώς αυξάνεται η ισχύς της φωτιάς. Στο σχήμα 6.52 είναι ορατή έμμεσα η μετακίνηση του

ουδέτερου επιπέδου, καθώς στα πρώτα λεπτά, στο ύψος 400mm οι ταχύτητες είναι θετικές και έπειτα από ένα χρονικό διάστημα γίνονται αρνητικές.

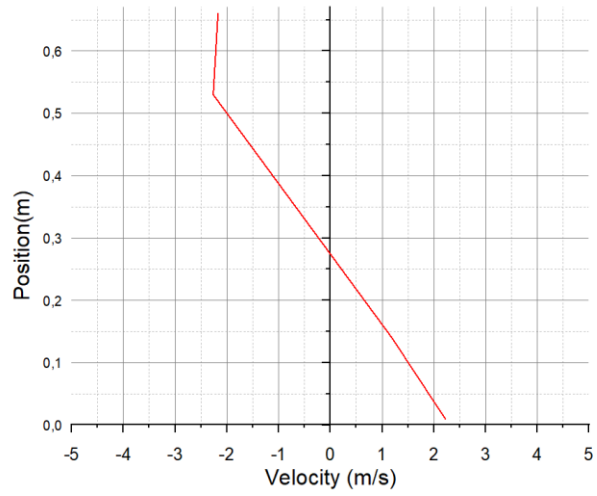
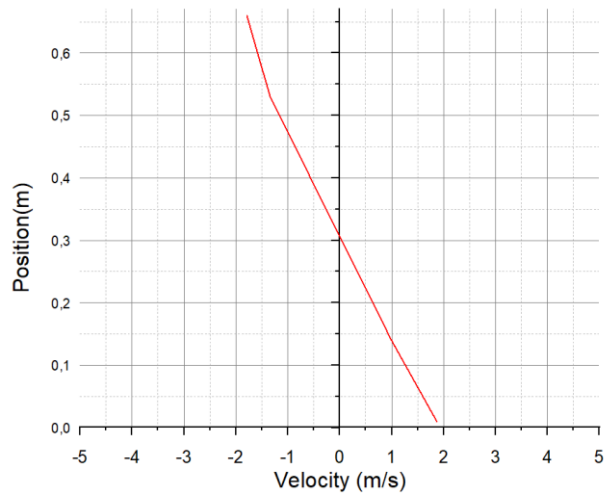
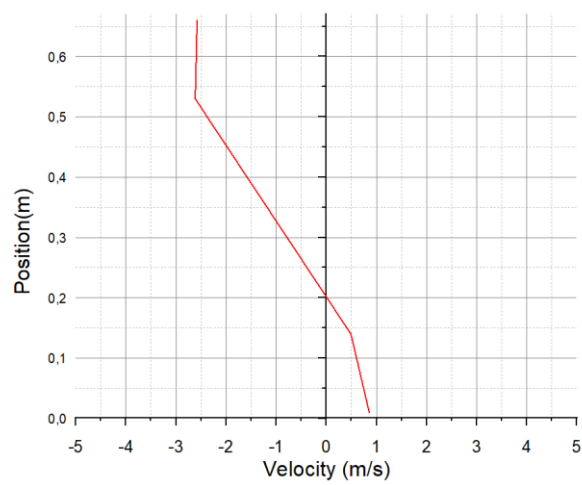
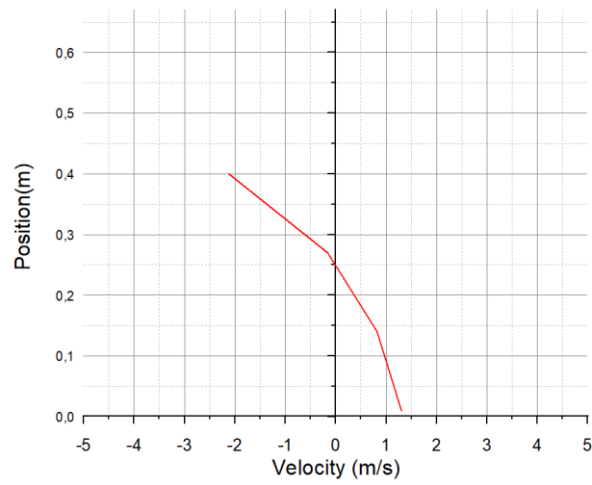
Παρατηρείται πως οι ταχύτητες το ανώτερο ύψος 660mm παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις στο χρόνο, ιδιαίτερα στο σχήμα 6.53 δεξιά. Καθώς ο μετρητής βρίσκεται οριακά στο υψηλότερο σημείο του ανοίγματος, και στο σημείο αυτό εξέρχονται φλόγες ανομοιόμορφα, οι ταχύτητες εξόδου δεν μπορούν να αποκτήσουν σταθερές τιμές.

6.3.1.2 Διαγράμματα προφίλ ταχύτητας στο άνοιγμα

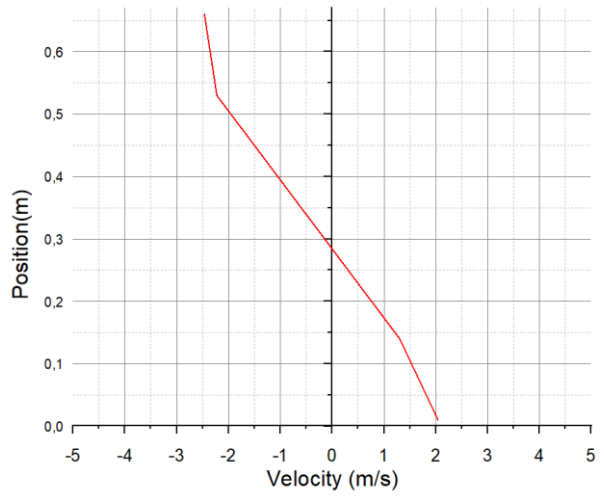
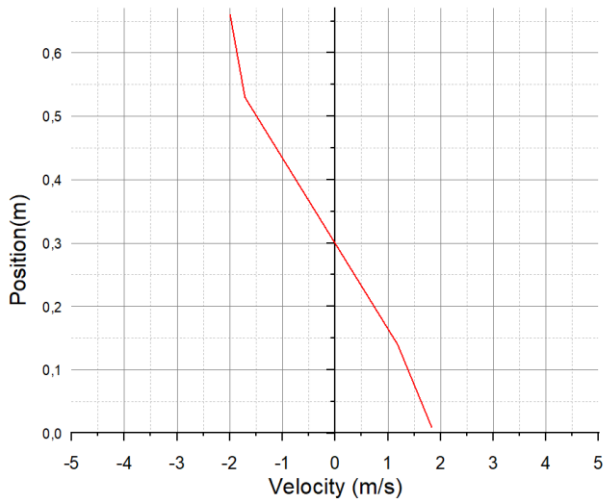
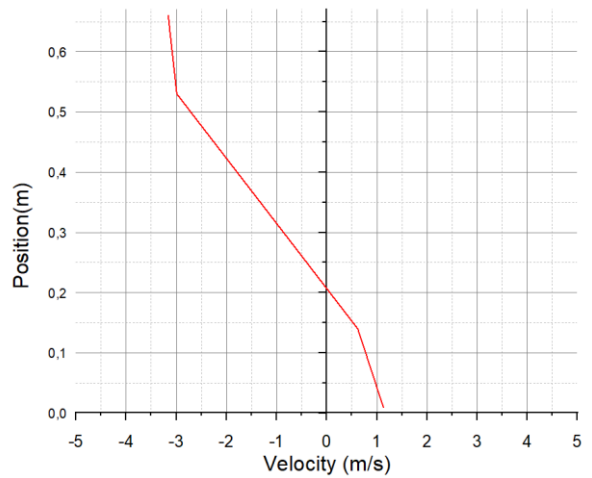
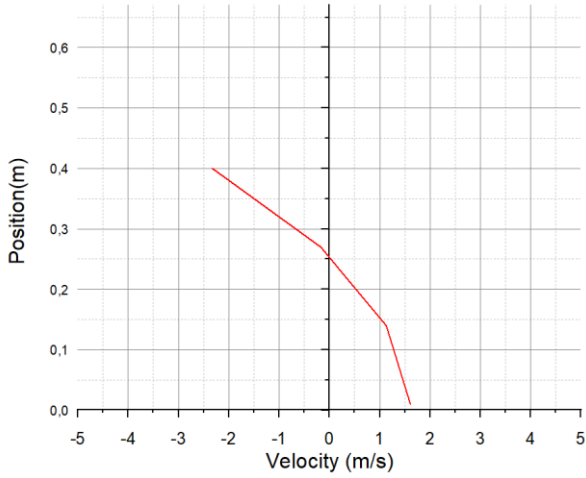
Με τις τιμές ταχύτητας για κάθε χρονική στιγμή δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας διαγραμμάτων προφίλ, της ταχύτητας ανάλογα με την θέση, για μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Στην παρούσα εργασία τα διαγράμματα δημιουργούνται ανά 15 λεπτά.



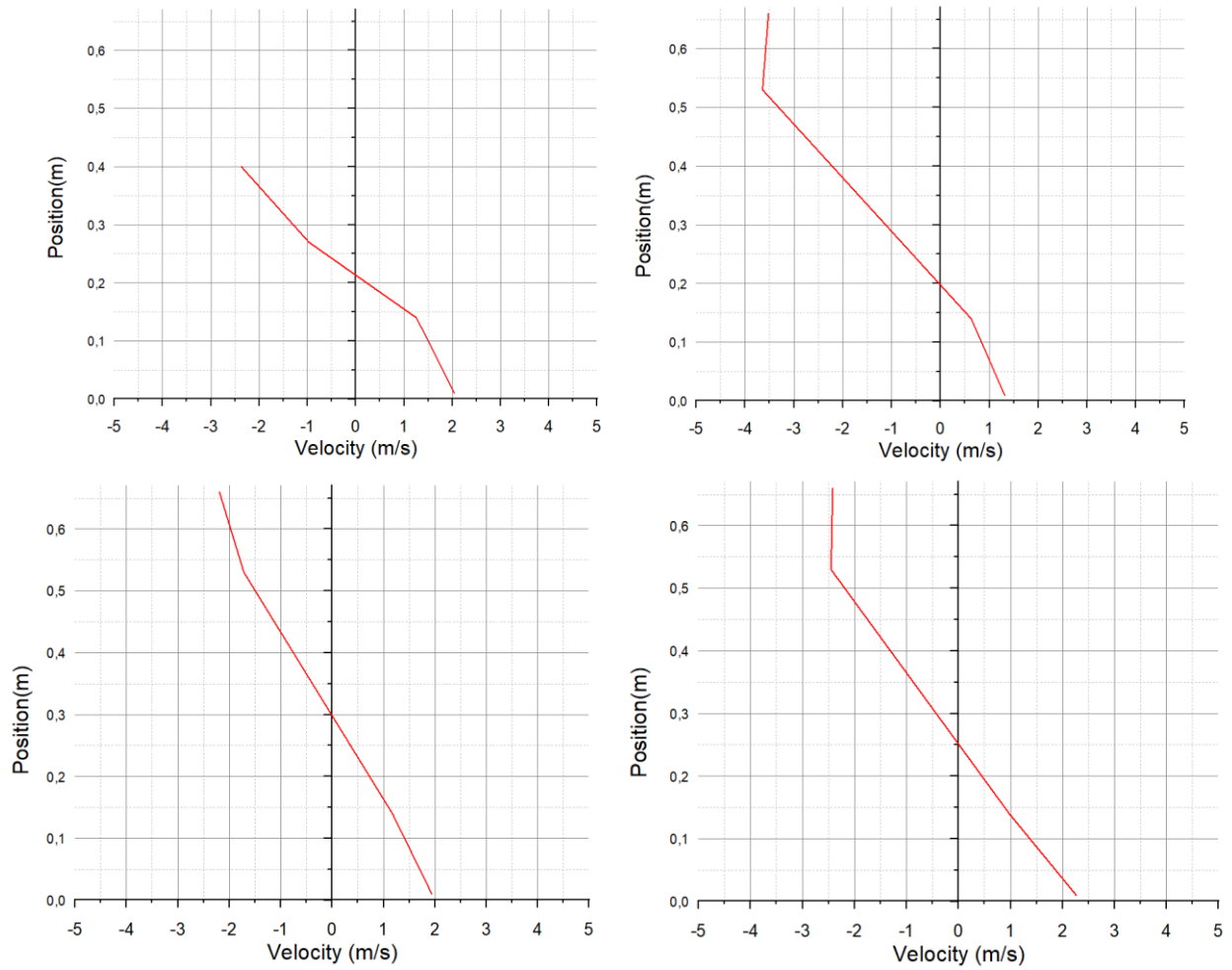
Σχήμα 6.56 Διαγράμματα προφίλ ταχύτητας στο άνοιγμα για $t=0\text{min}$ των πειραμάτων A(πάνω αριστερά), B(πάνω δεξιά), C(κάτω αριστερά), D(κάτω δεξιά).



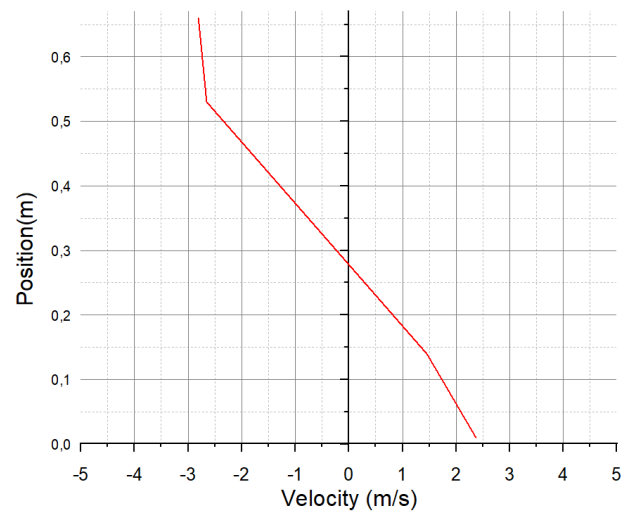
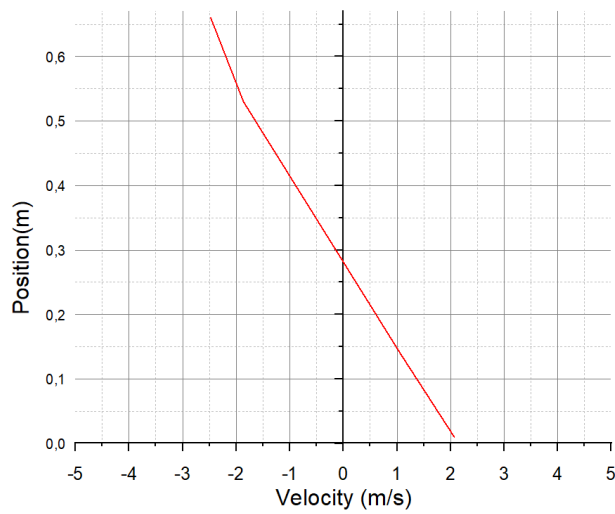
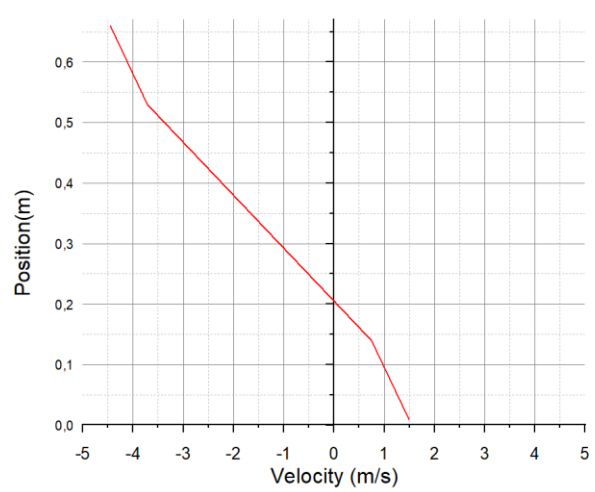
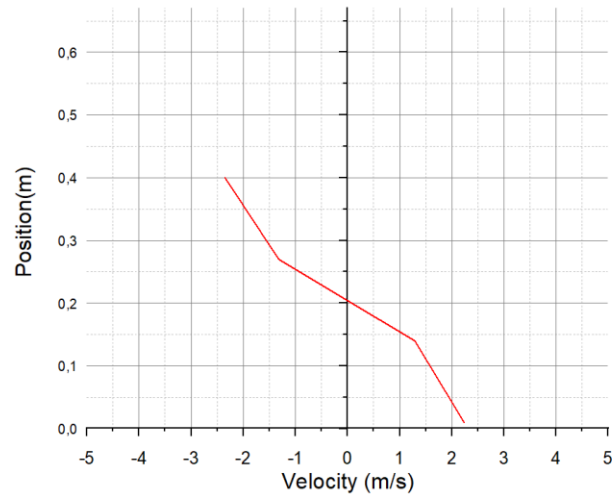
Σχήμα 6.57 Διαγράμματα προφίλ ταχύτητας στο άνοιγμα για $t=15\text{min}$ των πειραμάτων Α(πάνω αριστερά), Β(πάνω δεξιά), C(κάτω αριστερά), D(κάτω δεξιά).



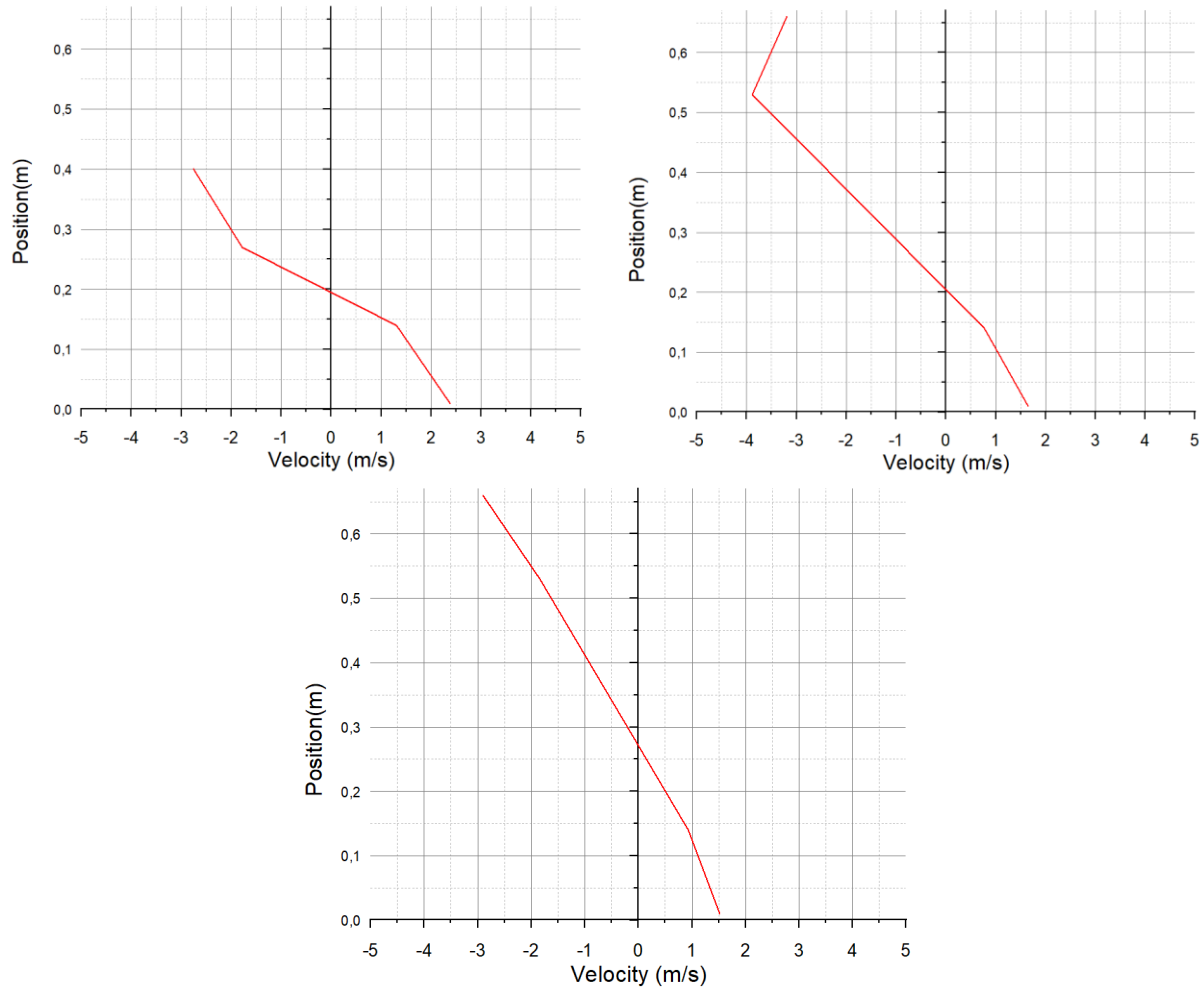
Σχήμα 6.58 Διαγράμματα προφίλ ταχύτητας στο άνοιγμα για $t=30\text{min}$ των πειραμάτων A(πάνω αριστερά), B(πάνω δεξιά), C(κάτω αριστερά), D(κάτω δεξιά).



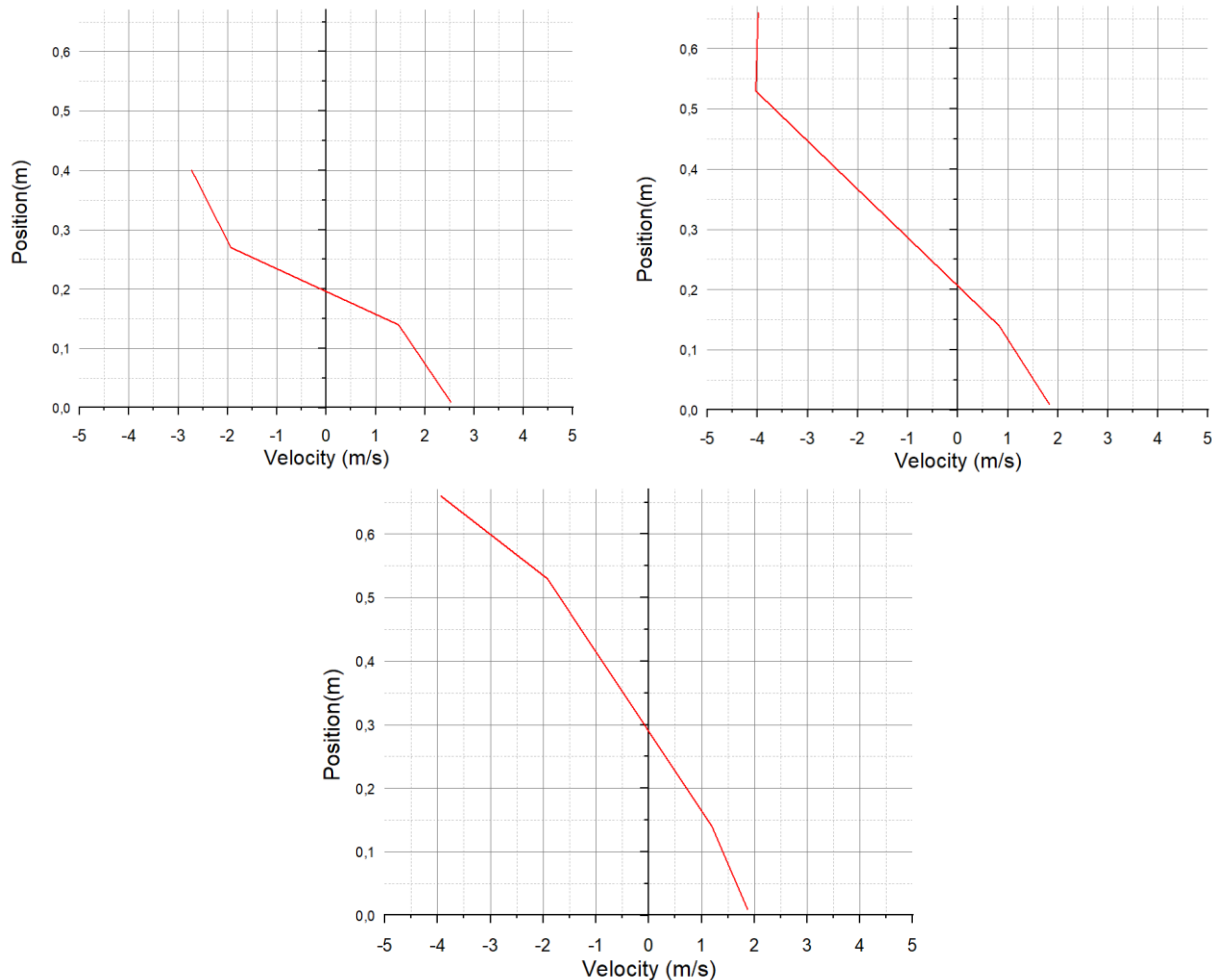
Σχήμα 6.59 Διαγράμματα προφίλ ταχύτητας στο άνοιγμα για $t=45\text{min}$ των πειραμάτων A(πάνω αριστερά), B(πάνω δεξιά), C(κάτω αριστερά), D(κάτω δεξιά).



Σχήμα 6.60 Διαγράμματα προφίλ ταχύτητας στο άνοιγμα για $t=60\text{min}$ των πειραμάτων A(πάνω αριστερά), B(πάνω δεξιά), C(κάτω αριστερά), D(κάτω δεξιά).



Σχήμα 6.61 Διαγράμματα προφίλ ταχύτητας στο άνοιγμα για $t=75\text{min}$ των πειραμάτων A(πάνω αριστερά), B(πάνω δεξιά), C(κάτω αριστερά), D(κάτω δεξιά).



Σχήμα 6.62 Διαγράμματα προφίλ ταχύτητας στο άνοιγμα για $t=90\text{min}$ των πειραμάτων A(πάνω αριστερά), B(πάνω δεξιά), C(κάτω αριστερά), D(κάτω δεξιά).

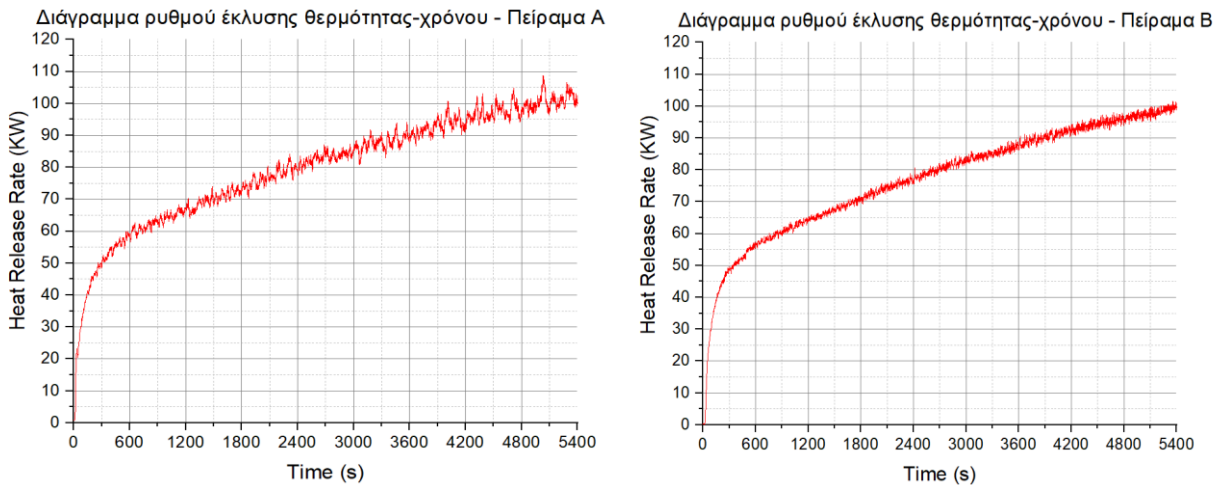
Παρατηρήσεις:

Με τα παραπάνω διαγράμματα οπτικοποιείται καλύτερα το ροϊκό πεδίο που επικρατεί στο άνοιγμα του πυροδιαμερίσματος. Δίνεται η δυνατότητα, επιπλέον, να προσδιοριστεί η θέση και οι μεταβολές του ουδέτερου επιπέδου που διαχωρίζει τον αέρα από τα καυσαέρια. Στη λήξη των πειραμάτων A και B το ουδέτερο επίπεδο βρίσκεται στη θέση 0,2m ενώ στο πείραμα C βρίσκεται στη θέση 0,3m. Στο πείραμα D φαίνεται να βρίσκεται στα 0,27-0,28m. Οι τιμές αυτές σαφώς δεν είναι ακριβείς καθώς για μεγαλύτερη βεβαιότητα θα έπρεπε να μετριέται η ταχύτητα σε περισσότερες θέσεις.

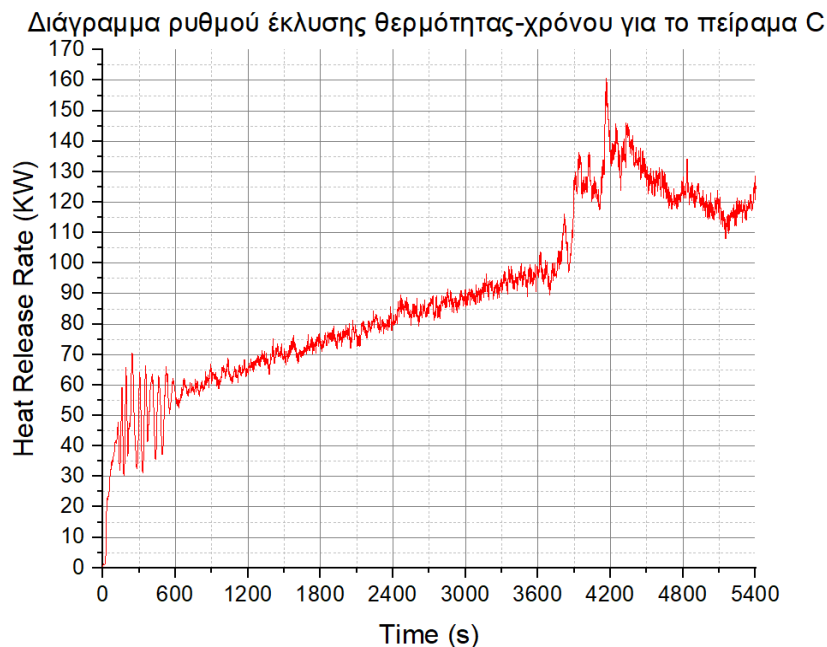
6.4 Επίδραση CLT

6.4.1 Ρυθμός Έκλυσης Θερμότητας (Heat Release Rate HRR)

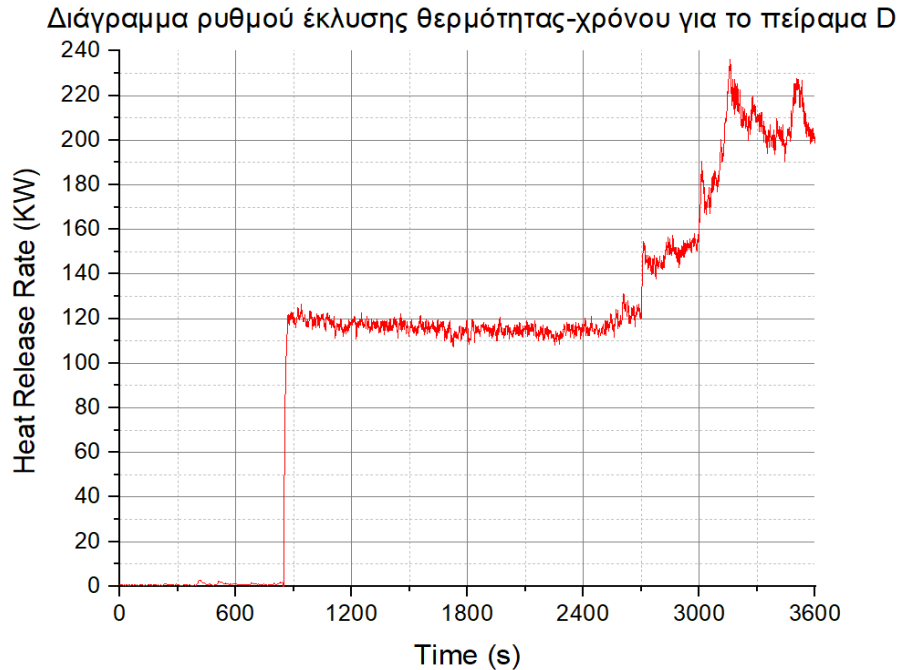
Με τη μεθοδολογία του προηγούμενου κεφαλαίου υπολογίζεται ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας των πειραμάτων για κάθε χρονική στιγμή, και μπορεί να παρουσιαστεί σε μορφή διαγράμματος.



Σχήμα 6.63 Διαγράμματα ρυθμού έκλυσης θερμότητας ως προς τον χρόνο για τα πειράματα A και B.



Σχήμα 6.64 Διάγραμμα ρυθμού έκλυσης θερμότητας ως προς τον χρόνο για το πείραμα C.



Σχήμα 6.65 Διάγραμμα ρυθμού έκλυσης θερμότητας ως προς τον χρόνο για το πείραμα D.

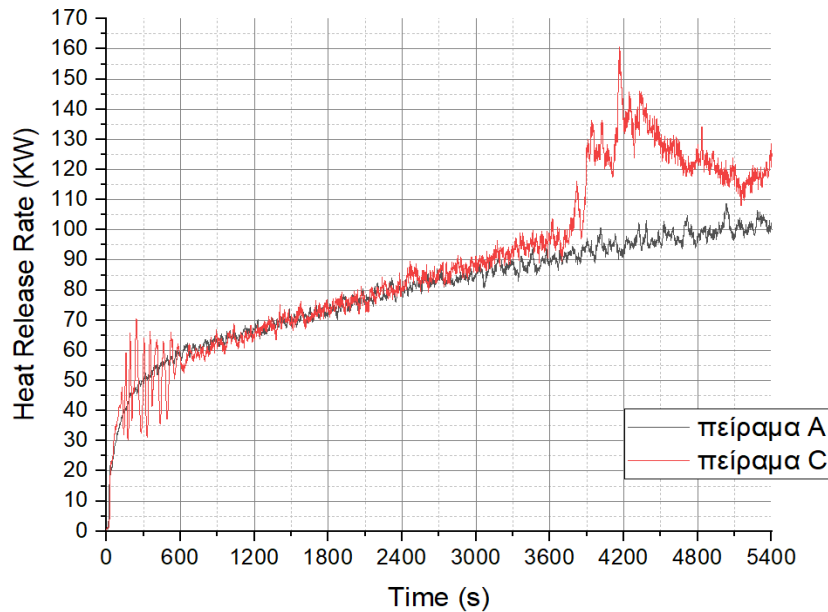
Παρατηρήσεις:

Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας παρουσιάζει την ισχύ της φωτιάς και είναι ο κύριος τρόπος με τον οποίο καθορίζεται η επικινδυνότητα μιας πυρκαγιάς. Τα πειράματα A και B εμφανίζουν όμοια καμπύλη ισχύος καθώς όπως έχει επαληθευτεί στην παράγραφο 6.1.4, ακολουθούν την καμπύλη ISO-834. Τα πειράματα C και D λόγω της συνεισφοράς του CLT παρουσιάζουν σημαντικά μεγαλύτερες τιμές ισχύος, ιδιαίτερα το πείραμα D. Το πείραμα C εμφανίζει μέγιστο ρυθμό έκλυσης θερμότητας 60% μεγαλύτερο των A και B, ενώ το D εμφανίζει μέγιστο ρυθμό έκλυσης θερμότητας πάνω από διπλάσιο των δύο πρώτων πειραμάτων.

Στο πείραμα D, λόγω λάθους κατά την έναρξη του πειράματος χάθηκαν οι μετρήσεις συγκεντρώσεων των καυσαερίων για τα πρώτα 15 περίπου λεπτά.

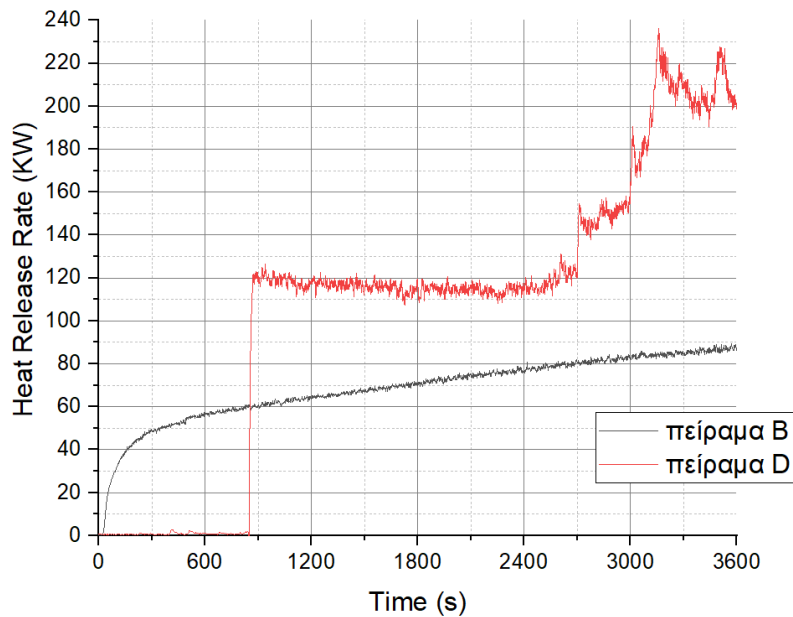
Για καλύτερη σύγκριση μεταξύ των πειραμάτων που ακολουθούν την καμπύλη ISO (A,C) και την καμπύλη Q-t (B,D) ακολουθούν τα διαγράμματα:

Διάγραμμα ρυθμού έκλυσης θερμότητας-χρόνου για τα πειράματα A και C



Σχήμα 6.66 Διαγράμματα ρυθμού έκλυσης θερμότητας ως προς τον χρόνο για τα πειράματα A και C.

Διάγραμμα ρυθμού έκλυσης θερμότητας-χρόνου για τα πειράματα B και D

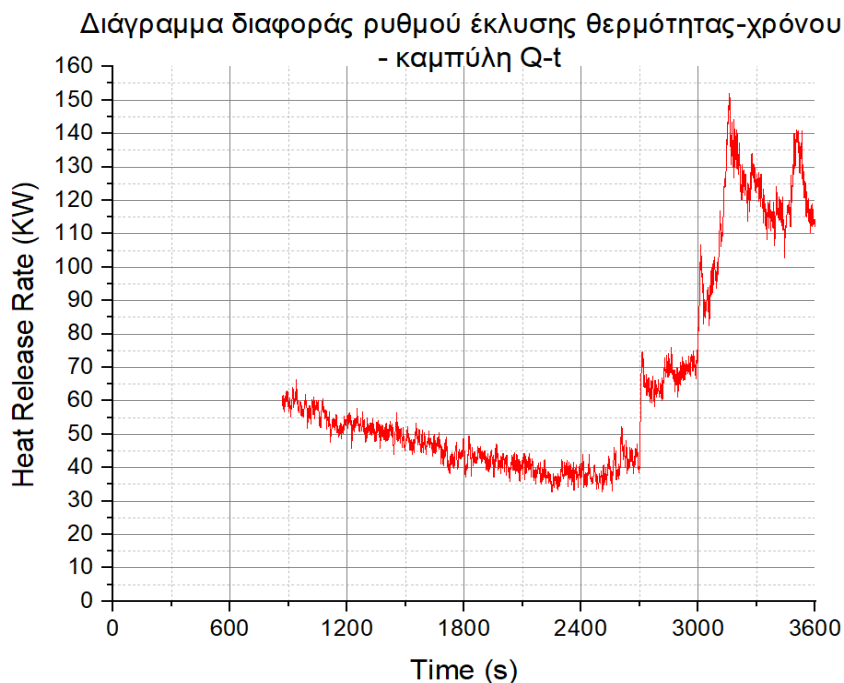


Σχήμα 6.67 Διαγράμματα ρυθμού έκλυσης θερμότητας ως προς τον χρόνο για τα πειράματα B και D.

Επιπλέον, αφαιρώντας τις αντίστοιχες καμπύλες υπολογίζεται η περίσσεια θερμική ισχύς ανάμεσα στα πειράματα. Στην περίπτωση των πειραμάτων Β και D, η αφαίρεση των τιμών ισούται με την καθαρή συνεισφορά σε θερμική ισχύ του CLT.

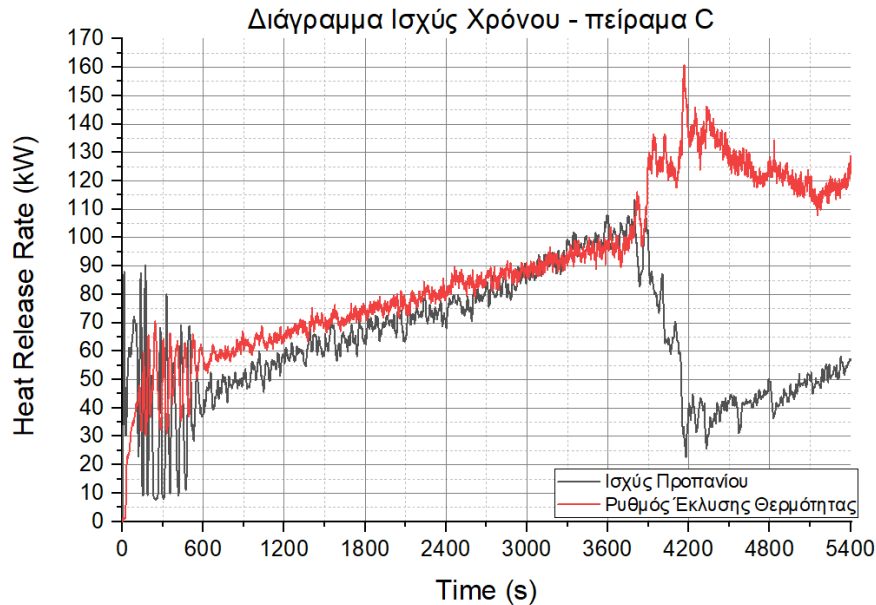


Σχήμα 6.68 Διάγραμμα διαφοράς ρυθμού έκλυσης θερμότητας των πειραμάτων που ακολουθούν την καμπύλη ISO-834.



Σχήμα 6.69 Διάγραμμα διαφοράς ρυθμού έκλυσης θερμότητας των πειραμάτων που ακολουθούν την καμπύλη Q-t.

Προκειμένου να βρεθεί η καθαρή συνεισφορά σε ισχύ του CLT του πειράματος C δημιουργείται το διάγραμμα 6.70, στο οποίο παριστάνεται ο μετρούμενος ρυθμός έκλυσης θερμότητας με την ισχύ του καυσίμου που καίγεται ανά χρονική στιγμή. Για τον υπολογισμό της ισχύς του καυσίμου χρησιμοποιείται ο τύπος 6.2.



Σχήμα 6.70 Διάγραμμα ολικού ρυθμού έκλυσης θερμότητας και της ισχύς του προπανίου στο πείραμα C.

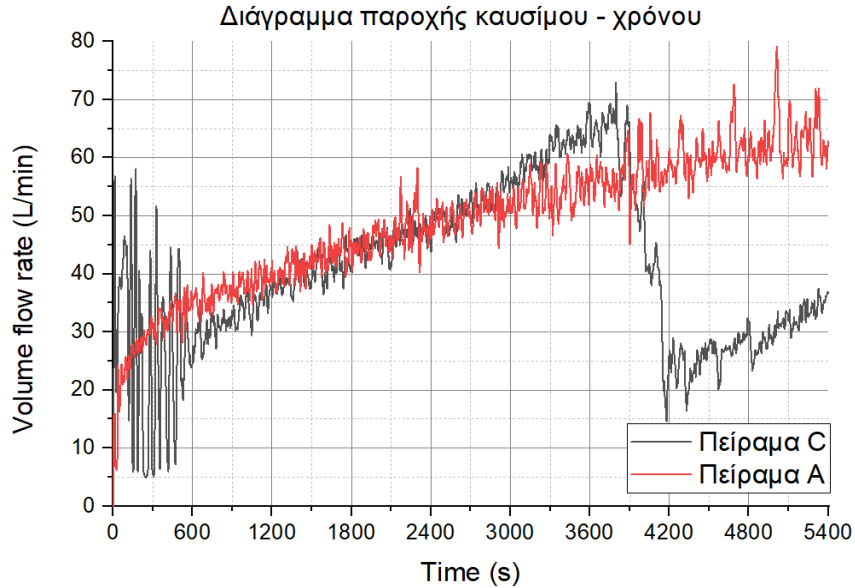
Παρατηρήσεις:

Προκειμένου να γίνει πιστή εφαρμογή της καμπύλης ISO-834 μιας καμπύλης θερμοκρασίας χρόνου, στο πείραμα C με οροφή από CLT το κύκλωμα που ελέγχει την παροχή καυσίμου χρειάζεται να στείλει λιγότερο καύσιμο (σχήμα 6.70 και 6.71). Αυτό οφείλεται στην καύση του ίδιου του CLT και στην θερμότητα που προσφέρει. Στο πείραμα D καθώς δεν υπάρχει αντίστοιχος μηχανισμός ελέγχου παροχής, ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας παρατηρείται αρκετές φορές μεγαλύτερος αυτού των πειραμάτων A και B (και του C).

Στο σχήμα 6.70 παρατηρείται η μέγιστη συνεισφορά του CLT σε ισχύ στα 70 λεπτά και ισούται με περίπου 140kW.

Η μέγιστη συνεισφορά του CLT σε ισχύ στο πείραμα D μετριέται στα 150kW στο σχήμα 6.69 και οι τιμές παραμένουν υψηλές για την υπόλοιπη διάρκεια του πειράματος. Η διαπίστωση αυτή παρουσιάζει τα μειονεκτήματα χρήσης της καμπύλης ISO-834, μιας καμπύλης θερμοκρασίας χρόνου σε μελέτες διερεύνησης πυρκαγιάς σε διαμέρισμα με δομικά στοιχεία κατασκευασμένα από CLT.

Στο σχήμα 6.71 παρουσιάζονται οι τιμές παροχής καυσίμου ανά χρόνο, των πειραμάτων A και C.



Σχήμα 6.71 Διάγραμμα παροχής καυσίμου στον χρόνο των πειραμάτων που ακολουθούν την καμπύλη ISO-834.

Στα 65 λεπτά στα σχήματα 6.68 και 6.66, εμφανίζεται η αύξηση του ρυθμού έκλυσης θερμότητας του πειράματος C σε σχέση με το πείραμα A, το σημείο δηλαδή που το CLT συνεισφέρει ενεργά. Την ίδια χρονική στιγμή στο σχήμα 6.71 μειώνεται η παροχή καυσίμου χάρη στο σύστημα ελέγχου, για να διατηρηθεί η θερμοκρασία στις τιμές της καμπύλης ISO-834.

6.4.2 Ρυθμός εξανθράκωσης του CLT

Ο ρυθμός εξανθράκωσης (charring rate) του CLT παρουσιάζει πρακτικά την ταχύτητα μετάδοσης της καύσης στο πάχος του CLT. Σε πειραματικό επίπεδο θεωρείται πως η εξανθράκωση του CLT αρχίζει στους 300°C. Για τον υπολογισμό, στις μετρήσεις θερμοκρασιών των οροφών βρίσκεται η χρονική στιγμή που επέρχεται θερμοκρασία 300°C και διαιρείται η τιμή της απόστασης από την εκτεθειμένη επιφάνεια με την χρονική αυτή στιγμή. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για τις πέντε θέσεις και τα διάφορα βάθη που είναι τοποθετημένα τα θερμοστοιχεία στις οροφές CLT των πειραμάτων C και D (για το πείραμα D χρησιμοποιούνται μόνο τα θερμοστοιχεία που παρουσιάζουν “λογικές” τιμές).

Για παράδειγμα στο πείραμα C στα 10mm από την εκτεθειμένη επιφάνεια:

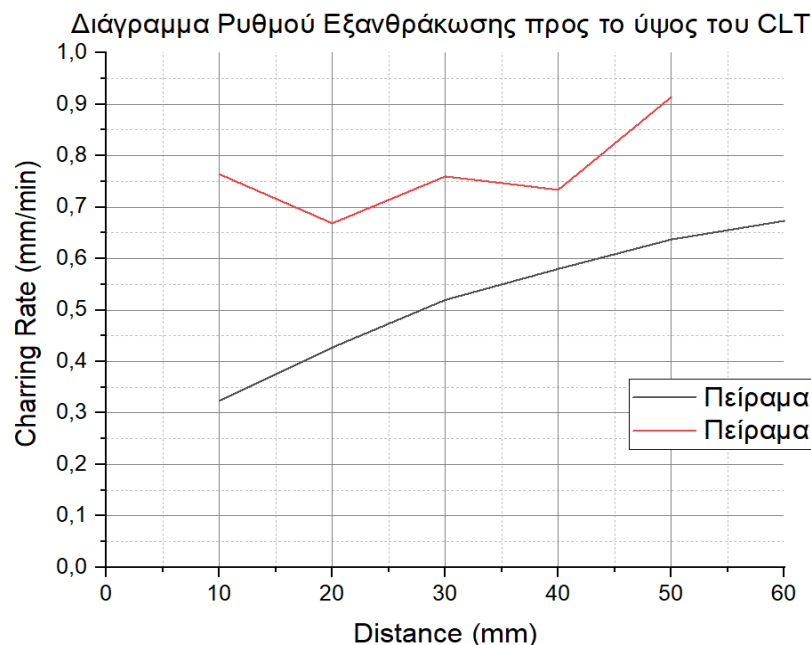
Πίνακας 6.3 Ρυθμοί εξανθράκωσης το πειράματος C στα 10mm.

Θέση (x,y) mm	Ρυθμός εξανθράκωσης mm/min
Πίσω (900,0) mm	0,3841
Κέντρο (600,0) mm	0,3346
Αριστερά (600,-267) mm	0,3019
Μπροστά (300,0) mm	0,2682
Δεξιά (600,267) mm	0,3288
Μέσος Όρος	0,3235

Υπολογίζονται λοιπόν οι μέσοι όροι σε κάθε απόσταση από την εκτεθειμένη επιφάνεια και σχηματίζεται το διάγραμμα στο σχήμα 6.72.

Πίνακας 6.4 Μέσοι όροι των ρυθμών εξανθράκωσης.

Απόσταση από την εκτεθειμένη επιφάνεια	Ρυθμός εξανθράκωσης mm/min
10mm – Πείραμα C	0,3235
20mm – Πείραμα C	0,4272
30mm – Πείραμα C	0,5198
40mm – Πείραμα C	0,58
50mm – Πείραμα C	0,6371
60mm – Πείραμα C	0,6735
10mm – Πείραμα D	0,7642
20mm – Πείραμα D	0,6687
30mm – Πείραμα D	0,7597
40mm – Πείραμα D	0,7336
50mm – Πείραμα D	0,9142



Σχήμα 6.72 Διάγραμμα ρυθμού εξανθράκωσης για τα πειράματα C και D.

Στο πείραμα C οι ρυθμοί εξανθράκωσης ακολουθούν μια ανοδική πορεία, λογαριθμικής αύξησης, που μπορεί να αιτιολογηθεί με την καμπύλη ISO-834 η οποία είναι λογαριθμική καμπύλη. Οι ρυθμοί εξανθράκωσης του πειράματος D είναι αρκετά υψηλότεροι ενώ παράλληλα παρατηρούνται αυξομειώσεις ανά την απόσταση από την εκτεθειμένη επιφάνεια. Το φαινόμενο αυτό πιθανώς οφείλεται σε απότομες αποκολλήσεις εξανθρακωμάτων που προκαλούν ακαριαία αύξηση θερμοκρασιών στην νέα περιοχή που εκτίθεται στην φλόγα.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία διεκπεραιώθηκε πειραματική μελέτη χρήσης οροφής κατασκευασμένης από άκαυστο υλικό και από πάνελ σταυρωτής επικολλητής ξυλείας σε πυροδιαμέρισμα το οποίο υποβλήθηκε σε δύο καμπύλες φωτιάς. Σκοπός της πειραματικής μελέτης ήταν η παρουσίαση και η σύγκριση των ροϊκών και των θερμικών πεδίων που σχηματίστηκαν σε κάθε πείραμα.

Οι καμπύλες φωτιάς που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η καμπύλη, θερμοκρασίας-χρόνου, ISO-834 και μια καμπύλη Q-t, θερμικής ισχύος-χρόνου, η οποία, όπως έχει ήδη εξηγηθεί, προσομοιάζει την ISO-834 για την πειραματική διάταξη του εργαστηρίου με άκαυστα δομικά υλικά. Οι δοκιμές ήταν οχτώ, τρία πειράματα με την καμπύλη ISO-834 και άκαυστη οροφή διάρκειας μιας ώρας και τριάντα λεπτών, τρία με την καμπύλη Q-t και άκαυστη οροφή διάρκειας μιας ώρας και τριάντα λεπτών, ένα με την καμπύλη ISO-834 και οροφή από CLT διάρκειας μιας ώρας και τριάντα λεπτών και ένα πείραμα με την καμπύλη Q-t και οροφή από CLT διάρκειας μιας ώρας.

Κατά την παρούσα πειραματική μελέτη μετρήθηκαν:

- Θερμοκρασίες του αέριου μείγματος εντός του πυροδιαμερίσματος.
- Θερμοκρασίες του αέριου μείγματος στο άνοιγμα.
- Θερμοκρασίες του πίσω και του δεξιού ως προς την πρόσοψη τοιχώματος σε εκτεθειμένες στη φωτιά και μη εκτεθειμένες θέσεις.
- Θερμοκρασίες της οροφής.
- Ταχύτητες στο άνοιγμα.
- Θερμορροές στα δύο τοιχώματα.
- Συγκεντρώσεις των καυσαερίων CO, CO₂, O₂.

Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν 106 θερμοστοιχεία, 4 δικατευθυντικοί μετρητές ταχύτητας, 3 θερμορροόμετρα, 2 παροχόμετρα που ρύθμιζαν την παροχή του προπανίου και ένα παροχόμετρο το οποίο μετρούσε την παροχή όγκου στην απαγωγή των καυσαερίων προς τον αναλυτή καυσαερίων. Δύο σωλήνες Pitot-Static που χρησιμοποιήθηκαν αρχικά αφαιρέθηκαν λόγω λανθασμένων μετρήσεων. Με τις μετρήσεις των συγκεντρώσεων των καυσαερίων έγιναν υπολογισμοί για τον ρυθμό έκλυσης θερμότητας (HRR). Επιπλέον υπολογίσθηκε ο ρυθμός εξανθράκωσης των πάνελ CLT που χρησιμοποιήθηκαν ως οροφές.

Αξιολογώντας τα πειραματικά αποτελέσματα εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα.

Για τις θερμοκρασίες στο εσωτερικό του διαμερίσματος:

- Οι θερμοκρασίες στο αέριο περιβάλλον των πειραμάτων με άκαυστη οροφή ακολουθούν κατά κύριο λόγο μια τύπου λογαριθμική αύξηση που οφείλεται στην καμπύλη ISO-834.
- Οι θερμοκρασίες των πειραμάτων με οροφή από CLT παρουσίασαν πιο απρόβλεπτες αυξήσεις, καθώς η ίδια η καύση του CLT απελευθερώνει θερμότητα και ισχύ στην πυρκαγιά.

- Οι υψηλότερες θερμοκρασίες αέριου περιβάλλοντος εμφανίστηκαν στο πείραμα που ακολουθούσε την καμπύλη φωτιάς Q-t με οροφή από CLT.
- Το πείραμα που ακολουθούσε την ISO-834 με οροφή από CLT, εμφάνισε λίγο χαμηλότερες θερμοκρασίες στην εμπρόσθια μεριά του πυροδιαμερίσματος και μεγαλύτερες στην οπίσθια μεριά σε σχέση με τα πειράματα με άκαυστη οροφή.
- Οι θερμοκρασίες σε χαμηλότερα ύψη του πυροδιαμερίσματος είναι μικρότερες. Στα πειράματα με οροφή από CLT εμφανίζεται ο κίνδυνος αποκόλλησης του εξανθρακώματος το οποίο αυξάνει τις θερμοκρασίες στη βάση λόγω ακτινοβολίας.

Για τις θερμοκρασίες στο άνοιγμα του διαμερίσματος:

- Το ουδέτερο επίπεδο διαχωρίζει την είσοδο του αέρα περιβάλλοντος και την έξοδο των καυσαερίων. Οι θερμοκρασίες εισόδου είναι πάντα ψυχρότερες σε σχέση με τα θερμά καυσαέρια που εξέρχονται.
- Οι θερμοκρασίες στο άνοιγμα σε κάθε πείραμα αυξάνονται με τον χρόνο. Στα πειράματα με άκαυστη οροφή, η αύξηση είναι τύπου λογαριθμική ενώ στα πειράματα με οροφή από CLT οι μεταβολές είναι πιο απρόβλεπτες.
- Οι θερμοκρασίες εξόδου καυσαερίων στο ανώτερο μέρος του ανοίγματος είναι μικρότερες από αυτές λίγο χαμηλότερα. Οι μικρότερες ταχύτητες εξόδου οδηγούν σε μικρότερη μεταφορά θερμοκρασίας μέσω συναγωγής.
- Η ύπαρξη οροφής CLT οδήγησε σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες στο άνοιγμα, σε σχέση με την οροφή από άκαυστο υλικό, στα πειράματα που ακολουθούσαν την καμπύλη ISO-834
- Οι υψηλότερες θερμοκρασίες ανοίγματος εμφανίστηκαν στο πείραμα που ακολουθούσε την καμπύλη φωτιάς Q-t με οροφή από CLT.
- Αποκολλημένα εξανθρακώματα που ακτινοβολούν στη βάση του πυροδιαμερίσματος προκαλούν αύξηση θερμοκρασίας εισόδου του αέρα.

Για τις θερμοκρασίες στο δεξί ως προς την πρόσοψη τοίχωμα:

- Οι θερμοκρασίες στον δεξιό τοίχο στην εκτεθειμένη πλευρά σε κάθε πείραμα αυξάνονται με τον χρόνο. Στα πειράματα που ακολουθούν την καμπύλη ISO-834 η αύξηση είναι τύπου λογαριθμική ενώ στο πείραμα με οροφή από CLT και καμπύλη Q-t οι μεταβολές είναι πιο απρόβλεπτες.
- Στα πειράματα με άκαυστη οροφή, οι υψηλότερες θερμοκρασίες στην εκτεθειμένη πλευρά εμφανίστηκαν στην οπίσθια μεριά του τοιχώματος.
- Στα πειράματα με οροφή από CLT, οι υψηλότερες θερμοκρασίες στην εκτεθειμένη πλευρά εμφανίστηκαν στην μέση του τοιχώματος.
- Οι υψηλότερες θερμοκρασίες στην εκτεθειμένη πλευρά εμφανίστηκαν στο πείραμα που ακολουθούσε την καμπύλη φωτιάς Q-t με οροφή από CLT.
- Στην μη εκτεθειμένη πλευρά του τοιχώματος οι θερμοκρασίες είναι πολύ χαμηλότερες.

Για τις θερμοκρασίες στο οπίσθιο τοίχωμα:

- Οι θερμοκρασίες στον οπίσθιο τοίχο στην εκτεθειμένη πλευρά σε κάθε πείραμα αυξάνονται με τον χρόνο. Στα πειράματα που ακολουθούν την καμπύλη ISO-834 η αύξηση είναι τύπου λογαριθμική ενώ στο πείραμα με οροφή από CLT και καμπύλη Q-t οι μεταβολές είναι πιο απρόβλεπτες.
- Το πείραμα με οροφή από CLT υπό την καμπύλη ISO-834 παρουσιάζει μεγαλύτερες θερμοκρασίες από τα δύο πειράματα με άκαυστη οροφή που ακολουθούν και αυτά την καμπύλη ISO-834.
- Οι υψηλότερες θερμοκρασίες στην εκτεθειμένη πλευρά εμφανίστηκαν στο πείραμα που ακολουθούσε την καμπύλη φωτιάς Q-t με οροφή από CLT.
- Στην μη εκτεθειμένη πλευρά του τοιχώματος οι θερμοκρασίες είναι πολύ χαμηλότερες.

Για τις θερμορροές στα τοιχώματα:

- Οι θερμορροές σε κάθε πείραμα αυξάνονται με τον χρόνο.
- Τα πειράματα με άκαυστη οροφή παρουσιάζουν όμοιες θερμορροές στα τοιχώματα.
- Στον πλαϊνό τοίχωμα τα πειράματα με άκαυστη οροφή και το πείραμα με οροφή από CLT υπό την καμπύλη ISO-834 παρουσίαζαν όμοιες καμπύλες θερμορροής. Το πείραμα με οροφή από CLT υπό την καμπύλη Q-t παρουσίασε πολύ μεγαλύτερες τιμές με τελική τιμή διπλάσια των άλλων πειραμάτων.
- Στο οπίσθιο τοίχωμα τα πειράματα με άκαυστη οροφή εμφανίζουν όμοιες καμπύλες θερμορροής. Το πείραμα με οροφή από CLT υπό την καμπύλη ISO-834 παρουσιάζει μεγαλύτερες θερμορροές από τα δύο προηγούμενα ενώ το πείραμα με οροφή από CLT υπό την καμπύλη Q-t παρουσίασε τις μεγαλύτερες τιμές με τελική τιμή μεγαλύτερη από τη διπλάσια των άλλων πειραμάτων.
- Οι μεγαλύτερες θερμορροές στα πειράματα με οροφές από CLT εμφανίστηκαν στον χαμηλότερα τοποθετημένο μετρητή.

Για τις θερμοκρασίες στην οροφή:

- Οι καμπύλες θερμοκρασιών της οροφής στα δύο πειράματα με άκαυστη οροφή είναι πανομοιότυπες, με αύξηση λογαριθμικού τύπου.
- Στα πειράματα με οροφή από CLT η θερμοκρασία οροφής αυξάνεται με τον χρόνο ενώ το CLT υποβάλλεται στα στάδια της καύσης στερεών καυσίμων.
- Ξεπερνώντας τους 600°C πλέον η καύση έχει σταματήσει και μετριέται θερμοκρασία αέριου μείγματος.
- Η αποκόλληση εξανθρακώματος εκθέτει CLT που δεν έχει καεί στη φλόγα, αυξάνοντας ραγδαία τις θερμοκρασίες στο σημείο που συνέβη.
- Το πείραμα που ακολουθούσε την ISO-834, εμφάνισε χαμηλότερες θερμοκρασίες στην οροφή CLT από το πείραμα που ακολουθούσε την καμπύλη φωτιάς Q-t. Και στα δύο πειράματα οι θερμοκρασίες στην οροφή ήταν αρκετά μεγαλύτερες από τα πειράματα με άκαυστη οροφή.

Για τις ταχύτητες στο άνοιγμα:

- Οι τιμές των ταχυτήτων αυξάνονται κατά απόλυτη τιμή κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, καθώς αυξάνεται η ισχύς της καμπύλης φωτιάς.
- Οπτικοποιείται η πτώση του ουδέτερου επιπέδου καυσαερίων που διαχωρίζει την είσοδο ψυχρού αέρα και την έξοδο θερμών καυσαερίων.
- Οι τιμές στο ανώτερο σημείο μέτρησης σε όλα τα πειράματα παρουσιάζουν υψηλή ανομοιομορφία.
- Η τελική θέση του ουδέτερου επιπέδου στα πειράματα με άκαυστη οροφή παρατηρείται στα 0,2m ενώ στα πειράματα με CLT παρατηρείται πιο ψηλά στα 0,3m και 0,28m.

Για τον ρυθμό έκλυσης θερμότητας των πειραμάτων:

- Οι ρυθμοί έκλυσης θερμότητας στα πειράματα με άκαυστη οροφή είναι πανομοιότυποι καθώς ισούνται μόνο με την ισχύ του παρεχόμενου καυσίμου.
- Στο πείραμα με οροφή CLT που ακολουθεί την καμπύλη ISO-834, οι τιμές του ρυθμού έκλυσης θερμότητας είναι υψηλότερες από των πειραμάτων με άκαυστη οροφή λόγω της συνεισφοράς του CLT.
- Το πείραμα με οροφή CLT που δεν περιορίζεται από τον έλεγχο θερμοκρασίας παρουσιάζει αρκετά μεγαλύτερες τιμές ρυθμού έκλυσης θερμότητας.

Για την παροχή όγκου του καυσίμου:

- Στο πείραμα με οροφή CLT που ακολουθεί την καμπύλη ISO-834, η παροχή του καυσίμου περιορίζεται ώστε να μην ξεπεραστούν οι θερμοκρασίες από τις θερμοκρασίες της καμπύλης ISO-834. Το φαινόμενο αυτό περιορίζει και τον ρυθμό έκλυσης θερμότητας στο πείραμα αυτό.

Για τον ρυθμό εξανθράκωσης του CLT:

- Στο πείραμα με οροφή από CLT που ακολουθεί την καμπύλη ISO-834 παρατηρείται πως η αύξηση των τιμών του ρυθμού εξανθράκωσης εμφανίζει λογαριθμική μορφή.
- Αντίθετα στο πείραμα που ακολουθείται η καμπύλη παροχής χρόνου οι αυξομειώσεις του ρυθμού εξανθράκωσης είναι απρόβλεπτες. Οι τιμές είναι μεγαλύτερες από του πειράματος που ακολουθεί την ISO-834.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

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

Ariyanayagam, Anthony & Mahendran, Mahen (2013) Fire safety of buildings based on realistic fire time-temperature curves. In Manley, K, Hampson, K, & Kajewski, S (Eds.) *Proceedings of the 19th International CIB World Building Congress, Brisbane 2013: Construction and Society*. Queensland University of Technology, Australia, pp. 1-13.

Barber, D., Dixon, R., Rackauskaite, E. & Looi, K. (2021) A method for determining time equivalence for compartments with exposed mass timber, using iterative parametric curves, in: *Proceedings of WCTE 2021 World Conference on Timber Engineering*, 24–27 August, Santiago, Chile.

Brandon, D., & Dagenais, C. (2017). Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings – Phase 2: Task 5 – Experimental Study of Delamination of Cross Laminated Timber (CLT) in Fire. Retrieved from <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-59256>.

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

Buchanan, A., & Östman, B. (Eds.). (2022). *Fire Safe Use of Wood in Buildings: Global Design Guide* (1st ed.). CRC Press.

Carmen Gorska, Juan P. Hidalgo, Jose L. Torero, Fire dynamics in mass timber compartments, *Fire Safety Journal*, Volume 120, 2021, 103098, ISSN 0379-7112, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103098>.

Dieck R., Measurement uncertainty models, *ISA transactions*, vol 36. No. 1, pp. 29-35, 1997.

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.

Harmathy T. Z. and Mehaffey J. R., Post-flashover Compartment Fires. *Fire and Materials*, Volume 7, No.2, pp 49-61, 1983.

Hopkin, D.; Wegrzynski, W.; Spearpoint, M.; Fu, I.; Krenn, H.; Sleik, T.; Gorska, C.; Stapf, G. Large-Scale Enclosure Fire Experiments Adopting CLT Slabs with Different Types of Polyurethane Adhesives: Genesis and Preliminary Findings. *Fire* 2022, 5, 39. <https://doi.org/10.3390/fire5020039>.

<http://fire.fsv.cvut.cz/ASFE09/Posters/Th3-4.pdf>

<https://www.castlegarnews.com/news/space-heaters-likely-cause-of-fatal-house-fire-on-vancouver-island-4708244>

<https://www.enr.com/articles/42484-what-local-officials-want-to-do-about-wood-frame-building-fires-in-massachusetts>

<https://www.reidmiddleton.com/reidourblog/timber-construction-using-clt/>

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

Hurley M.J., Gottuk D.T., Hall Jr., J.R., Harada K., Kuligowski E.D., Puchovsky M., Torero J.L., Watts Jr. J.M., Wieczorek C.J., "SFPE Handbook of fire protection engineering", 5th Ed., SFPE, Quincy, Massachusetts, U.S.A., 2016.

Ian Pope, Vinny Gupta, Hangyu Xu, Felix Wiesner, David Lange, José L. Torero, Juan P. Hidalgo, Fully-developed compartment fire dynamics in large-scale mass timber compartments, *Fire Safety Journal*, Volume 141, 2023, 104022, ISSN 0379-7112, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.104022>.

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.

ISO 9705, "International Organization for Standardization, ISO 9705 Fire Tests: Full-Scale Room Test for Surface Products", 1st Edition, Geneva, Switzerland, 1993.

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

J.W.G. Van De Kuilen, A. Ceccotti, Zhouyan Xia, Minjuan He, Very Tall Wooden Buildings with Cross Laminated Timber, *Procedia Engineering*, Volume 14, 2011, Pages 1621-1628, ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.204>.

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

Kimo Debimo, Air flow measuring blades, technical data sheet.

Kotsovinos P, Christensen EG, Rackauskaite E, et al. Impact of ventilation on the fire dynamics of an open-plan compartment with exposed timber ceiling and columns: *CodeRed #02. Fire and Materials*. 2023; 47(4): 569-596. doi:10.1002/fam.3082.

Kotsovinos P, Rackauskaite E, Christensen E, et al. Fire dynamics inside a large and open-plan compartment with exposed timber ceiling and columns: *CodeRed #01. Fire and Materials*. 2023; 47(4): 542-568. doi:10.1002/fam.3049.

Law, A. & Hadden, R. (2020) We need to talk about timber: Fire safety design in tall buildings. *Structural Engineers*, 9–15.

Li X, McGregor C, Medina Hevia AR, et al. Real-scale fire tests on timber constructions. In: *Presented at the WCTE 2016*, Vienna, 22–25 August 2016.

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

McGregor CJ. Contribution of cross-laminated timber panels to room fires. Master's Thesis, Carleton University, Ottawa, ON, Canada, 2013.

McNamee R, Zehfuss J, Bartlett AI, Heidari M, Robert F, Bisby LA. Enclosure fire dynamics with a cross-laminated timber ceiling. *Fire and Materials*. 2021; 45: 847–857. <https://doi.org/10.1002/fam.2904>.

Medina Hevia AR. Fire resistance of partially protected cross-laminated timber rooms. *Master's Thesis, Carleton University, Ottawa, ON, Canada*, 2014.

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.

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.

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

Richard Emberley, Carmen Gorska Putynska, Aaron Bolanos, Andrea Lucherini, Angela Solarte, Diana Soriguer, Mateo Gutierrez Gonzalez, Kathryn Humphreys, Juan P. Hidalgo, Cristian Maluk, Angus Law, Jose L. Torero, Description of small and large-scale cross laminated timber fire tests, *Fire Safety Journal*, Volume 91, 2017, Pages 327-335, ISSN 0379-7112, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.024>.

Rory M. Hadden, Alastair I. Bartlett, Juan P. Hidalgo, Simón Santamaria, Felix Wiesner, Luke A. Bisby, Susan Deeny, Barbara Lane, Effects of exposed cross laminated timber on compartment fire dynamics, Fire Safety Journal, Volume 91, 2017, Pages 480-489, ISSN 0379-7112, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.074>.

Roy Crielaard, Jan-Willem van de Kuilen, Karel Terwel, Geert Ravenshorst, Pascal Steenbakkens, Self-extinguishment of cross-laminated timber, Fire Safety Journal, Volume 105, 2019, Pages 244-260, ISSN 0379-7112, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.01.008>.

Sam Nothard, David Lange, Juan P. Hidalgo, Vinny Gupta, Martyn S. McLaggan, Felix Wiesner, Jose L. Torero, Factors influencing the fire dynamics in open-plan compartments with an exposed timber ceiling, Fire Safety Journal, Volume 129, 2022, 103564, ISSN 0379-7112, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2022.103564>.

Sensenig D.L., An Oxygen Consumption Technique for Determining the Contribution of Interior Wall Finishes to Room Fires 13, Department of Commerce, National Bureau of Standards (1980)

Swedish Wood, "The CLT Handbook, CLT structures – design and detailing", UK EDITION 1:2022, Confederation of Timber Industries.

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

White, R. (2016) Analytical methods for determining fire resistance of timber members, in: Hurley, M.J. (Ed.), SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Springer, New York, 1979–2011.

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.

Κολαΐτης Δ., Διαφάνειες μαθήματος «Αρχές Πυρομηχανικής» , Εργαστήριο ετερογενών μειγμάτων και συστημάτων καύσης, Σχολή μηχανολόγων μηχανικών, Εθνικό μετσόβιο πολυτεχνείο.

Κολαΐτης Δ., Φούντη Μ., Θεωρία Καύσης, Εκδόσεις Fountas, (2014).

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