

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

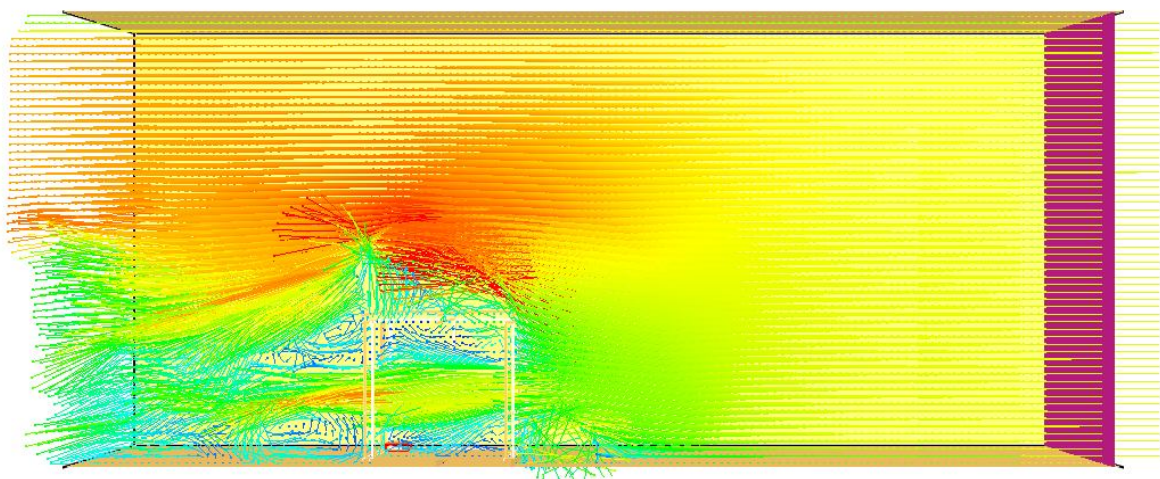


ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ
ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: Κα. Μ. ΦΟΥΝΤΗ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ
ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΕΞΑΝΑΓΚΑΣΜΕΝΟΥ
ΑΕΡΙΣΜΟΥ

ΣΥΓΓΕΛΑΚΗΣ ΜΑΝΟΥΣΟΣ



ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2013

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την καθηγήτριά μου, κυρία Μαρία Φούντη για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας. Την υποψήφια διδάκτορα Ελένη-Μαρίνα Ασημακοπούλου για την καθοδήγησή της, τις γόνιμες διορθώσεις της και την αμέριστη συμπαράστασή της κατά τη διάρκεια εκπόνησης του θέματος της εργασίας μου. Τον κύριο Διονύση Κολαίτη, μετα-διδακτορικό συνεργάτη, για τη βοήθειά του στις διαδικασίες της υπολογιστικής προσομοίωσης, αλλά και το συνάδελφο Γιώργο Σπέντζο για τις χρήσιμες συμβουλές του κατά τη συγγραφή της εργασίας αυτής. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω όλους τους συναδέλφους στο εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης για την βοήθειά τους αλλά και το ευχάριστο κλίμα που επικρατεί στον χώρο εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα αγαπημένα μου πρόσωπα που με στήριξαν και συνεχίζουν να με στηρίζουν όλα αυτά τα χρόνια.

Πρόλογος

Στην παρούσα διπλωματική μελετάται η ανάπτυξη και εξάπλωση της φωτιάς σε διαμέρισμα υπό συνθήκες εξαναγκασμένου αερισμού. Τα φαινόμενα στα οποία δίνεται έμφαση αφορούν τα χαρακτηριστικά της φωτιάς και τον τρόπο εξάπλωσης της μέσα κι έξω από το χώρο του διαμερίσματος για διαφορετικές ταχύτητες εξωτερικού ανέμου και διαφορετική θέση της εστίας. Για την υπολογιστική προσομοίωση του φαινομένου χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας υπολογιστικής ρευστομηχανικής, Fire Dynamics Simulator, FDS κι οι πειραματικές μετρήσεις των (Huang et al., 2008) σε ένα μοντέλο δωματίου υπό-κλίμακα.

Αρχικά, στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά σε κάποια γενικά χαρακτηριστικά της φωτιάς, ενώ παράλληλα παρουσιάζονται και οι πιο διαδεδομένες εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού των μορφολογικών χαρακτηριστικών τους. Δίνονται πληροφορίες για τις δεξαμενές φωτιάς (κηλίδες) υγρών καυσίμων και αναλύονται τα στάδια ανάπτυξης της φωτιάς σε εσωτερικούς χώρους. Ακόμα, αναλύονται τα χαρακτηριστικά ανάπτυξης φωτιάς σε διαμερίσματα σε περιπτώσεις όπου η ανάπτυξη του φαινομένου εξαρτάται από την διαθεσιμότητα σε καύσιμο ή από τις συνθήκες αερισμού του χώρου.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση η οποία εστιάζει σε τρεις βασικούς άξονες: πειράματα φωτιάς σε διαμερίσματα, πειράματα φωτιάς σε περιπτώσεις εξάπλωσης φωτιάς κατά την πρόσοψη κτιρίων και πειράματα φωτιάς σε αεροσήραγγες. Στα πλαίσια της σύντομης βιβλιογραφικής αναφοράς επιχειρείται η ανάδειξη της έρευνας που έχει διεξαχθεί τα τελευταία χρόνια με βασικό αντικείμενο την πυρκαγιά σε εσωτερικούς χώρους κι απώτερο σκοπό τη βελτιστοποίηση των συστημάτων πυρασφάλειας και πυρανίχνευσης.

Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται μία ανασκόπηση της μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκε για προσομοιώσεις φωτιάς και για ροές χαμηλών ταχυτήτων που οφείλονται στην ύπαρξη θερμότητας. Παρουσιάζεται αναλυτικά ο κώδικας υπολογιστικής ρευστομηχανικής FDS κι οι εξισώσεις που επιλύονται σε αυτόν. Περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά λειτουργίας του κώδικα καθώς και τα διάφορα μοντέλα που χρησιμοποιούνται.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, περιγράφεται το κυρίως αντικείμενο της μελέτης που πραγματοποιήθηκε, το οποίο αφορά την προσομοίωση φωτιάς ελεγχόμενης από τις συνθήκες αερισμού σε μοντέλο υπό-κλίμακα. Παρουσιάζεται το ροϊκό και θερμοκρασιακό πεδίο για το εσωτερικό του διαμερίσματος και για το πλούμιο της φωτιάς που εξέρχεται από αυτό ενώ ταυτόχρονα συγκρίνονται οι προλέξεις της θερμοκρασίας με διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα. Από αυτήν τη σύγκριση εξάγονται σημαντικά συμπεράσματα για την επίδραση της θέσης της εστίας και της έντασης του ανέμου στην ανάπτυξη φωτιάς σε κλειστούς χώρους υπό συνθήκες εξαναγκασμένου αερισμού.

Περιεχόμενα

1. Κηλίδες φωτιάς και συνθήκες εξαερισμού	1
1.1 Εκτίμηση των χαρακτηριστικών της καύσης μίας κηλίδας φωτιάς υγρού καυσίμου	1
1.1.1 Τρόπος μέτρησης του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (ΡΕΘ) και εμπειρικοί τύποι	1
1.1.2 Θερμογόνος δύναμη	5
1.1.3 Ρυθμός απώλειας μάζας καυσίμου	5
1.1.4 Χαρακτηριστικά μίας κηλίδας υγρού καυσίμου	7
1.1.4.1 Μέγεθος κηλίδας ή δεξαμενής	7
1.1.4.2 Επίδραση των διαστάσεων της κηλίδας	7
1.1.5 Διάρκεια της καύσης	8
1.1.6 Ύψος της φλόγας	8
1.1.6.1 Ύψος της φλόγας	8
1.1.6.2 Φυσική-χημεία της καύσης	8
1.1.6.3 Θερμοκρασία	9
1.1.6.4 Εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού του ύψους	10
1.2 Ανάφλεξη υγρών	13
1.2.1 Εισαγωγή	13
1.2.2 Υγρά και στερεά καύσιμα	13
1.2.3 Διάδοση της φλόγας σε υγρό καύσιμο	15
1.2.4 Ανάφλεξη των υγρών καυσίμων με χαμηλό σημείο ανάφλεξης	15
1.2.5 Ανάφλεξη των υγρών καυσίμων με υψηλό σημείο ανάφλεξης	15
1.3 Φωτιές σε διαμερίσματα	17
1.3.1 Πλούμιο φωτιάς	17
1.3.2 Θερμοκρασίες σε φωτιές σε ανοιχτό χώρο	19
1.3.3 Θερμοκρασίες σε φωτιές μέσα σε δωμάτια	19
1.3.4 Φάσεις της φωτιάς σε διαμερίσματα	20
1.3.4.1 Η περίοδος ανάπτυξης της φλόγας και ο ορισμός της καθολικής ανάφλεξης	21

1.3.4.2 Χαρακτηριστικά της καθολικής ανάφλεξης	22
1.3.4.3 Μετά την καθολική ανάφλεξη της φωτιάς σε διαμέρισμα	23
1.4 Δυναμική των ρευστών - Γενικό πρότυπο ροής μέσα σε διαμέρισμα	24
1.5 Φωτιές ελεγχόμενες από τις συνθήκες αερισμού ή από το καύσιμο	25
1.5.1 Εξαναγκασμένες συνθήκες αερισμού	25
1.5.2 Συμπεριφορά φωτιάς ελεγχόμενη από τις συνθήκες αερισμού	28
1.5.3 Συμπεριφορά φωτιάς ελεγχόμενη από τη διαθεσιμότητα καυσίμου και από τις συνθήκες αερισμού κατά την περίοδο πλήρους ανάπτυξης της φλόγας	28
2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση για πειράματα φωτιάς σε διαμερίσματα	30
2.1 Φωτιές σε κτίρια	30
2.2 Πειράματα φωτιάς σε διαμερίσματα	31
2.3 Πειράματα φωτιάς σχετικά με την εξωτερική πρόσοψη των κτιρίων	36
2.4 Πειράματα φωτιάς σε αεροσήραγγες	38
3. Κώδικας Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής FDS	42
3.1 Υπολογιστική προσομοίωση φωτιάς σε εσωτερικούς χώρους	42
3.2 Ο κώδικας FDS	43
3.2.1 Δεδομένα εισόδου και εξόδου	43
3.3 Το πρόγραμμα Smokeview	45
3.4 Θεμελιώδεις εξισώσεις διατήρησης	45
3.5 Περιγραφή των βασικών χαρακτηριστικών της λειτουργίας του FDS	47
3.5.1 Μοντέλο τύρβης	47
3.5.1.1 Μέθοδος άμεσης υπολογιστικής προσομοίωσης (Direct Numerical Simulation-DNS)	47
3.5.1.2 Μέθοδος Προσομοίωσης Μεγάλων Δινών (Large Eddy Simulation-LES)	48
3.5.2 Μοντέλο καύσης	49
3.5.3 Μεταφορά θερμότητας λόγω ακτινοβολίας	50
3.5.4 Μοντέλο στερεάς φάσης	50
3.5.4.1 Εξισώσεις για το μοντέλο πυρόλυσης στερεών υλικών	51
3.5.4.2 Η εξίσωση αγωγής θερμότητας στο στερεό	51

3.5.4.3	Θερμικές ιδιότητες δομικών υλικών	53
3.5.5	Μοντέλο πυρόλυσης	52
3.5.5.1	Προκαθορισμένος ρυθμός έκλυσης θερμότητας	52
3.5.5.2	Στερεά καύσιμα	52
3.5.5.3	Ροή θερμότητας στο στερεό λόγω ακτινοβολίας	54
3.5.5.4	Υγρά καύσιμα	55
3.6	Ρυθμός αντίδρασης	57
3.7	Διαδικασία επίλυσης	58
4.	Υπολογιστική προσομοίωση	60
4.1	Εισαγωγή	60
4.2	Παρουσίαση του πειράματος	60
4.2.1	Περιγραφή της γεωμετρίας του πειράματος	60
4.2.2	Ορισμός των θερμικών ιδιοτήτων στερεών υλικών στον κώδικα FDS	61
4.2.3	Εισαγωγή του καυσίμου στον κώδικα FDS	64
4.2.3.1	Ύψος κηλίδας καυσίμου	64
4.2.3.2	Χαρακτηριστικά καυσίμου	64
4.2.4	Αρχικές συνθήκες	65
4.2.5	Εφαρμογή οριακών συνθηκών	66
4.2.6	Περιγραφή του μοντέλου καύσης που επιλέχτηκε για την προσομοίωση	66
4.2.7	Ορισμός των συσκευών μέτρησης στον FDS	69
4.3	Υπολογιστικό πλέγμα	69
4.3.1	Παράλληλη επεξεργασία του κώδικα FDS με πρωτόκολλο MPI (Message Passing Interface)	70
4.3.2	Κριτήριο [McGrattan et al., 2002]	70
4.4	Περιγραφή της πειραματικής διάταξης	73
4.5	Πειραματικές περιπτώσεις	78
4.6	Πειραματικά αποτελέσματα και προλέξεις της θερμοκρασίας	80
4.6.1	Στατιστική ανάλυση	80

4.6.1.1 Ποσοτική μέθοδος αξιολόγησης μοντέλων υπολογιστικής ρευστομηχανικής	80
4.6.1.2 Επιλογή πλέγματος	81
4.6.2 Αποτελέσματα υπολογιστικής προσομοίωσης για το εσωτερικό του μοντέλου	85
4.6.2.1 Θερμοκρασιακό πεδίο στο εσωτερικό του διαμερίσματος	85
4.6.2.2 Απεικόνιση του ροϊκού πεδίου	91
4.6.2.3 Χρονικές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του αέρα στο εσωτερικό του μοντέλου	97
4.6.2.4 Συμπεράσματα για τη σύγκριση πειραματικών τιμών και προλέξεων της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του διαμερίσματος	113
4.6.2.5 Χρονικές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας των τοίχων στο διαμέρισμα	114
4.6.2.6 Συμπεράσματα για τη σύγκριση πειραματικών τιμών και των προλέξεων της θερμοκρασίας στους τοίχους του διαμερίσματος	131
4.6.2.7 Μέγιστη κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα μέσα στο διαμέρισμα	132
4.6.2.8 Συμπεράσματα για τη σύγκριση πειραματικών τιμών και προλέξεων κατακόρυφης κατανομής της θερμοκρασίας του αέρα στο εσωτερικό του μοντέλου	136
4.6.3 Αποτελέσματα υπολογιστικής προσομοίωσης για την εξωτερική φλόγα	137
4.6.3.1 Μελέτη της εξωτερικής φλόγας	137
4.6.3.2 Θερμοκρασιακό πεδίο της εξωτερικής φλόγας	142
4.6.3.3 Μέση θερμοκρασία εξωτερικής φλόγας κατά την περίοδο πλήρους ανάπτυξης	142
4.6.3.4 Συμπεράσματα για τη σύγκριση πειραματικών τιμών και προλέξεων της μέσης θερμοκρασίας της εξωτερικής φλόγας κατά τη διάρκεια της περιόδου πλήρους ανάπτυξης	149
4.6.3.5 Αδιάστατη θερμοκρασία στον κεντρικό άξονα του πλουμίου της φωτιάς εκτός του Διαμερίσματος	150
4.6.3.6 Συμπεράσματα για την αδιάστατη θερμοκρασία στον άξονα της εξωτερικής φλόγας	154
5. Γενικά συμπεράσματα της υπολογιστικής μελέτης	155

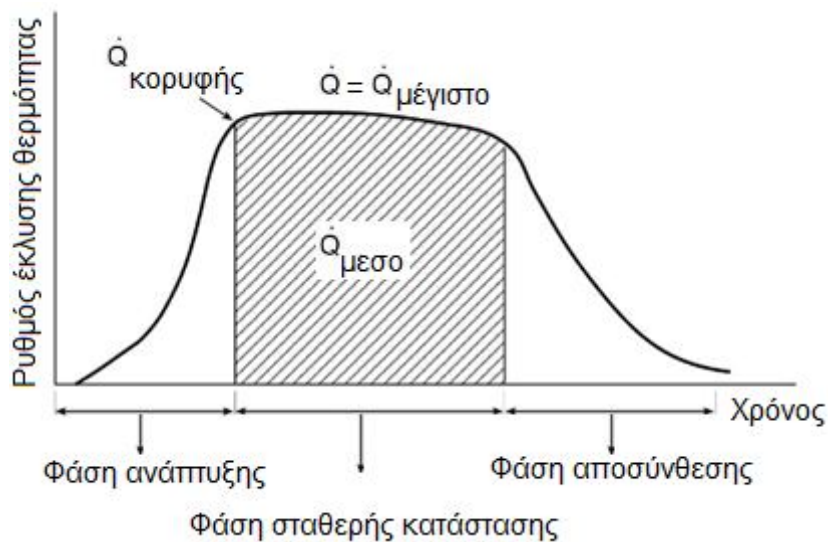
Κεφάλαιο 1^ο

Κηλίδες φωτιάς και συνθήκες αερισμού

1.1 Εκτίμηση των χαρακτηριστικών της καύσης σε κηλίδα φωτιάς υγρού καυσίμου

1.1.1 Τρόπος μέτρησης του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (PEΘ) και εμπειρικοί τύποι

Απαραίτητες συνιστώσες για τη μίας φωτιάς είναι η ύπαρξη καύσιμης ύλης, αέρα (O_2) και θερμότητας. Κατά την εξέλιξη της εκλύεται πάντα θερμότητα, φως ή/και φλόγα και καπνός. Ειδικότερα, ένα μέγεθος που χαρακτηρίζει την ανάπτυξη της φωτιάς είναι ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας (PEΘ) (ή αλλιώς ρυθμός καύσης). Η σχέση του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (PEΘ) (\dot{Q}) και του χρόνου για ένα σενάριο φωτιάς της καμπύλης ανάπτυξης της φωτιάς (Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1 Καμπύλη ανάπτυξης της φωτιάς (Iqbal et al., 2003).

Μπορούμε να σκεφθούμε τον ρυθμό έκλυσης θερμότητας ως τη “δύναμη” της φωτιάς. Σε μία μελέτη πυρασφάλειας είναι επιθυμητό να προσεγγίζονται οι ρυθμοί καύσης με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια. Για παράδειγμα οι αναλύσεις, που σχετίζονται με το στάδιο της “μετά την ανάφλεξη” περιόδου, βασίζονται συχνά στον προσδιορισμό της διάρκειας της φωτιάς, που με την σειρά της εξαρτάται από το φορτίο καυσίμου (εύφλεκτο φορτίο ανά μονάδα επιφάνειας). Ο PEΘ δεν είναι μια θεμελιώδης ιδιότητα του καυσίμου και για αυτό δεν μπορεί να θεωρείται ως μια από τις θερμικές ιδιότητες υλικών. Συνήθως, εκτιμάται βάση πειραματικών μετρήσεων. Ο πίνακας 1.1 περιέχει μία λίστα με τιμές του PEΘ από την καύση χαρακτηριστικών καυσίμων.

Καύσιμο	Ρυθμός έκλυσης θερμότητας (kW)
Τσιγάρο που καίγεται	$5 \cdot 10^{-3}$
Απλή λάμπα φωτός	0,06
Κερί που καίγεται	0,08
Άνθρωπος που ασκείται	0,1
Κάδος με χαρτιά	100
Καύση 1 m ² κηλίδα με βενζίνη	$2,5 \cdot 10^3$
Καύση ξύλινων παλετών στοιβαγμένες σε ύψος 3 m	$7 \cdot 10^3$
Καύση δοχείων πολυστερίνης σε 2 m ² χαρτοκιβωτίων ύψους 4,9 m	$40 \cdot 10^3$

Πίνακας 1.1 Μέτρηση του ΡΕΘ που παράγεται από διάφορες πηγές (Iqbal et al., 2003)

Η πιο συνηθισμένη μέθοδος για τη μέτρηση του ΡΕΘ είναι γνωστή ως “θερμιδομετρία κατανάλωσης”, η οποία επιτυγχάνεται μέσω ειδικών μετρητικών διατάξεων (Σχήμα 1.2). Η βάση αυτής της μεθόδου είναι ότι τα πιο πολλά αέρια, υγρά και στερεά, απελευθερώνουν ένα σταθερό ποσό ενέργειας ανά μονάδα μάζας καυσίμου που καταναλώνεται. Για τα περισσότερα καύσιμα υδρογονανθράκων, το ποσό αυτό εκτιμάται περίπου στα 13.100 kJ/kg και θεωρείται ότι είναι ακριβές με ένα σφάλμα $\pm 5\%$. Μετά την ανάφλεξη, όλα τα εύφλεκτα προϊόντα μετακινούνται μέσω ενός αγωγού εξαγωγής, στον οποίο μετράται η ροή και η περιεκτικότητα η ποσότητα του οξυγόνου που έχει χρησιμοποιηθεί για την καύση των πτητικών προϊόντων της καύσης του καυσίμου. Με αυτόν τον τρόπο, ο ΡΕΘ μπορεί και υπολογίζεται μέσω της σχέσης που υπάρχει ανάμεσα στο οξυγόνο που καταναλώνεται και στην ενέργεια που απελευθερώνεται.



Σχήμα 1.2 Όργανο μέτρησης του ρυθμού έκλυσης θερμότητας - Διάταξη Θερμιδόμετρου τύπου Κώνου.

Ένας άλλος τρόπος εκτίμησης του ΡΕΘ είναι η μέτρηση του ρυθμού καύσης, έχοντας ως δεδομένο το ρυθμό απώλειας μάζας. Σε αυτήν την περίπτωση, χρησιμοποιούνται συσκευές ζύγισης ή δυναμοκυψέλες για τη ζύγιση του πυροφορτίου κατά την καύση του. Ο υπολογισμός του ΡΕΘ, ο

οποίος είναι βασισμένος στο ρυθμό απώλειας μάζας, απαιτεί γνώση της θερμότητας καύσης του εκάστοτε καυσίμου που καίγεται.

Ο ΡΕΘ υπολογίζεται από τη σχέση (1.1):

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

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

\dot{m} = ρυθμός απώλειας μάζας (kg/sec)

ΔH_c = θερμότητα καύσης (kJ/kg)

Οι μέσοι ρυθμοί καύσης για πολλά υλικά υπολογίζονται πειραματικά μέσω ελεύθερων δοκιμών καύσης (Σχήμα 1.3) και εκφράζονται ανά οριζόντια καιάμενη περιοχή, kg/m². Αν η οριζόντια καιάμενη περιοχή του καυσίμου και η θερμότητα καύσης του καυσίμου είναι γνωστές, η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφεί και ως:

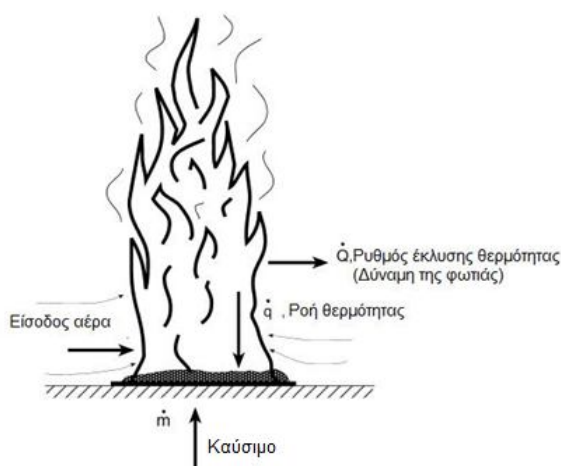
$$\dot{Q} = \dot{m}'' \cdot \Delta H_{c,eff} \cdot A_f \cdot (1 - e^{-k\beta D}) \quad (1.2)$$

Όπου: \dot{m}'' = ρυθμός απώλειας μάζας ανά μονάδα χρόνου (kg/m²-sec)

A_f = οριζόντια καιάμενη περιοχή (m²)

$k\beta$ = εμπειρική σταθερά (m⁻¹) (βλ. πίνακα 1.2)

D = διάμετρος της καιάμενης περιοχής (m), (Iqbal et al., 2003).



Σχήμα 1.3 Χαρακτηριστικά της δυναμικής μίας κηλίδας φωτιάς (Iqbal et al., 2003)

Ο μέσος όρος του ρυθμού καύσης ανά περιοχή και ανά μονάδα χρόνου της θερμότητας καύσης, η θερμότητα καύσης, η εμπειρική σταθερά k_b και οι αντίστοιχες πυκνότητες διαφόρων στερεών και υγρών παρουσιάζονται επιγραμματικά στον πίνακα 1.2.

Υλικό	Ρυθμός απώλειας καυσίμου (kg/m ² -sec)	Θερμότητα καύσης (kJ/kg)	Πυκνότητα (kg/m ³)	Εμπειρική σταθερά (m ⁻¹)
Αλκοόλες				
Μεθανόλη (CH ₃ OH)	0,017	20.000	796	100**
Αιθανόλη (C ₂ H ₅ OH)	0,015	26.800	794	100**
Απλά οργανικά καύσιμα				
Βουτάνιο (C ₄ H ₁₀)	0,078	45.700	573	2,7
Βενζίνη (C ₆ H ₆)	0,085	40.100	874	2,7
Εξάνιο (C ₆ H ₁₄)	0,074	44.700	650	1,9
Επτάνιο (C ₇ H ₁₆)	0,101	44.600	675	1,1
Ξυλένιο (C ₈ H ₁₀)	0,090	40.800	870	1,4
Ακετόνη (C ₃ H ₅ O)	0,041	25.800	791	1,9
Διοξάνιο (C ₄ H ₈ O)	0,018	26.200	1.035	5,4
Διαιθυλικός αιθέρας (C ₄ H ₁₀ O)	0,085	34.200	714	0,7
Προϊόντα πετρελαίου				
Benzine	0,048	44.700	740	3,6
Gasoline	0,055	43.700	740	2,1
Κηροζίνη	0,039	43.200	820	3,5
JP-4	0,051	43.500	760	3,6
JP-5	0,054	43.000	810	1,6
Έλαιο για μετασχηματιστές, υδρογονάνθρακες	0,039	46.400	760	0,7
Έλαιο καυσίμου (fuel oil),	0,035	39.700	940-1.000	1,7
Αργό πετρέλαιο (crude oil)	0,022-0,045	42.500	830-880	2,8
Στερεά				
Πολυμεθυλομεθακρυλικό (polymethylmethacrylate) (C ₅ H ₈ O ₂)	0,020	24.900	1.184	3,3
Πολυπροπυλένιο (C ₃ H ₆) _n	0,018	43.200	905	100**
Πολυστυρόλιο (polystyrene) (C ₈ H ₈) _n	0,034	39.700	1.050	100**

Πίνακας 1.2 Ιδιότητες καυσίμων κοινά χρησιμοποιούμενων σε μεγάλες κηλίδες φωτιάς (Iqbal et al., 2003).

1.1.2 Θερμογόνος δύναμη

Η θερμογόνος δύναμη ή ικανότητα ενός καυσίμου είναι η ενέργεια που εκλύεται κατά την πλήρη και τέλεια καύση του με το οξυγόνο, με τα προϊόντα και τα αντιδρώντα να βρίσκονται στους 25°C. Εκφράζεται σε μονάδες ενέργειας ανά μονάδα μάζας καυσίμου (KJ/kg, Kcal/kg, BTU/lb). Η θερμογόνος δύναμη διακρίνεται σε ανώτερη (HHV - Higher Heating Value), όταν στα προϊόντα καύσης το νερό βρίσκεται σε υγρή κατάσταση και κατώτερη (LHV - Lower Heating Value), όταν στα προϊόντα καύσης το νερό βρίσκεται σε αέρια κατάσταση (υδρατμός). Η θερμότητα που απελευθερώνεται σε μία χημική αντίδραση μπορεί να μετρηθεί πειραματικά με τη χρήση ενός αδιαβατικού θερμιδόμετρου τύπου οβίδας οξυγόνου. Θα πρέπει η αντίδραση να πραγματοποιηθεί χωρίς να γίνονται παράπλευρες αντιδράσεις και επαρκώς γρήγορα έτσι ώστε η ανταλλαγή θερμότητας με τα τοιχώματα να είναι αμελητέα. Να σημειωθεί ότι η θερμογόνος δύναμη που προσδιορίζεται με αυτόν τον τρόπο αντιστοιχεί στην ανώτερη θερμογόνος δύναμη. Για υπολογισμούς εκτίμησης του ρυθμού έκλυσης θερμότητας σε συνθήκες φωτιάς χρησιμοποιείται η ανώτερη θερμογόνος δύναμη.

Η θερμογόνος δύναμη αναφέρεται και ως θερμότητα καύσης ΔH (Heat of Combustion). Αυτή που υπολογίζεται βάση στοιχειομετρίας είναι η θεωρητική θερμότητα καύσης, ενώ αυτή που μετράται πειραματικά είναι η πραγματική θερμότητα καύσης.

Είναι σημαντικό να γνωρίζουμε τη διαφορά ανάμεσα στην θεωρητική και στην πραγματική θερμότητα καύσης. Η θεωρητική είναι το μέγεθος της ενέργειας που απελευθερώνεται όταν η καύση ολοκληρωθεί, χωρίς να μένει κατάλοιπο καυσίμου και απελευθερώνοντας όλη τη χημική ενέργεια του υλικού. Η πραγματική θερμότητα καύσης αφορά μία φωτιά στην οποία η καύση δεν είναι απαραίτητα τέλεια και παραμένουν κάποια κατάλοιπα καυσίμου. Μερικές φορές την ονομάζουμε και χημική θερμότητα καύσης. Η διαφορά είναι ότι η τελευταία δεν μετρείται με θερμιδόμετρο τύπου Οβίδας οξυγόνου πειράματα μεγάλης κλίμακας μετρώντας το ρυθμό απώλειας μάζας ή το ρυθμό έκλυσης θερμότητας (PEΘ).

Η ισότητα της πραγματικής με την θεωρητική θερμότητα καύσης, δηλαδή $\Delta H_{\text{effective}} = \Delta H_{\text{theoretical}}$, ισχύει όταν:

- Δεν υπάρχουν κατάλοιπα προϊόντα, H/C ή παρόμοια προϊόντα ατελούς καύσης,
- Δεν υπάρχει ποσότητα καυσίμου που δεν έχει καταναλωθεί ή καεί.

(Drysedale, 1999).

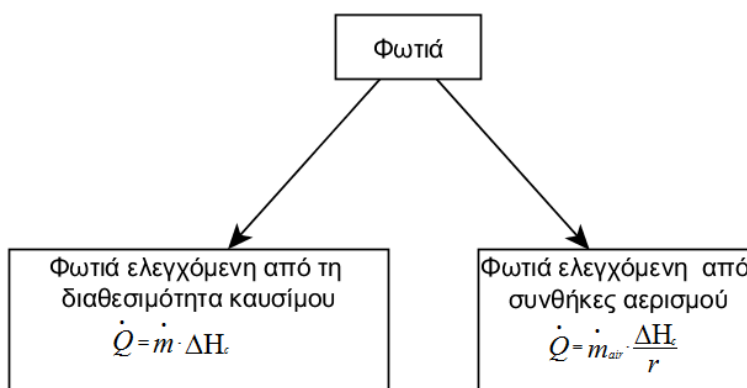
1.1.34 Ρυθμός απώλειας μάζας καυσίμου

Όταν ένα αντικείμενο καίγεται μέσα σε ένα διαμέρισμα, οι δύο βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη της φλόγας είναι η διαθεσιμότητα σε οξυγόνο και ο ρυθμός απώλειας μάζας του καυσίμου.

Η αιθάλη και τα θερμά αέρια συσσωρεύονται στο επίπεδο της οροφής του διαμερίσματος, με αποτέλεσμα οι επιφάνειες του διαμερίσματος (οροφή και τοίχοι) να θερμαίνονται. Οι επιφάνειες αυτές καθώς και τα θερμά αέρια που παράγονται κατά την καύση εκπέμπουν θερμότητα προς την επιφάνεια του καυσίμου με αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού καύσης ή ισοδύναμα του ρυθμού απώλειας μάζας του καυσίμου.

Επίσης, τα ανοίγματα στο διαμέρισμα (πόρτες παράθυρα και άλλες περιοχές διαρροής) μπορεί να επηρεάσουν τη διαθεσιμότητα οξυγόνου, που χρειάζεται για την καύση, με αποτέλεσμα την μεταβολή της ποσότητας του καυσίμου που καταναλώνεται και της παραγωγής άκαυστων αερίων. Αν ο αερισμός είναι περιορισμένος, η περιορισμένη διαθεσιμότητα του οξυγόνου προκαλεί ατελή καύση με αποτέλεσμα να μειώνεται ο ΡΕΘ. Αυτό οδηγεί με τη σειρά του σε μείωση της θερμοκρασίας του καυσαερίου και της θερμότητας που μεταφέρεται στην επιφάνεια του καυσίμου, ενώ το καύσιμο συνεχίζει να απελευθερώνει πτητικά αέρια. Τα πυροληπτικά αέρια εξέρχονται από τα διαθέσιμα ανοίγματα του δωματίου και αναμειγνύονται με το διαθέσιμο οξυγόνο εκτός του δωματίου.

Διαθέσιμες μελέτες (Babrauskas και Williamson, 1979) κατέδειξαν την ανάπτυξη ενός εξελιγμένου μοντέλου που δέχεται ως δεδομένα εισόδου κάποια χαρακτηριστικά του καυσίμου ανάλογα με το αν η εξέλιξη της φωτιάς εξαρτάται από τον αερισμό ή τη διαθεσιμότητα του καυσίμου. Ο ρυθμός πυρόλυσης του καυσίμου θεωρείται γνωστός σε όλους τους χρόνους, έτσι ώστε κάθε φορά να υπολογίζεται ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας με βάση την παρακάτω μεθοδολογία όπως παρουσιάζεται συνοπτικά (Σχήμα 1.4). Να σημειωθεί εδώ η παραδοχή ότι ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας εκλύεται εξ ολοκλήρου μέσα στο διαμέρισμα.



Σχήμα 1.4 Εμπειρικά μοντέλα για τον υπολογισμό έκλυσης ενέργειας σε περιπτώσεις φωτιάς ελεγχόμενης από τη διαθεσιμότητα καυσίμου ή από τις συνθήκες αερισμού.

Η παροχή αέρα μέσα στο διαμέρισμα υπολογίζεται από την εξίσωση 1.3:

$$\dot{m}_{air} = 0,52 A_w H^{1/2} \quad (1.3)$$

Όπου: ΔH_c : είναι η θερμότητα καύσης του καυσίμου,

A_w : το εμβαδόν του ανοίγματος του διαμερίσματος και

H : το ύψος του ανοίγματος του διαμερίσματος, (Drysdale, 1999).

1.1.45 Χαρακτηριστικά μίας κηλίδας καυσίμου

Ο όρος κηλίδα υποδεικνύει ότι το καύσιμο είναι σε υγρή μορφή, αλλά επίσης μπορεί να αναφέρεται και σε επίπεδες πλάκες στερεών καυσίμων που αποσυντίθενται με παρόμοιο τρόπο όπως τα υγρά. Υγρό καύσιμο μπορεί να καίγεται σε ένα ανοιχτό δοχείο αποθήκευσης ή στο έδαφος σε μορφή κηλίδας. Περιορισμένη ποσότητα καυσίμου, σε μία μεγάλη επιφάνεια, καίγεται με υψηλό ΡΕΘ σε μικρή χρονική διάρκεια. Επίσης, κατά την έγχυση του εύφλεκτου υγρού σε μία τυχαία επιφάνεια (π.χ. σε ένα ανάχωμα ή ένα φρεάτιο) μπορεί να διαμορφωθεί μία κηλίδα, το σχήμα και το πάχος της οποίας περιορίζονται από την γεωμετρία της γύρω περιοχής (Igbal και Salley 2003).

1.1.45.1 Μέγεθος κηλίδας ή δεξαμενής

Το πρώτο βήμα για την ανάλυση μιας φωτιάς ενός υγρού καυσίμου είναι να περιγραφούν οι φυσικές διαστάσεις της κηλίδας. Το μέγεθος της φωτιάς που θα προκύψει σχετίζεται με την μάζα του καυσίμου και την ελεύθερη επιφάνειά του. Μία κηλίδα φωτιάς αντιπροσωπεύει το σώμα του καυσίμου, που περιορίζεται από τα φυσικά όρια της κηλίδας που εμπεριέχει το καύσιμο. Με άλλα λόγια, οι τοίχοι ενός δωματίου ή τα εμπόδια στο πάτωμα περιορίζουν την έκλυση του καυσίμου σε μία μικρότερη περιοχή, σε σχέση με την περιοχή που θα είχε η κηλίδα του καυσίμου αν δεν περιοριζόταν χωρικά.

Η εξάπλωση του καυσίμου σε μία επιφάνεια εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η αρχική ορμή, η επιφανειακή τάση του καυσίμου και τα χαρακτηριστικά του υποστρώματος επί του οποίου χύνεται. Κάποιοι παράμετροι του υποστρώματος που λαμβάνονται υπόψη είναι το πορώδες του υλικού και η τραχύτητα της επιφάνειας. Πορώδη υλικά, όπως η άμμος ή κάποια καλύμματα του πατώματος όπως τα χαλιά, μπορούν να οδηγήσουν σε διαφορετικά μεγέθη της κηλίδας του καυσίμου άρα και σε διαφορετικούς ρυθμούς καύσης του.

1.1.45.2 Επίδραση των διαστάσεων της κηλίδας

Οι φυσικές διαστάσεις της κηλίδας ενός υγρού καυσίμου παίζουν σημαντικό ρόλο στη διάδοση της φωτιάς. Οι βασικές συνιστώσες είναι το βάθος και το χαρακτηριστικό πλάτος της κηλίδας. Το βάθος της κηλίδας για εύφλεκτο υγρό έχει αξιοσημείωτη επίδραση στο ΡΕΘ σε περιπτώσεις ελεγχόμενης καύσης. Ωστόσο, οι διαστάσεις της κηλίδας, συμπεριλαμβανομένου του βάθους, δεν επιδρούν σημαντικά σε περιπτώσεις όπου έχουμε καύση αερίου. Γενικά, η μέση ταχύτητα διάδοσης της φλόγας στις περιπτώσεις αυτές είναι πιο αυξημένη (DiNenno et al., 2002).

Μετά την ανάφλεξη, η φωτιά εξαπλώνεται γρήγορα σε όλη την επιφάνεια της περιοχής της υγρής κηλίδας. Ο ρυθμός καύσης ενός καυσίμου μπορεί να επηρεαστεί από το υπόστρωμα σε μία κηλίδα. Για εύφλεκτα υγρά οι ρυθμοί εξάπλωσης της φωτιάς βρίσκονται προσεγγιστικά μεταξύ 10 cm/sec και 2 m/sec (Igbal και Salley 2003).

1.1.56 Διάρκεια της καύσης

Ο ρυθμός καύσης ενός γνωστού καυσίμου εξαρτάται από τη χημική του σύσταση και τις φυσικές του ιδιότητες. Η έννοια της διάρκειας της καύσης είναι ένας καθοριστικός παράγοντας χαρακτηρισμού της επικινδυνότητας μιας φωτιάς σε ένα διαμέρισμα. Ο χρόνος που αναμένεται να καεί το καύσιμο μέσα στο διαμέρισμα εξαρτάται πρωτίστως από την ποσότητα του διαθέσιμου φορτίου καυσίμου. Το φορτίο καυσίμου είναι μία έννοια που περιγράφει την αναμενόμενη διάρκεια της καύσης, υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει η απαραίτητη ποσότητα αέρα μέσα στο δωμάτιο. Γι' αυτό, λαμβάνοντας υπόψη τη μάζα του υλικού που καίγεται ανά δευτερόλεπτο καθίσταται δυνατή η εκτίμηση της ολικής διάρκειας της καύσης του καυσίμου (N. Iqbal, 2003).

1.1.6 Ύψος της φλόγας

1.1.67.1 Ύψος της φλόγας

Η φλόγα είναι ένα σώμα ή ένα ρεύμα από καύσιμη ύλη που συμμετέχει στη διαδικασία της καύσης. Κατά τη διάρκεια της καύσης, ένα μέρος της εκλυόμενης ενέργειας διαχέεται στο περιβάλλον ενώ το υπόλοιπο μεταφέρεται σε γειτονικά καιγόμενα υλικά καθώς και σε τυχόν ενδιάμεσα προϊόντα της καύσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις, φλόγα καλείται ένα μέρος της ακτινοβολούμενης ενέργειας το οποίο γίνεται αντιληπτό από τον άνθρωπο σαν ορατό και θερμικό φαινόμενο λόγω της ιδιότητας που έχει η φλόγα να ακτινοβολεί.

Η φλόγα γενικά αποτελείται από ένα μίγμα οξυγόνου και λοιπών συστατικών, όπως για παράδειγμα υδρογόνο, μονοξειδίο του άνθρακα ή ένωση υδρογονανθράκων. Οι πιο φωτεινές φλόγες δεν είναι πάντα και οι πιο θερμές. Για παράδειγμα το υδρογόνο παρουσιάζει μία υψηλή θερμοκρασία φλόγας, όμως έχει μία σχεδόν αόρατη φλόγα σε κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας.

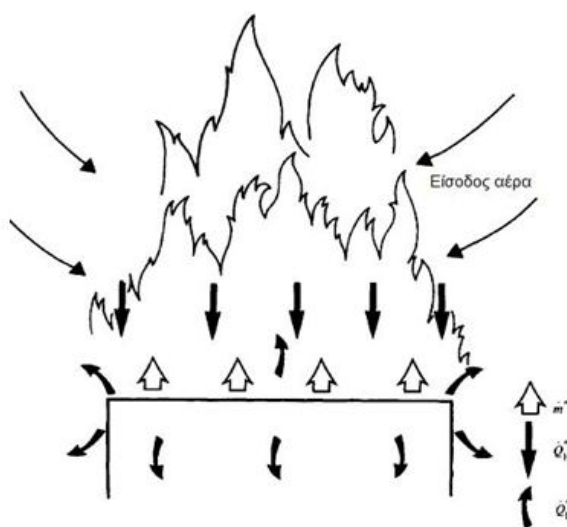
Οι ουσίες, που συμμετέχουν στην καύση, απαιτούν μία πεπερασμένη ποσότητα οξυγόνου προκειμένου να καούν. Κατά την καύση ενός κεριού ή ενός στερεού, όπως ξύλου ή κάρβουνου, η περιβάλλουσα ατμόσφαιρα προσφέρει το απαιτούμενο οξυγόνο. Σε καυστήρες αερίου, ο αέρας ή το καθαρό οξυγόνο αναμιγνύεται με το καυσαέριο στη βάση του καυστήρα για να καταναλωθεί ο άνθρακας σχεδόν στιγμιαία. Αυτό είναι ένα παράδειγμα φλόγας προανάμιξης. Σε οποιαδήποτε περίπτωση όπου η συγκέντρωση οξυγόνου είναι πιο αυξημένη σε σχέση με τις κανονικές συνθήκες (χωρίς πρόσθετη καύση οξυγόνου) οι θερμοκρασίες που λαμβάνονται είναι υψηλότερες από αυτές των κανονικώς συνθηκών. Να σημειωθεί ότι υπάρχουν δύο ξεχωριστές κατηγορίες φλόγας, οι φλόγες διάχυσης και οι φλόγες προανάμιξης, ενώ σε συνδυασμό των δύο μπορεί να προκύψουν φλόγες μερικής προανάμιξης (βάλε την βιβλιογραφία για την Καύση, Φούντη, 2005).

1.1.67.2 Φυσική χημεία της φλόγας

Οι φλόγες προανάμιξης φέρουν σε πλήρη ανάμιξη το μίγμα αντιδρώντων πριν την έναυση, με κλασικό παράδειγμα το λύχνο Bunsen. Να σημειωθεί ότι τυρβώδεις φλόγες προανάμιξης εμφανίζονται στα περισσότερα συστήματα καύσης όπως σε λέβητα, κλίβανο, καυστήρα, ή βενζινοκινητήρα.

Στις φλόγες διάχυσης δεν γίνεται προανάμιξη του καυσίμου με το οξειδωτικό πριν από την έναυση, δηλαδή η ανάμιξη καυσίμου και οξειδωτικού γίνεται ταυτόχρονα με την καύση. Τυπικό παράδειγμα είναι η φωτιά σε κτίρια (Iqbal, 2003).

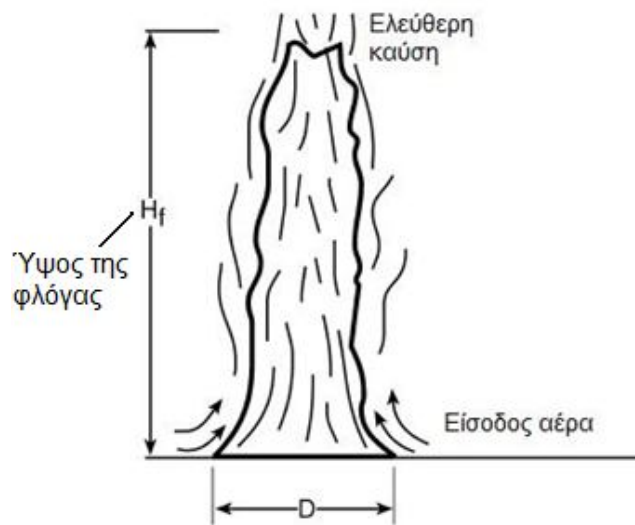
Σε μία φλόγα διάχυσης, ο ρυθμός καύσης εξισώνεται με το ρυθμό της ανατροφοδότησης του αέριου καυσίμου, όπου για φλόγες αερίου είναι ανεξάρτητος από τις διαδικασίες της καύσης. Μία διαφορετική κατάσταση ισχύει για εύφλεκτα στερεά και υγρά, όπου ο ρυθμός της ανατροφοδότησης των πτητικών από την επιφάνεια του καυσίμου συνδέεται άμεσα με το ρυθμό της μεταφοράς θερμότητας από τη φωτιά στο καύσιμο (Σχήμα 1.5), (Drysdale et al., 1999).



Σχήμα 1.5 Σχηματική αναπαράσταση μίας επιφάνειας που καίγεται όπου απεικονίζονται οι διαδικασίες μεταφοράς θερμότητας και μάζας (Drysdale et al., 1999).

1.1.67.3 Θερμοκρασία της φλόγας

Το θερμοκρασιακό προφίλ της φλόγας είναι άμεσα εξαρτώμενο από το ύψος αυτής. Η θερμοκρασία σε κάθε θέση κυμαίνεται σε ένα μεγάλο εύρος, ειδικά γύρω από τις ακμές και την κορυφή της φλόγας. Για αυτό όταν αναφέρεται η θερμοκρασία της φλόγας συνήθως γίνεται αναφορά στον κεντρικό άξονα της φλόγας ή σε μία μέση θερμοκρασία, που καθορίζεται από τη μέτρηση της θερμοκρασίας σε διαφορετικά σημεία καθ' ύψος της φλόγας (Σχήμα 1.6).



Σχήμα 1.6 Ύψος της φλόγας σε ελεύθερη καύση φωτιάς (Iqbal et al., 2003).

1.1.67.4 Εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού του ύψους της φλόγας

Υπολογισμοί του ύψους της φλόγας

Το ύψος της φλόγας είναι ένας παράγοντας που σχετίζεται με τον κίνδυνο εξάπλωσης μίας πυρκαγιάς και θεωρείται ένα σημαντικό ποσοτικό χαρακτηριστικό της φωτιάς που επηρεάζει το σχεδιασμό συστημάτων ανίχνευσης και κατάσβεσης της.

Το ύψος της φλόγας σχετίζεται άμεσα με τη μετάδοση θερμότητας λόγω της φλόγας και τη ροπή της να προσκρούει σε αντικείμενα που βρίσκονται στο κοντινό περιβάλλον της. Ακόμη, εξαρτάται από το αν η φλόγα είναι στρωτή ($Re < 10^3$) ή τυρβώδης ($Re > 10^3$). Στις περισσότερες περιπτώσεις οι επίπεδες φλόγες είναι πιο κοντές σε σχέση με τις τυρβώδεις.

Ερευνητές ορίζουν ως ύψος φλόγας, το ύψος εκείνο που έχει η φλόγα για τουλάχιστον 50% του χρόνου που μελετάται. Η περιοχή που φλέγεται, πάνω από την πηγή, χαρακτηρίζεται από υψηλή θερμοκρασία και είναι γενικά πιο φωτεινή. Οι φλόγες από κηλίδες φωτιάς εμφανίζουν μία περιοδική διακύμανση και το ύψος της φλόγας διαφέρει κατά το μήκος της περιοχής συνεχούς καύσης (ή φωτεινής περιοχής). Σημειώνεται ότι το ύψος και η θερμοκρασία της φλόγας είναι σημαντικές παράμετροι για τον υπολογισμό της πιθανότητας ανάφλεξης των γύρω από την κύρια εστία της φωτιάς αντικειμένων.

Δύο εμπειρικές σχέσεις που χρησιμοποιούνται ευρέως για να ορίσουν το ύψος της φλόγας σε κηλίδες φωτιάς σύμφωνα με διαθέσιμες βιβλιογραφικές πηγές (Heskestad, 1995 και Thomas, 1962) είναι οι ακόλουθες (1.4) και (1.5):

$$H_f = 0,235Q^{0,25} - 1,02D \quad (1.4)$$

Όπου: H_f : ύψος της φλόγας (m)

\dot{Q} : ρυθμός έκλυσης θερμότητας της φλόγας (kW)

D : διάμετρος της φλόγας ζ(m)

$$H_f = 42D \left(\frac{\dot{m}''}{\rho_a \sqrt{gD}} \right)^{0.61} \quad (1.5)$$

Όπου: H_f : ύψος της φλόγας (m)

D : διάμετρος της φλόγας (m)

\dot{m} : ρυθμός καύσης ή απώλειας μάζας ανά μονάδα χρόνου ($\text{kg/m}^2\text{-sec}$)

ρ_a : πυκνότητα του αέρα του περιβάλλοντος

g : επιτάχυνση της βαρύτητας (m/sec^2).

Οι παραπάνω σχέσεις μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τους υπολογισμούς του μήκους του πλούμιου της φλόγας κατά μήκος της οροφής και της θερμότητας που μεταφέρεται μέσω ακτινοβολίας στα αντικείμενα μέσα σε έναν κλειστό χώρο.

Για μη κυκλικές κηλίδες φωτιάς η πραγματική διάμετρος λαμβάνεται προσεγγιστικά ως διάμετρος κυκλικής κηλίδας που αντιστοιχεί σε περιοχή ίδια με αυτή της μη κυκλικής κηλίδας και δίνεται από τον τύπο (1.6):

$$D = \sqrt{\frac{4A_f}{\pi}} \quad (1.6)$$

Όπου A_f = είναι το εμβαδόν της επιφάνειας της μη κυκλικής κηλίδας.

Εκτίμηση του ύψους της φωτιάς σε τοίχο και σε γωνία

Αν μία φωτιά είναι τοποθετημένη κοντά σε ένα τοίχο η σε μία γωνία το αποτέλεσμα του περιορισμού της εισόδου ελεύθερου αέρα θα έχει σημαντικές επιπτώσεις στην ανάπτυξη και διάδοση της φλόγας. Βασικό χαρακτηριστικό σε αυτές τις περιπτώσεις είναι ότι μειώνεται το ποσοστό του εισερχόμενου αέρα που διατίθεται για τη φλόγα ή το πλούμιο της. Η άνωση που δημιουργείται από την ίδια τη φλόγα συμπαρασύρει τον αέρα και τα θερμά καυσαέρια, αυξάνοντας έτσι το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας στα υλικά κατασκευής του τοίχου.

Εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού του ύψους της φλόγας κοντά σε τοίχο

Η ροή θερμότητας στην προαναφερθείσα περίπτωση καθορίζεται κυρίως από την ακτινοβολία της φλόγας. Ο Delichatsios (1984), αναφερόμενος στον Budnick, Evans και Nelson (1997), ανέπτυξε μία εμπειρική σχέση για το ύψος της φλόγας που επιμηκύνεται εντός του διαμερίσματος, η οποία βασίστηκε σε πειραματικά δεδομένα. Στην σχέση αυτή το ύψος της φλόγας βασίζεται στο ΡΕΘ ανά μονάδα μήκους της φλόγας.

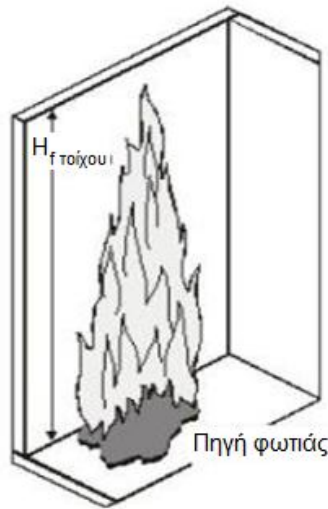
$$H_{f,wall} = 0,034 \dot{Q}^{\frac{2}{3}} \quad (1.7)$$

Όπου: H_f : το ύψος της φλόγας (m)

0,034: Συντελεστής εισόδου

\dot{Q} : HRR ανά μονάδα μήκους της φλόγας (kW/m)

Η σχέση αυτή μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί, ανάλογα με το μέγεθος που ζητείται σε κάθε περίπτωση, για την εύρεση του μήκους της φλόγας επί του τοίχου (Σχήμα 1.7) καθώς και τον υπολογισμό της θερμότητας μέσω ακτινοβολίας που μεταφέρεται στα αντικείμενα μέσα σε έναν κλειστό χώρο.



Σχήμα 1.7 Εξάπλωση της φωτιάς κοντά σε τοίχο (N. Iqbal et al.,2003).

Εμπειρικές σχέσεις για τον υπολογισμό του ύψους της φλόγας κοντά σε τοίχους που σχηματίζουν γωνία

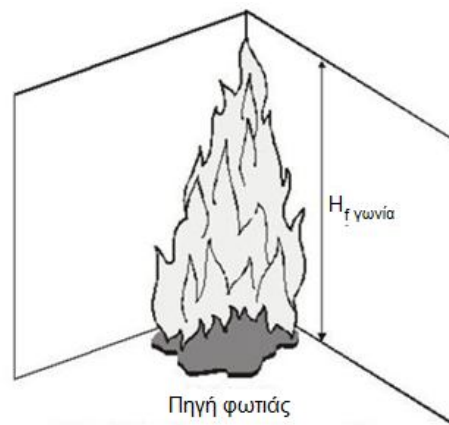
Η φωτιά κοντά σε τοίχους που σχηματίζουν γωνία μπορεί να μοντελοποιηθεί στην περίπτωση κηλίδας φωτιάς οριζοντίας ως συντεταγμένες του κέντρου την κορυφή της γωνίας που σχηματίζουν οι τοίχοι (Σχήμα 1.8). Στην αρχή της φωτιάς αναπτύσσεται μία φλόγα διάχυσης που έρχεται σε επαφή με τους τοίχους. Καθώς οι φλόγες εξαπλώνονται κατά μήκος της διασταύρωσης των τοίχων και της οροφής τελικά φτάνουν στη γωνία στο ταβάνι του δωματίου. Αν η οροφή είναι κατασκευασμένη από άκαυστο υλικό οι φλόγες εξαπλώνονται προς τα κάτω. Σε αντίθεση με έναν τοίχο κατασκευασμένο από εύφλεκτο υλικό όπου η θερμότητα που μεταφέρεται ανάμεσα σε δύο τοίχους έχει ως αποτέλεσμα μία πιο γρήγορη εξάπλωση της φωτιάς. Το ύψος της φλόγας σε αυτήν την περίπτωση υπολογίζεται από τη σχέση (1.8) (Hasemi και Tokunaga-1984):

$$H_{f,wall} = 0,075 \times \dot{Q}^{\frac{3}{5}} \quad (1.8)$$

Όπου: H_f , H_f : το ύψος της φλόγας στη γωνία (m)

0,07: Συντελεστής εισόδου

Η σχέση αυτή μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί, ανάλογα με το μέγεθος που ζητείται σε κάθε περίπτωση, για την εύρεση του μήκους της φλόγας επί της διασταύρωσης δύο τοίχων, καθώς και για τον υπολογισμό της θερμότητας μέσω ακτινοβολίας που μεταφέρεται στα αντικείμενα σε έναν κλειστό χώρο.



Σχήμα 1.8 Εξάπλωση της φωτιάς κοντά σε τοίχους που σχηματίζουν γωνία (N. Iqbal et al.,2003).

1.2 Ανάφλεξη υγρών καυσίμων

1.2.1 Εισαγωγή

Η ανάφλεξη ενός υγρού καυσίμου δεν έχει διαφορά από τις διαδικασίες της αυτανάφλεξης και της κατευθυνόμενης ανάφλεξης ενός μίγματος αέριου καυσίμου, με μία εξαίρεση. Από το υγρό καύσιμο πρέπει πρώτα να εξατμιστεί μία επαρκής ποσότητα του για να επιτραπεί η ανάφλεξη του αέριου καυσίμου. Σε αυτήν την περίπτωση, η συγκέντρωση του καυσίμου πρέπει να είναι τουλάχιστον κοντά στο χαμηλότερο όριο αναφλεξιμότητας για κατευθυνόμενη ανάφλεξη ή μέσα στα όρια αυτανάφλεξης. Για την κατευθυνόμενη ανάφλεξη, η σχετική θέση του εναυστήρα (σπίθας) και του μίγματος του εξατμιζόμενου καυσίμου με τον αέρα είναι κρίσιμη. Για την αυτανάφλεξη, το μέγεθος του θαλάμου και οι απώλειες θερμότητας μπορούν να επηρεάσουν το αποτέλεσμα.

Η θερμοκρασία και η πυκνότητα του καυσίμου παίζουν σημαντικό ρόλο για την κατευθυνόμενη ανάφλεξη. Το καύσιμο μπορεί μόνο να αναφλεχθεί όταν μία επαρκής θερμοκρασία υπάρχει στην περιοχή, που οδηγεί στην κατευθυνόμενη ανάφλεξη ή στην αυτανάφλεξη. Η θερμότητα της εξάτμισης είναι μία πολύ σημαντική θερμοδυναμική παράμετρος που ελέγχει τον ρυθμό εξάτμισης και την απώλεια μάζας καυσίμου.

1.2.2 Υγρά και στερεά καύσιμα

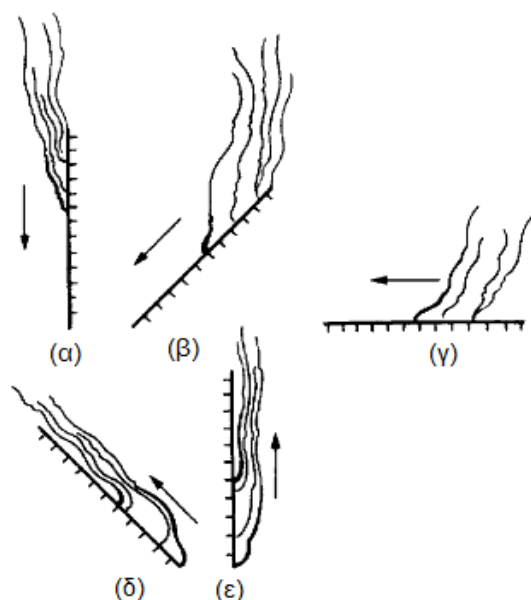
Η παράμετρος του χρόνου είναι πιο σημαντική σε ένα σενάριο φωτιάς όταν εμπλέκονται και στερεά αντικείμενα. Συγκεκριμένα, ο χρόνος ανάφλεξης ενός στερεού είναι αντιστρόφως ανάλογος με την

ταχύτητα διάδοσης της φωτιάς. Στην περίπτωση όπου ένα υγρό καύσιμο απορροφάται από ένα πορώδες στερεό είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη οι ιδιότητες του υγρού αλλά και του στερεού για να ελέγξουμε τη διαδικασία καύσης.

Για την κατανόηση των παραγόντων για τον έλεγχο της ανάφλεξης ενός στερεού υπάρχουν τρία βασικά βήματα:

- 1) Το στερεό θερμαίνεται παράγοντας προϊόντα πυρόλυσης.
- 2) Ο ατμός του καυσίμου που εμπλέκεται στη διαδικασία της καύσης πρέπει να μεταφερθεί μέσω του οριακού στρώματος του υγρού, στο οποίο η θερμοκρασία περιβάλλοντος του αέρα αναμιγνύεται με το καύσιμο. Για την κατευθυνόμενη ανάφλεξη, μία επαρκής ποσότητα ενεργειακής πηγής όπως π.χ. μια ηλεκτρική σπίθα ή μία μικρή φλόγα πρέπει να τοποθετηθούν στο σημείο όπου το μίγμα καυσίμου είναι εύφλεκτο. Για την αυτανάφλεξη, πρέπει όχι μόνο να επιτύχουμε ένα περίπου στοιχειομετρικό μίγμα αλλά και έναν επαρκή όγκο μίγματος ατμού που πρέπει να φτάσει τη θερμοκρασία αυτανάφλεξης του. Αν το στερεό θερμαίνεται με ακτινοβολία, τότε θερμότητα μεταφέρεται είτε από την επιφάνεια είτε η απορρόφηση της ακτινοβολίας στο οριακό στρώμα αυξάνει τη θερμοκρασία του μίγματος στο όριο της αυτανάφλεξης.
- 3) Όταν το αναφλέξιμο αέριο μίγμα αναφλεχθεί θα υπάρξει μία μεταγενέστερη χρονική στιγμή όπου θα προχωρήσει σε "θερμική εκφυγή" (έκλυση θερμότητας) (Quintiere et al., 2006).

Σε αντίθεση με τις κηλίδες υγρών καυσίμων, η επιφάνεια ενός στερεού μπορεί να βρίσκεται σε οποιοδήποτε προσανατολισμό (Σχήμα 1.9). Να σημειωθεί κατά το φαινόμενο διάδοσης της φωτιάς, η συμπεριφορά της φλόγας επηρεάζεται έντονα από τη γεωμετρία και την κλίση της επιφάνειας (Drysdale et al., 1999).



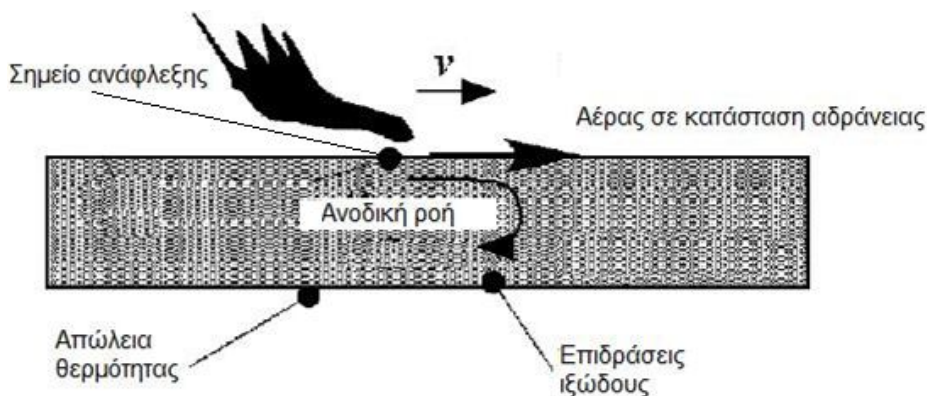
Σχήμα 1.9 Διάδοση της φωτιάς σε μία επιφάνεια ενός λεπτού εύφλεκτου στερεού για διαφορετικές κλίσεις: (α) -90, (β) -45, (γ) 0, (δ) 45, (ε) 90 (Drysdale et al., 1999).

1.2.3 Διάδοση της φλόγας σε υγρό καύσιμο

Η διάδοση της φλόγας για κηλίδες με μεγαλύτερα βάθη επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες. Ειδικότερα:

- 1) την επιφανειακή τάση (σ)
- 2) την άνωση που προκαλείται από τη ροή κάτω από την επιφάνεια.

Για ρηχές κηλίδες φωτιάς, οι κύριοι παράγοντες που επιδρούν στην εξάπλωση της φλόγας είναι το ιξώδες και η μεταφορά θερμότητας στο έδαφος. Αυτοί οι μηχανισμοί παρατηρούνται στο Σχήμα 1.10. Για την ανάφλεξη του υγρού καυσίμου, είναι ανάγκη να αυξηθεί η θερμοκρασία του στο σημείο ανάφλεξης του. Η διάδοση της φλόγας με τους μηχανισμούς μεταφοράς ενέργειας που περιέχει θερμαίνει το υγρό από μία θερμοκρασία T στη θερμοκρασία ανάφλεξης του T_L (Quintiere, 2006).



Σχήμα 1.10 Μηχανισμός διάδοσης της φωτιάς στην επιφάνεια υγρού καυσίμου (Quintiere et al., 2006).

1.2.4 Ανάφλεξη υγρών καυσίμων με χαμηλό σημείο ανάφλεξης

Ένας εύκολος τρόπος για να υποδείξουμε το σχετικό κίνδυνο πυρκαγιάς είναι κατηγοριοποιώντας τα αναφλέξιμα υγρά με βάση το σημείο ανάφλεξης τους. Τα πιο επικίνδυνα είναι τα υγρά καύσιμα με χαμηλό σημείο ανάφλεξης, καθώς παρουσιάζουν κίνδυνο ανάφλεξης σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος κι οι ατμοί τους μπορεί να αναφλεχθούν από μία σπίθα ή φλόγα. Τέτοιο υγρό καύσιμο είναι και η βενζίνη (σημείο ανάφλεξης $<45^{\circ}\text{C}$).

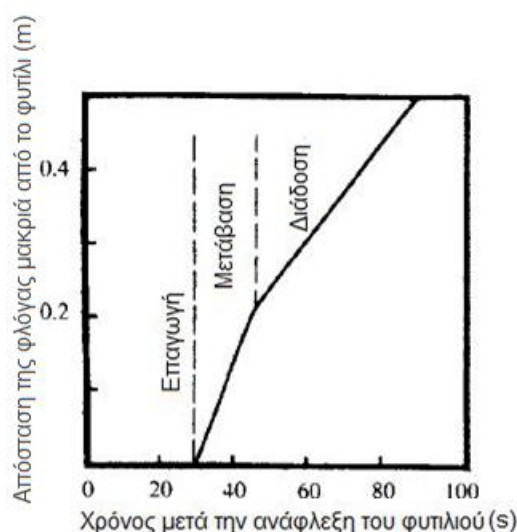
1.2.5 Ανάφλεξη υγρών καυσίμων με υψηλό σημείο ανάφλεξης

Υγρά με υψηλό σημείο ανάφλεξης (π.χ. αεριωθούμενα καύσιμα, σημείο ανάφλεξης $>100^{\circ}\text{C}$) μπορούν να αναφλεχθούν μόνο στην περίπτωση όπου θερμανθούν υψηλότερα από το “σημείο έναυσης φωτιάς” τους. Διευκρινίζεται ότι “σημείο ανάφλεξης” (flashpoint) θεωρείται η κατώτερη θερμοκρασία στην οποία ένα εύφλεκτο μίγμα ατμού/αέρα υπάρχει στην επιφάνεια, ενώ “σημείο έναρξης φωτιάς” (firepoint) είναι η θερμοκρασία στην οποία ο ατμός συνεχίζει να καίγεται αφού έχει

γίνει η ανάφλεξη (Burgoyne και Williams, 1949). Αν και αυτό μπορεί να επιτευχθεί εφαρμόζοντας μία πηγή θερμότητας σε όλη την επιφάνεια του υγρού (π.χ. μία κηλίδα υγρού καυσίμου που είναι εκτεθειμένη σε ακτινοβολία από μία κοντινή φωτιά), πιο συχνά συναντάται τοπική εφαρμογή της θερμότητας, όπως πρόσπτωση της φλόγας σε μία επιφάνεια ή καύση κοντά στην επιφάνεια.

Προτού η φλόγα διαδοθεί σε όλη την επιφάνεια του υγρού περνάει ένα χρονικό διάστημα. Στο διάστημα αυτό, η φλόγα διαχέεται με γρήγορο ρυθμό στην περιοχή που δέχεται την επίδραση της θερμότητας, μέσω ενός συμβατικού μηχανισμού που διατηρείται από τις μεταβολές της επιφανειακής τάσης στην επιφάνεια (Sirignano and Glassman, 1970). Σημειώνεται ότι η επιφανειακή τάση, ορίζεται σαν η δύναμη ανά μονάδα μήκους εφαρμοσμένης στην επιφάνεια του υγρού. Απόρροια του παραπάνω φαινομένου, είναι η εφαρμογή μίας δύναμης στην επιφάνεια, με αποτέλεσμα να απομακρύνεται το ζεστό υγρό μακριά από τη θερμαινόμενη περιοχή και υγρό χαμηλότερης θερμοκρασίας να παίρνει θέση κάτω από την επιφάνεια. Σε μία κηλίδα περιορισμένης έκτασης, η ανάφλεξη τελικά θα επιτευχθεί ακολουθώντας τη διάδοση της φλόγας κατά μήκος της επιφάνειας, υπό την προϋπόθεση ότι θα μεταφερθεί δια συναγωγής ένα σημαντικό ποσό θερμότητας στον όγκο του υγρού και η θερμοκρασία της επιφάνειας θα αγγίξει το σημείο έναρξης φωτιάς (Burgoyne και Roberts, 1968).

Ωστόσο, ένα υγρό με υψηλότερο σημείο έναρξης φωτιάς μπορεί να αναφλεχθεί ευκολότερα από ένα φυτίλι, δηλαδή από ένα πορώδες υλικό μεσαίας προς χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας όπως αυτά που χρησιμοποιούνται σε λάμπες κηροζίνης και σε κεριά. Η εφαρμογή της φλόγας στο εμποτισμένο με καύσιμο φυτίλι προκαλεί ταχεία τοπική αύξηση της θερμοκρασίας, όχι μόνο επειδή το στρώμα του υγρού είναι τόσο λεπτό για να συμβεί απαγωγή της συναγωγής, αλλά επίσης γιατί το φυτίλι είναι ένας θερμικός μονωτής. Η ανάφλεξη θα συμβεί σε ένα σημείο και θα ακολουθηθεί μέσω της διάδοσης της φλόγας σε όλη την επιφάνεια του φυτιλιού. Ένας μηχανισμός με τον οποίο οι κηλίδες υγρών με υψηλό σημείο έναρξης φωτιάς μπορούν να αναφλεχθούν, χωρίς την διενέργεια της θέρμανσης του όγκου του υγρού, είναι η ανάφλεξη του υγρού που απορροφάται ένα φυτίλι (π.χ. ένα πανί ή οποιοδήποτε πορώδες υλικό), το οποίο βρίσκεται πάνω στην επιφάνεια της κηλίδας (Burgoyne et al., 1968). Το υγρό περιεχόταν σε μία μακριά σκάφη και αναφλεγόταν επί του φυτιλιού, το οποίο ήταν τοποθετημένο στο ένα άκρο. Παρακολουθώντας τη θερμοκρασία σε διάφορα σημεία μέσα στο υγρό, βρέθηκε ότι η φλόγα ξεκίνησε να διαδίδεται μακριά από το φυτίλι μόνο όταν η θερμοκρασία υπερέβη αυτή του σημείου ανάφλεξης. Η σχετική περίοδος φαίνεται στο Σχήμα 1.11. Αποδείχτηκε ότι το ποσό θερμότητας, που μεταφέρεται από τη φλόγα στο φυτίλι, ήταν ανάλογο του ποσού, της αποθηκευμένης θερμότητας στο υγρό, στο τέλος της «περιόδου επαγωγής» (Drysdale et al., 1999).

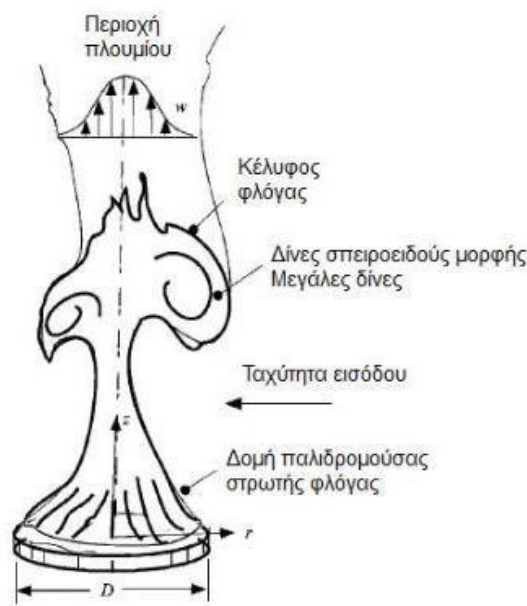


Σχήμα 1.11 Περίοδος επαγωγής για την ανάφλεξη του φυτιλιού σε υψηλά σημεία έναρξης φωτιάς (Drysdale et al., 1999).

1.3 Φωτιές σε διαμερίσματα

1.3.1 Πλούμιο φωτιάς

Με τον όρο πλούμιο φωτιάς περιγράφεται η κάθετη ανοδική ροή των αερίων, ως αποτέλεσμα της καύσης του καυσίμου. Η ροή που προκαλείται στο πλούμιο, λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας ή λόγω της επακόλουθης μείωσης της πυκνότητας, κινείται ανοδικά. Συνήθως η ροή στο πλούμιο είναι τυρβώδης κι όχι στρωτή (Σχήμα 1.12). Το πλούμιο της φωτιάς ορίζει μία περιοχή που μπορεί να κατευθύνει τη ροή μακριά από την πηγή της καύσης, ειδικά αν η πηγή είναι μικρή. Ο καθένας από εμάς που έχει παρατηρήσει μία ανοδική ροή του λευκού καπνού από ένα τσιγάρο που έχει απομείνει σε ένα τασάκι θα θυμηθεί βλέποντας την κυματιστή στρωτή ροή του λευκού εκλυόμενου καπνού ότι διαχωρίζεται σε ένα τυρβώδες πιο ευρύ πλούμιο σε λιγότερο από το ένα τρίτο του ύψους της. Σχεδόν κάθε είδος φωτιάς συνδέεται με ένα πλούμιο τυρβώδους μορφής, ακόμα και μία φωτιά που σιγοκαίει (Quintiere et al., 2006).



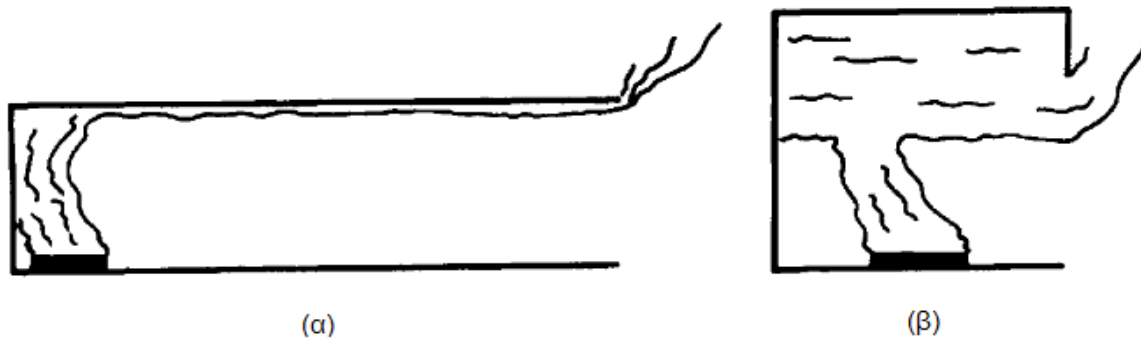
Σχήμα 1.12 Απεικόνιση τυρβώδους πλουμίου φωτιάς (Quintiere et al., 2006).

Στο σχήμα 1.13 φαίνεται η διαμόρφωση του πλουμίου της φωτιάς στην περίπτωση κλειστού χώρου. Κίνηση του πλουμίου της φωτιάς όταν υπάρχει οροφή,

(α) Οροφή διαδρόμου με μη περιορισμένη οριζόντια ροή κατά τη μία κατεύθυνση

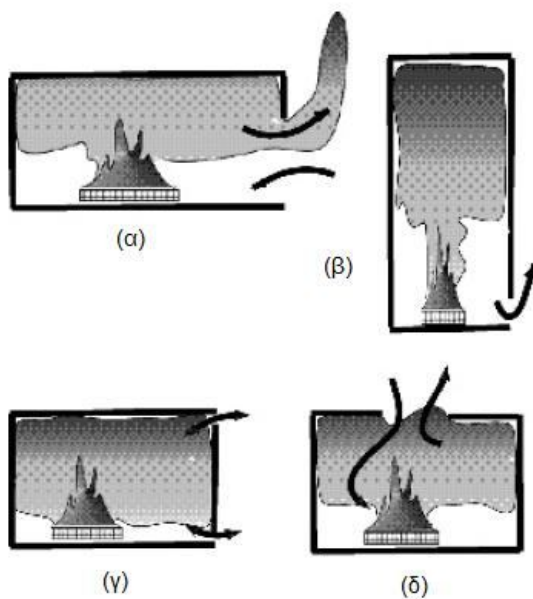
(β) Οροφή διαμερίσματος, απεικόνιση της διαμόρφωσης του στρώματος της αιθάλης.

Οι ιδιότητες του πλουμίου της φωτιάς είναι σημαντικές για την αντιμετώπιση προβλημάτων που σχετίζονται με την πυρανίχνευση, τη θέρμανση των δομικών κατασκευών από τη φωτιά, τον εξαερισμό σε περίπτωση φωτιάς και το σχεδιασμό συστημάτων καταστολής (DiNenno et al., 2002).



Σχήμα 1.13 Κίνηση του πλουμίου της φωτιάς όταν υπάρχει οροφή (Drysdale et al., 1999).

Στο Σχήμα 1.14 παρουσιάζονται περιπτώσεις φωτιάς για διαφορετικά ανοίγματα σε κλειστούς χώρους που έχουν ύψος λίγο περισσότερο από 3 m. Να σημειωθεί ότι το ύψος αυτό χαρακτηρίζει τα περισσότερα διαμερίσματα και χώρους εργασίας.

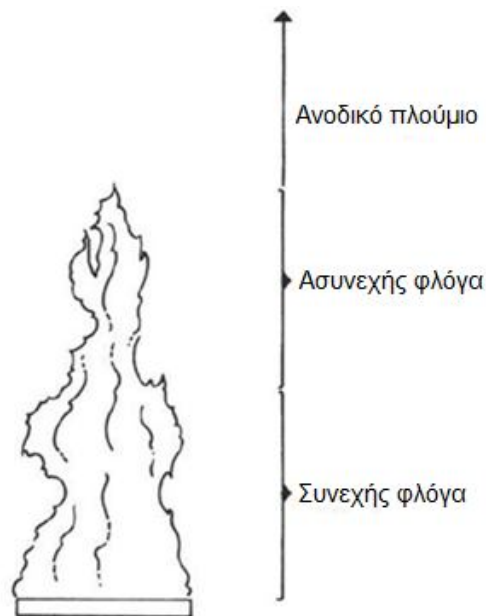


Σχήμα 1.14 Σενάρια φωτιάς σε διαμέρισμα (Quintiere et al., 2006).

1.3.2 Θερμοκρασίες σε φωτιές σε ανοιχτό χώρο

Σημείο αναφοράς για την περιγραφή των θερμοκρασιών σε ανοιχτό χώρο σε περίπτωση ύπαρξης εστίας φωτιάς μπορεί να αποτελέσει το έργο του McCaffrey (1979), που μελέτησε εκτενώς τις θερμοκρασίες σε τυρβώδεις φλόγες διάχυσης. Καθόρισε τρεις διαφορετικές περιοχές στο πλούμιο μίας φλόγας (Σχήμα 1.15):

- 1) Την περιοχή της **συνεχούς φλόγας**, όπου οι θερμοκρασίες παραμένουν σταθερές, λίγο παραπάνω από 900 °C,
- 2) Την **ασυνεχή περιοχή της φλόγας**, που βρίσκεται πάνω από την περιοχή της συνεχούς φλόγας. Αυτά τα σημεία της φλόγας έχουν θερμοκρασίες γύρω στους 320 °C και
- 3) Την **περιοχή του ανοδικού πλουμίου**, που είναι πέρα από τα σημεία της ασυνεχούς φλόγας. Η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη σε αυτήν την περιοχή όσο το ύψος αυξάνει και απομακρυνόμαστε από την κυρίως εστία της φωτιάς (Iqbal et al., 2003).



Σχήμα 1.15 Σχηματικό διάγραμμα του πλουμίου της φωτιάς (Drysdale et al., 1999)

1.3.3 Θερμοκρασίες σε φωτιές μέσα σε δωμάτια

Ο όρος διαμέρισμα αφορά κάθε περιορισμένο χώρο που επηρεάζει τον ανεφοδιασμό και το θερμικό περιβάλλον της φωτιάς. Η επιστημονική κοινότητα που σχετίζεται με την επιστήμη της φωτιάς έχει γενικά αποφανθεί ότι καθολική ανάφλεξη μπορεί να εμφανιστεί σε κλειστούς χώρους όταν η μέση ανώτερη θερμοκρασία του καυσαερίου στο δωμάτιο υπερβαίνει τους 600 °C. Διευκρινίζεται ότι καθολική ανάφλεξη είναι η σχεδόν ταυτόχρονη ανάφλεξη του μεγαλύτερου μέρους των άμεσα εκτεθειμένων επιφανειών των αντικειμένων, που βρίσκονται σε έναν κλειστό χώρο. Τα αντικείμενα αυτά θερμαίνονται σε θερμοκρασία αυτανάφλεξης, αναφλέγονται και μπορεί να εκπέμψουν εύφλεκτα πυρολιπικά αέρια. Η καθολική ανάφλεξη της φλόγας είναι μία μετάβαση, συνήθως ταχεία,

κατά την οποία η ανάπτυξη της φλόγας μέσα στο διαμέρισμα είναι ευδιάκριτη. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μέγιστη θερμοκρασία της φλόγας, που παρατηρείται σε τέτοιες περιπτώσεις. Αυτή η θερμοκρασία καθορίζεται από τις συνθήκες αερισμού και τα χαρακτηριστικά του πυροθερμικού φορτίου. Ως αποτέλεσμα, αυτών των μεταβλητών οι τιμές της μέγιστης θερμοκρασίας διαμορφώνουν μία ευρεία περιοχή κατανομής (Babrauskas και Williamson, 1979). Η μέγιστη τιμή είναι περίπου 1200°C, παρόλα αυτά μία συμβατική τιμή μετά την καθολική ανάφλεξη της φλόγας είναι περίπου 900-1000°C. Οι μέγιστες αναμενόμενες θερμοκρασίες σε φωτιές μέσα σε δωμάτια είναι λίγο υψηλότερες από αυτές που συναντάμε σε μη ελεγχόμενες φωτιές στην ύπαιθρο.

Η θερμότητα που χάνεται από τη φλόγα καθορίζει πόσο κάτω από την αδιαβατική θερμοκρασία της φλόγας είναι η πραγματική θερμοκρασία. Όταν η φλόγα βρίσκεται μακριά από τοίχους και δεν θερμαίνει τα στερεά όρια του κλειστού χώρου ακτινοβολεί στο γύρω περιβάλλον το οποίο βρίσκεται σε αρχική θερμοκρασία 20 °C. Αν η φλόγα είναι αρκετά μεγάλη ή το δωμάτιο αρκετά μικρό ώστε να προθερμανθούν οι τοίχοι επιφανειακά, τότε η φλόγα μπορεί να λαμβάνει θερμότητα μέσω ακτινοβολίας από ένα σώμα που βρίσκεται σε θερμοκρασία αρκετών εκατοντάδων βαθμών Κελσίου. Η συνέπεια του φαινομένου αυτού, οδηγεί σε υψηλότερη θερμοκρασία της φλόγας (Iqbal et al., 2003).

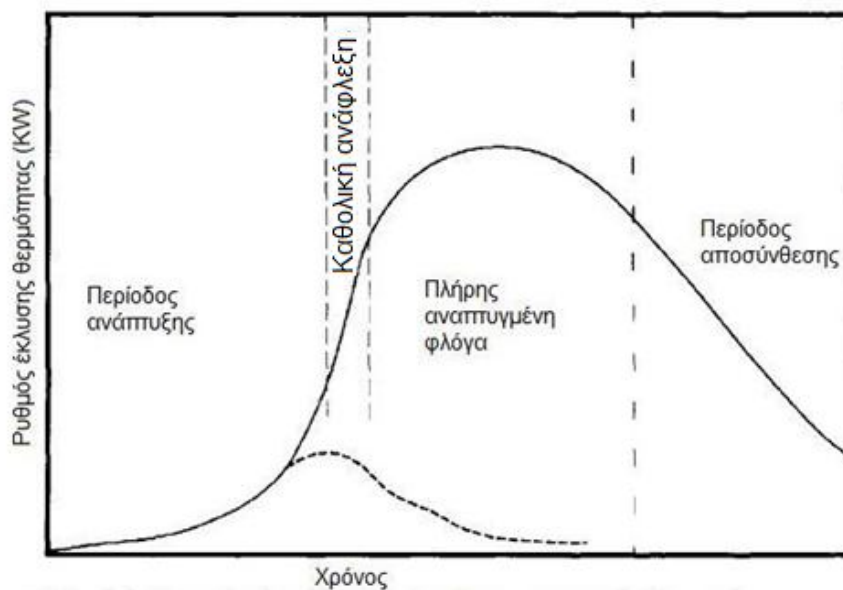
Στη συνέχεια παρατίθενται κάποια στοιχεία για τη συμπεριφορά της φωτιάς κατά τη διάδοση και ανάπτυξη της μέχρι το στάδιο πλήρους ανάπτυξης της.

1.3.4 Φάσεις της φωτιάς σε διαμερίσματα

Η φωτιά σε κλειστούς χώρους χαρακτηρίζεται από τρεις φάσεις. Η πρώτη φάση είναι η ανάπτυξη της φωτιάς. Αν δεν γίνει καμία ενέργεια για να κατασταλεί η φωτιά τότε αυτή μεγαλώνει και τελικά φτάνει σε ένα ανώτατο μέγεθος που εξαρτάται από την διαθεσιμότητα καυσίμου (φωτιά ελεγχόμενη από τη διαθεσιμότητα καυσίμου) ή του αέρα που είναι διαθέσιμος μέσα από τα ανοίγματα του δωματίου (φωτιά ελεγχόμενη από τις συνθήκες αερισμού) (Quintiere et al., 2006).

Τα τρία βασικά στάδια ανάπτυξης της φωτιάς σε διαμερίσματα είναι (Drysdale, 1999):

- 1) **Η φάση της ανάπτυξης της φλόγας** ή η “πριν την καθολική ανάφλεξη φάση” στην οποία ο μέσος όρος της θερμοκρασίας του διαμερίσματος είναι χαμηλός και η φωτιά εντοπίζεται στη γεινίαση της προέλευση της.
- 2) **Η πλήρως αναπτυγμένη φλόγα** ή η “μετά την καθολική ανάφλεξη” φάση, κατά την οποία όλα τα εύφλεκτα αντικείμενα που υπάρχουν στο διαμέρισμα εμπλέκονται και οι φλόγες φαίνεται να καταλαμβάνουν όλο τον όγκο του διαμερίσματος.
- 3) **Το στάδιο της υποβάθμισης**, συχνά αναγνωρίζεται και ως το στάδιο της φωτιάς μετά την περίοδο όπου ο μέσος όρος της θερμοκρασίας έχει πέσει κατά 80% σε σχέση με τη μέγιστη τιμή. Τα στάδια ανάπτυξης της φωτιάς σε διαμέρισμα με επαρκή αερισμό φαίνονται στο σχήμα 1.16. Η διακεκομμένη γραμμή αναπαριστά την εξάντληση του καυσίμου σε περίπτωση μη καθολικής ανάφλεξης.



Σχήμα 1.16 Στάδια ανάπτυξης της φωτιάς (Drysdale et al., 1999).

1.3.4.1 Η περίοδος ανάπτυξης της φλόγας και ο ορισμός της καθολικής ανάφλεξης

Κατά τη διάρκεια της πλήρους αναπτυγμένης φάσης της φωτιάς, ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας φτάνει τη μέγιστη τιμή του και η απειλή για τα γειτονικά διαμερίσματα και τα γειτονικά κτίρια είναι σοβαρή. Φλόγες μπορεί να αναδύονται από κάθε άνοιγμα του δωματίου, συμβάλλοντας στην εξάπλωση της φωτιάς στο υπόλοιπο κτίριο, είτε εσωτερικά (μέσω ανοιχτών πορτών) είτε εξωτερικά (μέσω παράθυρων). Επιπρόσθετα με την προφανή απειλή αυτών που βρίσκονται μέσα στο κτίριο, κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης αυτής είναι πιθανή η δομική αστοχία του κτιρίου που μπορεί να οδηγήσει στην κατάρρευση του. Κατά τη διάρκεια της τρίτης φάσης, ο ρυθμός της καύσης μειώνεται. Η φωτιά τελικά θα σβήσει, αφήνοντας πίσω μία μάζα από πυρακτωμένα κάρβουνα, που θα συνεχίσουν να καίνε, έστω και αργά, για κάποιο διάστημα, διατηρώντας υψηλές τοπικές θερμοκρασίες (Drysdale, 1999).

Γενικά η καθολική ανάφλεξη είναι η μετάβαση ανάμεσα στην ανάπτυξη της φλόγας που συνεχίζει να αναπτύσσεται και μετά τη φάση πλήρους ανάπτυξης της φλόγας. Το φαινόμενο της καθολικής ανάφλεξης είναι ορατό στον παρατηρητή, καθώς διακρίνεται ότι η φλόγα θα αλλάξει “ξαφνικά” σε μέγεθος και θα προχωρήσει σε συμμετοχή όλου του καυσίμου στο διαμέρισμα. Αν το διαμέρισμα δεν εφοδιάζεται με επαρκή στοιχειομετρικό αέρα (περίπτωση φωτιάς που εξαρτάται από τις συνθήκες αερισμού), η φωτιά θα παράγει μεγάλες φλόγες έξω από το διαμέρισμα. Μία φωτιά σε περιορισμένες συνθήκες αερισμού θα καίει κυρίως στα ανοίγματα (Σχήμα 1.17), ενώ παράλληλα σημαντικά θέματα τοξικότητας θα προκύψουν λόγω της ατελούς διαδικασίας της καύσης (Quintiere, 2006).



Σχήμα 1.17 Μετάβαση από το στάδιο ανάπτυξης της φωτιάς στο στάδιο της καθολικής ανάφλεξης εκτός του διαμερίσματος (Drysdale et al., 1999).

1.3.4.2 Χαρακτηριστικά της καθολικής ανάφλεξης

Στο σημείο αυτό παρουσιάζονται περιεκτικά τα χαρακτηριστικά του φαινομένου της καθολικής ανάφλεξης, όπως αυτό περιγράφηκε παραπάνω.

- 1) **Εξωτερική μετάδοση φλόγας:** Συμβαίνει από αυτανάφλεξη ή κατευθυνόμενη ανάφλεξη, ως αποτέλεσμα της θερμότητας δια ακτινοβολίας. Η θερμότητα υπό τη μορφή ακτινοβολίας μεταφέρεται στην οροφή μέσω των ζεστών αερίων που κινούνται ανοδικά, λόγω της μεγάλης έκτασης τους. Το κατώφλι πολλών κοινών υλικών για την κατευθυνόμενη ανάφλεξη είναι περίπου 20 kW/m^2 . Αυτή η τιμή της ροής θερμότητας, η οποία μετράται στο πάτωμα, λαμβάνεται συχνά και ως λειτουργικό κριτήριο για την καθολική ανάφλεξη και αντιστοιχεί σε θερμοκρασίες αερίου της τάξης των $500\text{-}600^\circ\text{C}$.
- 2) **Ταχεία διάδοση της φλόγας:** Η προθέρμανση δια ακτινοβολίας ενός υλικού μπορεί να προκαλέσει την αύξηση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του υλικού με αποτέλεσμα την προσέγγιση της θερμοκρασίας της κατευθυνόμενης ανάφλεξης. Αυτό προκαλεί μία μοναδικότητα στη θεωρία απλής διάδοσης της φλόγας και φυσικά σημαίνει ότι μία φλόγα προανάμιξης στο κατώτερο όριο αναφλεξιμότητας εμφανίζεται μπροστά από την επιφάνεια της φλόγας. Ως εκ τούτου, η ταχεία διάδοση της φλόγας είναι της τάξεως του 1 m/s .
- 3) **Αστάθεια της καύσης:** Ακόμα και στην περίπτωση όπου η φωτιά δεν εξαπλώνεται μακριά από το αντικείμενο που έχει αναφλεχθεί, μία ξαφνική έκρηξη της φλόγας μπορεί να διακριθεί υπό τις κατάλληλες συνθήκες. Συγκεκριμένα, η ανατροφοδότηση της θερμότητας ανάμεσα στην αντικείμενοεστία που καίγεται και στο θερμαινόμενο διαμέρισμα μπορεί να προκαλέσει μία ξαφνική μετάβαση (στάδιο καθολικής ανάφλεξης) όπου όλες οι επιφάνειες μέσα στον κλειστό χώρο φτάνουν το σημείο ανάφλεξης τους και ξεκινά η καύση τους.) από την αρχική

κατάστασΜετά το στάδιο της καθολικής ανάφλεξης η καύσης σε συνθήκες περιβάλλοντος σε μία νέα

- 3) σταθερή κατάσταση μετά τη και τη θέρμανση των επιφανειών του διαμερίσματος (στάδιο μετά την καθολικά ανάφλεξη) όπου η καύση του καυσίμου έρχεται και πάλι σε ισορροπία.
- 4) **Τροφοδοσία οξυγόνου:** Εμφανίζεται σε συνθήκες μη επαρκούς αερισμού. Η ξαφνική θραύση ενός παραθύρου ή το άνοιγμα μίας πόρτας θα επιτρέψει σε καθαρό οξυγόνο να εισέρθει στο χώρο. Καθώς αυτό αναμιγνύεται με τα ζεστά αέρια που εμφανίζουν περίσσεια καυσίμου, παρατηρείται ανάφλεξη αυτών των αερίων. Το φαινόμενο αυτό ενδέχεται να συμβεί τόσο γρήγορα που να παρουσιαστεί μία σημαντική αύξηση της πίεσης, με αποτέλεσμα να προκαλέσει την κατάρρευση τοίχων και παράθυρων.
- 5) **Υπερχείλιση:** Αυτό είναι ένα φαινόμενο που συμβαίνει όταν το νερό ψεκάζεται σε ένα λιγότερο πυκνό υγρό με μία θερμοκρασία βρασμού υψηλότερη από αυτήν του νερού. Έτσι, σταγονίδια νερού μεταβαίνουν σε στιγμιαίο ατμό, η αύξηση του οποίου είναι πιθανό να προκαλέσει ψεκασμό του καυσίμου. Η αύξηση της προστιθέμενης περιοχής του υγρού καυσίμου που ψεκάζεται μπορεί να δημιουργήσει τεράστια αύξηση της ισχύος της φωτιάς. Ακόμα κι αν αυτό δεν συμβαίνει στην επιφάνεια, η συλλογή του βαρύτερου νερού στο κάτω μέρος της κηλίδας καυσίμου μπορεί να προκαλέσει ταχύ βρασμό, καθώς το υγρό καύσιμο υποχωρεί προς τον πυθμένα της κηλίδας(Quintiere et al., 2006).

1.3.4.3 Μετά την καθολική ανάφλεξη της φωτιάς σε διαμέρισμα

Μετά την καθολική ανάφλεξη, οι εκτιθέμενες επιφάνειες όλων των εύφλεκτων αντικειμένων στο δωμάτιο προέλευσης της θα αρχίσουν να καίγονται κι ο ρυθμός εκλυόμενης ενέργειας θα λάβει τη μέγιστη τιμή του. Χαρακτηριστικά, κατά το στάδιο αυτό η θερμοκρασία μπορεί να φτάσει τους 1100 °C, αλλά ενδέχεται να ληφθούν πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Οι υψηλές θερμοκρασίες διατηρούνται μέχρι ο ρυθμός παραγωγής των εύφλεκτων πτητικών να αρχίσει να μειώνεται σαν αποτέλεσμα της κατανάλωσης του καυσίμου. Κατά τη διάρκεια της περιόδου της πλήρους αναπτυγμένης φλόγας τα στοιχεία του κτιρίου μπορούν να φτάσουν θερμοκρασίες στις οποίες μπορεί να αστοχήσουν. Η αστοχία ενός δομικού στοιχείου μπορεί να προκαλέσει τοπική ή γενική κατάρρευση της κατασκευής του κτιρίου. Ο όρος επίσης αφορά τα όρια του διαμερίσματος, που μπορεί ή όχι να φέρουν φορτίο, αλλά αστοχούν επιτρέποντας τη διάδοση της φωτιάς σε διπλανούς χώρους (Drysdale et al., 1999).

Η φάση της πλήρους ανάπτυξης της φωτιάς επηρεάζεται από:

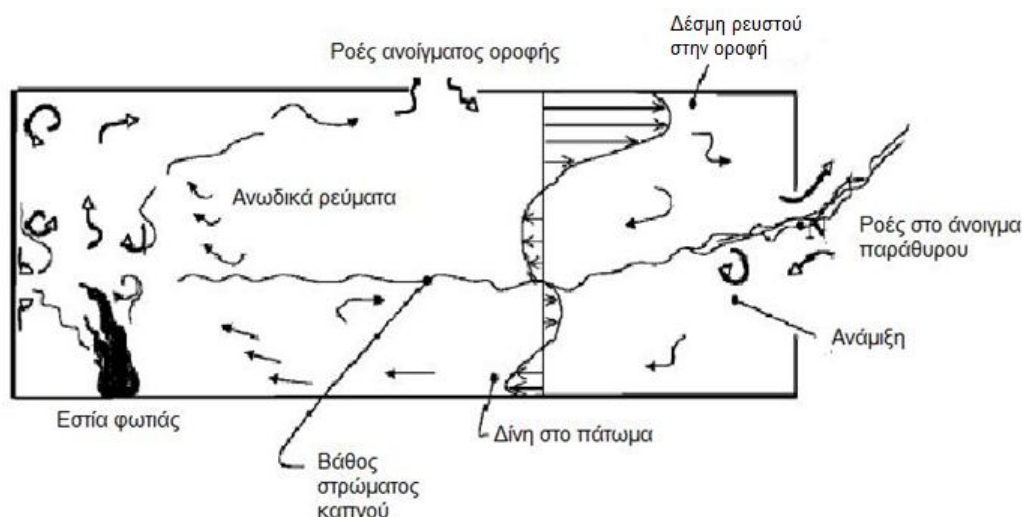
- το μέγεθος και το σχήμα του κλειστού χώρου/διαμερίσματος (κατά περίπτωση),
- την ποσότητα, κατανομή και τύπο του καυσίμου,
- τις συνθήκες αερισμού του χώρου,
- τη μορφή και τον τύπο των δομικών υλικών συμπεριλαμβάνοντας την οροφή, τους τοίχους και το πάτωμα του διαμερίσματος.

Σε γενικές γραμμές, η σημασία της κάθε φάσης της φωτιάς σε ένα διαμέρισμα εξαρτάται από τις συνιστώσες του συστήματος πυρασφάλειας που έχουν ληφθεί υπόψη. Για ανιχνευτές ή

ψεκαστήρες, η φάση της ανάπτυξης της φωτιάς επηρεάζει σημαντικά το χρόνο αντίδρασης τους. Ακόμη η φάση της πλήρους ανάπτυξης της φωτιάς και η φάση υποβάθμισης της είναι σημαντικές παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη για την ακεραιότητα των δομικών κατασκευών (Quintiere et al., 2006).

1.4 Δυναμική των ρευστών - Γενικό πρότυπο της ροής της φωτιάς μέσα σε διαμέρισμα

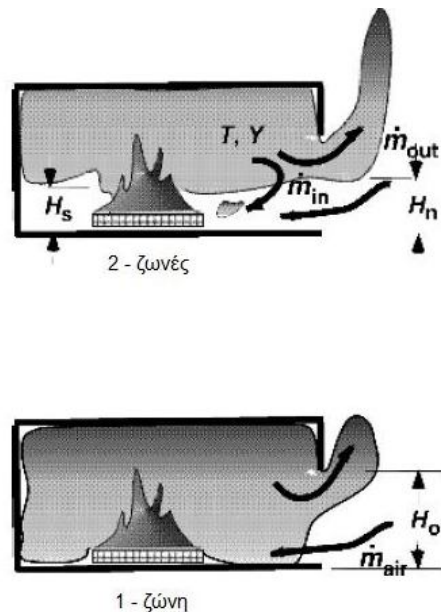
Η τάση της διαστρωμάτωσης του πεδίου της ροής, λόγω της θερμικής επαγωγικής άνωσης, είναι υπεύθυνη για το μεγαλύτερο κομμάτι του πεδίου της ροής μέσα στο διαμέρισμα. Το Σχήμα 1.18 δείχνει ένα τυπικό πρότυπο ροής σε διαμέρισμα υπό συνθήκες φωτιάς. Η τύρβη και η διαφοράς πίεσης προκαλούν τη ανάμιξη των στοιχείων (κατά την είσοδο του αέρα) μέσα στο πλούμιο της φωτιάς.



Σχήμα 1.18 Μοτίβο ροής στην περίπτωση τυπικής φωτιάς σε διαμέρισμα (Quintiere et al., 2006).

Η ορμή και η θερμική άνωση προκαλούν μία σχετικά λεπτή δέσμη ρευστού (δίνη) στην οροφή. Το πάχος του ρευστού είναι περίπου 1/10 του ύψους του δωματίου. Επίσης αντίστοιχη ροή εμφανίζεται στο κρύο πάτωμα. Ανάμεσα σε αυτές τις δέσμες, δημιουργούνται ροές ανακυκλοφορίας, προκαλώντας ένα πρότυπο ροής τεσσάρων στρωμάτων. Λόγω του θερμικού διαχωρισμού σε στρώματα, στο εσωτερικό του διαμερίσματος περίπου στο μέσο σημείο του συστήματος των τεσσάρων στρωμάτων, σχηματίζεται ένα αρκετά εμφανές όριο (στρώμα διεπαφής) ανάμεσα στο σχετικά θερμότερο ανώτερο στρώμα και στο ψυχρότερο κατώτερο στρώμα.

Στο Σχήμα 1.19 παρατηρούνται δύο ξεχωριστές περιπτώσεις. Στην πρώτη απεικονίζεται ένα μοντέλο δύο ζωνών, στο οποίο παρουσιάζεται ένα θερμότερο ανώτερο και ένα ψυχρότερο κατώτερο ομοιογενές στρώμα, φαινόμενο που παρατηρείται κατά την ανάπτυξη της φωτιάς. Η δεύτερη περίπτωση, χαρακτηρίζει μία μεγάλη πλήρως αναπτυγμένη φωτιά σαν μία ενιαία ομογενής ζώνη (Quintiere et al., 2006).



Σχήμα 1.19 Περιπτώσεις για μοντέλα μίας ή δύο ζωνών (Quintiere et al., 2006).

1.5 Φωτιές ελεγχόμενες από τις συνθήκες αερισμού ή από το καύσιμο.

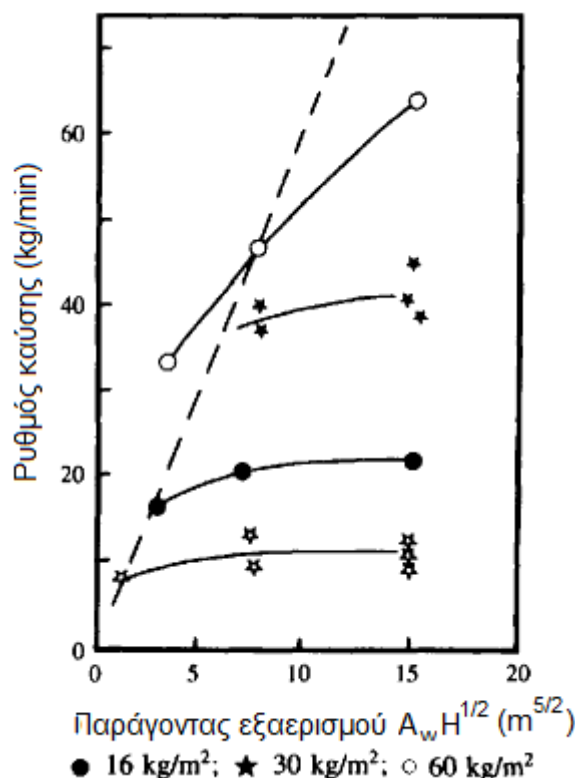
1.5.1 Εξαναγκασμένες συνθήκες αερισμού

Η επίδραση της εξαναγκασμένης ροής του αέρα σε συνθήκες φωτιάς και εξάπλωσης καπνού λόγω μηχανικών ή φυσικών δυνάμεων ήταν πάντα ένα σημαντικό ζήτημα για φωτιές σε μεγάλα κτίρια. Οι επιδράσεις του ανέμου και η επακόλουθη κατανομή της πίεσης γύρω από ένα μεγάλο κτίριο είναι ένα βασικό στοιχείο που λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό κατασκευής. Η μετακίνηση του καπνού μέσα σε ένα κτίριο λόγω του μηχανικού συστήματος αερισμού έχει προσομοιωθεί από δικτυακά μοντέλα που αντιμετωπίζουν τον όγκο του διαμερίσματος ως ενιαίο και λαμβάνουν υπόψη τις απώλειες πίεσης λόγω ανοιγμάτων και τριβής των αγωγών (Klote και Cooper, 1989). Σε ένα μοντέλο ζώνης δυο στρωμάτων, για τη δημιουργία ενός συνδέσμου, είναι απαραίτητο να συμπεριληφθούν όλα τα χαρακτηριστικά της ροής πίεσης των συσκευών κλιματισμού και στις δύο κατευθύνσεις (DiNenno et al., 2002) (DiNenno, 2002)..

Οι Thomas και Heselden το 1972 έδωσαν μία συμβατική ερμηνεία για το ρυθμό καύσης. Ο ρυθμός καύσης για ένα συγκεκριμένο εύρος ελέγχεται από το ρυθμό στον οποίο ο αέρας μπορεί να

κυκλοφορεί μέσα στο διαμέρισμα. Τέτοια φωτιά είναι η φωτιά ελεγχόμενη από τις συνθήκες αερισμού. Ωστόσο, αν το άνοιγμα του αερισμού διευρυνθεί, τότε θα ξεπεράσει την κατάσταση πέραν της οποίας ο ρυθμός καύσης γίνεται ανεξάρτητος του μεγέθους του ανοίγματος και καθορίζεται πλέον από το εμβαδόν της επιφάνειας και τα χαρακτηριστικά της καύσης του καυσίμου. Πράγματι βρέθηκε ότι η μετάβαση από την φωτιά ελεγχόμενη από τις συνθήκες αερισμού στη φωτιά ελεγχόμενη από την διαθεσιμότητα του καυσίμου εξαρτάται πρωταρχικά από το εμβαδόν της επιφάνειας του εύφλεκτου υλικού: αυτό παρατηρήθηκε από τους Gross και Robertson ((1965)), δόθηκε έμφαση από τους Thomas et al., 1967, Bishop et al., 1993).

Στο Σχήμα 1.20 παρατηρείται, για την περίπτωση φωτιάς που εξαρτάται από τις συνθήκες αερισμού, η αύξηση του ρυθμού καύσης (kg/min) σε σχέση με τον παράγοντα αερισμού, για μεγάλα ανοίγματα αερισμού. Σημειώνεται ότι A_w και H είναι το εμβαδόν της επιφάνειας του ανοίγματος (m^2) και το ύψος του ανοίγματος αερισμού αντίστοιχα. Δοκιμές έγιναν για διαφορετικά πυροφορτία (καύσιμο: σωροί από ορθογωνικά διατεταγμένες ξύλινες ράβδους) για φορτία 16, 30 και 60kg/m² (Thomas et al., 1967, Drysdale et al., 1999).



Σχήμα 1.20 Ρυθμός καύσης συναρτήσει του παράγοντα αερισμού για μεγάλα ανοίγματα και διαφορετικά πυροφορτία (Thomas et al., 1967) (Drysdale et al., 1999.).

Η ενέργεια που παράγεται από τη φωτιά έχει βασική επίδραση στη θερμοκρασία της φλόγας μέσα στο διαμέρισμα. Πολλές έρευνες έχουν διεξαχθεί για την πρόβλεψη του ρυθμού έκλυσης ενέργειας καυσίμων κάτω από διάφορες συνθήκες.

Σε φωτιές ελεγχόμενες από τη διαθεσιμότητα καυσίμου υπάρχει επαρκής αέρας για να αντιδράσει όλο το καύσιμο μέσα στο διαμέρισμα, ενώ σε φωτιές ελεγχόμενες από τις συνθήκες αερισμού δεν υπάρχει και έτσι κάποια από τα προϊόντα της πυρόλυσης εξέρχονται από το χώρο του διαμερίσματος. Σημειώνεται ότι είναι πιθανό τα προϊόντα αυτά να αντιδράσουν έξω από το συγκεκριμένο χώρο, με το διαθέσιμο οξυγόνο που υπάρχει στον ατμοσφαιρικό αέρα. Για τον υπολογισμό των παραγόμενων θερμικών φορτίων σε φωτιές μέσα σε διαμέρισμα, πρωταρχικό ρόλο έχει η έκλυση ενέργειας μέσα σε αυτό.

Ο ρυθμός πυρόλυσης του καυσίμου εξαρτάται από τον τύπο του καυσίμου, τη γεωμετρία του, και το εσωτερικό περιβάλλον. Έτσι, η ενέργεια που παράγεται στο διαμέρισμα από τα προϊόντα της πυρόλυσης που καίγονται εξαρτάται από τις συνθήκες (θερμοκρασία, συγκέντρωση οξυγόνου, κλπ.) μέσα σε αυτό.

Για τις περισσότερες φωτιές, το ποσό της ενέργειας που εκλύεται από τη φωτιά και διαφεύγει μέσω του πλουμίου της φωτιάς με τη μορφή ακτινοβολίας, ανέρχεται σε 35%, ενώ το υπόλοιπο ποσό που εκλύεται, κατά ένα μεγάλο μέρος του, μεταφέρεται στο ανώτερο στρώμα μέσω του πλουμίου της φωτιάς. Καθώς το πλούμιο κινείται ανοδικά, εισέρχεται αέρας από το κατώτερο στρώμα, μειώνοντας τη θερμοκρασία του και αυξάνοντας το ρυθμό απώλειας μάζας του καυσίμου (DiNenno, 2002).

Είναι σημαντικό να μπορούμε να διακρίνουμε αυτά τα δύο συστήματα: τις φωτιές ελεγχόμενες από τις συνθήκες αερισμού και τις φωτιές ελεγχόμενες από το καύσιμο. Οι τελευταίες είναι γενικά μία λιγότερο σοβαρή περίπτωση σε σχέση με τη φωτιά όπου ο αερισμός δεν είναι επαρκής. Στο σύστημα αυτό, η περίσσεια αέρα που εισέρχεται στο διαμέρισμα έχει ως αποτέλεσμα το μετριασμό της θερμοκρασίας. Το σημείο διασταύρωσης ανάμεσα στα δύο συστήματα (φωτιές ελεγχόμενες από τις συνθήκες αερισμού και από τη διαθεσιμότητα καυσίμου) εξαρτάται από τη σχέση ανάμεσα στο \dot{m} , τον ρυθμό εξαέρωσης του καυσίμου (kg/s) δηλαδή τον ρυθμό καύσης και το ρυθμό εισροής αέρα (kg/s). Ιδανικά, σύμφωνα με διαθέσιμη βιβλιογραφία (Thomas et al., 1967, Harmathy, 1978), αν ισχύει:

$$\dot{m} > \dot{m}_{air} / r \quad (\text{kg/s}) \quad (1.9),$$

όπου r είναι η στοιχειομετρική αναλογία καυσίμου/αέρα, τότε η φωτιά θεωρείται ελεγχόμενη από τις συνθήκες αερισμού.

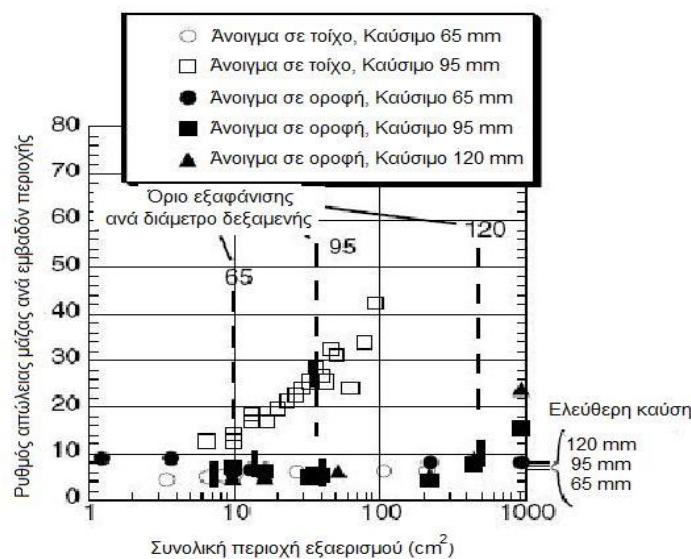
Παρόμοια, η φωτιά ελέγχεται από τη διαθεσιμότητα του καυσίμου αν ισχύει

$$\dot{m} < \dot{m}_{air} / r \quad (\text{kg/s}) \quad (1.10),$$

αν και αυτός ο ισχυρισμός υπονοεί ότι ο ρυθμός της αντίδρασης ανάμεσα στα πτητικά του καυσίμου και στο οξυγόνο του αέρα είναι άπειρα γρήγορος. Ο ρυθμός στον οποίο τα πτητικά οξειδώνονται είναι πεπερασμένος και χρειάζεται μία σημαντική χρονική περίοδο για να καούν, ακόμα κι όταν αναμιγνύονται με επαρκή ποσότητα αέρα. Στην πραγματικότητα, τα αέρια αναδύονται από το άνοιγμα ενώ καίγονται ακόμα. Από την άλλη μεριά, αν ισχύει $\dot{m} > \dot{m}_{air} / r$, περίσσεια ατμών ρέουν από το άνοιγμα και καίγονται ενώ παράλληλα αναμιγνύονται με αέρα έξω από διαμέρισμα (Drysdale, 1999).

1.5.2 Συμπεριφορά φωτιάς ελεγχόμενη από τις συνθήκες αερισμού

Μέσα από μία σειρά πειραματικών δοκιμών (Naruse et al., 2004) παρατηρήθηκε ότι η μείωση του ανοίγματος σε ένα κλειστό χώρο ενισχύει τη μίξη μεταξύ των δύο στρωμάτων αέρα (θερμότερο και ψυχρότερο στρώμα) και μειώνει τη διαθεσιμότητα του οξυγόνου που τροφοδοτεί τη φωτιά. Στο Σχήμα 1.21 παρατηρείται η επίδραση του αερισμού σε φωτιά σε κηλίδα επτανίου σε ένα πείραμα μικρής κλίμακας. Τα πειράματα, που διεξήχθησαν για διαφορετικές διαμέτρους κηλίδας, αφορούν τις ακόλουθες περιπτώσεις: 1) Υπάρχει μόνο ένα άνοιγμα στην οροφή 2) Υπάρχουν δύο ανοίγματα ίδιων διαστάσεων σε τοίχο (ανώτερο και κατώτερο άνοιγμα σε τοίχο-περίπτωση φωτιάς ελεγχόμενης από τις συνθήκες αερισμού). Παρατηρήθηκε ότι για περιοχές ανοιγμάτων που βρίσκονται κάτω από το ενδεικνυόμενο όριο εξαφάνισης της φλόγας, η φλόγα εξαφανίζεται, ενώ σημειώθηκε ότι για διάμετρο κηλίδας 95 mm, ο ρυθμός απώλειας μάζας που συνδέεται με το άνοιγμα στην οροφή ήταν πολύ χαμηλότερος από την περίπτωση του ανοίγματος σε τοίχο.



Σχήμα 1.21 Καύση ελεγχόμενη από τις συνθήκες αερισμού (Naruse et al., 2004)

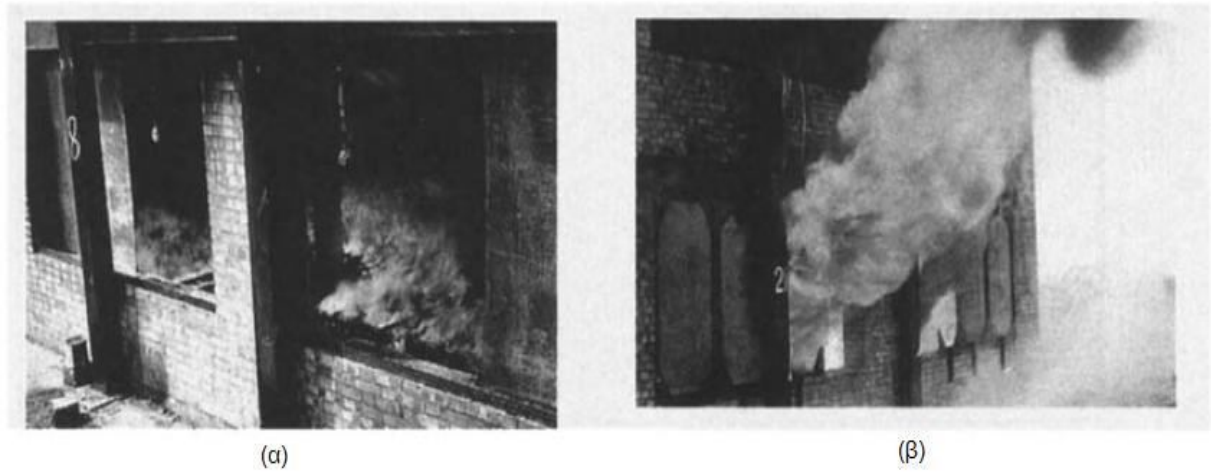
1.5.3 Συμπεριφορά φωτιάς ελεγχόμενη από τη διαθεσιμότητα καυσίμου και τις συνθήκες αερισμού κατά την περίοδο πλήρους ανάπτυξης της φλόγας.

Στην εργασία (Butcher et al., 1968) μελετήθηκε η συμπεριφορά της φωτιάς για δύο περιπτώσεις σε δύο όμοια διαμερίσματα, όπου το ένα περιείχε διπλάσια ποσότητα καυσίμου (ξύλου) από το άλλο.

Περίπτωση (α) Σύστημα για φωτιά ελεγχόμενη από τη διαθεσιμότητα καυσίμου. Το καύσιμο ήταν σε μορφή σωρών ορθογώνια διατεταγμένων ξύλινων ράβδων (15 kg/m²), με επιφάνεια A_f=55m². Δεν παρατηρήθηκε εξωτερική φλόγα.

Περίπτωση (β) Σύστημα για φωτιά ελεγχόμενη από τις συνθήκες αερισμού. Καύσιμο ήταν ένα ινώδες (από ξύλο) μονωτικό υλικό (7,5 kg/m²), το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως επένδυση στους τοίχους και στην οροφή, με επιφάνεια A_f=55m². Σημειώθηκε ότι λόγω της μεγάλης εκτιθέμενης επιφάνειας του καυσίμου προκλήθηκε καθολική ανάφλεξη με φλόγες οι οποίες προβάλλονταν έξω

από το παράθυρο. Στην Σχήμα 1.22 φαίνονται, κατά την περίοδο πλήρους ανάπτυξης της φλόγας, οι διαφορές στη συμπεριφορά της φωτιάς ανάμεσα στις δύο περιπτώσεις.



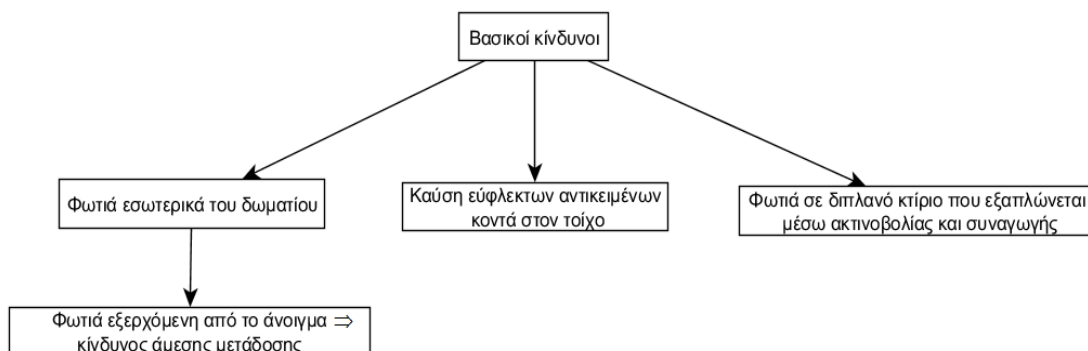
Σχήμα 1.22 Συμπεριφορά της φωτιάς για περίπτωση (α) και (β) (Butcher et al., 1968).

Κεφάλαιο 2^ο

2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση για πειράματα φωτιάς σε διαμερίσματα

2.1 Φωτιές σε κτίρια

Τα τελευταία χρόνια η κατασκευή μεγάλων κτιρίων και ειδικά πολυκατοικιών συνεχώς αυξάνεται. Σε περίπτωση φωτιάς, υπάρχει κίνδυνος εξάπλωσης της σε γειτονικά διαμερίσματα και κτίρια είτε λόγω της ανάφλεξης των εύφλεκτων υλικών μέσα στα δωμάτια των κτιρίων είτε λόγω της ανάφλεξης των εκτεθειμένων εύφλεκτων επιφανειών στην πρόσοψη αυτών (Σχήμα 2.1).



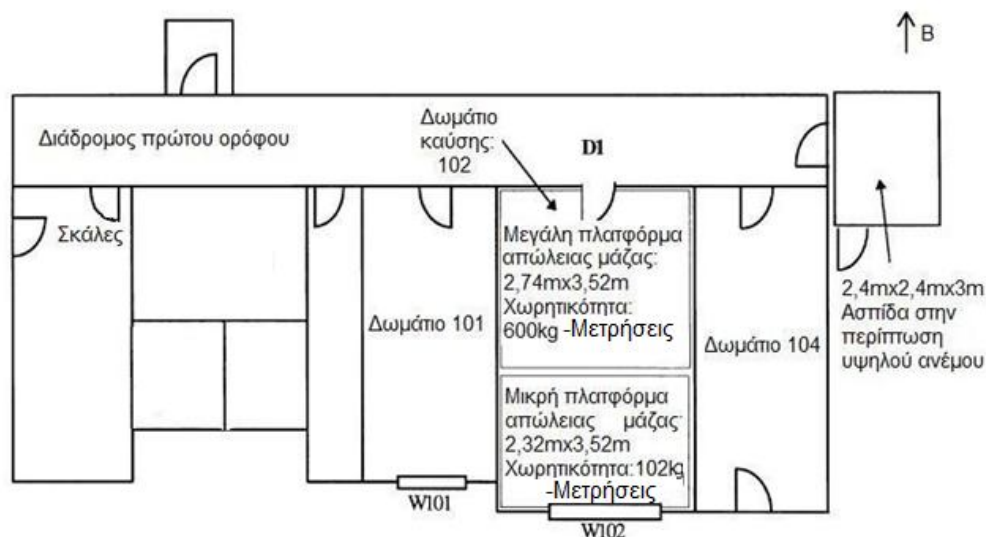
Σχήμα 2.1 Βασικοί κίνδυνοι σε φωτιές διαμερισμάτων

Η λήψη όλων των απαραίτητων μέτρων ασφαλείας για την έγκαιρη πρόληψη, απόσβεση της φωτιάς, καθώς και την ασφαλή εκκένωση των ανθρώπων είναι ένα πολύ σημαντικό ζήτημα. Για αυτό το λόγο, καθίσταται αναγκαία η διενέργεια πειραμάτων σε διαμερίσματα ή σε μοντέλα διαμερισμάτων με στόχο την κατανόηση και μελέτη των εμπλεκόμενων φαινομένων. Να σημειωθεί ότι οι παράγοντες που επηρεάζουν την εξέλιξη των πυρκαγιών σε κτίρια αφορούν κυρίως τις συνθήκες αερισμού (ύπαρξη ανοιγμάτων), το πυροφορτίο, τη γεωμετρία του κτιρίου, τις συνθήκες περιβάλλοντος και τις ιδιότητες των υλικών που λαμβάνουν μέρος στην καύση. Συγκεκριμένα, η επίδραση των συνθηκών αερισμού και των περιβαλλοντικών συνθηκών σε φωτιές σε διαμερίσματα με ανοίγματα υπήρξε αντικείμενο πολλών ερευνών και πλήθος πειραμάτων έχουν διεξαχθεί για τη βελτιστοποίηση των συστημάτων πυρασφάλειας και πυρανίχνευσης.

2.2 Πειράματα φωτιάς σε διαμερίσματα

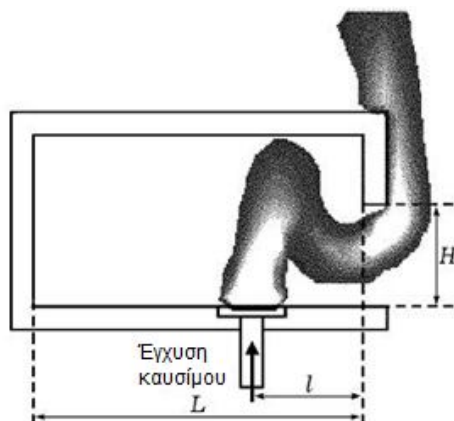
Το 1997 μελετήθηκε, εκτεταμένα για πρώτη φορά, η επίδραση του αερισμού, κατά τη διάρκεια της καθολικής ανάφλεξης, (S. Klorovic and O.F. Turan, 1998). Οι περιπτώσεις αερισμού που

μελετήθηκαν ήταν εξαναγκασμένης και μη εξαναγκασμένης ροής. Οι συνθήκες αυτές αντιστοιχούσαν σε ανοιχτή πόρτα (D1) και παράθυρο (W102) (περίπτωση εξαναγκασμένης ροής) στο δωμάτιο καύσης και σε κλειστή πόρτα (D1) και ανοιχτό παράθυρο (W102) (περίπτωση μη εξαναγκασμένης ροής), αντίστοιχα (Σχήμα 2.2). Κατά τη διάρκεια δυο σειρών πειραμάτων μεγάλης κλίμακας προέκυψαν πολύτιμα συμπεράσματα, σχετικά με την περίοδο ύπαρξης σταθερούς εξωτερικής φλόγας από το άνοιγμα καθώς και για την πιθανότητα έναρξης μίας δεύτερης εστίας φωτιάς, στο εξωτερικό του κτιρίου ή σε κάποιους από τους υπόλοιπους ορόφους της εγκατάστασης. Τα πειράματα επαναλήφθηκαν με διαφορετικά είδη αερισμού και πυροφορτίου προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση τους στην εξέλιξη του φαινομένου.



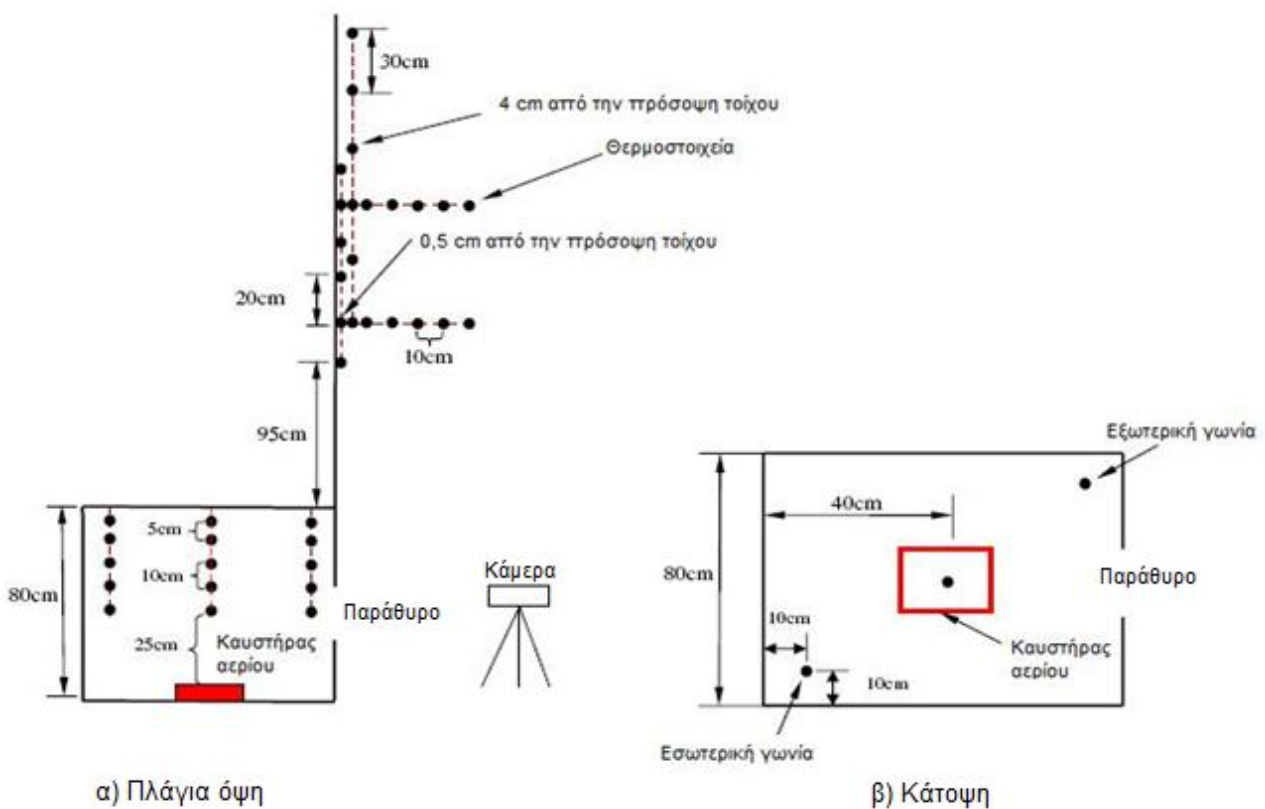
Σχήμα 2.2 Κάτοψη του δωματίου καύσης στον πρώτο όροφο του κτιρίου διεξαγωγής πειραμάτων φωτιάς του Πανεπιστημίου της Βικτόρια ΗΠΑ (Klorovic and O.F. Turan, 1998).

Στη εργασία (Snegirev et al., 2003), εξετάστηκε υπολογιστικά και πειραματικά η ανάπτυξη της τυρβώδους φλόγας διάχυσης εξερχόμενη από ένα διαμερίσμα. Πιο αναλυτικά, σε έναν εργαστηριακό θάλαμο (Σχήμα 2.3), ειδικά σχεδιασμένο για προσομοίωση φωτιάς σε υπό κλίμακα μοντέλο διαμερίσματος, παρατηρήθηκε η προβολή της φλόγας μέσα από το άνοιγμα υπό συνθήκες μη εξαναγκασμένης ροής. Οι πειραματικές δοκιμές διεξήχθησαν για διαφορετικό ύψος και πλάτος ανοίγματος και για διαφορετικές θέσεις της εστίας της φωτιάς σε σχέση με το άνοιγμα.



Σχήμα 2.3 Εγκάρσια τομή του πειραματικού θαλάμου (Snegirev et al., 2003).

Δύο πιο σύγχρονες μελέτες που διεξήχθησαν σε μοντέλα δημοσιεύτηκαν σχετικά πρόσφατα, (Tang et al., 2011) και (Hu et al., 2012). Η πρώτη είχε ως αντικείμενο την μελέτη της ανάπτυξης του ύψους της φλόγας και του θερμοκρασιακού προφίλ ανοδικού πλουμίου εξερχόμενο από παράθυρο διαμερίσματος (F.Tang et al., 2011). Στο Σχήμα 2.4 φαίνεται αναλυτικά η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε. Τα πειράματα διεξήχθησαν σε δωμάτιο διαστάσεων (0,8m x 0,8m x 0,8m) σε συνθήκες φωτιάς μη επαρκούς αερισμού, χρησιμοποιώντας ως καύσιμο προπάνιο. Οι πειραματικές μετρήσεις από τις σειρές θερμοστοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στα επέτρεψαν μία τεκμηριωμένη επιστημονικά μοντελοποίηση των θερμοκρασιών τόσο μέσα στον κλειστό χώρο όσο και στην πρόσοψη τοίχου ακριβώς πάνω από το άνοιγμα του παραθύρου. Επιπλέον πραγματοποιήθηκε παραμετρική μελέτη για διαφορετικές γεωμετρίες ανοίγματος παραθύρου και χρησιμοποιήθηκαν για τον καθορισμό του ύψους της φλόγας που αναδύεται από το άνοιγμα.

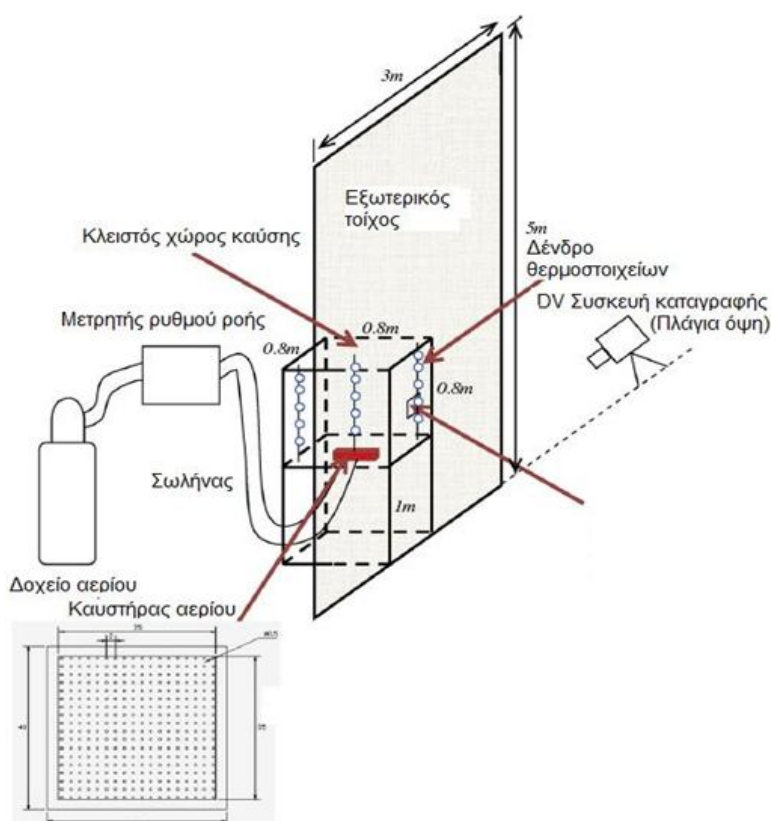


Σχήμα 2.4 Πλάγια όψη και κάτοψη της πειραματικής διάταξης (Tang et al., 2011).

Παρομοίως και στη δεύτερη πειραματική μελέτη (Hu et al., 2012), αντικείμενο μελέτης αποτέλεσαν οι φωτιές σε κλειστούς χώρους. Σημειώνεται ότι οι τελευταίες διακρίνονται σε δύο φάσεις: 1) την εσωτερική καύση όπου δεν υπάρχει εξωτερική φλόγα υπό καθεστώς περίσσειας αέρα και 2) τη φάση της εξωτερικής καύσης με φλόγες που εξέρχονται σταθερά από το παράθυρο υπό συνθήκες μη επαρκούς αερισμού. Σε αυτή τη μελέτη, οι ερευνητές προσπάθησαν να αναλύσουν το μεταβατικό στάδιο της φωτιάς, στο οποίο ασυνεχείς φλόγες εξέρχονται από το παράθυρο με συγκεκριμένη πιθανότητα, κάνοντας δοκιμές με διαφορετικούς ρυθμούς τροφοδότησης αερίου καυσίμου (υγροποιημένου αερίου πετρελαίου) και με διαφορετικές γεωμετρίες ανοίγματος του παραθύρου. Η

εγκατάσταση αυτού του πειράματος που διεξήχθη σε μοντέλο υπό-κλίμακα απεικονίζεται στο Σχήμα 2.5.

Απόρροια αυτής της μελέτης ήταν η δημιουργία ενός μοντέλου όπου λαμβάνοντας ως δεδομένα κάποιες παραμέτρους υπολογίζεται η πιθανότητα εμφάνισης φλογών έξω από τον κλειστό χώρο. Το μοντέλο αυτό βασίζεται στη φυσική παρατήρηση ότι οι ασυνεχείς φλόγες που εξέρχονται οφείλονται σε δύο παράγοντες: 1) στην πιθανότητα ανάφλεξης και 2) στις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις της ανοδικής τυρβώδους φλόγας των αερίων που βγαίνει έξω από το άνοιγμα. Οι δύο αυτοί παράγοντες επηρεάζονται από την ποσότητα της περίσσειας αέρα και τη θερμοκρασία που επικρατεί μέσα στο διαμέρισμα. Σημειώνεται ότι η πιθανότητα αυτή βρέθηκε να αυξάνεται με την αύξηση της ανατροφοδότησης καυσίμου ή του ρυθμού έκλυσης θερμότητας.

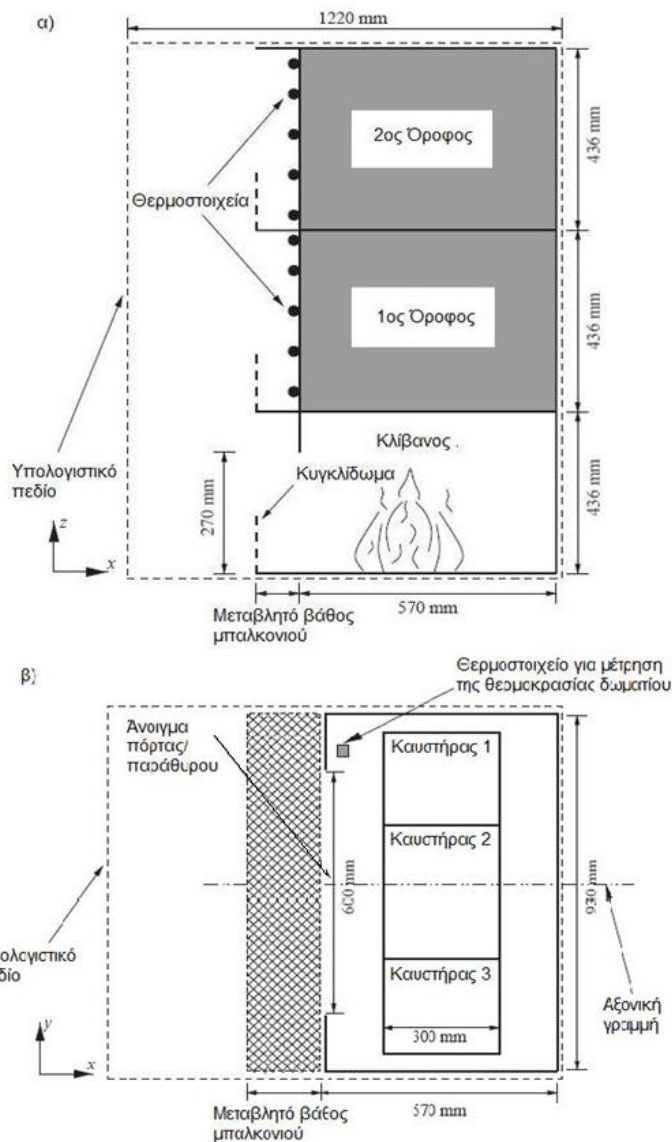


Σχήμα 2.5 Απεικόνιση της πειραματικής διάταξης (Tang et al., 2011).

Η φωτιά που εξέρχεται από παράθυρα είναι ένα ζήτημα που έχει λάβει μεγάλες διαστάσεις και έχει αποτελέσει αντικείμενο πολλών πειραματικών μελετών, καθώς είναι από τις πιο επικίνδυνες και πιθανές αιτίες εξάπλωσης φωτιάς από δωμάτιο σε δωμάτιο και από κτίριο σε κτίριο. Για το συγκεκριμένο φαινόμενο έχουν διατυπωθεί πολλά μοντέλα πρόβλεψης διάδοσης της φλόγας. Μία προσέγγιση για την πρόβλεψη προβολής της φλόγας που εξέρχεται από παράθυρο, στην περίπτωση φωτιάς σε διαμέρισμα, διατυπώθηκε στη μελέτη (Himoto et al., 2009), λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της ύπαρξης των τοίχων πάνω από το άνοιγμα. Το μοντέλο πρόβλεψης που διατυπώθηκε βασίστηκε σε μετρήσεις πειραμάτων φωτιάς σε υπό-κλίμακα μοντέλα και υπολογίζει προσεγγιστικά πως η φωτιά θα εξαπλωθεί στην επιφάνεια του εξωτερικού τοίχου.

Το 2003 ολοκληρώθηκε μία υπολογιστική μελέτη (Mammoser, 2004), η οποία εξετάζει τη μείωση της κάθετης διάδοσης της φλόγας εξαιτίας της παρουσίας μπαλκονιού πάνω από το άνοιγμα που

εξέρχεται η φλόγα στα διαμερίσματα. Πρωταρχικός στόχος της μελέτης αυτής ήταν να ερευνηθούν φωτιές που εξέρχονται από άνοιγμα πολυώροφου κτιρίου, έτσι ώστε να προσδιοριστεί με ποιο τρόπο το βάθος ενός μπαλκονιού επηρεάζει τη ροή των θερμών αερίων. Χρησιμοποιήθηκε τρισδιάστατο μοντέλο διάδοσης της φλόγας για ένα συγκρότημα πολυώροφων διαμερισμάτων. Οι προσομοιώσεις έγιναν χρησιμοποιώντας τον κώδικα FDS. Προσδιορίστηκε ότι, για την περίπτωση των πυκνών πλεγμάτων, η χρήση μοντέλων υπό-κλίμακα είχε αρκετά καλή προσέγγιση σε σχέση με τις κανονικές τους διαστάσεις και δεν απαιτούσε πρόσθετη σπατάλη ωρών CPU. Οι υπολογιστικές προσομοιώσεις βασίστηκαν σε πειραματικά αποτελέσματα μίας προηγούμενης μελέτης (Suzuki et al., 2001). Στα πειράματα της μελέτης αυτής χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο κλίμακας 1/7 για να αναπαρασταθεί ένα πολυώροφο συγκρότημα διαμερισμάτων και έγιναν δοκιμές για διάφορα βάθη μπαλκονιών. Στο Σχήμα 2.6 φαίνεται ενδεικτικά η γεωμετρία του μοντέλου του πολυώροφου κτιρίου που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις. Μέσα από την έρευνα αυτή παρατηρήθηκε ότι αύξηση του βάθους του μπαλκονιού καθυστερεί την κάθετη διάδοση της φλόγας. Ένας ακόμη στόχος αυτής της έρευνας ήταν η εύρεση μίας βέλτιστης γεωμετρίας μπαλκονιού (βάθος και κιγκλίδωμα) για την αποτελεσματικότερη εμπόδιση της κάθετης διάδοσης της φωτιάς. Αλλάζοντας τη γεωμετρία του μπαλκονιού παρατηρήθηκαν σημαντικές επιδράσεις στην κάθετη κίνηση του καπνού και των αερίων.



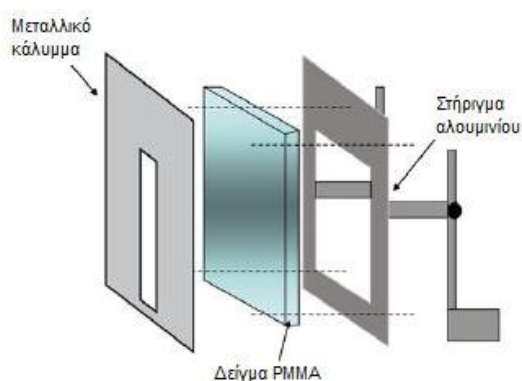
Σχήμα 2.6 Σχηματικό διάγραμμα του συγκροτήματος διαμερισμάτων α) Πλάγια όψη β) Κάτοψη (John H. Mammoser III, 2004).

Σε μία ακόμα μελέτη (Lin et al., 2009), που αφορούσε φωτιές σε διαμερίσματα, διερευνήθηκε με υπολογιστικές προσομοιώσεις η επίδραση του μεγέθους του υπολογιστικού πλέγματος στα χαρακτηριστικά της θερμικής ακτινοβολίας. Επαρκής αριθμός πειραμάτων πραγματοποιήθηκε για την αξιολόγηση των προβλεπόμενων αποτελεσμάτων, σχετικά με την επίδραση του πλέγματος στο ύψος της φλόγας και στην ροή θερμότητας μέσω ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε επτάνιο σε υγρή μορφή ως πηγή καυσίμου και δοκιμές έγιναν για διαφορετικές διαμέτρους μικρών κυκλικών κηλίδων καυσίμου της τάξεως των cm. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των πειραμάτων με τις προλέξεις των προσομοιώσεων και μέσα από μαθηματικά μοντέλα προσδιορίστηκε μία αδιάστατη μεταβλητή ($D^*/\delta x > 13$), η οποία χαρακτηρίζει την πυκνότητα του πλέγματος και προσεγγίζει σε ικανοποιητικό βαθμό τα πειραματικά αποτελέσματα. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα συμπεράσματα αυτής της έρευνας περιορίζονται σε φωτιές μικρής κλίμακας και περισσότερη υπολογιστική και πειραματική έρευνα πρέπει να πραγματοποιηθεί για φωτιές μεγαλύτερης κλίμακας.

2.3 Πειράματα φωτιάς σχετικά με τις εξωτερικές προσόψεις κτιρίων

Ένα πολύ σημαντικό φαινόμενο κατά τη διάρκεια ανάπτυξης μίας φωτιάς είναι η ανοδική διάδοση της φλόγας, η οποία συχνά παρατηρείται στις εξωτερικές προσόψεις των κτιρίων και μπορεί να είναι ταχέα και επικίνδυνη. Αξίζει να σημειωθεί ότι μεγάλος αριθμός μελετών έχουν πραγματοποιηθεί σχετικά με τους παράγοντες που ενδέχεται να επηρεάσουν και να περιορίσουν αυτό το φαινόμενο, όπως οι θερμικές ιδιότητες, τα όρια ευφλεκτότητας και το πλάτος των υλικών που χρησιμοποιούνται στις εξωτερικές προσόψεις των κτιρίων.

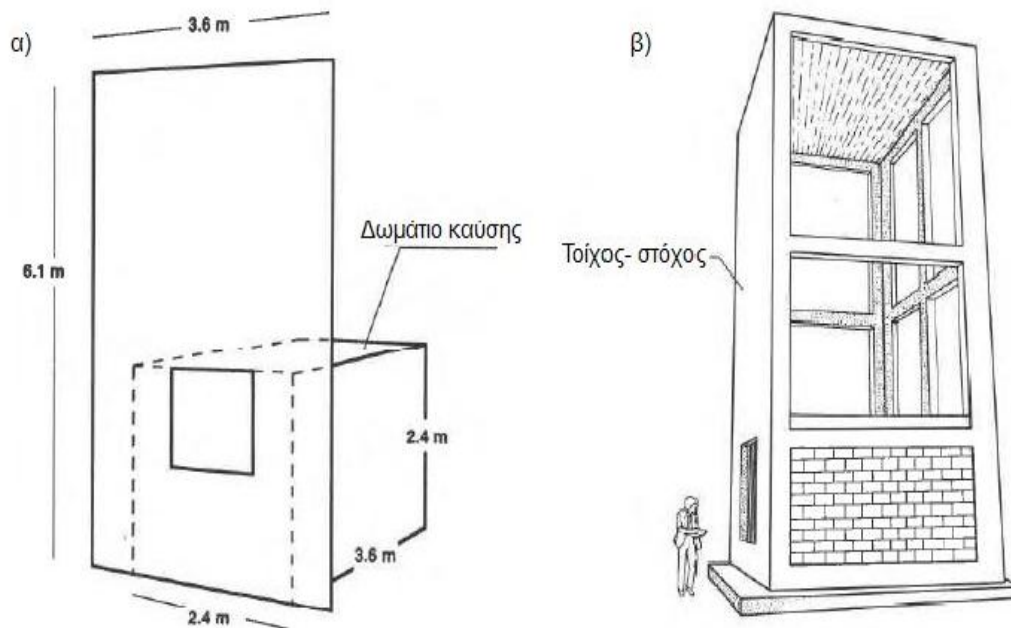
Στη μελέτη (Pizzo et al., 2009), ερευνήθηκαν οι επιδράσεις του πλάτους σε πλάκες πολυμεθακρυλικού μεθυλίου, οι οποίες χρησιμοποιούνται στην κατασκευή προσόψεων κτιρίων, κατά το πρώιμο στάδιο ανοδικής διάδοσης της φλόγας. Πιο συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε μία μέθοδος επεξεργασίας, βασισμένη στην αποσύνθεση μικρών κυμάτων κρούσεως, για την ανίχνευση της πυρόλυσης της μπροστινής πλευράς της ειδικής πλάκας. Αυτή η διαδικασία εξετάστηκε μέσω της συμβολής δύο καμερών καταγραφής των διαβρώσεων που υπέστη η επιφάνεια. Στο Σχήμα 2.8 φαίνεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε. Τα δείγματα πλακών πολυμεθακρυλικού μεθυλίου (PMMA slabs) συγκροτήθηκαν μεταξύ ενός στηρίγματος αλουμινίου και ενός μεταλλικού καλύμματος. Το μεταλλικό κάλυμμα τοποθετήθηκε για να επιτρέψει μόνο στην μπροστινή πλευρά να αναφλεχθεί και να καεί.



Σχήμα 2.8 Πειραματική διάταξη (Pizzo et al., 2009).

Κάνοντας δοκιμές για διάφορα πλάτη του δείγματος της ειδικής πλάκας παρατηρήθηκαν αλλαγές στον ρυθμό διάδοσης της φλόγας, στο ύψος της και στον ρυθμό έκλυσης θερμότητας ανά μονάδα πλάτους.

Οι φλόγες που εξέρχονται από παράθυρα τείνουν να κάμπτονται προς τα πίσω και να προσκρούουν στον τοίχο που βρίσκεται πάνω από το παράθυρο. Η πυκνότητα της ροής θερμότητας που μεταφέρεται στον τοίχο είναι αρκετή για να προκληθεί κίνδυνος για τους ορόφους που βρίσκονται υψηλότερα. Μία παλαιότερη μελέτη (Oleszkiewicz et al., 1989), που ασχολήθηκε με αυτό το φαινόμενο περιέχει δεδομένα που διεξήχθησαν σε πραγματικής κλίμακας πειράματα σχετικά με την ροή θερμότητας σε προσόψεις κτιρίων. Για τα πειράματα που διεξήχθησαν χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές εγκαταστάσεις (μία μικρότερη και μία μεγαλύτερη) και δύο διαφορετικά καύσιμα (σωροί ορθογώνια διατεταγμένων ξύλινων ράβδων και προπάνιο σε αέρια μορφή). Στο Σχήμα 2.7 φαίνονται οι δύο εγκαταστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν.



Σχήμα 2.7 α) Η μικρή και β) η μεγάλη πειραματική μονάδα (κτίριο τριών ορόφων) που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή των πειραμάτων (Oleszkiewicz et al., 1989).

Οι σωροί ορθογώνια διατεταγμένων ξύλινων ράβδων χρησιμοποιήθηκαν και στις δύο εγκαταστάσεις. Στη μικρότερη εγκατάσταση (Σχήμα 2.7, αριστερά) εξετάστηκε η μεταφορά θερμότητας στον τοίχο πάνω από το παράθυρο, μεταβάλλοντας τη γεωμετρία του ανοίγματος στην πρόσοψη του κτιρίου. Στην πιο μεγάλη εγκατάσταση (Σχήμα 2.7, δεξιά) εξετάστηκε η ολική μεταφορά θερμότητας στον συγκεκριμένο τοίχο που βρίσκεται πάνω από το άνοιγμα του παράθυρου. Στα πειράματα με προπάνιο σε αέρια μορφή, που πραγματοποιήθηκαν στη μεγαλύτερη πειραματική εγκατάσταση εξετάστηκαν οι επιπτώσεις που έχουν ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας και οι διαστάσεις του παραθύρου, στη μεταφορά θερμότητας στον εξωτερικό τοίχο πάνω από το παράθυρο. Συμπεράσματα της έρευνας προέκυψαν για ένα εύρος γεωμετρίας ανοίγματος παραθύρων. Δημιουργήθηκε ένα μαθηματικό μοντέλο για την περιγραφή της ροής θερμότητας σε προσόψεις κτιρίων. Το μοντέλο αυτό προσεγγίζει φωτιές για ένα μέσο ρυθμό καύσης υλικών και περισσότερη έρευνα χρειάζεται να γίνει για υλικά που καίγονται πιο γρήγορα, όπως πλαστικό, εύφλεκτες πλάκες κ.α.

Σε μία ακόμη μελέτη (Brehob et al., 1998), με στόχο την κατανόηση του φαινομένου διάδοσης της φωτιάς, δόθηκε έμφαση στην απόκτηση πειραματικών δεδομένων, για την ανοδική διάδοση της φωτιάς με την εφαρμογή εξωτερικής ακτινοβολίας σε συνήθη υλικά που χρησιμοποιούνται στην τοιχοποιία, όπως ξύλινη σανίδα, κοντραπλακέ, βαμβάκι, λεύκη, ινοσανίδα, χαρτόνι και πολυμεθακρυλικό μεθύλιο. Παράλληλα, διαπιστώθηκε μία χαρακτηριστική μέγιστη τιμή ανάδρασης θερμότητας των υλικών αυτών κατά τη διάρκεια εξάπλωσης της φλόγας στην επιφάνεια τους, πληροφορία που μπορεί να αξιοποιηθεί για την αξιολόγηση της ευφλεκτότητας ενός υλικού και ως δεδομένο εισόδου για απλοποιημένα μοντέλα διάδοσης της φωτιάς. Να σημειωθεί ότι στη μελέτη αυτή επιχειρήθηκε για πρώτη φορά η ανάπτυξη ενός υπολογιστικού μοντέλου διάδοσης της φωτιάς, το οποίο βασίστηκε στα πειραματικά αποτελέσματα της μελέτης.

2.4 Πειράματα φωτιάς σε αεροσήραγγες

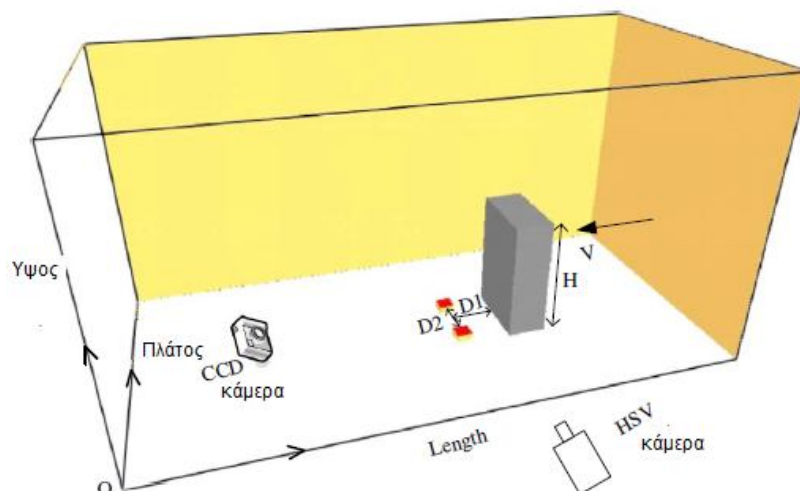
Τις τελευταίες δύο δεκαετίες, για την καλύτερη κατανόηση φωτιών σε διαμερίσματα, ένα μεγάλο ποσοστό πειραματικών δεδομένων έχει συλλεχθεί, από μελέτες σε αεροσήραγγες. Ο λόγος που πειράματα φωτιάς πραγματοποιούνται σε αεροσήραγγες είναι διότι στις τελευταίες υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου των συνθηκών αερισμού. Ενδεικτικά αναφέρονται ορισμένες περιπτώσεις μελετών. Σε μία πυκνοκατοικημένη περιοχή, αν η εστία της φωτιάς σε ένα διαμέρισμα τύχει να βρίσκεται σε πέρασμα ανάμεσα σε κτίρια όπου εμφανίζονται δίνες αέρα, πίσω από ένα ψηλό κτίριο, τότε είναι πιθανόν δημιουργηθεί στροβιλισμός του πλουμίου της φωτιάς. Αυτό το φαινόμενο όχι μόνο θα εντείνει την ένταση της αρχικής φλόγας αλλά μπορεί επίσης να προκαλέσει μία δεύτερη εστία φωτιάς στο ψηλό κτίριο, καθώς η επέκταση της φλόγας θα κλίνει αντίθετα της κατεύθυνσης του ανέμου και προς το ψηλό κτίριο, όπως παρατηρείται για παράδειγμα στο Σχήμα 2.9.



Σχήμα 2.9 Συμπεριφορά της φωτιάς πίσω από ένα ψηλό κτίριο σε πλευρικό άνεμο (Zhibin Chen et al., 2009).

Ένα πείραμα, σχετικά με τη συμπεριφορά της καύσης στην περίπτωση που περιγράφηκε παραπάνω πραγματοποιήθηκε και το 2009, τα συμπεράσματα του οποίου μπορούν να ενταχθούν στο πλαίσιο ενίσχυσης της πυροπροστασίας για ψηλά κτίρια. Η μελέτη (Chen et al., 2009), επικεντρώθηκε στις πειραματικές έρευνες σχετικά με τη συμπεριφορά της καύσης δύο γειτονικών κηλίδων φωτιάς, που βρίσκονται πίσω από ένα ψηλό κτίριο υπό-κλίμακα 1/50 σε πλάγιο άνεμο. Ο σκοπός ήταν να μελετηθεί η επίδραση της απόστασης μεταξύ των δύο εστιών φωτιάς (D2), της απόστασης μεταξύ των εστιών και του κτιρίου (D1), της ταχύτητας του ανέμου και του ύψους του υπό-κλίμακα κτιρίου (Σχήμα 2.10). Σημαντικά συμπεράσματα προέκυψαν για την επιρροή της απόστασης D1 και της D2 στο ρυθμό απώλειας μάζας, την επιρροή της D1 στις δίνες φωτιάς, την επιρροή της D2 στην πιθανή συγχώνευση των δύο φωτιών και την επίδραση της ταχύτητας του ανέμου στο ρυθμό απώλειας μάζας. Τα αποτελέσματα του πειράματος, κατά την εφαρμογή του πλευρικού ανέμου, υπέδειξαν την ύπαρξη μίας κρίσιμης ταχύτητας του. Αν η ταχύτητα του πλευρικού ανέμου υπερβεί αυτή την κρίσιμη τιμή ο ρυθμός απώλειας μάζας αρχίζει να μειώνεται και δεν υπάρχει στροβιλισμός φωτιάς (fire swirling). Μία προσεγγιστική τιμή της κρίσιμης ταχύτητας προσδιορίστηκε για τις συνθήκες των δοκιμών. Μελετήθηκε επίσης η επίδραση του ύψους του υπό-κλίμακα κτιρίου στον ρυθμό απώλειας μάζας και στην εμφάνιση της δίνης φωτιάς. Οι αναλύσεις των

αποτελεσμάτων οδήγησαν σε κάποιες πολύ ενδιαφέρουσες υποδείξεις για την καταπολέμηση της πυρκαγιάς σε ψηλά κτίρια. Περαιτέρω έρευνες ενδείκνυνται σε μεγαλύτερης κλίμακας πειράματα.



Σχήμα 2.10 Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης (Zhibin Chen et al., 2009).

Όταν ένα δωμάτιο στο ισόγειο ή ένα διαμέρισμα που βρίσκεται σε έναν ανώτερο όροφο ενός πολύ ψηλού κτιρίου πιάσει φωτιά, η ταχύτητα του ανέμου περιβάλλοντος παίζει ένα σημαντικό ρόλο στη διάδοση της φωτιάς και στη συμπεριφορά της κίνησης του καπνού. Μία μελέτη που δημοσιεύτηκε πρόσφατα (Chen et al., 2011), είχε ως αντικείμενο την μελέτη της επίδρασης του ανέμου (εγκάρσιος αερισμός) σε φωτιά σε διαμέρισμα. Για το πείραμα χρησιμοποιήθηκε ως πηγή καυσίμου το επτάνιο. Η κηλίδα του καυσίμου τοποθετήθηκε στο κέντρο του πατώματος ενός υπό-κλίμακα κλειστού χώρου κυβικού σχήματος με δύο ανοίγματα στους τοίχους. Στο Σχήμα 2.11 φαίνεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε, όπως φαίνεται το καύσιμο μέσα στο διαμέρισμα καίγεται υπό συνθήκες εξαναγκασμένου αερισμού.

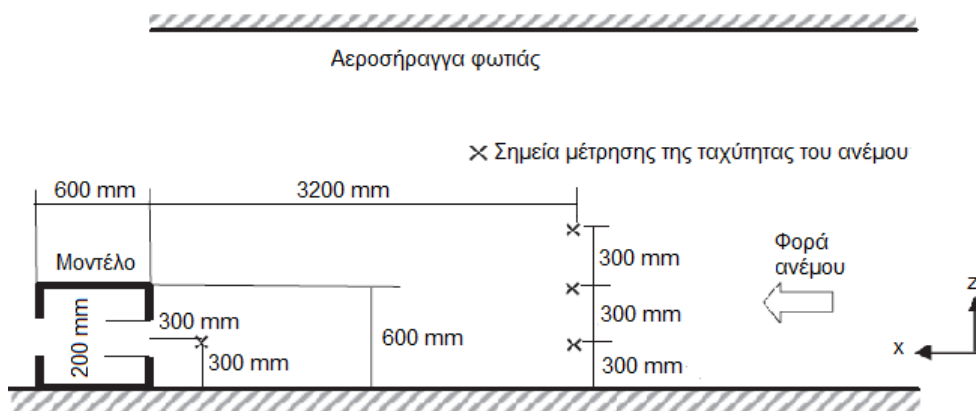


Σχήμα 2.11 Φωτογραφία της διαρρύθμισης της πειραματικής εγκατάστασης (Chen et al., 2011).

Μεταβάλλοντας τις ταχύτητες του αέρα μετρήθηκαν, με τη συμβολή θερμοστοιχείων, οι θερμοκρασίες μέσα και έξω από τον κλειστό χώρο σε οριζόντιες και κάθετες θέσεις. Παρατηρήθηκε ότι η ταχύτητα του ανέμου ενισχύει την εξάπλωση της φλόγας αυξάνοντας τη θερμοκρασία της

φωτιάς μέσα στο διαμέρισμα και μειώνοντας το χρόνο της καθολικής ανάφλεξης, ενώ διαπιστώθηκε πιο έντονη θερμική διαστρωμάτωση μέσα στο δωμάτιο στις περιπτώσεις όπου η ταχύτητα ανέμου ήταν μηδενική. Με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου, τα θερμά αέρια εκτείνονταν οριζόντια όλο και πιο μακριά. Από την ανάλυση του φαινομένου προέκυψε η ύπαρξη μίας κρίσιμης ταχύτητας ανέμου, η οποία διαφοροποιεί την ροή αερίων από το άνοιγμα, γεγονός που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη συμπεριφορά της φωτιάς μέσα στον κλειστό χώρο. Τα πειραματικά δεδομένα αυτής της μελέτης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επικύρωση μοντέλων φωτιάς, όπως ο FDS και υπολογιστικών προσομοιώσεων που θα διεξαχθούν στο μέλλον.

Επιπλέον, μία πειραματική μελέτη σχετικά με την ανάπτυξη της φωτιάς σε διαμέρισμα πραγματοποιήθηκε στην Ιαπωνία το 2008 (Huang et al., 2008). Στη μελέτη αυτή, πειράματα φωτιάς σε αεροσήραγγα πραγματοποιήθηκαν σε ένα μοντέλο υπό-κλίμακα με σκοπό την κατανόηση της διαδικασίας ανάπτυξης της φωτιάς μέσα και μεταξύ διαμερισμάτων. Η εξωτερική ταχύτητα του ανέμου και η θέση εστίας της φωτιάς ήταν μεταβλητές. Στα πειράματα εξετάστηκε η επίδραση του ανέμου για διαφορετικές συνθήκες αερισμού. Μετρήσεις έγιναν για τον υπολογισμό των θερμοκρασιών του αέρα και των επιφανειών των τοίχων μέσα στο διαμέρισμα αλλά και των θερμοκρασιών της εξερχόμενης φλόγας από το άνοιγμα του διαμερίσματος. Ακόμη, καταγράφηκε ο ρυθμός απώλειας της μάζας του καυσίμου και η ροή θερμότητας από το άνοιγμα. Η διάταξη της εγκατάστασης του πειράματος φωτιάς σε αεροσήραγγα παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.12.



Σχήμα 2.12 Σχηματική διάταξη πειράματος φωτιάς σε διαμέρισμα μέσα σε αεροσύραγγα (Huang et al., 2008).

Πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές μελέτες μεταβάλλοντας κάθε φορά την ταχύτητα του ανέμου και τη θέση της κηλίδας καυσίμου. Πιο συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε ότι ο εξωτερικός άνεμος επιδρά στην εξέλιξη του φαινομένου με δύο διαφορετικούς τρόπους. Η αυξημένη ποσότητα αέρα που

εισέρχεται μέσα στο διαμέρισμα όταν αυξάνεται η ταχύτητα αέρα προκαλεί την αύξηση της θερμοκρασίας κατόντη αυτού. Επίσης, παρατηρήθηκε απομάκρυνση και αραίωση των καυσαερίων μέσα στο διαμέρισμα με αποτέλεσμα τη μείωση της θερμοκρασίας και την επίσπευση του φαινομένου υποβάθμισης και τελικά σβέσης της φλόγας. Παράλληλα μελετήθηκε κι η κλίση του πλουμίου της φωτιάς που εξέρχεται από τα ανοίγματα του διαμερίσματος. Ωστόσο, πειράματα μεγαλύτερης κλίμακας κρίνεται απαραίτητο να διεξαχθούν στο κοντινό μέλλον για την πιστοποίηση της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων αυτής της μελέτης. Η παρούσα μελέτη παρουσιάζεται πιο αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 3^ο

Κώδικας Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής FDS

3.1 Υπολογιστική προσομοίωση φωτιάς σε εσωτερικούς χώρους

Σε αυτήν την ενότητα, παρουσιάζεται ανασκόπηση της μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκε για προσομοιώσεις φωτιάς και για ροές χαμηλών ταχυτήτων που οφείλονται στην ύπαρξη θερμότητας. Η ιδέα της υπολογιστικής μελέτης της δυναμικής της φωτιάς χρονολογείται στην αρχή της εποχής των υπολογιστών. Αν και η θεμελιώδης διατύπωση των εξισώσεων που διέπουν την υπολογιστική ρευστομηχανική, τη μεταφορά θερμότητας και την καύση είχε σημειωθεί τουλάχιστον έναν αιώνα πριν, η ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων για την προσομοίωση φωτιάς κι όχι μόνο για την περίπτωση της ελεγχόμενης καύσης είναι σχετικά πρόσφατο επίτευγμα λόγω της πολυπλοκότητας του φαινομένου.

Τα πρώτα μοντέλα που σχεδιάστηκαν ειδικά για τη μελέτη των επιπτώσεων της φωτιάς σε κτίρια ξεκίνησαν στις αρχές του 1970. Τα πρώτα μοντέλα ήταν ουσιαστικά εμπειρικές σχέσεις που εξήγαγαν εκτιμήσεις για τα χαρακτηριστικά του πλουμίου της φωτιάς, τις θερμοκρασίες στο εσωτερικό των διαμερισμάτων, την ροή θερμότητας και την διασπορά του καπνού. Στη συνέχεια, αυτές οι σχέσεις ενσωματώθηκαν σε αυτό που έγινε γνωστό ως μοντέλα ζώνης. Στα μοντέλα ζώνης ο χώρος του διαμερίσματος μπορεί να διαιρεθεί σε δύο χωρικά ομοιογενείς όγκους, ένα θερμότερο ανώτερο στρώμα και ένα ψυχρότερο κατώτερο στρώμα (Jones 1983, Quientiere 1984). Τα απλοποιημένα αυτά μοντέλα, στα οποία η χωρική ανάλυση δεν λαμβανόταν υπόψη, χρησιμοποιήθηκαν εκτεταμένα για τη μελέτη σεναρίων φωτιάς. Παρόλα αυτά, λόγω της φύσης τους δεν επιδέχονταν περιθώρια βελτίωσης και αυτό τα καθιστούσε μικρής αξιοπιστίας. Η αύξηση των δυνατοτήτων στην υπολογιστική ισχύ, με τον καιρό οδήγησε στην ανάπτυξη μοντέλων υπολογιστικής ρευστομηχανικής, τα οποία είχαν εκτεταμένη εφαρμογή σε έρευνες προβλημάτων φωτιάς και επέτρεψαν τη λεπτομερή ανάλυση σε χώρους πολύπλοκης γεωμετρίας... Τα μοντέλα αυτά βασίζονται στην επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes, οι οποίες ολοκληρώνονται χωρικά και χρονικά και προκύπτουν οι μέσες εξισώσεις Reynolds (Reynold Averaged Navier-Stokes, RANS). Τα μοντέλα RANS χρησιμοποιούν μία προσέγγιση της μέσης τιμής του χρόνου στην διατήρηση των εξισώσεων της ρευστομηχανικής. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση παρουσιάζει έναν βασικό περιορισμό, λόγω της ανακρίβειας της μεθόδου επίλυσης που ακολουθείται στις θεμελιώδεις εξισώσεις διατήρησης. Στην πορεία προέκυψε το ζήτημα μιας πιο ακριβούς προσέγγισης του χρόνου, η οποία απαιτείται στην ανάλυση φαινομένων μεταφοράς δινών μεγάλης κλίμακας. Στα πλαίσια της προσομοίωσης τυρβώδων φαινομένων αναπτύχθηκε το “μοντέλο προσομοίωσης μεγάλης δίνης” (Large Eddy Simulation, LES).

Οι γενικές εξισώσεις της ρευστομηχανικής απλοποιήθηκαν από τους Rehm και Baum (1978), με στόχο την υιοθέτηση του μοντέλου αυτού από την ευρεία επιστημονική κοινότητα που ασχολείται με προβλήματα φωτιάς. Στη συνέχεια, οι Oran και Boris (1978) συνέβαλαν στη διάδοση αυτής της τεχνικής για εφαρμογές σε διάφορα συστήματα αντιδρώντων ροών. Οι απλοποιημένες εξισώσεις των Rehm και Baum, βασιζόμενες στην υπόθεση του “χαμηλού αριθμού Mach”, χρησιμοποιούνται και στον CFD κώδικα ανοιχτού λογισμικού γνωστό ως “Fire Dynamics Simulator” (FDS). Η πρώτη έκδοση του προγράμματος κυκλοφόρησε το 2000 και έκτοτε το πρόγραμμα ανανεώνεται και

βελτιώνεται συνεχώς. Σήμερα χρησιμοποιείται από ερευνητές φωτιάς και μηχανικούς πυροπροστασίας σε ποικιλία εφαρμογών (McGrattan et al., 2007).

3.2 Ο κώδικας FDS

Ο FDS είναι ένα κώδικας υπολογιστικής ρευστομηχανικής για τη ροή του ρευστού που επηρεάζεται από τη διάδοση και ανάπτυξη της φωτιάς. Στο μοντέλο αυτό επιλύονται οι εξισώσεις Navier-Stokes, οι οποίες αντιστοιχούν σε χαμηλής ταχύτητας θερμικές ροές. Το πρόγραμμα είναι γραμμένο σε γλώσσα Fortran 90 και σε C και δημιουργήθηκε από το Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων και Τεχνολογίας των ΗΠΑ (NIST). Η έκδοση που χρησιμοποιήθηκε για το υπολογιστικό κομμάτι της παρούσας διπλωματικής είναι η 5.5.1. Ο FDS χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση πολλών περιπτώσεων όπως η διάδοση και εξάπλωση της φωτιάς, σε φαινόμενα πυρόλυσης ή σε φαινόμενα χαμηλής ταχύτητας μεταφοράς θερμότητας και καύσιμων προϊόντων, σε φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας λόγω ακτινοβολίας ή συναγωγής ανάμεσα σε αέριες και στερεές επιφάνειες. Ο FDS έχει σχεδιαστεί για να χρησιμοποιείται από μηχανικούς σε πρακτικά ζητήματα πυροπροστασίας και άλλες εφαρμογές θερμικής ροής. Για αυτό, η χρήση του είναι απαραίτητο να είναι έγκυρη και να δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να εισάγει εύκολα τις παραμέτρους κάθε σεναρίου φωτιάς που θέλει να μελετήσει. Αυτό σημαίνει ότι ο χρήστης ορίζει μόνο ένα μικρό αριθμό υπολογιστικών παραμέτρων, εστιάζοντας στη φυσική περιγραφή του προβλήματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι το λογισμικό αυτό διατίθεται δωρεάν στο διαδίκτυο και μπορεί να λειτουργήσει είτε σειριακά σε ένα προσωπικό υπολογιστή είτε παράλληλα σε ένα δίκτυο υπολογιστών έχοντας δυνατότητα πιο γρήγορης επίλυσης με χρήση του πρωτοκόλλου “Message Passing Interface-MPI” (McGrattan et al., 2011).

3.2.1 Δεδομένα εισόδου και εξόδου

Δεδομένα εισόδου

Οι δυνατότητες εισαγωγής δεδομένων αφορούν κυρίως:

- Τη γεωμετρία του χώρου που απαιτείται να μελετηθεί. Συνήθως προσομοιώνεται η εξάπλωση της φωτιάς που ξεκινάει από μία εστία σε ένα οριοθετημένο χώρο. Πριν οριστούν οι διαστάσεις του χώρου και των αντικειμένων που θα τοποθετηθούν στο χώρο είναι απαραίτητο να οριστεί μία ευρύτερη περιοχή του υπολογιστικού πεδίου. Ορίζεται δηλαδή από το χρήστη ένα ορθογώνιο πλέγμα τριών διαστάσεων (l,j,k). Η πυκνότητα του πλέγματος, δηλαδή από πόσα κελιά θα αποτελείται το πλέγμα, επαφίεται στην ακρίβεια των προλέξεων που θέλει να επιτύχει ο χρήστης. Οι διαστάσεις του πλέγματος επειδή ακριβώς η επίλυση των εξισώσεων που αφορούν την πίεση γίνεται με χρήση Ταχύ Μετασχηματισμού Fourier είναι απαραίτητο να ακολουθούν συγκεκριμένους κανόνες (τα j,k ορίζονται βάση του κανόνα $2^k \times 3^m \times 5^n$, όπου k,m και n είναι ακέραιοι). Ο FDS επιλύει τις κυριαρχούσες εξισώσεις σε ένα ή περισσότερα ορθογωνικά υπολογιστικά πλέγματα. Παράλληλα η γεωμετρία των αντικειμένων που ορίζει ο χρήστης είναι απαραίτητο να συμβαδίζει με το ορθογωνικό υπολογιστικό πλέγμα.
- Το χρόνο στον οποίο επιθυμείται να γίνει η προσομοίωση του φαινομένου.
- Τις ιδιότητες των υλικών που θα χρησιμοποιήσει (π.χ. να ορίσει το υλικό των τοίχων) καθώς και τις ιδιότητες καύσης των υλικών αυτών.

- Τα χαρακτηριστικά της φωτιάς όπως ο ρυθμός έκλυσης ενέργειας ή ο ρυθμός απώλειας μάζας του καυσίμου, η θερμότητα που παράγεται από τη φλόγα κ.α.. Επίσης, είναι δυνατόν να οριστούν με τη χρήση ειδικών εντολών οι χημικές ιδιότητες του καυσίμου, οι εκπομπές των καύσιμων προϊόντων που σχηματίζονται κατά την καύση του καθώς και η παραγωγή καπνού. Η μεταφορά της θερμότητας και της μάζας προς και από τις στερεές επιφάνειες περιγράφεται από εμπειρικές σχέσεις.
- Τις εξωτερικές αρχικές οριακές συνθήκες του υπολογιστικού χωρίου (π.χ. πίεση, θερμοκρασία, ταχύτητα αέρα κλπ.).
- Την εισαγωγή συσκευών μέτρησης όπως ανιχνευτές καπνού, μετρητές θερμικής ροής, χρονόμετρα, θερμοστοιχεία, καταιονιστήρες, ανάλογα με την ποσότητα που χρειάζεται να μετρηθεί και το πότε ο χρήστης επιθυμεί να ξεκινήσει η συσκευή τις μετρήσεις. Παράλληλα, ο χρήστης μπορεί να εισάγει πληροφορίες σχετικά με τις θέσεις στις οποίες επιθυμεί να γίνουν οι μετρήσεις των υπολογιστικών μεγεθών (ροή θερμότητας, συγκεντρώσεις αερίων, πίεση κ.λπ.) (Emanuele Gissi, 2010).

Δεδομένα εξόδου

Στον κώδικα FDS είναι δυνατός ο υπολογισμός μίας πληθώρας φυσικών μεγεθών (ταχύτητα του αέρα, θερμοκρασία, πίεση, πυκνότητα, χημική σύνθεση κ.α.) σε κάθε κελί του πλέγματος για κάθε χρονική στιγμή. Τυπικές ποσότητες δεδομένων εξόδου στην αέρια φάση είναι οι ακόλουθες:

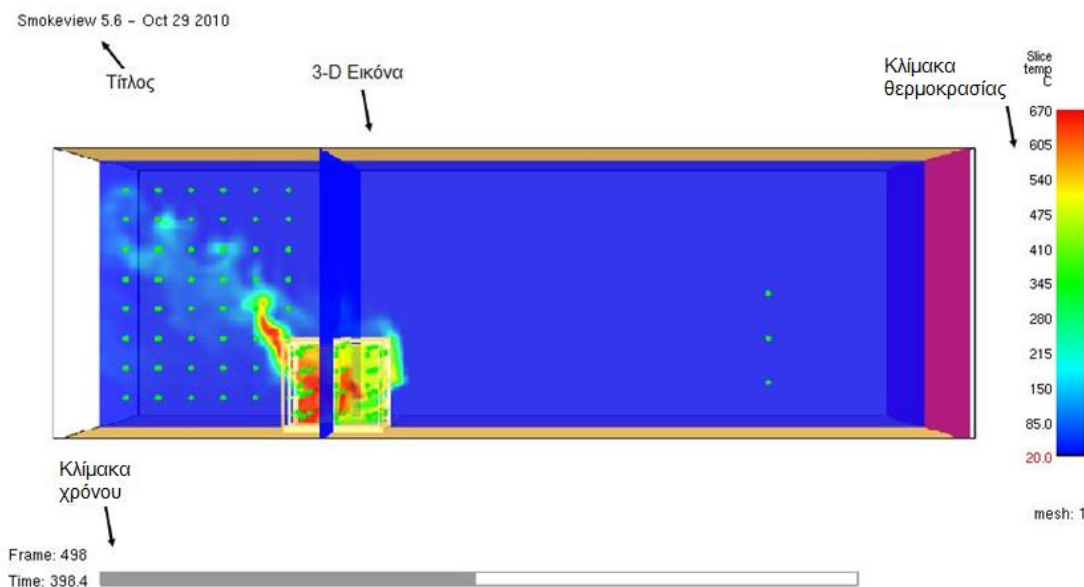
- Θερμοκρασία
- Ταχύτητα
- Συγκεντρώσεις αερίων (υδρατμός CO₂, CO, N₂)
- Συγκέντρωση καπνού
- Πίεση
- Ρυθμός έκλυσης θερμότητας ανά μονάδα όγκου
- Κλάσμα μίγματος
- Μάζα υγρών σταγονιδίων ανά μονάδα όγκου κ.α.

Τυπικές ποσότητες εξόδου δεδομένων για στερεά:

- Θερμοκρασία στην επιφάνεια και στο εσωτερικό ενός στερεού
- Ροή θερμότητας λόγω ακτινοβολίας ή συναγωγής
- Ρυθμός καύσης
- Μάζα υγρών σταγονιδίων ανά μονάδα όγκου κ.α.

3.3 Το πρόγραμμα Smokeview

Το Smokeview είναι ένα συνοδευτικό πρόγραμμα του FDS. Ο FDS και το Smokeview χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό για τη μοντελοποίηση και απεικόνιση φαινομένων φωτιάς. Το Smokeview είναι ένα εργαλείο που δίνει τη δυνατότητα της οπτικοποίησης της φωτιάς και της αιθάλης (καπνού) σε ρεαλιστικές απεικονίσεις. Με το πρόγραμμα Smokeview είναι δυνατή η απεικόνιση της θερμοκρασίας, και άλλων ποσοτήτων που μπορεί να ορίσει ο χρήστης, σε οποιαδήποτε διατομή του χώρου. Ακόμη, το πρόγραμμα αυτό παρουσιάζει διανυσματικά και μη μεγέθη των προλέξεων οπουδήποτε μέσα στον χώρο σε συγκεκριμένο χρόνο.



Σχήμα 3.1 Τυπική απεικόνιση του προγράμματος Smokeview. Το στιγμιότυπο αυτό είναι από την υπολογιστική μελέτη που πραγματοποιήθηκε.

3.4 Θεμελιώδεις εξισώσεις διατήρησης

Για την αριθμητική προσέγγιση των μερικών παραγώγων των εξισώσεων διατήρησης της μάζας, της ορμής και της ενέργειας χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών δευτέρας τάξης.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι θεμελιώδεις εξισώσεις διατήρησης που επιλύονται στον κώδικα FDS και η καταστατική εξίσωση των τέλειων αερίων, που χρησιμοποιείται στο υδροδυναμικό μοντέλο.

Εξίσωση Διατήρησης Μάζας

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{u} = \dot{m}_b \quad (3.1):$$

Η εξίσωση διατήρησης της μάζας γράφεται συνήθως σε όρους των κλασμάτων μάζας για κάθε ξεχωριστό αέριο χημικό συστατικό, Y_α :

$$\frac{\partial(\rho Y_a)}{\partial t} + \nabla \cdot \rho Y_a \vec{u} = \nabla \cdot \rho D_a \nabla Y_a + \dot{m}_{b,a}''' + \dot{m}_a''' \quad (3.2)$$

Αθροίζοντας όλες τις εξισώσεις για κάθε ξεχωριστό αέριο χημικό συστατικό (Εξίσωση 3.2), θα προκύψει ότι $\sum Y_a = 1$, όπου $\sum Y_a$ το άθροισμα όλων των κλασμάτων μάζας του μείγματος. Ακόμη ισχύει ότι $\sum \dot{m}_a''' = 0$ και $\sum \dot{m}_{b,a}''' = \dot{m}_b'''$, εξ' ορισμού, επειδή έχει υποθεθεί $\sum \rho D_a \nabla Y_a = 0$. Ο τελευταίος ισχυρισμός δεν είναι αληθής, για κάθε περίπτωση. Ωστόσο, οι εξισώσεις μεταφοράς επιλύονται για τη συνολική μάζα και για όλα (εκτός από ένα) συστατικά, υπονοώντας ότι ο όρος διάχυσης των χημικών ειδών επιλέγεται έτσι ώστε το άθροισμα όλων των όρων διάχυσης να είναι μηδέν.

Εξίσωση Διατήρηση Ορμής

$$\frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{u} \vec{u} + \nabla \cdot \rho = \rho g + \vec{f}_b + \nabla \cdot \tau_{ij} \quad (3.3)$$

όπου ο όρος δύναμης \vec{f}_b αντιπροσωπεύει τις εξωτερικές δυνάμεις όπως π.χ. η οπισθέλκουσα δύναμη που εφαρμόζεται σε υγρές σταγόνες. Ο όρος τ_{ij} αναφέρεται στον τανυστή των τάσεων ο οποίος ισούται με:

$$\tau_{ij} = \mu \left(2\vec{S}_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} (\nabla \cdot \vec{u}) \right) \quad (3.4)$$

όπου δ_{ij} η σταθερά Kroneker: $\delta_{ij} = \begin{cases} 1, i=j \\ 0, i \neq j \end{cases}$, (3.5)

\vec{S}_{ij} είναι ο τανυστής παραμόρφωσης και μ είναι το δυναμικό ιξώδες του ρευστού.

Ισχύει ότι: $\vec{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ για $i, j=1,2,3$ (3.6)

Εξίσωση Διατήρηση Ενέργειας

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot \rho h \vec{u} = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}''' + \dot{q}_b''' - \nabla \cdot \vec{q}'' + \varepsilon \quad (3.7)$$

όπου ο όρος \dot{q}''' είναι ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας ανά μονάδα όγκου. Ο όρος \dot{q}_b''' είναι η ενέργεια που μεταφέρεται στις υγρές σταγόνες που εξατμίζονται. Ο όρος \vec{q}'' αντιπροσωπεύει τη ροή θερμότητας από ακτινοβολία και από συναγωγή και ισούται με:

$$\vec{q}'' = -k \nabla T - \sum_a h_a \rho D_a \nabla Y_a + \vec{q}_r'' \quad (3.8)$$

όπου k είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας και \vec{q}_r'' η ροή θερμότητας λόγω ακτινοβολία σε στερεή επιφάνεια.

Ο όρος ε εκφράζει το ρυθμό με τον οποίο η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμική λόγω της συνεκτικότητας του ρευστού και δίνεται από την σχέση:

$$\varepsilon = \tau_{ij} \cdot \nabla \vec{u} = \mu \left(2\vec{S}_{ij} \cdot \vec{S}_{ij} - \frac{2}{3}(\nabla \cdot \vec{u})^2 \right) \quad (3.9)$$

Καταστατική εξίσωση τέλειου αερίου

$$p = \frac{\rho RT}{W} \quad (3.10)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι παραπάνω εξισώσεις αποτελούν ένα σύνολο έξι εξισώσεων με έξι αγνώστους, την πυκνότητα ρ , τη θερμοκρασία T , την πίεση p και τις τρεις συνιστώσες του διανύσματος της ταχύτητας $\vec{u} = (u, v, w)$. Η ενθαλπία υπολογίζεται συναρτήσει της θερμοκρασίας:

$$h = \int_{T_0}^T C_p(T) dT \quad (3.11)$$

3.5 Περιγραφή των βασικών χαρακτηριστικών λειτουργίας του FDS

3.5.1 Μοντέλο τύρβης

Ο FDS επιλύει τις εξισώσεις ρευστομηχανικής Navier-Stokes, οι οποίες αντιστοιχούν σε χαμηλής ταχύτητας θερμικές ροές. Επίσης, εξειδικεύεται και στην προσομοίωση της μεταφοράς καπνού και της μεταφοράς θερμότητας σε συνθήκες φωτιάς. Γενικά, ο υπολογισμός των εξισώσεων μπορεί να αντιμετωπιστεί ανάλογα με την πυκνότητα του πλέγματος με χρήση της “Άμεση Αριθμητική Προσομοίωση” (Direct Numerical Simulation-DNS), στην οποία οι όροι διάχυσης υπολογίζονται άμεσα, ή με χρήση της μεθόδου Προσομοίωση Μεγάλων Δινών (Large Eddy Simulation-LES), στην οποία οι μεγάλης κλίμακας δίνες υπολογίζονται άμεσα και οι μικρότερες κλίμακες μοντελοποιούνται με χρήση υποπλεγματικών μοντέλων. Η προσομοίωση των τυρβωδών φαινομένων γίνεται με τη μέθοδο Προσομοίωσης Μεγάλων Δινών (LES) χρησιμοποιώντας το μοντέλο Smagorinsky. Οι περισσότερες εφαρμογές του FDS είναι LES. Για παράδειγμα, είναι αδύνατο να επιλυθούν οι διαδικασίες καύσης και μεταφοράς με τη μέθοδο DNS στην περίπτωση της προσομοίωσης της ροής του καπνού σε ένα μεγάλο κλειστό χώρο με πολλά δωμάτια, λόγω μεγάλου υπολογιστικού κόστους. Ο άμεσος υπολογισμός των διαδικασιών καύσης και μεταφοράς είναι δυνατός (προς το παρόν) σε μικρής κλίμακας πειράματα καύσης.

3.5.1.1 Μέθοδος άμεσης υπολογιστικής προσομοίωσης (Direct Numerical Simulation-DNS)

Άμεση υπολογιστική προσομοίωση (Direct Numerical Simulation-DNS) είναι μία προσομοίωση στην υπολογιστική ρευστομηχανική στην οποία οι εξισώσεις Navier-Stokes επιλύονται αριθμητικά άμεσα χωρίς τη χρήση κάποιου τυρβώδους μοντέλου. Επειδή ακριβώς επιλύονται όλες οι κλίμακες της τύρβης από τη μεγαλύτερη δίνη μέχρι τη μικρότερη στο υπολογιστικό πλέγμα (η χωρική διακριτοποίηση είναι πολύ μικρή), το υπολογιστικό κόστος είναι πολύ μεγάλο. Κατά συνέπεια, απαιτείται μεγάλη χωρητικότητα υπολογιστικών συστημάτων και έτσι οι εφαρμογές που προσομοιώνονται με αυτή τη μέθοδο περιορίζονται σε απλές γεωμετρίες και ροές με χαμηλούς αριθμούς Reynolds (Emanuele Gissi, 2010).

3.5.1.2 Μέθοδος Προσομοίωσης Μεγάλων Δινών (Large Eddy Simulation-LES)

Σε αυτήν την ενότητα επιχειρείται μία σύντομη αναφορά στη μέθοδο LES. Αρχικά, κρίνεται χρήσιμο να εισάγουμε έναν ορισμό για την τύρβη. Αν και υπάρχει ασάφεια στον ορισμό της, καθώς κάθε φορά ανάλογα με την σκοπιά που εξετάζεται ο ορισμός ενδέχεται να διαφέρει, μία σύντομη αλλά πλήρης περιγραφή του φαινομένου δίνεται από τον Hinze:

Μια ροή καλείται τυρβώδης όταν σωματίδια του ρευστού κινούνται με εξαιρετικά μη κανονικό, τυχαίο τρισδιάστατο τρόπο σε μια συνεχή κλίμακα μήκους και χρόνου. Ιδιότητα της ροής και όχι του ίδιου του ρευστού (Hinze, 1959).

Στη συνέχεια, κάνοντας την παραδοχή ότι η λεπτομερής κίνηση μιας τυρβώδους ροής χαρακτηρίζεται από τις εξισώσεις Navier-Stokes, οι θεμελιώδεις εξισώσεις της τύρβης μπορούν να θεωρηθούν γνωστές και με αυτόν τον τρόπο να αποτελέσουν τη βάση για οποιαδήποτε στατιστική θεωρία για τη περιγραφή του τυρβώδους πεδίου. Να τονισθεί εδώ ότι οι εξισώσεις Navier-Stokes εκφράζουν όλα τα πεδία ροής, στρωτά και τυρβώδη. Ο χαρακτηρισμός τυρβώδης πεδίο ροής προσδιορίζει ότι το πεδίο ροής είναι χρονικά μεταβαλλόμενο και εμπεριέχει όλες τις κλίμακες χρόνου από τις πιο μεγάλες μέχρι τις πιο μικρές (κλίμακα Kolmogorov) και κλίμακες χρόνου από τις πιο μεγάλες μέχρι τις πιο μικρές (μικροκλίμακες) που καθορίζονται από τον ρυθμό καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας στην κλίμακα μήκους Kolmogorov (Μπεργελές, 2006).

Γενικά, η εφαρμογή των προσομοιώσεων μεγάλων δινών (LES) σε φωτιά έχει ως στόχο την εξαγωγή καλύτερης χρονικής και χωρικής πιστότητας, οι οποίες απαιτούν χρήση πιο πυκνών πλεγμάτων.

Το μοντέλο LES χρησιμοποιείται για την επίλυση της τυρβώδους ανάμιξης του αέριου καυσίμου και των προϊόντων καύσης μαζί με τον ατμοσφαιρικό αέρα γύρω από το χώρο της φωτιάς. Η βασική ιδέα της μεθόδου LES είναι ότι οι τυρβώδεις δίνες που είναι υπεύθυνες για το μεγαλύτερο μέρος της αναμίξεως είναι αρκετά μεγάλες για να επιλυθούν με εύλογη ακρίβεια από τις εξισώσεις της ρευστομηχανικής. (McGrattan, 2011). Σημειώνεται ότι η χρήση της μεθόδου LES στα μοντέλα καύσης είναι περιορισμένη λόγω της δυσκολίας περιγραφής της ακρίβειας της παραπάνω ανάμιξης (Σεραφείμ, 2008).

Να σημειωθεί επίσης ότι η μέθοδος LES είναι βασισμένη στην παραδοχή ότι το υπολογιστικό πλέγμα είναι ανάγκη να είναι αρκετά πυκνό για να επιτρέψει το σχηματισμό των δινών που είναι υπεύθυνες για την ανάμιξη. Γενικά, ο σχηματισμός δινών περιορίζεται από τη μεγαλύτερη διάσταση ενός υπολογιστικού κελιού του πλέγματος. Έτσι ενδεχόμενη συρρίκνωση της διακριτικής ικανότητας του πλέγματος κατά μία ή δύο διαστάσεις δεν σημαίνει ότι οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα της προσομοίωσης αν η τρίτη διάσταση είναι μεγάλη (Emanuele Gissi, 2010).

Ειδικότερα, στην προσομοίωση με τη μέθοδο LES εισάγεται ένα χωρικό φίλτρο στις κυριαρχούσες εξισώσεις κατά τέτοιο τρόπο ώστε να επιλύονται οι κινήσεις των δινών μεγάλης κλίμακας, ενώ λαμβάνονται μέσες τιμές για τις πιο μικρές δίνες. Αυτή η μέθοδος προϋποθέτει την χρήση υποπλεγματικών μοντέλων (SGS: Subgrid Scale) για την μοντελοποίηση τόσο της τύρβης μικρής κλίμακας όσο και των μέσων ρυθμών αντίδρασης, καθώς οι χημικές αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα

σε μοριακή κλίμακα. Η τύρβη υποπλεγματικής κλίμακας υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το μοντέλο Smagorinsky, με τιμή της σταθεράς Smagorinsky C_s ίση με 0.2. Το αριθμητικό χρονικό βήμα είναι συνεχώς προσαρμοζόμενο προκειμένου να ικανοποιείται το κριτήριο CFL (Courant-Friedrichs-Lewy condition) (MacGrattan et al., 2007)

3.5.2 Μοντέλο καύσης

Γενικά το υπολογιστικό κόστος, που απαιτείται για την εισαγωγή πληροφοριών που αφορούν τις χημικές διεργασίες της καύσης (όπως π.χ. εξισώσεις που περιγράφουν τη μεταφορά του καυσίμου, του οξυγόνου και των προϊόντων της καύσης), είναι τόσο μεγάλο που καθιστά τη λεπτομερή περιγραφή των διαδικασιών της καύσης ανέφικτη. Για αυτό στο μοντέλο αυτό όλα τα στοιχεία που λαμβάνουν μέρος στις αντιδράσεις περιγράφονται με βάση μία και μόνο ποσότητα που ονομάζεται κλάσμα μίγματος $Z(x,t)$.

3.5.2.1 Μοντέλο κλάσματος μίγματος

Κλάσμα μίγματος

Με τη θεώρηση ενός συστήματος που χαρακτηρίζεται από τη ροή ενός ρεύματος καυσίμου που αναμειγνύεται με ένα ρεύμα οξειδωτικού, το κλάσμα μίγματος του αέριου ρεύματος του καυσίμου ορίζεται ως:

$$Z = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} \quad (3.13)$$

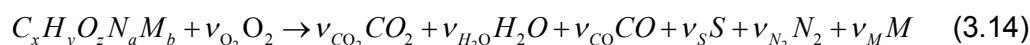
όπου \dot{m}_1 και \dot{m}_2 είναι η παροχή μάζας του ρεύματος καυσίμου και οξειδωτικού αντίστοιχα. (Φούντη, 2005)

Δεδομένου ενός όγκου που περιέχει ένα μίγμα αέριων στοιχείων το κλάσμα μίγματος μπορεί να οριστεί ως την αναλογία της μάζας ενός υποσυνόλου των στοιχείων αυτών προς την ολική παρουσία της μάζας στον όγκο (MacGrattan et al., 2007).

Στο μοντέλο κλάσματος μίγματος γίνεται η υπόθεση ότι η καύση είναι ελεγχόμενη και ότι η αντίδραση της ανάμιξης καυσίμου και οξειδωτικού γίνεται απείρως γρήγορα και εξ ολοκλήρου. Η αντιστοιχία μεταξύ του κλάσματος μίγματος ενός στοιχείου ή συστατικού και του κλάσματος μίγματος ονομάζεται "σχέση κατάστασης".

Η εξ' ολοκλήρου καύση του μίγματος είναι μια λογική υπόθεση σε πολλές εφαρμογές. Ωστόσο, σε κάποιες περιπτώσεις πυρκαγιάς δεν μπορούμε να υποθέσουμε ότι το καύσιμο και το οξυγόνο αντιδρούν πλήρως κατά την ανάμιξη. Αυτό για παράδειγμα συμβαίνει στις περιπτώσεις φωτιάς σε μη επαρκώς αεριζόμενα διαμερίσματα. Το κλάσμα του μίγματος παραμένει μια έγκυρη ποσότητα, αλλά δεν μπορεί πλέον να θεωρηθεί ότι προσδιορίζει εντελώς τη σύνθεση του αέριου μίγματος.

Στον κώδικα FDS για τον καθορισμό των παραμέτρων του μοντέλου κλάσματος απαιτείται ο ορισμός του καυσίμου που θα χρησιμοποιηθεί (McGrattan et al., 2010). Χρησιμοποιώντας το μοντέλο κλάσματος μίγματος, κάθε αντίδραση θεωρείται ότι είναι της μορφής:



Να σημειωθεί ότι το άζωτο στο μόριο του καυσίμου θεωρείται ότι σχηματίζει μόνο N_2 . Επιπρόσθετα προϊόντα μπορούν να ορισθούν ως ένα στοιχείο M με το μέσο μοριακό βάρος αυτών. Τα προϊόντα αυτά θεωρείται ότι δεν καταναλώνουν οξυγόνο κατά το σχηματισμό τους. Η αιθάλη θεωρείται ότι είναι ένα μίγμα από άνθρακα και υδρογόνο όπου το ατομικό κλάσμα του υδρογόνου δίνεται από το συντελεστή X_H .

Ο στοιχειομετρικός συντελεστής v_s αντιπροσωπεύει το ποσό του καυσίμου που μετατρέπεται σε αιθάλη. Σχετίζεται με την παραγωγή αιθάλης y_s μέσω της σχέσης:

$$v_s = \frac{W_F}{W_S} y_s \text{ και } W_S = X_H W_H + (1 - X_H) W_C \quad (3.15)$$

όπου τα W_F , W_S τα μοριακά βάρη του καυσίμου και της αιθάλης αντίστοιχα.

Για την παραγωγή αιθάλης και μονοξειδίου του άνθρακα ισχύουν οι σχέσεις για τους στοιχειομετρικούς συντελεστές:

$$v_s = \frac{W_F}{W_S} y_s \text{ και } W_S = X_H W_H + (1 - X_H) W_C \quad (3.16)$$

Παρόμοια, ο στοιχειομετρικός συντελεστής του μονοξειδίου του άνθρακα δίνεται από τη σχέση:

$$v_{CO} = \frac{W_F}{W_{CO}} y_{CO} \quad (3.17)$$

Το κλάσμα μίγματος Z μπορεί να οριστεί με βάση το κλάσμα μάζας του καυσίμου και των προϊόντων καύσης που περιέχουν άνθρακα:

$$Z = Y_F + \frac{W_F}{x W_{CO_2}} y_{CO_2} + \frac{W_F}{x W_{CO}} y_{CO} + \frac{W_F}{x W_S} y_s \quad (3.18)$$

Το κλάσμα μίγματος ικανοποιεί την εξίσωση διατήρησης μάζας:

$$\rho \frac{DZ}{Dt} = \nabla \cdot \rho D \nabla Z \quad (3.19)$$

(MacGrattan et al., 2007).

3.5.3 Μεταφορά θερμότητας λόγω ακτινοβολίας

Η μεταφοράς θερμότητας μέσω ακτινοβολίας περιγράφεται μέσω της επίλυσης της εξίσωσης μεταφοράς ακτινοβολίας για ένα φαιό αέριο χρησιμοποιώντας μία τεχνική παρόμοια με τη μέθοδο πεπερασμένων όγκων, Μέθοδος Πεπερασμένου Όγκου (Finite Volume Method – FVM). Χρησιμοποιώντας 100 διαφορετικές στερεές γωνίες, η επίλυση του μοντέλου ακτινοβολίας απαιτεί περίπου το 15% του συνολικού υπολογιστικού χρόνου, το οποίο είναι ένα μέτριο κόστος δεδομένης της πολυπλοκότητας του φαινομένου. Επίσης οι σταγόνες νερού μπορούν να απορροφήσουν και να διασκορπίσουν τη θερμική ακτινοβολία. Το φαινόμενο αυτό είναι σημαντικό για όλες τις περιπτώσεις όπου υπάρχουν καταιονηστές.

3.5.4 Μοντέλο στερεάς φάσης

Κατά την επίλυση στον FDS μπορεί να θεωρηθεί ότι τα στερεά σώματα αποτελούνται από πολλαπλά στρώματα, όπου το κάθε στρώμα συνίσταται από πολλά υλικά συστατικά που μπορούν να υποβληθούν σε πολλαπλές θερμικές αντιδράσεις υποβάθμισης. Κάθε αντίδραση σχηματίζει ένα συνδυασμό στερεού υπόλοιπου (δηλ. διαφορετικού υλικού συστατικού από το αρχικό), υδρατμών και / ή αερίου καυσίμου. Η ροή θερμότητας επιλύεται μόνο σε κατεύθυνση κάθετη προς την επιφάνεια. Αυτή η ενότητα θα αναλυθεί περισσότερο στη συνέχεια.

3.5.4.1 Εξισώσεις για το μοντέλο πυρόλυσης στερεών υλικών

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται οι εξισώσεις για την περιγραφή των εξισώσεων μάζας και διατήρησης ενέργειας για τα στερεά υλικά, καθώς επίσης και οι διάφοροι συντελεστές και οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο πυρόλυσης στερεάς φάσης υλικών.

3.5.4.2 Η εξίσωση αγωγής θερμότητας στο στερεό

Για την εκτίμηση της θερμοκρασίας του στερεού τοιχώματος $T_s(x,t)$ επιλύεται μονοδιάστατη εξίσωση αγωγής θερμότητας. Κατά τη διεύθυνση του άξονα x μέσα στο στερεό ισχύει:

$$\rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} + \dot{q}_s''' \quad (3.20)$$

Η ενότητα 3.6.2 περιγράφει τις μέσες φυσικές ιδιότητες του υλικού k_s , ρ_s και c_s . Ο όρος πηγής, \dot{q}_s''' , αποτελείται από δύο συνισταμένες, αυτή των χημικών αντιδράσεων και αυτή της απορρόφησης ακτινοβολίας:

$$\dot{q}_s''' = \dot{q}_{s,c}''' + \dot{q}_{s,r}''' \quad (3.21)$$

Ο όρος $\dot{q}_{s,c}'''$ είναι ουσιαστικά ο ρυθμός παραγωγής θερμότητας που δίνεται από το μοντέλο πυρόλυσης διαφόρων υγρών και στερεών καυσίμων.

3.5.4.3 Θερμικές ιδιότητες δομικών υλικών

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας και η ειδική θερμοχωρητικότητα του στερεού ορίζονται ως:

$$k_s = \sum_{\alpha=1}^{N_m} X_{\alpha} k_{s,\alpha} \quad \text{και} \quad c_s = \frac{\sum_{\alpha=1}^{N_m} \rho_{s,\alpha} c_{s,\alpha}}{\rho_s} \quad (3.22)$$

όπου N_m είναι ο αριθμός των υλικών που αποτελούν το στερεό και $\rho_{s,\alpha}$ είναι η πυκνότητα κάθε στοιχείου και ισούται με:

$$\rho_{s,\alpha} = \rho_s Y_a \quad (3.23)$$

όπου ρ_s είναι η πυκνότητα κάθε υλικού και Y_a το κλάσμα μάζας του κάθε στοιχείου a . Η πυκνότητα του στερεού είναι το άθροισμα των πυκνοτήτων του κάθε στοιχείου:

$$\rho_s = \sum_{\alpha=1}^{N_m} \rho_{s,\alpha} \quad (3.24)$$

X_a είναι το κλάσμα όγκου του κάθε στοιχείου a :

$$X_a = \frac{\rho_{s,\alpha}}{\rho_s} \bigg/ \sum_{\alpha'=1}^{N_m} \frac{\rho_{s,\alpha'}}{\rho_{\alpha'}} \quad (3.25)$$

όπου ρ_{α} είναι η πυκνότητα του υλικού α στην αρχική του μορφή. Συνθετικά στερεά ορίζονται προσδιορίζοντας το κλάσμα μάζας, Y_a και την πυκνότητα, ρ_{α} , του κάθε στοιχείου του σύνθετου υλικού.

3.5.5 Μοντέλο πυρόλυσης

Πυρόλυση είναι η διάσπαση ή ο μετασχηματισμός μίας ένωσης εξαιτίας της θερμότητας που παράγεται από το αέριο καύσιμο το οποίο καίγεται κατά τη διάρκεια της καύσης της αέριας φάσης (Emanuele Gissi, 2010).

Κατά τη διάρκεια της πυρόλυσης παράγονται πτητικά αέρια που διαχέονται στο χώρο, πυρολυτικά υγρά και στερεό υπόλοιπο. Περιγραφή του φαινομένου πυρόλυσης έχει πραγματοποιηθεί στο πρώτο κεφάλαιο. Σε αυτή την ενότητα περιγράφεται πως μοντελοποιούνται τα αντιδρώντα πυρόλυσης της στερεής φάσης καθώς και ο όρος πηγής λόγω χημικών αντιδράσεων, $\dot{q}_{s,c}'''$, που υπάρχει στην εξίσωση μεταφοράς θερμότητας λόγω αγωγής στη στερεή φάση (Εξίσωση 3.21). (MacGrattan et al., 2007).

3.5.5.1 Προκαθορισμένος ρυθμός έκλυσης θερμότητας

Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας δύναται να χρησιμοποιηθεί ως δεδομένο εισόδου από τον χρήστη. Σε τέτοιες περιπτώσεις, ο επιθυμητός ρυθμός έκλυσης θερμότητας μπορεί να θεωρηθεί σαν μια ροή μάζας από μια δεδομένη στερεή επιφάνεια, που μπορεί να θεωρηθεί σαν την επιφάνεια ενός καυστήρα:

$$\dot{m}_f'' = \frac{f(t)\dot{q}_{user}''}{\Delta H} \quad (3.26)$$

Συχνά, ο χρήστης ορίζει έναν επιθυμητό ρυθμό έκλυσης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας, \dot{q}_{user}'' , καθώς και μία μεταβλητή συνάρτηση ως προς το χρόνο, $f(t)$, στην περίπτωση που ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας δεν παραμένει σταθερός.

3.5.5.2 Στερεά καύσιμα

Τα στερεά καύσιμα μπορούν να συμμετέχουν σε περισσότερες από μία αντιδράσεις, με τις ακόλουθες προϋποθέσεις:

- η έκλυση πτητικών ουσιών από τη στερεά στην υγρή φάση γίνεται στιγμιαία,
- υπάρχει τοπική θερμική ισορροπία μεταξύ στερεού και των πτητικών ουσιών,
- δεν υπάρχει η συμπύκνωση των αέριων προϊόντων και
- δεν υπάρχουν πορώδη υλικά.

Κάθε δομικό συστατικό μπορεί να λαμβάνει μέρος σε πολλές αντιδράσεις και κάθε μία από αυτές τις αντιδράσεις μπορεί να παράγει κάποια άλλα στερεά συστατικά-υπόλοιπα, πτητικά αέρια, και/ή υδρατμό σύμφωνα με τους συντελεστές v_s , v_f , v_w , αντίστοιχα. Αυτοί οι συντελεστές θα πρέπει απαραίτητως να ικανοποιούν τη σχέση $v_s + v_f + v_w = 1$, αλλά υπάρχουν αντίστοιχα και άλλοι μικρότεροι συντελεστές που μπορεί να χρησιμοποιηθούν για να οριστούν από το χρήστη και άλλα αέρια προϊόντα.

Υποθέτοντας κάποιο συστατικό α που συμμετέχει σε $N_{r,\alpha}$ ξεχωριστές αντιδράσεις. θα χρησιμοποιηθεί ο δείκτης β για να αντιπροσωπευθεί μία από αυτές τις αντιδράσεις:



Η πυκνότητα του συστατικού α αλλάζει με την πάροδο του χρόνου ανάλογα με την εξίσωση διατήρησης των στερεών ουσιών:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\rho_{s,\alpha}}{\rho_{s0}} \right) = - \sum_{\beta=1}^{N_{r,\alpha}} r_{\alpha\beta} + S_\alpha \quad (3.28)$$

που σημαίνει ότι η μάζα του συστατικού α καταναλώνεται στις αντιδράσεις στερεής φάσης $r_{\alpha\beta}$ και παράγεται από άλλες αντιδράσεις.

Όπου $r_{\alpha\beta}$: ο ρυθμός της αντίδρασης β με μονάδες μέτρησης (1/s) και

ρ_{s0} : η αρχική πυκνότητα του στρώματος του υλικού και

S_α : ο ρυθμός παραγωγής του συστατικού α σαν αποτέλεσμα των αντιδράσεων με άλλα συστατικά.

Ο ρυθμός αντίδρασης υπολογίζεται ως συνάρτηση της τοπικής συγκέντρωσης μάζας και της θερμοκρασίας και υπολογίζεται σαν ένας συνδυασμός των συναρτήσεων Arrhenius και των συναρτήσεων ισχύος:

$$r_{\alpha\beta} = \left(\frac{\rho_{s,\alpha}}{\rho_{s0}} \right)^{n_{s,\alpha\beta}} A_{\alpha\beta} \exp \left(- \frac{E_{\alpha\beta}}{RT_s} \right) \max \left[0, T_s - T_{thr,\alpha\beta} \right]^{n_{t,\alpha\beta}} \quad (3.29)$$

Ο ρυθμός αντίδρασης και οι κινητικές παράμετροι του επεξηγούνται αναλυτικότερα στη συνέχεια.

Ο όρος παραγωγής είναι το άθροισμα όλων των αντιδράσεων όπου το στερεό υπόλοιπο είναι το συστατικό α (όπου $\Upsilon_{\text{πόλοιπο}\alpha\beta} = \Upsilon_{\text{λικό}\alpha}$):

$$S_{\alpha} = \sum_{a=1}^{N_m} \sum_{\beta=1}^{N_{r,a}} v_{s,\alpha\beta} r_{\alpha\beta} \quad (3.30)$$

Οι ογκομετρικοί ρυθμοί παραγωγής των αέριων καυσίμων και του υδρατμού ορίζονται ως:

$$\dot{m}_f''' = \rho_{s0} \sum_{a=1}^{N_m} \sum_{\beta=1}^{N_{r,a}} v_{f,\alpha\beta} r_{\alpha\beta} \quad (3.31)$$

$$\dot{m}_w''' = \rho_{s0} \sum_{a=1}^{N_m} \sum_{\beta=1}^{N_{r,a}} v_{w,\alpha\beta} r_{\alpha\beta} \quad (3.29)$$

Έχει υποτεθεί ότι τα αέρια καύσιμα και ο υδρατμός μεταφέρονται απευθείας στην επιφάνεια, όπου αντίστοιχα οι ροές μάζας ορίζονται:

$$\dot{m}_f'' = \int_0^L \dot{m}_f'''(x) dx \quad (3.30)$$

$$\dot{m}_w'' = \int_0^L \dot{m}_w'''(x) dx \quad (3.31)$$

όπου L είναι το πάχος της επιφάνειας.

Ο χημικός όρος πηγής στην εξίσωση μεταφοράς θερμότητας δίνεται από την εξίσωση:

$$\dot{q}_{s,c}'''(x) = -\rho_{s0} \sum_{a=1}^{N_m} \sum_{\beta=1}^{N_{r,a}} r_{\alpha\beta}(x) H_{r,\alpha\beta} \quad (3.32)$$

(MacGrattan et al., 2007).

3.5.5.3 Ροή θερμότητας στο στερεό λόγω ακτινοβολίας

Αν υποτεθεί ότι η θερμική ακτινοβολία από τα αέρια που υπάρχουν στο χώρο απορροφάται από ένα απείρως λεπτό στρώμα επιφάνειας του στερεού, τότε η καθαρή ροή θερμότητας λόγω ακτινοβολίας είναι το άθροισμα των εισερχόμενων και εξερχόμενων συνιστωσών:

$$\dot{q}_r''' = \dot{q}_{r,in}''' - \dot{q}_{r,out}''' \quad (3.34)$$

όπου η κάθε συνιστώσα περιγράφεται ως εξής:

$$\dot{q}_{r,in}''' = \varepsilon \int_{s' \cdot n_w < 0} I_w(s') |s' \cdot n_w| \partial\Omega \quad (3.35)$$

$$\dot{q}_{r,out}''' = \varepsilon \sigma T_w^4 \quad (3.36)$$

Όμως, πολλά κοινά υλικά δεν έχουν άπειρο οπτικό πάχος. Η ακτινοβολία διεισδύει στο υλικό σε ένα συγκεκριμένο βάθος. Η μεταφορά της ακτινοβολίας μέσα στο στερεό (ή υγρό) μπορεί να περιγραφεί ως όρος πηγής στην εξίσωση (3.20). Στον κώδικα FDS, χρησιμοποιείται ένα μοντέλο “δύο ροών”, που βασίζεται στην προσέγγιση των Schuster-Schwarzschild. Στο μοντέλο αυτό γίνεται η υπόθεση ότι η ένταση της ακτινοβολίας είναι σταθερή μέσα στο ‘εμπρός’ και ‘πίσω’ ημισφαίριο. Η εξίσωση μεταφοράς για την ένταση κατά την ‘εμπρός’ κατεύθυνση είναι:

$$\frac{1}{2} \frac{dI^+(x)}{dx} = \kappa_s (I_b - I^+(x)) \quad (3.37)$$

όπου κ_s ο συντελεστής απορρόφησης,

$$\kappa_s = \sum_{a=1}^{N_m} X_a \kappa_{s,a} \quad (3.38)$$

I_b είναι η ένταση της ακτινοβολίας από μέλαν σώμα, σ ο συντελεστής διασποράς και x είναι η απόσταση από την επιφάνεια του υλικού. Αντίστοιχη εξίσωση δίνεται για την ‘πίσω’ κατεύθυνση.

Πολλαπλασιάζοντας την εξίσωση (3.37) με τον αριθμό π προκύπτει η ‘εμπρός’ θερμοροή στο εσωτερικό του υλικού λόγω ακτινοβολίας:

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \dot{q}_r^+(x)}{\partial x} = \kappa_s (\sigma T_s^4 - \dot{q}_r^+(x)) \quad (3.39)$$

με οριακή συνθήκη στην επιφάνεια του στερεού (ή υγρού) που ορίζεται ως εξής:

$$\dot{q}_r^+(0) = \dot{q}_{r,in}'' + (1 - \varepsilon) \dot{q}_r^-(0) \quad (3.40)$$

Ο όρος πηγής της ακτινοβολίας στην εξίσωση μεταφοράς λόγω αγωγής είναι το άθροισμα των ‘εμπρός’ και ‘πίσω’ κλίσεων των συναρτήσεων:

$$\dot{q}_{s,r}'''(x) = \frac{d\dot{q}_r^+(x)}{dx} + \frac{d\dot{q}_r^-(x)}{dx} \quad (3.41)$$

(MacGrattan et al., 2007).

3.5.5.4 Υγρά καύσιμα

Για τα υγρά καύσιμα οι θερμικές ιδιότητες είναι παρόμοιες με εκείνες των στερεών υλικών, με κάποιες εξαιρέσεις. Ο ρυθμός με τον οποίο ατμοποιούνται τα υγρά καύσιμα όταν καίγονται είναι μια συνάρτηση της θερμοκρασίας του υγρού και της συγκέντρωσης του ατμού του καυσίμου πάνω από την επιφάνεια του καυσίμου και ακολουθεί την εξίσωση των Clausius-Clapeyron. Το μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι η παροχή μάζας του καυσίμου δεν είναι μία ρητή συνάρτηση της θερμοκρασίας, αλλά υπολογίζεται μέσω μίας επαναληπτικής διαδικασίας, η οποία εξαρτάται από τη θερμοκρασία και τις συνθήκες ροής. Για να ξεκινήσει η εξάτμιση απαιτείται μία αρχική τιμή για το κλάσμα όγκου του ατμού του καυσίμου. Αν αυτή η τιμή είναι (σχετικά) υψηλή, η εξάτμιση αρχίζει

άσχετα με οποιαδήποτε πηγή ανάφλεξης και το καύσιμο αρχίζει αμέσως να καίγεται (McGrattan et al., 2011).

Σύμφωνα με τη σχέση των Clausius-Clapeyron, το κλάσμα όγκου του ατμού του καυσίμου πάνω από την επιφάνεια του καυσίμου είναι μια συνάρτηση της θερμοκρασίας βρασμού του υγρού:

$$X_f = \exp \left[-\frac{h_v W_f}{R} \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_b} \right) \right] \quad (3.42)$$

όπου h_v είναι η θερμότητα ατμοποίησης, W_f είναι το μοριακό βάρος του καυσίμου, T_s είναι η θερμοκρασία της επιφάνειας και T_b η θερμοκρασία βρασμού του καυσίμου.

Για λόγους απλοποίησης το υγρό καύσιμο αντιμετωπίζεται σαν ένα θερμικό-λεπτό στερεό, με σκοπό τον υπολογισμό της θερμικής αγωγιμότητας. Δεν λαμβάνεται υπόψη η αγωγή θερμότητας των υγρών καυσίμων μέσα στη κηλίδα (K. MacGrattan). Στο κομμάτι του κώδικα του Σχήματος 3.2 φαίνεται ένα παράδειγμα εισόδου παραμέτρων-κλειδιών με στόχο την περιγραφή καύσης σε κηλίδα αιθανόλης, κατασκευασμένη από ατσάλι.

```

&MATL ID           = 'ETHANOL LIQUID'
  EMISSIVITY       = 1.0
  NU_FUEL          = 0.97
  HEAT_OF_REACTION = 880.
  CONDUCTIVITY     = 0.17
  SPECIFIC_HEAT    = 2.45
  DENSITY          = 787.
  ABSORPTION_COEFFICIENT = 40.
  BOILING_TEMPERATURE = 76. /

&MATL ID           = 'STEEL'
  EMISSIVITY       = 1.0
  DENSITY          = 7850.
  CONDUCTIVITY     = 45.8
  SPECIFIC_HEAT    = 0.46 /

&MATL ID           = 'CONCRETE'
  DENSITY          = 2200.
  CONDUCTIVITY     = 1.2
  SPECIFIC_HEAT    = 0.88 /

&SURF ID          = 'ETHANOL POOL'
  FYI              = '4 kg of ethanol in a 0.7 m x 0.8 m pan'
  COLOR            = 'YELLOW'
  MATL_ID          = 'ETHANOL LIQUID', 'STEEL', 'CONCRETE'
  THICKNESS        = 0.0091, 0.001, 0.05
  TMP_INNER        = 18. /

```

Σχήμα 3.2 Είσοδος παραμέτρων για περίπτωση καύσης σε κηλίδα αιθανόλης.

Με την εντολή MATL, που χρησιμοποιείται εδώ, ορίζονται οι παράμετροι που λαμβάνουν μέρος στις διαδικασίες καύσης των υγρού καυσίμου. Η εισαγωγή του BOILING_TEMPERATURE στην γραμμή εντολών MATL σηματοδοτεί τη χρησιμοποίηση του μοντέλου πυρόλυσης για υγρά. Επίσης τίθεται αυτόματα N_REACTIONS=1: η μόνη αντίδραση είναι η διαδικασία μετατροπής του καυσίμου από υγρή σε αέρια φάση. Το HEAT_OF_REACTION σε αυτήν την περίπτωση είναι η λανθάνουσα

θερμότητα ατμοποίησης. Ο παράγοντας του αέριου καυσίμου NU_FUEL, είναι 0,97 αντί 1 γιατί έχουν ληφθεί υπόψη οι ακαθαρσίες στο υγρό που δεν συμμετέχουν στις διαδικασίες καύσης. Η θερμική αγωγιμότητα, η πυκνότητα και η ειδική θερμότητα χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των απωλειών θερμότητας μέσα στο υγρό μέσω της αγωγιμότητας. Είναι φανερό ότι η αγωγή θερμότητας (convection) του υγρού είναι σημαντική, αλλά δεν λαμβάνεται υπόψη στο μοντέλο. Επίσης παρατηρείται και η εντολή ABSORPTION_COEFFICIENT για το υγρό. Αυτή υποδηλώνει την απορρόφηση σε βάθος της θερμικής ακτινοβολίας. Τα υγρά δεν απορροφούν μόνο ακτινοβολία στην επιφάνεια, αλλά και γύρω από ένα λεπτό στρώμα κοντά στην επιφάνεια. Η επίδραση του στο ρυθμό καύσης είναι σημαντική (McGrattan et al., 2010).

3.6 Ρυθμός αντίδρασης

Για κάθε αντίδραση που συμμετέχει το κάθε υλικό πρέπει να προσδιορίζονται οι κινητικές παράμετροι του ρυθμού αντίδρασης Arrhenius. Η γενική εξίσωση για κάθε ένα υλικό που συμμετέχει σε μία ή παραπάνω αντιδράσεις είναι η εξής:

$$\frac{\partial Y_{s,i}}{\partial t} = - \sum_{j=1}^{N_{r,i}} r_{ij} + \sum_{i'=1}^{N_m} \sum_{j=1}^{N_{r,i'}} v_{s,i',j} r_{i',j} \quad (3.43)$$

και:

$$r_{ij} = A_{ij} Y_{s,i}^{n_{s,ij}} \exp\left(-\frac{E_{ij}}{RT_s}\right) \quad \text{και} \quad Y_{s,i} = \left(\frac{\rho_{s,i}}{\rho_{s0}}\right) \quad (3.44)$$

όπου:

r_{ij} : καθορίζει το ρυθμό της αντίδρασης στην θερμοκρασία, T_s , του i -οστού υλικού της j -οστή αντίδρασης

$\Sigma r_{ij} + \Sigma \Sigma v_{s,i',j} r_{i',j}$: αντιπροσωπεύει τη συμμετοχή των υπολοίπων υλικών από τα οποία παράγεται το i -οστό υλικό σαν υπόλοιπο με απόδοση $v_{s,i',j}$.

$\rho_{s,i}$: πυκνότητα του i -οστού υλικού του στρώματος, ορίζεται ως η μάζα του i -οστού υλικού διαιρεμένη με τον όγκο του στρώματος.

ρ_{s0} : αρχική πυκνότητα του στρώματος, έτσι η ποσότητα $Y_{s,i} = \left(\frac{\rho_{s,i}}{\rho_{s0}}\right)$ αυξάνεται όταν το i -οστό υλικό παράγεται ως υπόλοιπο από κάποια άλλη αντίδραση και μειώνεται όταν καταναλώνεται, όταν το στρώμα αποτελείται μόνο από υλικό, τότε ο όρος $\frac{\rho_{s,i}}{\rho_{s0}} = 1$

$n_{s,ij}$: η τάξη της αντίδρασης, αν δεν είναι γνωστή τότε ίση με τη μονάδα.

A_{ij} : προ-εκθετικός παράγοντας που εξαρτάται από τις συνθήκες της αντίδρασης, το σχήμα και το μέγεθος των αντιδρώντων(1/s)

E_{ij} : ενέργεια ενεργοποίησης (kJ/kmol)

Για μία δεδομένη αντίδραση, πρέπει να προσδιοριστούν και οι δύο όροι A,E και η τάξη της αντίδρασης n. Αυτές οι παράμετροι μπορούν να υπολογιστούν μέσω πειραμάτων όπως η μέθοδος θερμοβαρυμετρικής ανάλυσης, TGA (Thermo-Gravimetric Analysis).

Συνήθως οι παράμετροι A και E δεν είναι διαθέσιμες για τα περισσότερα υλικά επομένως τότε χρησιμοποιούνται άλλες παράμετροι στο κώδικα FDS και καθορίζουν έμμεσα αυτά τα μεγέθη. Η πιο σημαντική παράμετρος είναι η θερμοκρασία αναφοράς (T_p). Οι κινητικές παράμετροι για μια αντίδραση προσδιορίζονται ως εξής:

$$E = \frac{e_{r_p}}{Y_0} \frac{RT_p^2}{T} \quad \text{και} \quad A = \frac{e_{r_p}}{Y_0} e^{E/RT_p} \quad (3.44)$$

με T_p : θερμοκρασία σε συνθήκες αναφοράς

r_p / Y_0 : ρυθμός αντίδρασης σε συνθήκες αναφοράς, όταν το στερεό αποτελείται από ένα υλικό που υπόκειται σε μία μόνο αντίδραση τότε $Y_0=1$. (Y_0 σε μονάδες K/s).

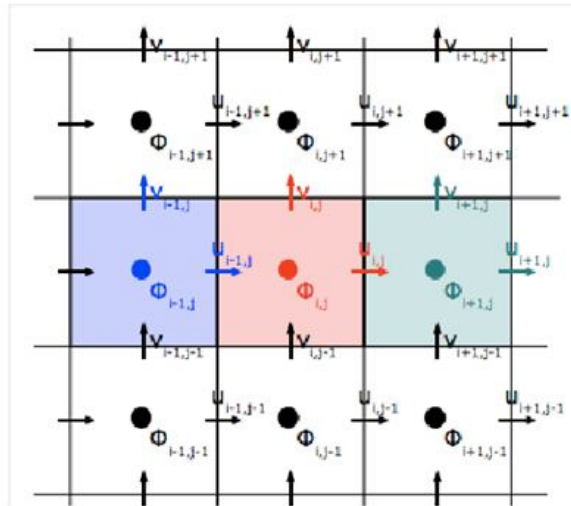
Σε περίπτωση που είναι δυνατή μόνο η εκτίμηση της θερμοκρασίας αναφοράς μια συγκεκριμένης αντίδρασης τότε μπορεί να οριστεί μία ακόμη παράμετρος εκτός από τη θερμοκρασία αναφοράς. Αυτή η παράμετρος είναι το εύρος πυρόλυσης T_p . Χρησιμοποιώντας αυτές τις παραμέτρους εισόδου γίνεται μία εκτίμηση του μεγίστου της καμπύλης του ρυθμού αντίδρασης, από την οποία οι κινητικές παράμετροι της αντίδρασης A,E υπολογίζονται.

$$\frac{r_p}{Y_0} = \frac{2T}{\Delta T} (1 - v_s) \quad (3.45)$$

όπου v_s : ποσοστό του υλικού που μετατρέπεται σε στερεό (McGrattan et al., 2010).

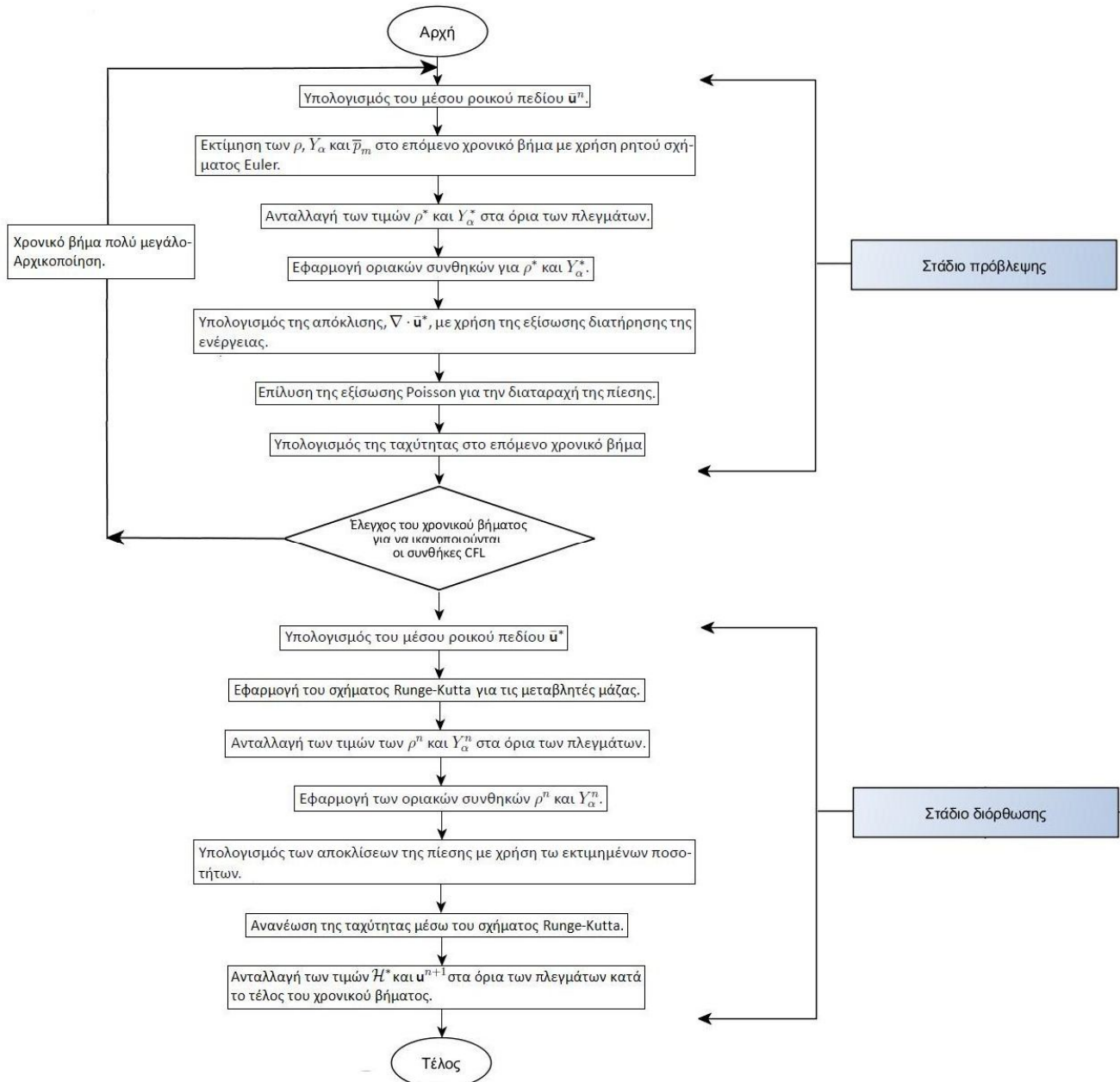
3.7 Διαδικασία επίλυσης

Ο κώδικας FDS χρησιμοποιεί ένα ημιπεπλεγμένο σχήμα επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων. Οι μεταβλητές ροής ανανεώνονται στο χρόνο χρησιμοποιώντας ένα ρητό σχήμα Runge-Kutta δεύτερης τάξης. Στο σχήμα 3.3 παρατηρούνται οι βαθμωτές ποσότητες Φ_{ij} (πυκνότητα ρ^n , κλάσματα μάζας των συστατικών Y_a^n , πίεση \bar{p}^n και διαταραχή της πίεσης H^n), οι οποίες αντιστοιχούν στο κέντρο κάθε υπολογιστικού κελιού, ενώ τα διανυσματικά μεγέθη (π.χ. η ταχύτητα) διατάσσονται στο κέντρο των εκάστοτε όψεων τους.



Σχήμα 3.3 Γραφική απεικόνιση των φυσικών μεγεθών που υπολογίζονται στο ορθογωνικό πλέγμα του κώδικα υπολογιστικής ρευστομηχανικής FDS.

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα αυτού του κεφαλαίου ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για την επίλυση του ροικού πεδίου είναι αλγόριθμος πρόβλεψης-διόρθωσης και έχει ακρίβεια 2^{ns} τάξης στο χώρο και στο χρόνο. Στο σχήμα 3.4 παρουσιάζεται ένα συνοπτικό διάγραμμα ροής της διαδικασίας που ακολουθείται για την επίλυση του αλγορίθμου (McGrattan et al., 2011).



Σχήμα 3.4 Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου πρόβλεψης διόρθωσης.

Κεφάλαιο 4^ο

Υπολογιστική προσομοίωση

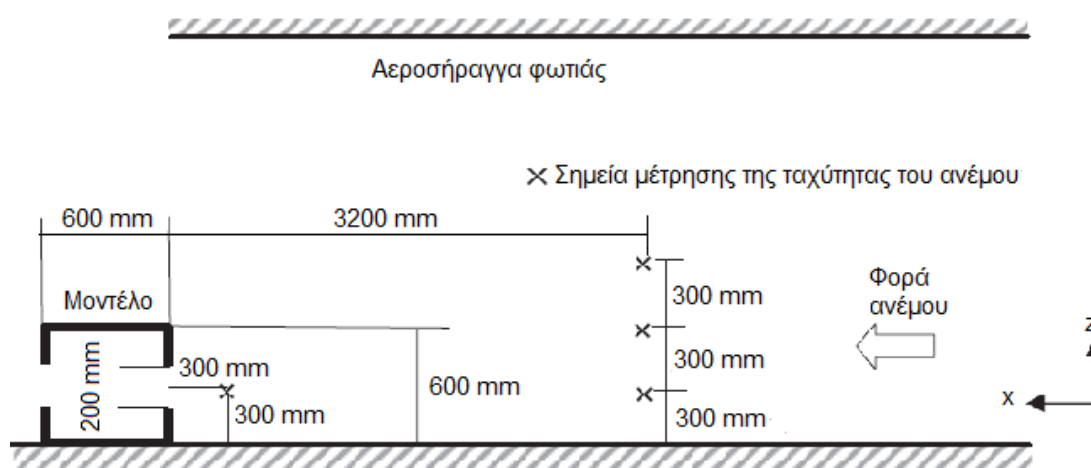
4.1 Εισαγωγή

Στη παρούσα διπλωματική μελετήθηκε η ανάπτυξη φωτιάς μέσα σε διαμέρισμα σε συνθήκες εξαναγκασμένου αερισμού. Για να επιτευχθεί αυτό χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας FDS κι οι πειραματικές μετρήσεις των (Huang et al., 2008) σε ένα μοντέλο δωματίου υπό-κλίμακα. Τα πειράματα έγιναν μέσα σε αεροσήραγγα έτσι ώστε να διασφαλιστεί η ομοιογένεια των συνθηκών εξαναγκασμένου αερισμού εκτός του δωματίου. Οι προλέξεις θερμοκρασίας, τόσο εντός όσο κι εκτός του δωματίου, συγκρίθηκαν με τις πειραματικές μετρήσεις προκειμένου να διασφαλιστεί η πιστότητα του FDS για τη μελέτη αυτού του φαινομένου. Η παραμετρική μελέτη που πραγματοποιήθηκε αφορά την επίδραση της θέσης της εστίας και της έντασης του εξωτερικού αέρα στη συμπεριφορά της φωτιάς σε διαμερίσματα.

4.2 Παρουσίαση του πειράματος

4.2.1 Περιγραφή της γεωμετρίας του πειράματος

Η αεροσήραγγα φωτιάς που χρησιμοποιήθηκε έχει διαστάσεις 1,8m (πλάτος) x 1,8m (ύψος) x 14m (μήκος). Στο σχήμα 4.1 απεικονίζεται η διάταξη της εγκατάστασης του πειράματος φωτιάς. Το μοντέλο υπό-κλίμακα αναπαριστά διαμέρισμα, το οποίο βρίσκεται μέσα στην αεροσήραγγα. Η φορά του ανέμου είναι από τα δεξιά προς τα αριστερά όπως φαίνεται στο σχήμα. Οι διαστάσεις του μοντέλου υπό-κλίμακα είναι 600 x 600 x 600 mm³. Η επιλογή ενός κυβικού μοντέλου διαμερίσματος (600 mm), που επιλέχτηκε για το πείραμα, δεν έγινε τυχαία, καθώς το πλάτος της ζώνης δοκιμών της αεροσήραγγας είναι 600mm. Επίσης οι διαστάσεις αυτές προσεγγίζουν το 1/5 σε κλίμακα ενός τυπικού Ιαπωνικού δωματίου διαμερίσματος. Για τη φωτιά χρησιμοποιήθηκε ένα ανοξειδωτο δοχείο (100 x 100 mm²), το οποίο περιείχε για καύσιμο επτάνιο.



Σχήμα 4.1 Πειραματική διάταξη της αεροσήραγγας για πειράματα φωτιάς και του μοντέλου υπό-κλίμακας που χρησιμοποιήθηκε (Huang et al., 2008)

Οι πλευρικοί τοίχοι του διαμερίσματος αποτελούνται από 3 υλικά. Οι τοίχοι είναι κατασκευασμένοι από ξύλινες-κέδρινες σανίδες (wooden-cedar boards) εικοσιπέντε χιλιοστών (25 mm), πυράντοχες γυψοσανίδες τριάντα δύο χιλιοστών (32 mm) και από ανοξειδωτες χαλύβδινες (ατσάλινες) πλάκες χάλυβα δύο χιλιοστών (2 mm). Η οροφή αποτελείται από τα ίδια υλικά που αποτελούνται και οι τοίχοι, ενώ το πάτωμα θεωρήθηκε αδιαβατική επιφάνεια. Επίσης, υπάρχουν δύο ανοίγματα 200 x 200 mm² στο κέντρο των ανάντη και κατάντη πλευρών του διαμερίσματος.

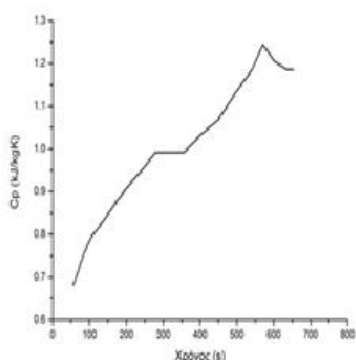
4.2.2 Ορισμός των θερμικών ιδιοτήτων στερεών υλικών στον κώδικα FDS

Όπως αναφέρθηκε οι τοίχοι του μοντέλου υπό-κλίμακα που προσομοιώθηκε αποτελούνται από τρία υλικά (από την εσωτερική προς την εξωτερική πλευρά): 1) ξύλο, 2) πυράντοχη γυψοσανίδα 3)χάλυβας. Η πυράντοχη γυψοσανίδα είναι ένα από τα υλικά δόμησης που χρησιμοποιούνται ευρέως, λόγω της καλής συμπεριφοράς της σε υψηλές θερμοκρασίες και της μηχανικής σταθερότητας της.

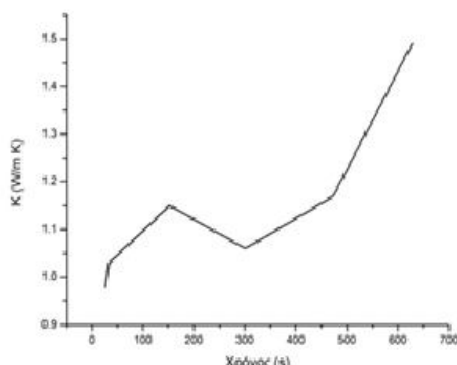
Για τον ορισμό των υλικών αυτών στο πρόγραμμα FDS χρησιμοποιήθηκαν οι θερμικές τους ιδιότητες. Τα σημαντικότερα θερμοδυναμικά μεγέθη για την περιγραφή των υλικών είναι η πυκνότητα (ρ), η ειδική θερμοχωρητικότητα (c_p) και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (k) του υλικού. Στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τα υλικά αυτά. Για την προσομοίωση του διαμερίσματος έγινε προσπάθεια εύρεσης των θερμικών ιδιοτήτων των υλικών από αξιόπιστες πηγές (P.J. DiNenno et al,2002). Ας σημειωθεί ότι για λόγους μεγαλύτερης ακρίβειας, για την περίπτωση του ξύλου και του γύψου, οι τιμές των μεγεθών της ειδικής θερμοχωρητικότητας (c_p) και του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (k), που λήφθηκαν υπόψη, μεταβάλλονται συναρτήσει του χρόνου, όπως φαίνεται και στα σχήματα 4.2 ως 4.5.

Υλικά	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg K)	K (W/m K)
Cedar (ξύλο)	300	Σχήμα 4.2	Σχήμα 4.4
Γύψος	700	Σχήμα 4.3	Σχήμα 4.5
Χάλυβας	7850	0,52	37,5

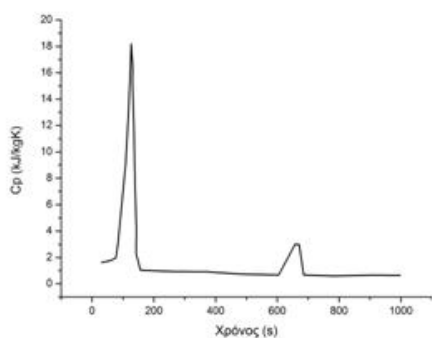
Πίνακας 4.1 Θερμικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν.



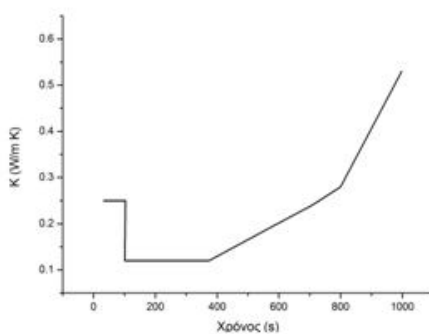
Σχήμα 4.2 Ειδική θερμοχωρητικότητα C_p συναρτήσει του χρόνου για ξύλινη σανίδα.



Σχήμα 4.3 Θερμοχωρητικότητα K συναρτήσει του χρόνου για ξύλινη σανίδα.



Σχήμα 4.4 Ειδική θερμοχωρητικότητα C_p συναρτήσει του χρόνου για γυψοσανίδα.



Σχήμα 4.5 Θερμοχωρητικότητα K συναρτήσει του χρόνου για γυψοσανίδα.

Οι ιδιότητες του κάθε υλικού στον κώδικα FDS ορίζονται μέσω των εντολών MATL. Αυτές οι ιδιότητες περιγράφουν πόσο γρήγορα θερμαίνεται και καίγεται ένα υλικό. Κάθε εντολή εισόδου δεδομένων MATL δίνει πληροφορίες για ένα συγκεκριμένο υλικό. Χρησιμοποιώντας την εντολή RAMP υπάρχει η δυνατότητα να οριστούν μεγέθη που μεταβάλλονται με το χρόνο. Στα παραδείγματα που ακολουθούν παρουσιάζονται κομμάτια του κώδικα που χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδος δεδομένων στον FDS για την περιγραφή των υλικών.

Για την ξύλινη σανίδα (κέδρος):

```
&MATL ID           ='wooden_cedar'  
FYI                ='bibliografia'  
SPECIFIC_HEAT_RAMP ='Cp_cedar'  
CONDUCTIVITY_RAMP ='k_cedar'  
Density            =300. / J.M. Watts. S.F.P.E. Handbook for Fire Engineering, 3rd Edition. National Fire  
  
&RAMP ID='Cp_cedar', T=55.79, F=0.68056 / Cp cedar  
&RAMP ID='Cp_cedar', T=85.84, F=0.75833 / Cp cedar  
&RAMP ID='Cp_cedar', T=107.30, F=0.79222 / Cp cedar  
&RAMP ID='Cp_cedar', T=141.63, F=0.83611 / Cp cedar  
  
&RAMP ID='k_cedar', T=26.91, F=0.98 / k cedar  
&RAMP ID='k_cedar', T=33.63, F=1.03 / k cedar  
&RAMP ID='k_cedar', T=152.47, F=1.15 / k cedar  
&RAMP ID='k_cedar', T=473.09, F=1.17 / k cedar
```

Για την πυράντοχη γυψοσανίδα:

```
&MATL ID           ='fire_resistant_board_gypsum'  
FYI                ='BIBLIOGRAFIA'  
SPECIFIC_HEAT_RAMP ='b_gypsum'  
CONDUCTIVITY_RAMP ='e_gypsum'  
DENSITY            = 700. /J.M. Watts. S.F.P.E. Handbook for Fire Engineering, 3rd Edition. National Fire  
  
&RAMP ID='b_gypsum', T= 30.90, F=1.63086 / Cp gypsum  
&RAMP ID='b_gypsum', T= 46.29, F=1.68827 / Cp gypsum  
&RAMP ID='b_gypsum', T= 63.89, F=1.80386 / Cp gypsum  
&RAMP ID='b_gypsum', T= 77.09, F=1.97802 / Cp gypsum  
  
&RAMP ID='e_gypsum', T= 32.97, F=0.25 / K gypsum  
&RAMP ID='e_gypsum', T= 101.30, F=0.25 / K gypsum  
&RAMP ID='e_gypsum', T= 103.30, F=0.12 / K gypsum  
&RAMP ID='e_gypsum', T= 373.63, F=0.12 / K gypsum
```

Για την χαλύβδινη πλάκα:

```
&MATL ID           ='stainless_steel_sheet'  
FYI                ='BIBLIOGRAFIA'  
SPECIFIC_HEAT      = 0.52  
CONDUCTIVITY       = 37.5  
DENSITY            = 7850. /J.M. Watts. S.F.P.E. Handbook for Fire Engineering, 3rd Edition. National Fire,
```

Τα χαρακτηριστικά των οριακών συνθηκών ορίζονται με την εντολή SURF. Στην περίπτωση που μελετάται, τα στερεά όρια των τοίχων αποτελούνται από τρία στρώματα διαφορετικών υλικών. Οι ιδιότητες αυτών των υλικών ορίζονται μέσω της εντολής MATL. Κάθε είσοδος MATL στο αρχείο εισόδου του κώδικα έχει μία ID, ή ένα όνομα, ώστε να συνδέεται με ένα συγκεκριμένο SURF με την παράμετρο MATL_ID. Με την εντολή SURF έχουμε τη δυνατότητα ακόμη να ορίσουμε το πάχος

ενός τοίχου ή το χρώμα του για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων μέσω του Smokeview. Ενδεικτικά στο παρακάτω κομμάτι του κώδικα παρουσιάζεται η ακόλουθη εντολή.

```
&SURF ID           = 'WALL IN', COLOR='WHITE',  
MATERIAL_ID        = 'wooden_cedar','fire_resistant_board_gypsum','stainless_steel_sheet'  
THICKNESS          = 0.025,0.032,0.002 /
```

Για τον ορισμό των τοίχων όπως και για κάθε στερεό αντικείμενο στον κώδικα εισάγεται η εντολή &OBST, η οποία ορίζει ένα στερεό αντικείμενο που καταλαμβάνει έναν όγκο. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα περιγράφεται ο νότιος τοίχος του διαμερίσματος. Ο όγκος που καταλαμβάνει ο τοίχος ξεκινά π.χ. στον x άξονα από τη θέση 1,23 και εκτείνεται κατά 0,54 m μέχρι τη θέση 1,77 m.

```
&OBST XB= 1.23, 1.77, 0.45, 0.48, 0.03, 0.57, SURF_ID6(3)='WALL OUT', SURF_ID6(4)='WALL IN', OUTLINE=.TRUE. / notios toixos
```

4.2.3 Εισαγωγή του καυσίμου στον κώδικα FDS

4.2.3.1 Ύψος δοχείου αποθήκευσης καυσίμου

Το δοχείο αποθήκευσης που περιέχει το επτάνιο είναι κατασκευασμένη από ανοξείδωτο υλικό (χάλυβας), το οποίο στην προσομοίωση αυτή παρουσιάζει τις ίδιες θερμικές ιδιότητες με το φύλλο χάλυβα που τοποθετήθηκε στους τοίχους.

Το ανοξείδωτο δοχείο (100 x 100 mm²) περιείχε 250 ml επτανίου (n-heptane). Το ύψος της κηλίδας του υγρού καυσίμου βρέθηκε από τον τύπο του όγκου της.

Διαστάσεις κηλίδας: 100x100mm² ⇔ 0,1x0,1m²

Όγκος της κηλίδας δίνεται από τη σχέση 4.1:

$$V = 0,1x0,1xv \tag{4.1}$$

$$\left. \begin{array}{l} V = 0,1x0,1xv \\ V = 0,250\text{lt} \end{array} \right\} \Rightarrow v = 25\text{mm}$$

4.2.3.2 Χαρακτηριστικά καυσίμου

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η κηλίδα καυσίμου που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα ήταν (100 x 100 mm²) για όλα τα σενάρια φωτιάς που πραγματοποιήθηκαν. Και πάλι έγινε προσπάθεια εύρεσης αξιόπιστων πηγών για την εισαγωγή των χαρακτηριστικών του καυσίμου στον FDS. Για τον περιγραφή του καυσίμου επιλέχτηκαν τα εξής χαρακτηριστικά:

- Χημικός τύπος του καυσίμου
- Θερμότητα καύσης (N. Iqbal et al., 2003)
- Εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα (P. J. DiNenno et al,2002)
- Εκπομπές θείου (S) (P. J. DiNenno et al,2002)

Στον πίνακα 4.2 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του επτανίου.

Επτάνιο	
Χημικός τύπος	C ₇ H ₁₆
Θερμότητα καύσης	44.600 kJ/kg
Εκπομπές CO	0,010 g/g
Εκπομπές S	0,037 g/g

Πίνακας 4.2 Ιδιότητες επτανίου που χρησιμοποιήθηκαν στον FDS.

Ένα μόνο καύσιμο μπορεί να προσομοιωθεί κάθε φορά από τον FDS. Η στοιχειομετρία της κυρίαρχης εξίσωσης του καυσίμου ορίζεται μέσω των εντολών REAC. Στην πραγματικότητα η θερμότητα καύσης (HEAT_OF_COMBUSTION) που ορίζεται στη γραμμή εντολών REAC αφορά μόνο στο καύσιμο κατά τη διάρκεια της φάσης της καύσης. Οι εκπομπές του CO και S ορίζονται με την εντολή SOOT_YIELD και CO_YIELD και ουσιαστικά αποτελούν το κλάσμα μάζας του καυσίμου που μετατρέπεται σε CO και S αντίστοιχα.

Ακολουθεί η περιγραφή του καυσίμου:

```
&REAC ID='HEPTANE'  
FUEL='N-HEPTANE'  
FYI='heptane, C_7 H_16'  
HEAT_OF_COMBUSTION=44600.  
C=7.  
H=16.  
CO_YIELD=0.010  
SOOT_YIELD=0.037 /J.M. Watts. S.F.P.E. Handbook for Fire Engineering, 3rd Edition. National Fire
```

Τέλος, η εντολή SPEC χρησιμοποιήθηκε για να ορίσουμε κάθε επιπλέον είδος αερίου που ήταν επιθυμητό να ληφθεί υπόψη στην προσομοίωση, όπως φαίνεται στην παρακάτω γραμμή εντολών:

```
&SPEC ID='CARBON DIOXIDE' /  
&SPEC ID='CARBON MONOXIDE' /  
&SPEC ID='OXYGEN' /
```

Ο FDS συμπεριλαμβάνει της υπολογισμούς που κάνει για της αντιδράσεις καύσης το διοξείδιο του άνθρακα CO₂, μονοξείδιο του άνθρακα CO και οξυγόνο O₂. Οι ιδιότητες που απαιτούνται για τον ορισμό αυτών των αερίων δεν χρειάζονται να περιγραφούν γιατί υπάρχουν της βιβλιοθήκης του προγράμματος.

4.2.4 Αρχικές συνθήκες

Στην αρχή της υπολογιστικής προσομοίωσης (t=0s), θεωρείται ότι το πεδίο ταχυτήτων, σε όλο το υπολογιστικό χωρίο είναι μηδενικό και επικρατεί ενιαία αρχική θερμοκρασία 20°C. Ο συνολικός χρόνος της προσομοίωσης προσδιορίστηκε με βάση το χρόνο διεξαγωγής των πειραμάτων φωτιάς και είναι ίσος με 800 sec.

4.2.5 Εφαρμογή οριακών συνθηκών

Η γεωμετρία περιγράφεται στον FDS με ορθογώνια αντικείμενα τα οποία θερμαίνονται, καίγονται, ή άγουν θερμότητα κλπ.. Σε αυτά τα αντικείμενα ενδέχεται να υπάρχουν ανοίγματα από τα οποία αέρας ή καύσιμο μπορεί να εισέρχεται ή να εξέρχεται από το υπολογιστικό πεδίο.

Η εφαρμογή τέτοιων οριακών συνθηκών γίνεται με την εντολή VENT. Η εντολή αυτή χρησιμοποιείται για την εφαρμογή της συγκεκριμένης οριακής συνθήκης πάνω σε μία όψη της στερεού αντικειμένου. Να σημειωθεί ότι η εντολή VENT εφαρμόζεται μόνο πάνω σε στερεά αντικείμενα. Στη συγκεκριμένη προσομοίωση χρειάστηκε να περιγραφούν δύο οριακές συνθήκες με την εντολή VENT.

1) Ορίστηκε η επιφάνεια του καύσιμο.

```
&OBST XB=1.23,1.33,0.92,1.02,0.03,0.055, SURF_ID='POOL FIRE', OUTLINE=.TRUE. / ANTIKEIMENO GIA TOPOTHETISI FOTIAS
```

```
&VENT XB=1.23,1.33,0.92,1.02,0.055,0.055, SURF_ID='fotia' / diastasteis flegomenis epifaneias 0.1x0.1 sto kentro
```

Της παραπάνω γραμμής εντολών ορίζεται ένα στερεό αντικείμενο, το οποίο είναι φτιαγμένο από τα υλικά του SURF_ID=" POOL FIRE", και στο οποίο εφαρμόζεται οριακή συνθήκη για την περιγραφή της καύσης του επτανίου επάνω στην επιφάνεια αντικειμένου (εντολή OBST) κατά τη διεύθυνση z.

2) Ορίστηκε η επιφάνεια για την είσοδο του εξωτερικού αέρα στην αεροσήραγγα.

```
&OBST XB= 5.97, 6.0, 0.0, 1.5, 0.0, 1.8, SURF_ID='WALL1' / antikeimeno 1 gia vent se apostash 1000 mm dexia apo ta thermost
```

```
&VENT XB=5.97,5.97,0.0,1.5,0.0, 1.8, IOR=-1, SURF_ID='inlet' / vent dexia apo ta thermostoixeia panw sto antikeimeno wall1
```

Της παραπάνω γραμμής εντολών ορίζεται πάνω στην επιφάνεια της στερεού αντικειμένου οριακή συνθήκη για ταχύτητα εξωτερικού αέρα που περιγράφεται από το SURF_ID="inlet" και εφαρμόζεται κατά τη διεύθυνση x.

4.2.6 Περιγραφή του μοντέλου καύσης που επιλέχτηκε για την προσομοίωση

Στον FDS υπάρχει η δυνατότητα επιλογής της βασικής μεθόδου περιγραφής της πυρόλυσης των στερεών και υγρών καυσίμων. Η επιλογή της κάθε μεθόδου επαφίεται στο χρήστη ανάλογα με της πληροφορίες που έχει στη διάθεση του.

Ενδεικτικά αναφέρονται οι τέσσερις μέθοδοι περιγραφής του μοντέλου πυρόλυσης.

- **Φλόγα με σταθερό ρυθμό έκλυσης θερμότητας.**

Για παράδειγμα εκλύονται 500kW/m² στην επιφάνεια FIRE με την εντολή:

```
&SURF ID='FIRE',HRRPUA=500. /
```

- **Εξάπλωση της φλόγας με δεδομένο ρυθμό που μεταβάλλεται σε σχέση με το χρόνο.**

Σε αυτή τη μέθοδο είναι απαραίτητο να οριστεί ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (Heat Release Rate Per Unit Area-HRRPUA), αλλά και μία χρονική παράμετρος

η οποία αντιστοιχεί στο HRRPUA κάθε χρονική στιγμή. Η χρονική παράμετρος εισάγεται της αναφέρθηκε και παραπάνω με την εντολή Ramp.

- **Στερεά καύσιμα που καίγονται με σταθερό ρυθμό έκλυσης θερμότητας**

Σε αυτή τη μέθοδο είναι απαραίτητο να οριστούν οι πληροφορίες που αφορούν της θερμικές ιδιότητες του όγκου του στερεού.

- **Στερεά καύσιμα που δεν καίγονται με συγκεκριμένο ρυθμό.**

Αυτή η μέθοδος έχει να κάνει με χαρακτηριστικά της αντίδρασης Arrhenius που αφορούν στερεά καύσιμα.

Στην προσομοίωση του πειράματος (Huang et al., 2008) με τον κώδικα FDS επιλέχθηκε η δεύτερη μέθοδος για τον ορισμό έκλυσης θερμότητας κατά την καύση του επτανίου. Η επιλογή αυτή δεν έγινε τυχαία, καθώς από τα δεδομένα του πειράματος ήταν γνωστός, για όλα τα σενάρια φωτιάς ο ρυθμός απώλειας μάζας σε σχέση με το χρόνο.

Συγκεκριμένα, από τα διαγράμματα ρυθμού απώλειας μάζας σε σχέση με το χρόνο βρέθηκε ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας ακολουθώντας την εξής διαδικασία, η οποία παρουσιάζεται και στο σχήμα 4.6.

Αρχικά ο ρυθμός απώλειας μάζας (g/s^2) διαιρείται με το 1000 για να μετατραπεί σε kg/s^2 και στη συνέχεια διαιρείται με το εμβαδό της επιφάνειας της κηλίδας καυσίμου 10^{-2} . Πολλαπλασιάζεται με τη θερμότητα καύσης του επτανίου $\Delta H = 44,600 kJ/kg$ (ισχύει $\dot{Q} = \dot{m} \Delta H$) και προκύπτει ο ρυθμός έκλυσης ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας σε kW/m^2 .

$$\frac{dm}{dt} \left(\frac{g}{s} \right) \xrightarrow{/1000} \left(\frac{kg}{s} \right) \xrightarrow{/10^{-2}} \frac{kg}{s \cdot m^2} \xrightarrow{\times 44,600 kJ/kg} \frac{kJ}{s \cdot m^2} \rightarrow \frac{kW}{m^2}$$

ανά μονάδα επιφάνειας

Σχήμα 4.6 Διαδικασία υπολογισμού του ρυθμού έκλυσης θερμότητας.

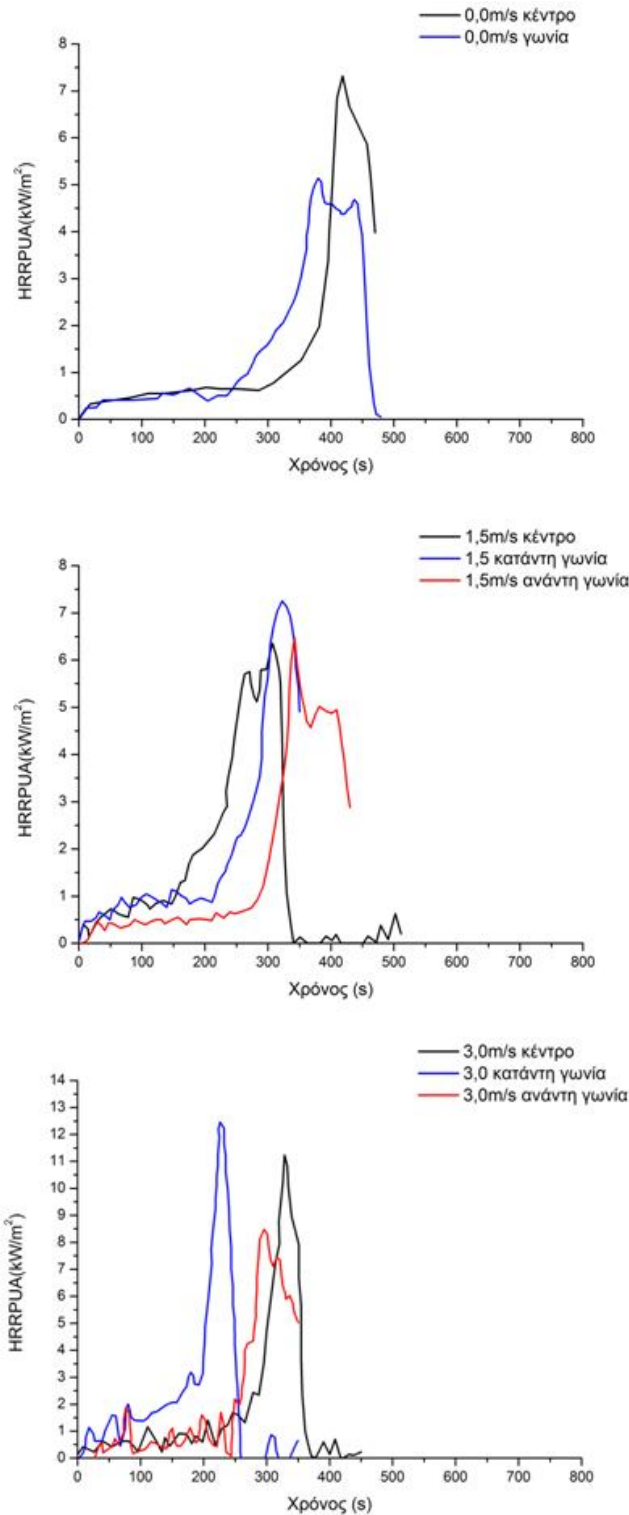
Πληροφορία για την περιγραφή της καύσης του υγρού επτανίου στον FDS αποτέλεσε ο Ρυθμός Έκλυσης Ενέργειας Ανά Μονάδα Επιφάνειας (Heat Release Rate Per Unit Area-HRRPUA) σε συνάρτηση με το χρόνο. Η χρονική παράμετρος εισήχθη με την εντολή Ramp. Για παράδειγμα, στην περίπτωση όπου η εστία βρίσκεται στο κέντρο του διαμερίσματος και για 0,0 m/s ταχύτητα εξωτερικού αέρα από το παρακάτω κομμάτι του κώδικα που χρησιμοποιήθηκε ορίζεται ρυθμός έκλυσης ενέργειας στην επιφάνεια του καυστήρα (FIRE), για όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

```
&SURF ID      = 'fotia'
RAMP_Q       = 'HEAT RELEASE RATE'   HRRPUA= 7315.8272 / HRR se kw/m^2

&RAMP ID     = 'HEAT RELEASE RATE', T=0.0, F=0.0 / heat release rate apo diagramma me mass loss rate * hu
&RAMP ID     = 'HEAT RELEASE RATE', T=17.74, F=0.04425 / heat release rate apo diagramma me mass loss rate * hu
```

όπου αρχικά (για $t=0$) η φωτιά είναι σβηστή και τη χρονική στιγμή $t=17,74s$ εκλύονται $0,04425 \times 7315,8272=323,725 \text{ kW/m}^2$.

Το σχήμα 4.7 παρουσιάζει το Ρυθμό Έκλυσης Ενέργειας Ανά Μονάδα Επιφάνειας (HRRPUA) σε συνάρτηση με το χρόνο, όπως προέκυψε μετά από επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων για τις περιπτώσεις ταχύτητας εξωτερικού ανέμου 0,0 m/s, 1,5 m/s και 3 m/s αντίστοιχα.



Σχήμα 4.7 Ρυθμός έκλυσης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας συναρτήσει του χρόνου για α) 0,0 m/s, β) 1,5 m/s και γ) 3,0 m/s.

4^[EA1].2.7 Ορισμός των “συσκευών μέτρησης” στον FDS

Στον κώδικα FDS τα θερμοστοιχεία, καθώς και άλλες “συσκευές μέτρησης”, ορίζονται με το γκρουπ εντολών DEVC. Κάθε συσκευή είναι απαραίτητο να τοποθετηθεί σε κάποιο σημείο που ανήκει στο υπολογιστικό πεδίο. Οι φυσικές συντεταγμένες της συσκευής δίνονται από μία τριπλέτα πραγματικών αριθμών, XYZ. Της κάθε συσκευής συνδέεται με την ποσότητα QUANTITY την οποία μετράει. Για παράδειγμα με την εντολή:

```
&DEVC XYZ=5.0,0.75,0.3, QUANTITY='VELOCITY',
```

ο FDS καταγράφει την ταχύτητα στο σημείο με συντεταγμένες (5,0, 0,75, 0,3) σαν συνάρτηση του χρόνου. Κάποιες φορές κρίνεται χρήσιμο να ορίσουμε και τον προσανατολισμό που έχει μία συσκευή. Με την παράμετρο IOR ορίζουμε τον προσανατολισμό της συσκευής που βρίσκεται πάνω σε μία στερεή επιφάνεια. Η εντολή:

```
&DEVC XYZ=1.23,0.75,0.1, QUANTITY='WALL TEMPERATURE', IOR=1 /
```

ορίζει ότι η “συσσκευή μέτρησης” της θερμοκρασίας (θερμοστοιχείο), η οποία βρίσκεται στη θέση (1,23, 0,75, 0,1), δείχνει κατά τη θετική διεύθυνση του άξονα x.

Της σημειωθεί ότι είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί η ίδια παράμετρος και για συσκευές που δεν βρίσκονται πάνω σε κάποια επιφάνεια, της οι καταιονιστήρες.

4.3 Υπολογιστικό πλέγμα

Ο όγκος της υπολογιστικού χωρίου ορίζεται με την εντολή MESH. Στο παρακάτω παράδειγμα,

```
&MESH IJK=25,50,60, XB=0.0,0.75,0.0,1.5,0.0,1.8 / exw 25x50x60=75000 cells diastaseis cell dx=dy=dz=0.03
```

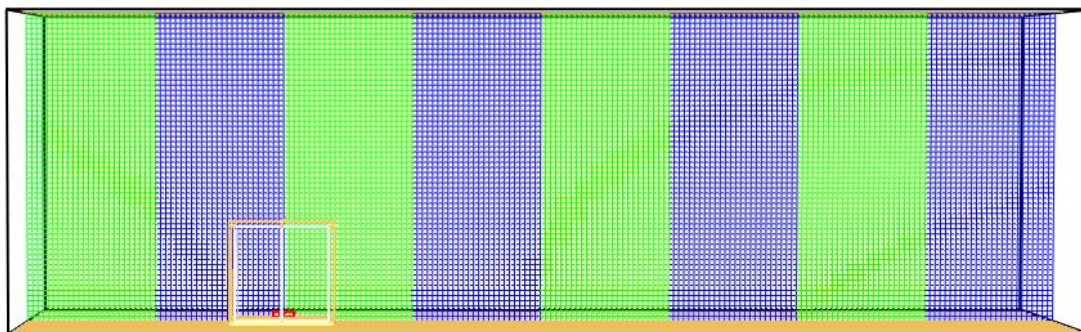
ορίζεται πλέγμα που διαγράφει έναν όγκο που ξεκινά από το (0,0, 0,0, 0,0) και εκτείνεται κατά 0,75 m κατά τη θετική κατεύθυνση του άξονα x, 1,5 m κατά τη θετική διεύθυνση του άξονα y και 1,8 m κατά τη θετική διεύθυνση του άξονα z.

Το πλέγμα υποδιαιρείται σε ομοιόμορφα κελιά μέσω των παραμέτρων IJK. Σε αυτό το παράδειγμα το πλέγμα χωρίζεται σε $\delta x = \frac{0,75}{25} = 0,03\text{m} \Rightarrow 3\text{cm}$ κύβους: 25 κύβους στην κατεύθυνση x, 20 κύβους στην κατεύθυνση y και 60 κύβους στην κατεύθυνση z.

Σημειώνεται ότι επειδή κατά τη διάρκεια των υπολογισμών χρησιμοποιείται FFTs (Ταχύς Μετασχηματισμός Fourier-Fast Fourier Transforms) κατά τη διεύθυνση y και z, η δεύτερη και η τρίτη διάσταση του πλέγματος είναι απαραίτητο να ακολουθούν συγκεκριμένους κανόνες. Συγκεκριμένα, τα j και k είναι απαραίτητο να ακολουθούν τον κανόνα: $2^k \times 3^m \times 5^n$, όπου k,m και n είναι ακέραιοι. Για παράδειγμα, οι αριθμοί $64 = 2^6$, $72 = 2^3 \times 3^2$ και $108 = 2^2 \times 3^3$ πληρούν της προϋποθέσεις για της υποδιαιρέσεις του πλέγματος, ενώ οι αριθμοί 37, 99 and 109 δεν πληρούν της προϋποθέσεις.

4.3.1 Παράλληλη επεξεργασία του κώδικα FDS με πρωτόκολλο MPI (Message Passing Interface)

Το υπολογιστικό χωρίο ενδέχεται να αποτελείται από περισσότερα από ένα πλέγματα, κατάλληλα συνδεδεμένα μεταξύ της. Οι συνδέσεις ακολουθούν έναν απλό κανόνα ευθυγράμμισης πλέγματος (Σχήμα 4.8).



Σχήμα 4.8 Το υπολογιστικό πεδίο της προσομοίωσης χωρισμένο σε 8 πλέγματα.

Για τη μείωση του υπολογιστικού χρόνου στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν το υπολογιστικό πεδίο χωρίστηκε σε 8 πλέγματα ίδιων διαστάσεων και χρησιμοποιήθηκε η δυνατότητα παράλληλης επεξεργασίας του κώδικα FDS (Message Passing Interface-MPI), με τον τρόπο που φαίνεται παρακάτω:

```
&MESH IJK=25,50,60, XB=0.0,0.75,0.0,1.5,0.0,1.8 / exw 25x50x60=75000 cells diastaseis cell dx=dy=dz=0.03  
&MESH IJK=25,50,60, XB=0.75,1.5,0.0,1.5,0.0,1.8 / exw 25x50x60=75000 cells diastaseis cell dx=dy=dz=0.03  
&MESH IJK=25,50,60, XB=1.5,2.25,0.0,1.5,0.0,1.8 / exw 25x50x60=75000 cells diastaseis cell dx=dy=dz=0.03  
&MESH IJK=25,50,60, XB=2.25,3.0,0.0,1.5,0.0,1.8 / exw 25x50x60=75000 cells diastaseis cell dx=dy=dz=0.03  
&MESH IJK=25,50,60, XB=3.0,3.75,0.0,1.5,0.0,1.8 / exw 25x50x60=75000 cells diastaseis cell dx=dy=dz=0.03  
&MESH IJK=25,50,60, XB=3.75,4.5,0.0,1.5,0.0,1.8 / exw 25x50x60=75000 cells diastaseis cell dx=dy=dz=0.03  
&MESH IJK=25,50,60, XB=4.5,5.25,0.0,1.5,0.0,1.8 / exw 25x50x60=75000 cells diastaseis cell dx=dy=dz=0.03  
&MESH IJK=25,50,60, XB=5.25,6.0,0.0,1.5,0.0,1.8 / exw 25x50x60=75000 cells diastaseis cell dx=dy=dz=0.03 / sum=6x75000=600000cells
```

4.3.2 Κριτήριο [McGrattan et al., 2002]

Ένας επιπλέον περιορισμός για το πλέγμα ο οποίος ισχύει για προσομοιώσεις που έχουν να κάνουν με τυρβώδη πλούμια φωτιάς λήφθηκε υπόψη στα πλαίσια της υπολογιστικής προσομοίωσης. Ουσιαστικά είναι ένα κριτήριο αξιολόγησης του υπολογιστικού χωρίου που χρησιμοποιείται, ανάλογα με την ισχύ της φλόγας (McGrattan et al., 2002). Το κριτήριο αυτό περιγράφεται αναλυτικά σε αυτήν την ενότητα. Η αδιάστατη έκφραση της διαμέτρου της φλόγας δίνεται από τη σχέση:

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\text{amb}} c_p T_{\text{amb}} \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (4.2)$$

Όπου: D^* είναι η χαρακτηριστική διάμετρος της φωτιάς,

\dot{Q} ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας λόγω της φωτιάς,

$\rho_{\text{amb}} = 1,2 \text{ kg} / \text{m}^3$ η πυκνότητα του αέρα περιβάλλοντος,

$c_p = 1 \text{ kJ} / \text{kgK}$ η ειδική θερμοχωρητικότητα,

$T_{\text{amb}} = 293 \text{ K}$ η θερμοκρασία περιβάλλοντος και

$g = 9,81 \text{ m}^2 / \text{s}$ η σταθερά της βαρύτητας (User's guide).

Η ποσότητα $D^* / \delta x$, όπου D^* η χαρακτηριστική διάμετρος της φωτιάς και δx το μήκος του υπολογιστικού κελιού, χαρακτηρίζει το κατά πόσο η διακριτική ικανότητα του πλέγματος είναι ικανοποιητική για την μελέτη ενός σεναρίου φωτιάς (McDermott et al., 2010).

Στη μελέτη των (McGrattan et al., 2002) υποστηρίζεται ότι αν

$$D^* / \delta x > 10 \quad (4.3)$$

τότε η ακρίβεια του υπολογιστικού πλέγματος είναι ικανοποιητική χωρίς να αυξάνεται υπέρμετρα το υπολογιστικό κόστος. Στην παρούσα μελέτη πραγματοποιήθηκε έλεγχος αν το υπολογιστικό χωρίο που χρησιμοποιήθηκε ικανοποιεί την παραπάνω συνθήκη.

Αναλυτικότερα ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας της φωτιάς δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{Q} = \dot{m} \Delta H \quad (4.4)$$

όπου \dot{m} η παροχή μάζας και ΔH η θερμότητα καύσης του καυσίμου (επτανίου) από διαθέσιμη βιβλιογραφία (N. Iqbal et al., 2003) ορίστηκε: $\Delta H = 44,600 \text{ kJ} / \text{kg}$

Η παροχή μάζας υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\rho = \frac{\dot{m}}{V} \quad (4.5)$$

Η πυκνότητα από διαθέσιμες βιβλιογραφικές πηγές (N. Iqbal et al., 2003) βρέθηκε:

$$\rho_{\text{C}_7\text{H}_{16}} = 650 \text{ kg} / \text{m}^3$$

Άρα ο όγκος της κηλίδας που χρησιμοποιήθηκε: $V = 250 \text{ ml} = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$.

Επειδή η μάζα του καυσίμου μειώνεται με την πάροδο του χρόνου επιλέχθηκε η μέγιστη παροχή μάζας που είναι στην αρχή της καύσης. Η αρχική παροχή μάζας βρέθηκε: $\dot{m} = 0,1625 \text{ kg} / \text{s}$.

Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας της φωτιάς υπολογίστηκε: $\dot{Q} \approx 7,3158 \text{kJ/s}$.

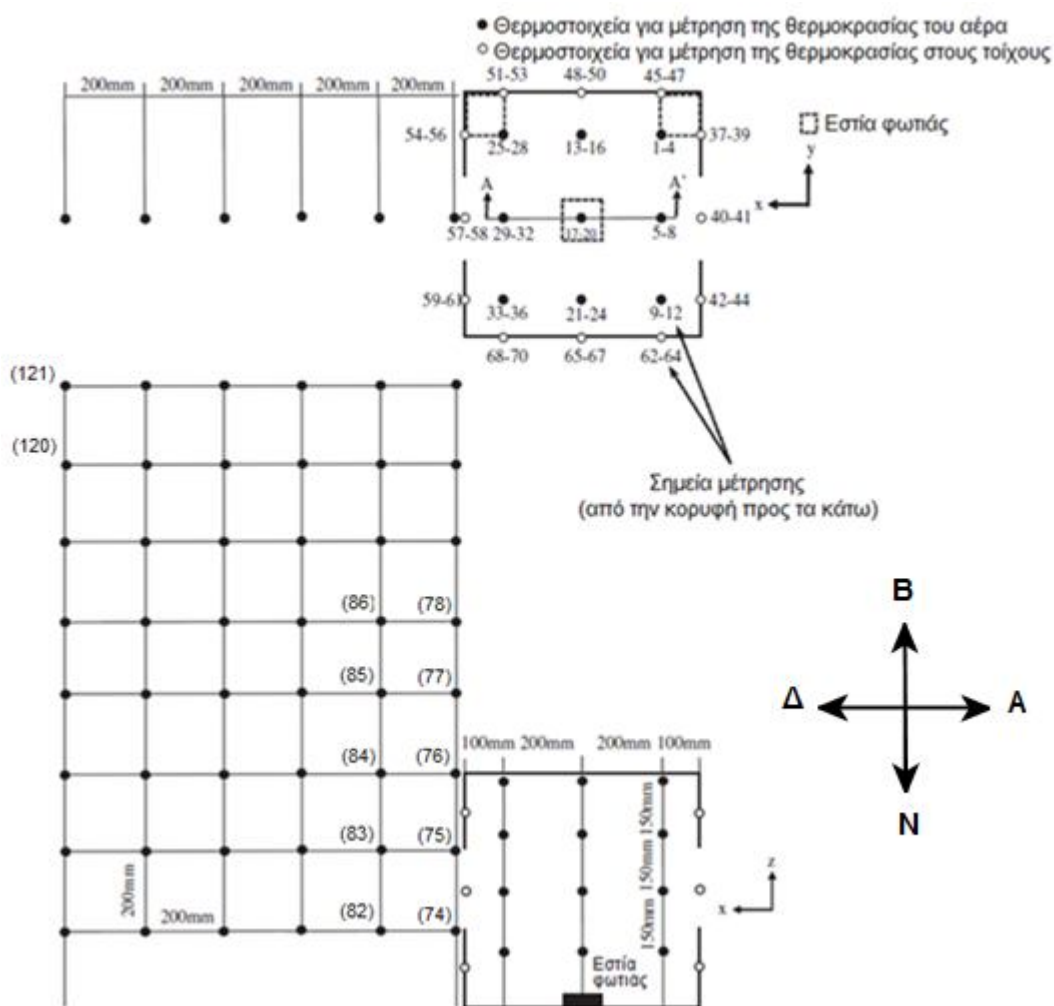
Η χαρακτηριστική διάμετρος της φωτιάς υπολογίστηκε: $D^* \approx 0,33 \text{m}$

Για να ισχύει η συνθήκη $D^*/\delta x > 10$, βρέθηκε για το μήκος του υπολογιστικού κελιού: $\delta x \leq 0,03$
(4.6).

Το υπολογιστικό χωρίο που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της φωτιάς στο διαμέρισμα και την αεροσήραγγα έχει διαστάσεις 6,0m x 1,5m x 1,8m κατά την x, y και z διάσταση αντιστοίχως. Είναι χωρισμένο σε 600.000 κελιά όπου το καθένα έχει μήκος πλευράς 0,03m. Το μήκος του υπολογιστικού κελιού ικανοποιεί το κριτήριο (McGrattan et al., 2002). Ισχύει ότι: $\delta x = \delta y = \delta z = 0,03$. Ας σημειωθεί εδώ ότι οι διαστάσεις του υπολογιστικού χωρίου επιλέχτηκαν λαμβάνοντας υπόψη τις διαστάσεις της εγκατάστασης. Τέλος, οι διαστάσεις (i,j,k)=(200,50,60) ικανοποιούν τον κανόνα ($2^k \times 3^m \times 5^n$).

4.4 Περιγραφή της πειραματικής διάταξης.

Η ταχύτητα του εξωτερικού αέρα μετρήθηκε, σε απόσταση 3200 mm δεξιά από το διαμέρισμα, κατακόρυφα σε τρία σημεία, σε ύψη 300, 600 και 900 mm πάνω από το έδαφος. Η ομοιομορφία της ταχύτητας του ανέμου επιβεβαιώθηκε στην κάθετη διεύθυνση. Για τη μέτρηση της ταχύτητας κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν ανεμόμετρα θερμού σύρματος (Kanomax, KA12). Το σχήμα 4.9 παρουσιάζει ένα σχηματικό διάγραμμα της πειραματικής μετρητικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε γύρω από το διαμέρισμα υπό κλίμακα.

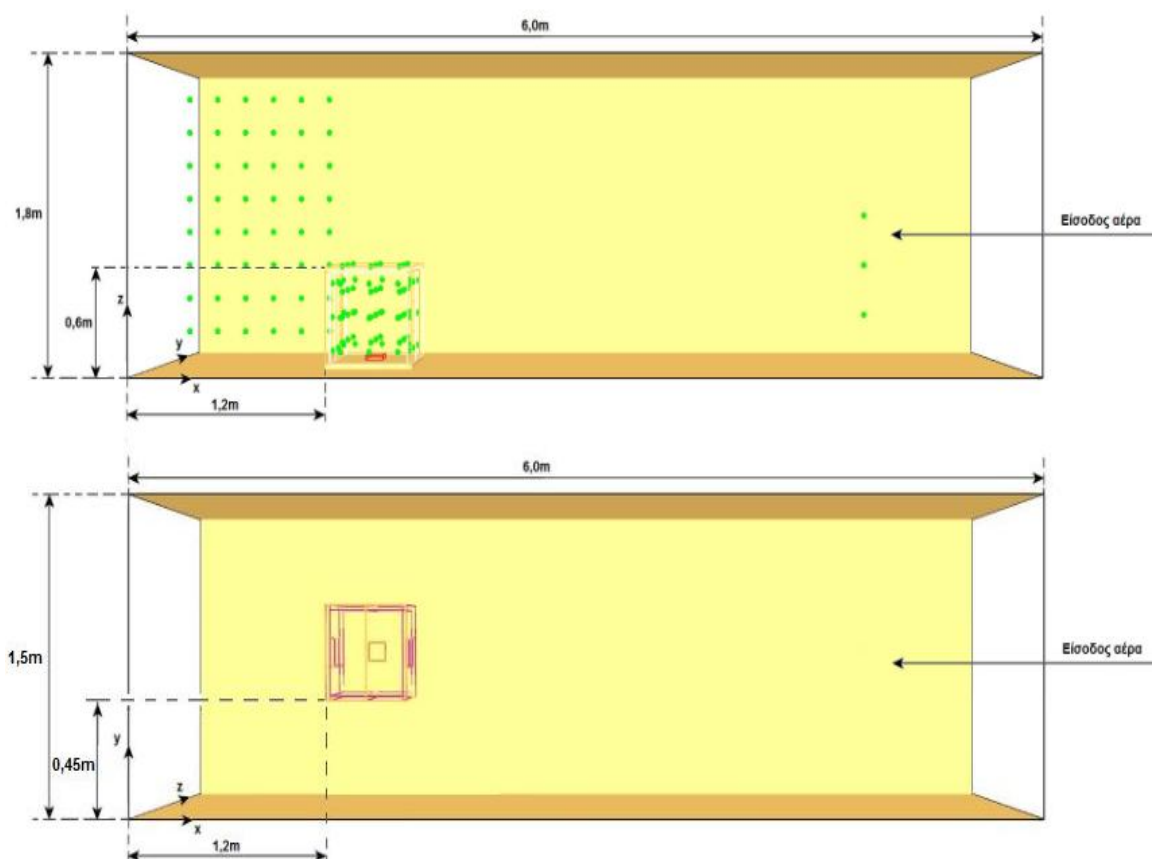


Σχήμα 4.9 Σχηματικό διάγραμμα της πειραματικής μετρητικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε γύρω από το διαμέρισμα [Hong Huang et al., 2008].

Μετρήσεις για τις θερμοκρασίες έγιναν μέσα στο διαμέρισμα, πάνω στους τοίχους κι έξω από το άνοιγμα στα αριστερά (κατάντη) του διαμερίσματος. Για της μετρήσεις των θερμοκρασιών χρησιμοποιήθηκαν θερμοστοιχεία τύπου K. Η θερμοκρασία του αέρα μέσα στο διαμέρισμα μετρήθηκε σε 4 διαφορετικά ύψη στην κάθετη διεύθυνση z ανά 150 mm και σε 3 διαφορετικές θέσεις

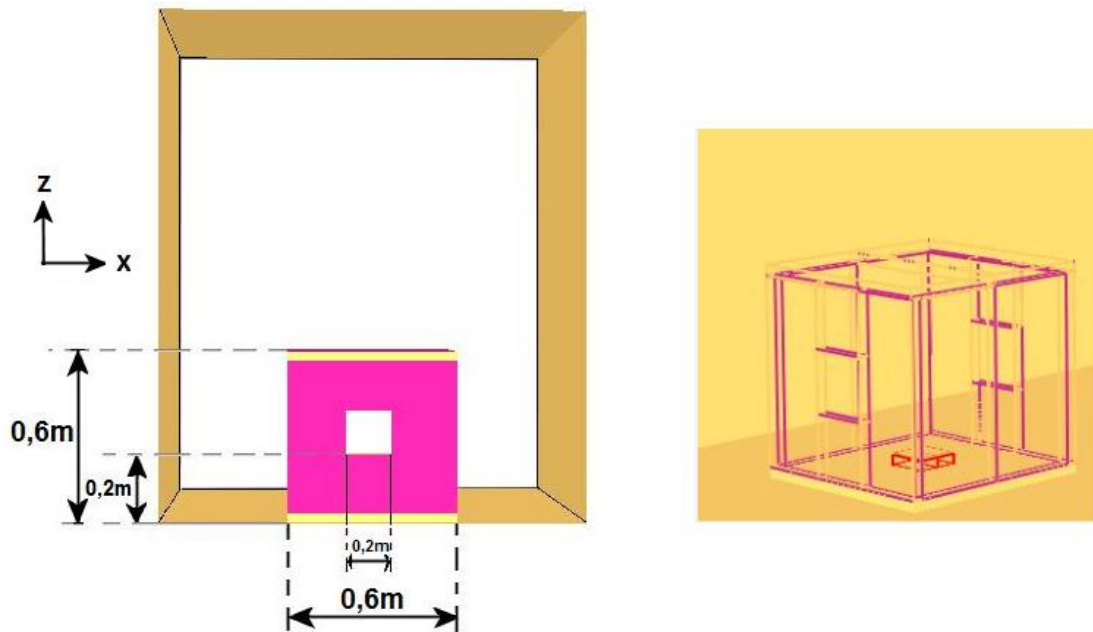
κατά τη διεύθυνση x και κατά τη διεύθυνση y αντίστοιχα, σχήμα 4.9. Έτσι, διαμορφώθηκε ένα σύνολο 36 σημείων στα οποία πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις. Οι θερμοκρασίες του τοίχου μετρήθηκαν ομοιόμορφα σε κάθε τοίχο σε 9 διαφορετικά σημεία. Τα θερμοστοιχεία προσκολλήθηκαν στις επιφάνειες του ξύλινου τοίχου (τοίχος από ειδικό ξύλο κέδρου-1^ο υλικό που συναντάται στον τοίχο από την εσωτερική της την εξωτερική πλευρά) μέσω λεπτών συρμάτων, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί αρκετά κοντινή επαφή μεταξύ του αισθητήρα του θερμοστοιχείου και της επιφάνειας του τοίχου. Για τη μέτρηση της εξωτερικής φλόγας χρησιμοποιήθηκε ένα ασάλινο πλέγμα πάνω στο οποίο τοποθετήθηκαν τα θερμοστοιχεία. Ένα σύνολο από 48 σημεία μέτρησης τοποθετήθηκαν ανά διαστήματα των 200 mm κατά x και z άξονα. Ο ρυθμός απώλειας μάζας του καυσίμου μετρήθηκε μέσω της ηλεκτρονικής ζυγαριάς (Sartorius, LA64001S, κατασκευασμένη στη Γερμανία), η οποία τοποθετήθηκε κάτω από το δοχείο του καυσίμου. Το εύρος ήταν 64 kg με ακρίβεια της τάξεως του 0,1 g.

Στο σχήμα 4.10 παρουσιάζεται πρόσοψη και η κάτοψη της πειραματικής διάταξης, όπως ορίστηκαν στον κώδικα FDS.



Σχήμα 4.10 Πρόσοψη και κάτοψη της πειραματικής εγκατάστασης όπως ορίστηκε στον FDS

Στο σχήμα 4.11 απεικονίζεται η πλάγια όψη και η κάτοψη του μοντέλου διαμερίσματος που χρησιμοποιήθηκε. Σημειώνεται ότι για την δημιουργία όλων των τρισδιάστατων σχημάτων που εμφανίζονται σε αυτό το κεφάλαιο, της αναφέρεται και στο κεφάλαιο 3, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Smokeview.



Σχήμα 4.11 Πλάγιες όψεις και διαστάσεις του μοντέλου διαμερίσματος

Οι συντεταγμένες των θερμοστοιχείων επιλέχθηκαν με βάση το σχήμα 4.9 και τις διαστάσεις του πλέγματος που ορίστηκε για την προσομοίωση. Στους πίνακες 4.3, 4.4, 4.5 και 4.6 παρουσιάζονται αναλυτικά οι συντεταγμένες των θερμοστοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν. Ας σημειωθεί εδώ ότι η αρίθμηση των θερμοστοιχείων που αφορούν τις θερμοκρασίες στους τοίχους, αλλά και τις θερμοκρασίες μέσα στο διαμέρισμα, έγινε με φορά από επάνω προς τα κάτω. Για τα θερμοστοιχεία μέτρησης της εξωτερικής φλόγας έγινε η θεώρηση ότι η αρίθμηση ξεκινάει από το άνοιγμα στην εξωτερική πλευρά του δυτικού τοίχου του διαμερίσματος και συνεχίζει προς τα επάνω και κατόντη (σχήμα 4.9). Η τοποθέτηση των θερμοστοιχείων έγινε σε απόσταση ίση με το πάχος ενός υπολογιστικού κελιού $\delta x = 0,033$, έτσι ώστε να μην εφάπτεται το πλέγμα στην εξωτερική πλευρά του δυτικού τοίχου.

Τέλος, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.1, η ταχύτητα του εξωτερικού αέρα μετρήθηκε, κατακόρυφα σε τρία σημεία, σε ύψη 300, 600 και 900 mm πάνω από το έδαφος. Οι συντεταγμένες των θερμοστοιχείων φαίνονται στον πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3			
Συντεταγμένες (x,y,z)	Θερμοστοιχεία μέτρησης ταχύτητας του εξωτερικού αέρα		
	71	72	73
x	5,00	5,00	5,00
y	0,75	0,75	0,75
z	0,30	0,60	0,90

Πίνακας 4.3 Συντεταγμένες θερμοστοιχείων μέτρησης ταχύτητας στο εξωτερικό κατόντη του διαμερίσματος.

Πίνακας 4.4									
Συντεταγμένες (x,y,z) (m)	Θερμοστοιχεία για μέτρηση θερμοκρασιών της τοίχους								
Ανατολικός τοίχος	37	38	39	40		41	42	43	44
x	1,77	1,77	1,77	1,77	-	1,77	1,77	1,77	1,77
y	0,95	0,95	0,95	0,75	-	0,75	0,55	0,55	0,55
z	0,5	0,3	0,1	0,5	-	0,1	0,5	0,3	0,1
Βόρειος τοίχος	45	46	47	48	49	50	51	52	53
x	1,70	1,70	1,70	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23
y	1,02	1,02	1,02	0,75	0,75	0,75	0,55	0,55	0,55
z	0,50	0,30	0,10	0,50	0,30	0,10	0,50	0,30	0,10
Δυτικός τοίχος	54	55	56	57		58	59	60	61
x	1,23	1,23	1,23	1,23	-	1,23	1,23	1,23	1,23
y	0,95	0,95	0,95	0,75	-	0,75	0,55	0,55	0,55
z	0,5	0,3	0,1	0,5	-	0,1	0,5	0,3	0,1
Νότιος τοίχος	62	63	64	65	66	67	68	69	70
x	1,70	1,70	1,70	1,50	1,50	1,50	1,30	1,30	1,30
y	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
z	0,50	0,30	0,10	0,50	0,30	0,10	0,50	0,30	0,10

** Στις παύλες δεν αντιστοιχεί κάποιο θερμοστοιχείο γιατί ανάντη και κατόντη του διαμερίσματος υπάρχουν 2 ανοίγματα.

Πίνακας 4.4 Συντεταγμένες θερμοστοιχείων μέτρησης θερμοκρασιών στους τοίχους του διαμερίσματος.

Πίνακας 4.5												
Συντεταγμένες	Θερμοστοιχεία για μέτρηση θερμοκρασίας μέσα στο διαμέρισμα											
Δεξιά	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
x	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
y	0,95	0,95	0,95	0,95	0,75	0,75	0,75	0,75	0,55	0,55	0,55	0,55
z	0,57	0,42	0,27	0,12	0,57	0,42	0,27	0,12	0,57	0,42	0,27	0,12
Κέντρο	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
x	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
y	0,95	0,95	0,95	0,95	0,75	0,75	0,75	0,75	0,55	0,55	0,55	0,55
z	0,57	0,42	0,27	0,12	0,57	0,42	0,27	0,12	0,57	0,42	0,27	0,12
Αριστερά	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
x	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
y	0,95	0,95	0,95	0,95	0,75	0,75	0,75	0,75	0,55	0,55	0,55	0,55
z	0,57	0,42	0,27	0,12	0,57	0,42	0,27	0,12	0,57	0,42	0,27	0,12

** Από την οροφή τα θερμοστοιχεία απέχουν απόσταση ίση με το πάχος της υπολογιστικού κελιού $\delta x \approx 0,033$.

Πίνακας 4.5 Συντεταγμένες θερμοστοιχείων μέτρησης θερμοκρασιών μέσα στο διαμέρισμα.

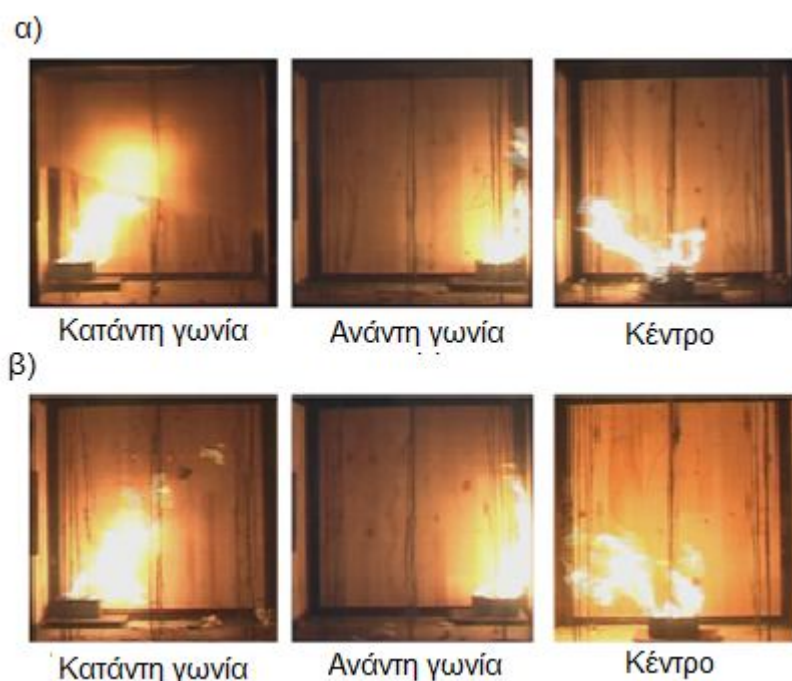
Πίνακας 4.6								
Συντεταγμένες (x,y,z) (m)	Θερμοστοιχεία πλέγματος για μέτρηση θερμοκρασίας εξωτερικής φλόγας							
	74	75	76	77	78	79	80	81
x	1,167	1,167	1,167	1,167	1,167	1,167	1,167	1,167
y	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750
z	0,300	0,500	0,700	0,900	1,100	1,300	1,500	1,700
	82	83	84	85	86	87	88	89
x	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967
y	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750
z	0,300	0,500	0,700	0,900	1,100	1,300	1,500	1,700
	90	91	92	93	94	95	96	97
x	0,767	0,767	0,767	0,767	0,767	0,767	0,767	0,767
y	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750
z	0,300	0,500	0,700	0,900	1,100	1,300	1,500	1,700
	98	99	100	101	102	103	104	105
x	0,657	0,657	0,657	0,657	0,657	0,657	0,657	0,657
y	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750
z	0,300	0,500	0,700	0,900	1,100	1,300	1,500	1,700
	106	107	108	109	110	111	112	113
x	0,467	0,467	0,467	0,467	0,467	0,467	0,467	0,467
y	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750
z	0,300	0,500	0,700	0,900	1,100	1,300	1,500	1,700
	114	115	116	117	118	119	120	121
x	0,167	0,167	0,167	0,167	0,167	0,167	0,167	0,167
y	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750
z	0,300	0,500	0,700	0,900	1,100	1,300	1,500	1,700

Πίνακας 4.6 Συντεταγμένες θερμοστοιχείων μέτρησης θερμοκρασιών εξωτερικής φλόγας.

4.5 Πειραματικές περιπτώσεις

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή πραγματοποιήθηκε παραμετρική μελέτη μεταβάλλοντας κάθε φορά την ταχύτητα του ανέμου και τη θέση της εστίας. Πιο συγκεκριμένα, το πείραμα επαναλήφθηκε για ταχύτητες ανέμου 0,0, 1,5, και 3,0 m/s. Παράλληλα, για τη μελέτη επίδρασης του εξωτερικού ανέμου για κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις, η εστία της φωτιάς τοποθετήθηκε σε τρεις διαφορετικές θέσεις 1) στην ανάντη γωνία 2) στην κατάντη γωνία και 3) στο κέντρο του διαμερίσματος.

Στο σχήμα 4.12 παρατηρούνται οι θέσεις τις εστίας για τα σενάρια φωτιάς με ταχύτητα ανέμου 1,5 και 3,0 m/s.



Σχήμα 4.12 Θέσεις τις εστίας για σενάρια φωτιάς με ταχύτητα ανέμου α) 1,5 m/s και β) 3,0 m/s.

Στα πλαίσια της προσομοίωσης του πειράματος με τον κώδικα FDS έγιναν δοκιμές με διάφορα πλέγματα με στόχο την καλύτερη προσέγγιση των πειραματικών αποτελεσμάτων. Ας σημειωθεί επίσης, ότι οι δοκιμές στις διαστάσεις του πλέγματος, για οικονομία χρόνου, πραγματοποιήθηκαν μόνο στην περίπτωση που βρισκόταν στο κέντρο η εστία και για 0,0 m/s ταχύτητα ανέμου. Στην περίπτωση αυτή, επιλέχθηκε βάση κάποιων στατιστικών κριτηρίων το υπολογιστικό χωρίο που προσέγγιζε καλύτερα τα πειραματικά αποτελέσματα. Το συγκεκριμένο υπολογιστικό χωρίο που επιλέχθηκε στην ανωτέρω περίπτωση ακολουθήθηκε και στα υπόλοιπα σενάρια φωτιάς με μεταβλητές την ταχύτητα του ανέμου και τη θέση της εστίας. Το πλέγμα που επιλέχθηκε αποτελείται από 600.000 κελιά, όπου το καθένα έχει πλευρά 0,03m. Οι περιπτώσεις διαφορετικών πλεγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν και οι περιπτώσεις που μελετήθηκαν φαίνονται συνοπτικά στον πίνακα 4.7.

Πίνακας 4.7				
Περίπτωση	Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Τοποθεσία εστίας	Πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε (i x j x k=κελιά)	Μήκος υπολογιστικού κελιούδχ
1α	0,0	Κέντρο	75.000	0,03 και 0,06 (συνδυαστικό)
1β	0,0	Κέντρο	180.000	0,03 και 0,06 (συνδυαστικό)
1γ	0,0	Κέντρο	285.000	0,03 και 0,06 (συνδυαστικό)
1δ	0,0	Κέντρο	600.000	0,03
1ε	0,0	Γωνία	600.000	0,03
2α	1,5	Κέντρο	600.000	0,03
2β	1,5	Ανάντη	600.000	0,03
2γ	1,5	Κατάντη	600.000	0,03
3 ^α	3,0	Κέντρο	600.000	0,03
3β	3,0	Ανάντη	600.000	0,03
3γ	1,5	Κατάντη	600.000	0,03

Πίνακας 4.7 Υπολογιστικές μελέτες που ολοκληρώθηκαν.

4.6 Πειραματικά αποτελέσματα και προλέξεις της θερμοκρασίας

4.6.1 Στατιστική ανάλυση

4.6.1.1 Ποσοτική μέθοδος αξιολόγησης μοντέλων υπολογιστικής ρευστομηχανικής

Η διαδικασία αξιολόγησης αποτελεσμάτων από μοντέλα CFD αφορά τη σύγκριση υπολογιστικών αποτελεσμάτων με γνωστές τιμές από πειραματικά δεδομένα, εμπειρικά αποτελέσματα ή αναλυτικές εκφράσεις.

Στην ανάλυση γραμμικής παλινδρόμησης (Ierardi and Barnett, 2003) μία ποσότητα συγκρίνεται με ένα σύνολο δεδομένων. Η μέθοδος αυτή αναφέρεται συνήθως και ως μέθοδος τετραγώνων γινομένων Pearson, ή R^2 .

Η μαθηματική έκφραση του συντελεστή συσχέτισης R δίνεται από τη σχέση (4.7):

$$R = \frac{n(\sum X_i Y_i) - (\sum X_i)(\sum Y_i)}{\sqrt{[(n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2)][n \sum Y_i^2 - (\sum Y_i)^2]}} \quad (4.7)$$

όπου: n είναι ο αριθμός των σημείων δεδομένων

X_i είναι οι τιμές γνωστών δεδομένων (πειραματικά δεδομένα)

Y_i είναι οι υπολογιστικές τιμές (π.χ. προλέξεις θερμοκρασίας)

Να σημειωθεί ότι όσο περισσότερο η τιμή του συντελεστή R^2 προσεγγίζει τη μονάδα, υπάρχει καλύτερη συσχέτιση πειραματικών-υπολογιστικών τιμών. Στην ιδανική περίπτωση όπου το R^2 είναι 1, οι πειραματικές και υπολογιστικές τιμές ταυτίζονται ($X_i = Y_i$).

Επιπρόσθετα με τη μέθοδο γινομένων Pearson, οι προλέξεις θερμοκρασίας των διαφόρων πλεγμάτων αναλύθηκαν χρησιμοποιώντας το σχετικό σφάλμα. Το σφάλμα αυτό για ένα συγκεκριμένο σημείο υπολογίζεται από τη σχέση (4.8):

$$E = \frac{(Y - X)}{X} \quad (4.8)$$

όπου X και Y είναι οι πειραματικές και υπολογιστικές τιμές αντίστοιχα.

Για σύγκριση περισσότερων σημείων υπάρχει το μέσο σχετικό σφάλμα E_m , που υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις απόλυτες τιμές του σχετικού σφάλματος για κάθε σημείο.

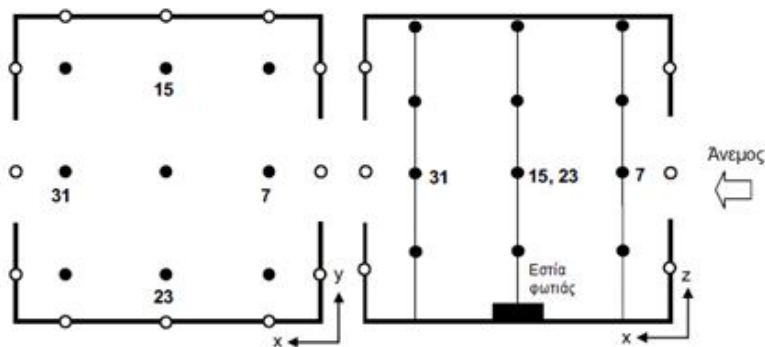
$$E_m = \frac{\sum \left| \frac{Y_i - X_i}{X_i} \right|}{n} \quad (4.9)$$

4.6.1.2 Επιλογή πλέγματος

Όπως έχει ήδη αναφερθεί οι δοκιμές στις διαστάσεις του πλέγματος, για οικονομία χρόνου, πραγματοποιήθηκαν μόνο στην περίπτωση για 0,0 m/s ταχύτητα ανέμου και θέση της εστίας στο κέντρο του διαμερίσματος. Η μέθοδος γινομένων Pearson χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική για τη σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με τις προλέξεις θερμοκρασίας, που προέκυψαν από τα διάφορα υπολογιστικά πλέγματα. Συγκεκριμένα, με βάση τη μέθοδο R^2 του Pearson συγκρίθηκαν οι πειραματικές τιμές με τις προλέξεις των υπολογιστικών χωρίων με 75.000, 180.000, 285.000 και 600.000 κελιά αντίστοιχα (Περιπτώσεις 1α,1β,1γ,1δ -Πίνακας 4.7). Στα ακόλουθα διαγράμματα γίνεται σύγκριση του συντελεστή γραμμικής συσχέτισης για τα διαφορετικά πλέγματα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διάρκεια της προκαταρκτικής αξιολόγησης.

Εσωτερικό του διαμερίσματος

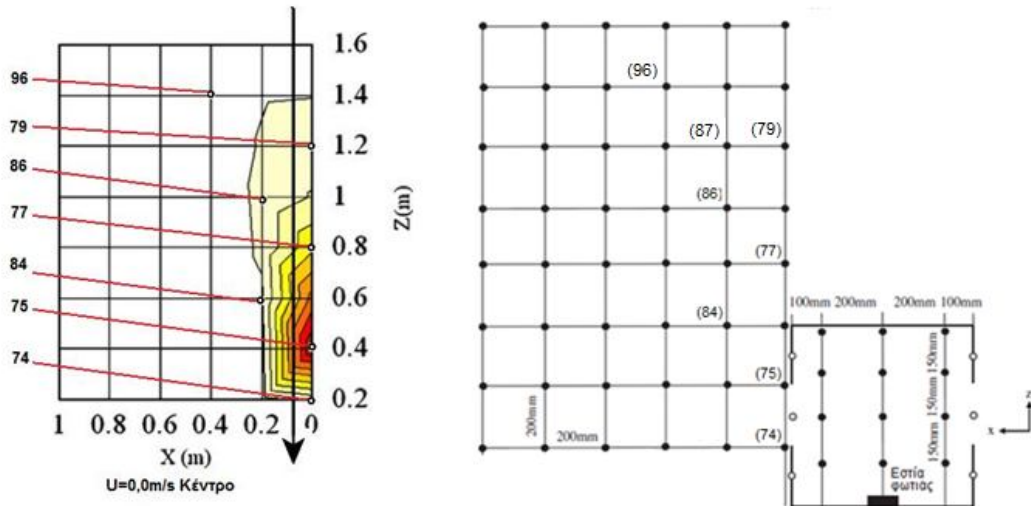
Για τις προλέξεις θερμοκρασίας στο εσωτερικό του διαμερίσματος (Σχήμα 4.13) επιλέχθηκαν δύο μεγέθη για τη σύγκριση του συντελεστή γραμμικής συσχέτισης. Το πρώτο αφορά τη μέγιστη τιμή των θερμοστοιχείων 7,15,23 και 31 και το δεύτερο αφορά τη μέση τιμή των θερμοστοιχείων αυτών σε ένα διάστημα 200s μετά την πλήρη ανάπτυξη της φλόγας και μέχρι το τέλος της προσομοίωσης (600s - 800s).



Σχήμα 4.13 Θέσεις των θερμοστοιχείων σε κάτοψη και πλάγια όψη για τις μετρήσεις στο εσωτερικό του δωματίου.

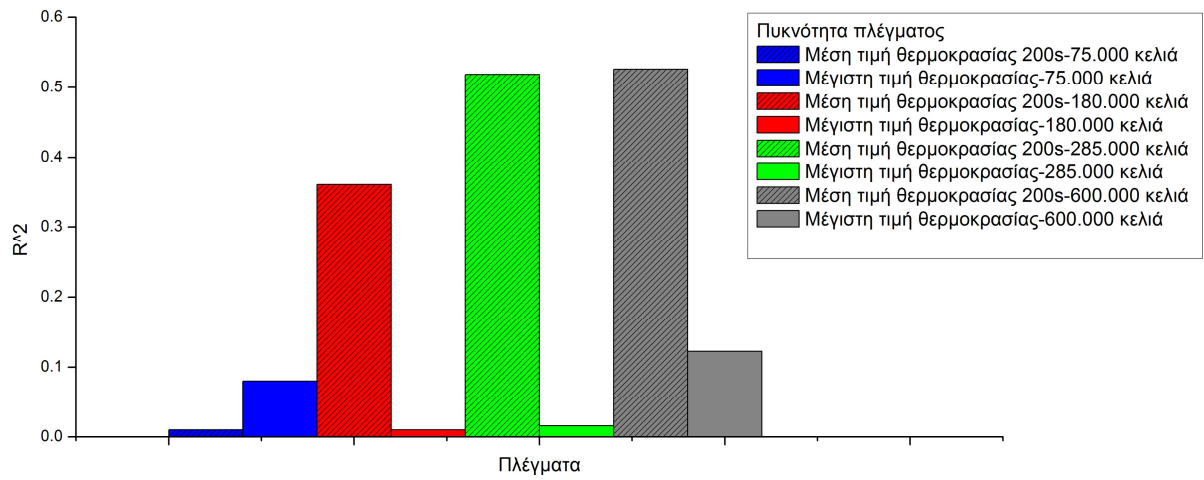
Εξωτερική φλόγα

Για τις προλέξεις θερμοκρασίας που αφορούν την εξωτερική φλόγα που εξέρχεται από το δυτικό άνοιγμα επιλέχθηκαν σημεία κατά μήκος της φλόγας και συγκρίθηκαν οι προλέξεις θερμοκρασίας των θερμοστοιχείων που βρίσκονταν σε εκείνα τα σημεία με τις πειραματικές τιμές (Σχήμα 4.14). Η σύγκριση έγινε βάση μίας μέσης θερμοκρασίας της εξωτερικής φλόγας για μία περίοδο 20s κατά τη φάση πλήρους ανάπτυξης της. Να σημειωθεί ότι στην παρούσα διπλωματική ακολουθήθηκε μία συγκεκριμένη διαδικασία για την εύρεση της συγκεκριμένης περιόδου, η οποία αναλύεται παρακάτω στην ενότητα 4.5.9.

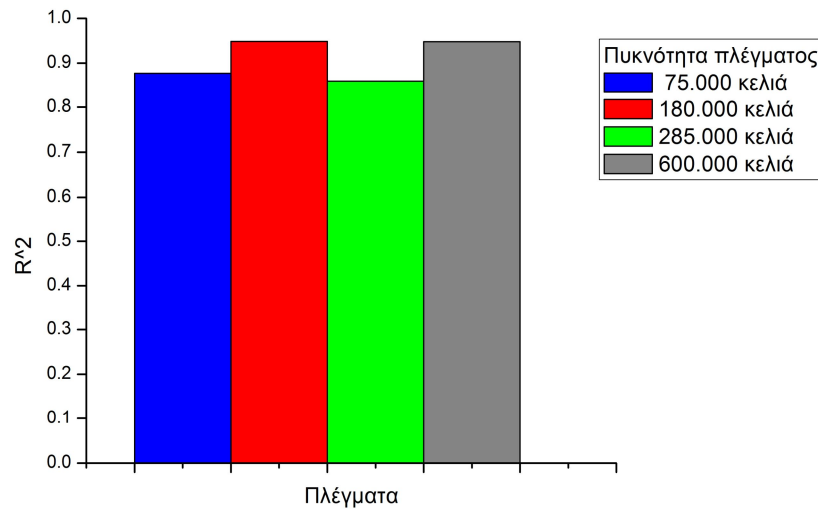


Σχήμα 4.14 Σημεία της εξωτερικής φλόγας κατά την περίοδο πλήρους ανάπτυξης της για $U=0,0\text{m/s}$ -Κέντρο.

Στα διαγράμματα 4.15 και 4.16 παρουσιάζεται η σύγκριση του συντελεστή γραμμικής συσχέτισης πειραματικών-υπολογιστικών δεδομένων (Περιπτώσεις 1α, 1β, 1γ, και 1δ) για θερμοκρασίες μέσα στο διαμέρισμα και για μέση θερμοκρασία εξωτερικής φλόγας αντίστοιχα.



Σχήμα 4.15 Σύγκριση του συντελεστή γραμμικής συσχέτισης για θερμοκρασίες στο εσωτερικό του διαμερίσματος.



Σχήμα 4.16 Σύγκριση του συντελεστή γραμμικής συσχέτισης για θερμοκρασίες που αφορούν τη μέση θερμοκρασία εξωτερικής φλόγας σε πλήρως αναπτυγμένη περίοδο.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά από την παραπάνω στατιστική ανάλυση παρουσιάζονται στον εποπτικό πίνακα 4.8.

	Πλέγματα							
	75000		180000		285000		600000	
Θέση θερμοστοιχείου	E_m (%)	R^2	E_m (%)	R^2	E_m (%)	R^2	E_m (%)	R^2
Εσωτερικό δωματίου-Μέγιστη τιμή Θερμοστοιχεία (7,15,23,31)	22,45	0,080	14,13	0,001	16,95	0,010	18,80	0,123
Εσωτερικό δωματίου- Μέση τιμή (200s) Θερμοστοιχεία (7,15,23,31)	10,33	0,001	20,83	0,361	18,65	0,519	10,08	0,526
Εξωτερική φλόγα Θερμοστοιχεία κατά μήκος της φλόγας	47,84	0,877	36,11	0,949	44,60	0,860	39,61	0,948

Πίνακας 4.8 Εποπτικός πίνακας της στατιστικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε.

Σημειώνεται ότι είναι στατιστικά ορθό στο πλέγμα όπου ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης εμφανίζει τη μέγιστη τιμή του εκεί να υπάρχει και το μικρότερο μέσο σχετικό σφάλμα. Ωστόσο, παρατηρείται ότι η παραπάνω αντιστοιχία δεν εμφανίζεται σε όλες τις περιπτώσεις. Συγκεκριμένα, μέγιστος γραμμικός συντελεστής και μικρότερο μέσο σχετικό σφάλμα σημειώνεται για το πλέγμα των 180.000 κελιών στην εξωτερική φλόγα και για το πλέγμα των 600.000 κελιών στο εσωτερικό του δωματίου.

Από την παραπάνω στατιστική ανάλυση διαπιστώνεται για το εσωτερικό του διαμερίσματος ότι δεν υπάρχει τόσο καλή συσχέτιση πειραματικών τιμών και προλέξεων της θερμοκρασίας, καθώς ο συντελεστής συσχέτισης R^2 λαμβάνει πολύ χαμηλές τιμές. Όσον αφορά την εξωτερική φλόγα οι τιμές του συντελεστή R^2 προσεγγίζουν τη μονάδα. Έχοντας μία συνολική εποπτική εικόνα από τον πίνακα 4.8 εκτιμάται ότι το πλέγμα που προσεγγίζει καλύτερα τις πειραματικές τιμές είναι αυτό με τα 600.000 κελιά.

4.6.2 Αποτελέσματα υπολογιστικής προσομοίωσης για το εσωτερικό του μοντέλου

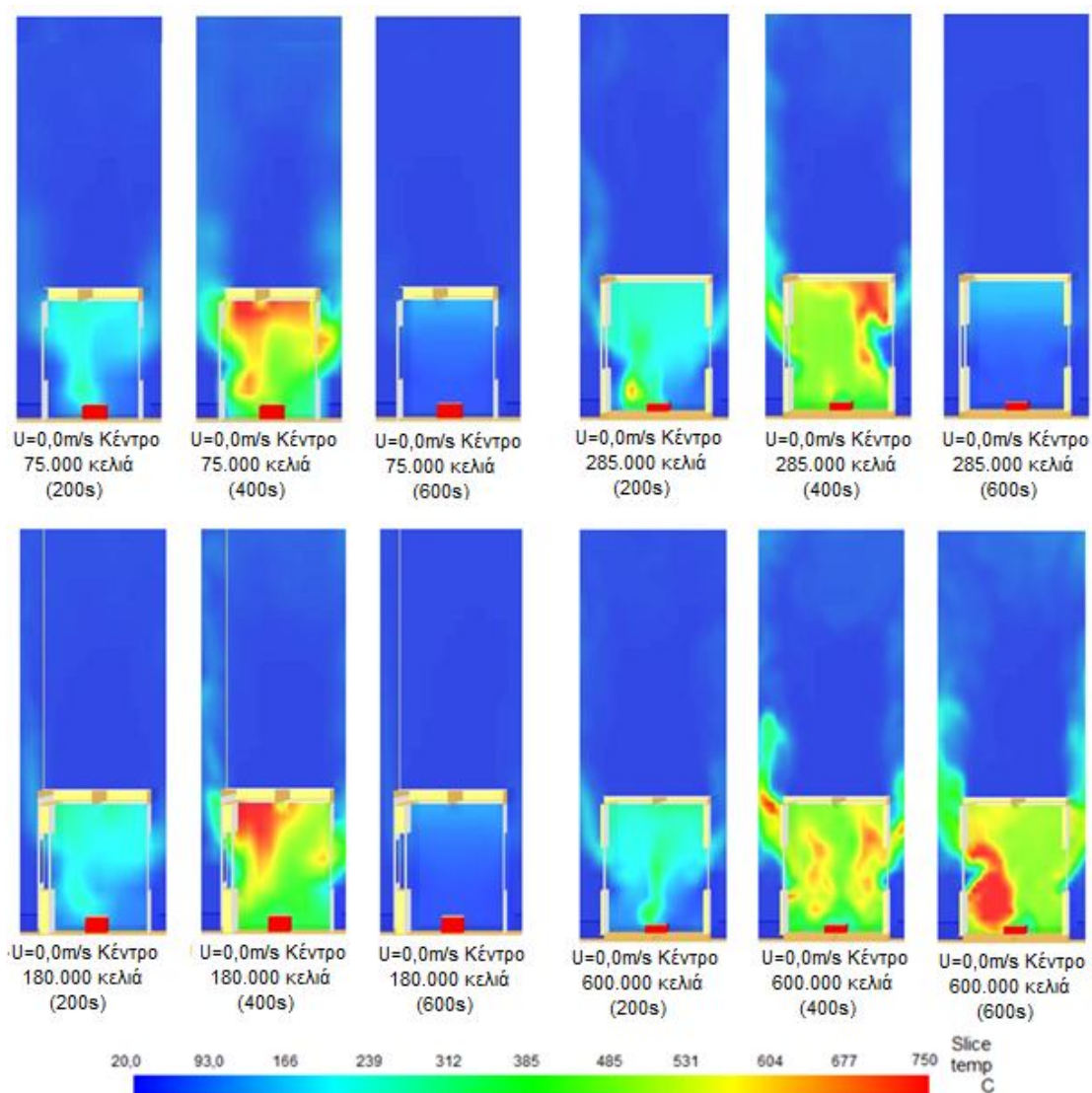
4.6.2.1 Θερμοκρασιακό πεδίο στο εσωτερικό του διαμερίσματος

Στα σχήματα 4.17, 4.18, 4.19, 4.20, 4.21, 4.22, 4.23 και 4.24 παρουσιάζεται το θερμοκρασιακό πεδίο για κάθε περίπτωση ταχύτητας και θέσης της εστίας, όπως διαμορφώνεται στο εσωτερικό του διαμερίσματος για τρεις διαφορετικές χρονικές στιγμές. Το θερμοκρασιακό πεδίο είναι σε τομή στο μέσο του υπολογιστικού χωρίου κατά τον άξονα y . Οι χρονικές στιγμές αφορούν τα στάδια ανάπτυξης της φωτιάς. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση νηνεμίας τα στιγμιότυπα που αντιπροσωπεύουν τα στάδια ανάπτυξης της φωτιάς αφορούν τα 200, 400 και 600s της προσομοίωσης, ενώ για τις περιπτώσεις επίδρασης εξωτερικού ανέμου αφορούν τα 150, 300 και 450s. Αυτή η διαφοροποίηση στις χρονικές στιγμές έγινε γιατί η εξέλιξη του φαινομένου της φωτιάς είναι πιο γρήγορη στην περίπτωση που υπάρχει εξωτερικός αέρας ταχύτητας 1,5m/s και 3,0m/s.

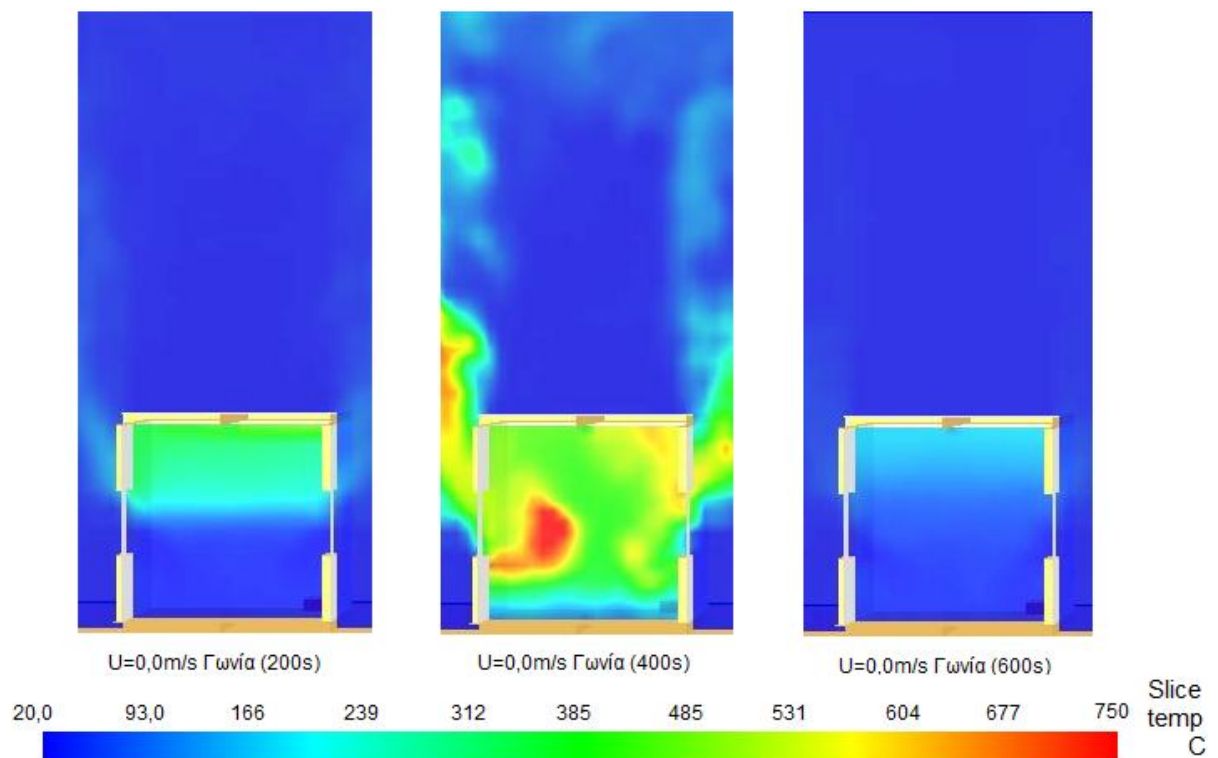
Για την κατάσταση νηνεμίας σημειώνονται αυξημένες θερμοκρασίες στην οροφή του μοντέλου κατά το στάδιο ανάπτυξης της φωτιάς. Για τη χρονική στιγμή των 400s γενικότερα σε όλες τις περιπτώσεις παρατηρείται ότι η φωτιά έχει εξαπλωθεί στο εσωτερικό του διαμερίσματος και εξέρχεται από το άνοιγμα. Στο χαμηλότερο επίπεδο του δωματίου σημειώνονται χαμηλότερες θερμοκρασίες. Το πλέγμα με τα 600.000 κελιά, για ταχύτητα ανέμου 0,0 m/s και θέση της εστίας στο κέντρο του μοντέλου, φαίνεται να παρουσιάζει τις υψηλότερες θερμοκρασίες.

Για την περίπτωση ταχύτητας εξωτερικού ανέμου 1,5 m/s παρατηρούνται υψηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με την κατάσταση νηνεμίας. Επίσης, όταν η εστία της φωτιάς βρίσκεται σε γωνία του διαμερίσματος και όχι στο κέντρο διαπιστώνονται εντονότερες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις. Ειδικότερα, οι υψηλότερες θερμοκρασίες στην οροφή λαμβάνονται στην περίπτωση όπου η εστία βρίσκεται στην ανάντη γωνία του διαμερίσματος και κυμαίνονται από 550 έως 750°C. Στην περίπτωση αυτή παρατηρείται εντονότερα και η θερμική διαστρωμάτωση του αέρα στο εσωτερικό του διαμερίσματος, ενώ παράλληλα διαπιστώνεται και μία ανοδική τάση των θερμών στρωμάτων αέρα προς την οροφή του.

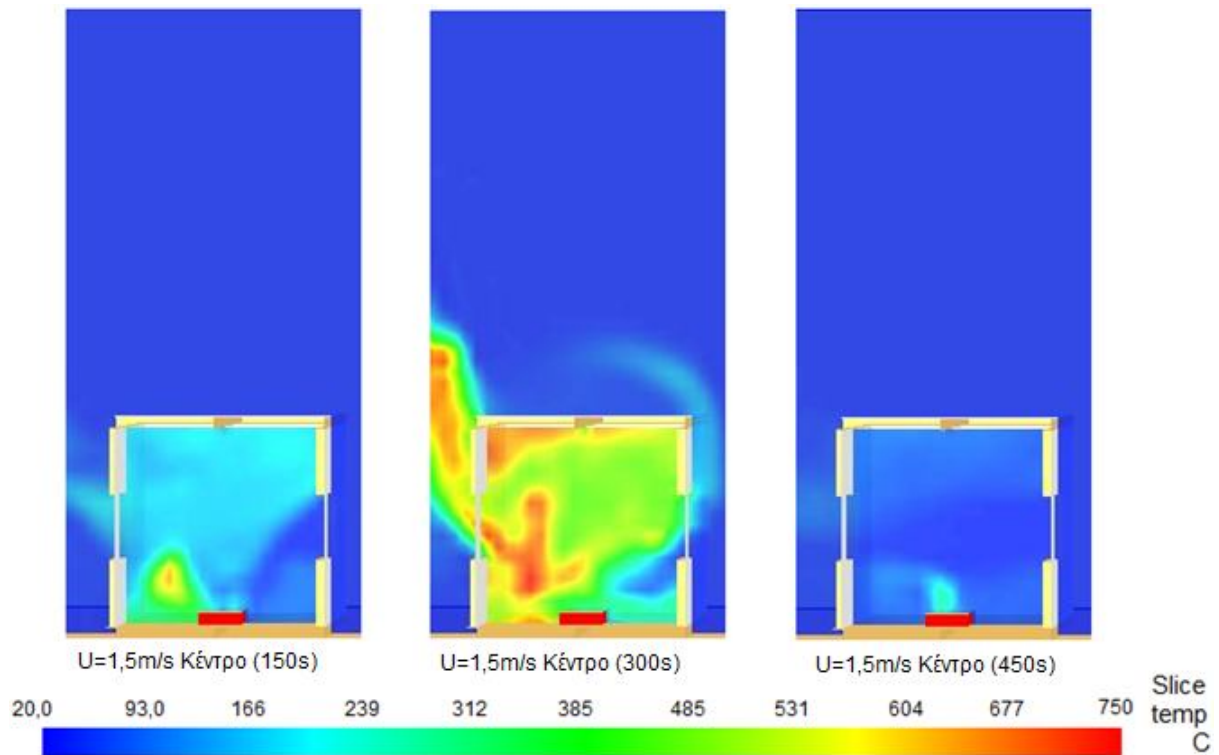
Στην περίπτωση όπου η ταχύτητα του εξωτερικού ανέμου είναι 3,0 m/s παρατηρούνται γενικότερα χαμηλότερες θερμοκρασίες και για τις τρεις χρονικές στιγμές. Αυτό σημαίνει ότι η επίδραση πιο ισχυρού ανέμου ωθεί τα θερμά αέρια προς το άνοιγμα του διαμερίσματος, προκαλώντας ταχύτερη, σε σχέση με τις άλλες περιπτώσεις, ανάπτυξη της φωτιάς και επίσπευση του φαινομένου υποβάθμισης και σβέσης της. Τέλος, στην περίπτωση θέσης της εστίας στην κατάντη γωνία παρατηρούνται πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Αυτό ενδέχεται να συμβαίνει είτε γιατί το στάδιο ανάπτυξης της φωτιάς παρατηρείται νωρίτερα από τις συγκεκριμένες χρονικές στιγμές είτε γιατί διαρκεί μικρό χρονικό διάστημα, με αποτέλεσμα να μην διατηρούνται υψηλές θερμοκρασίες στις χρονικές στιγμές που μελετώνται.



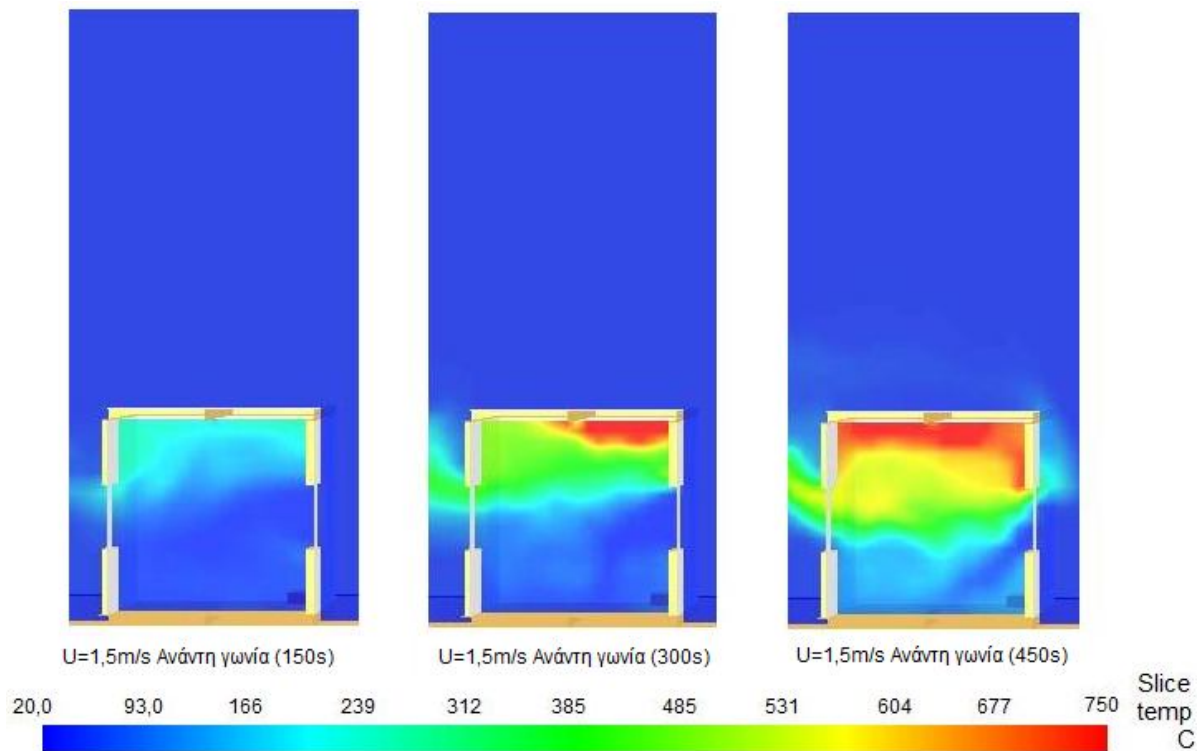
Σχήμα 4.17 Παρουσίαση θερμοκρασιακού πεδίου για την περίπτωση ταχύτητας εξωτερικού ανέμου 0,0 m/s και για εστία στο κέντρο του διαμερίσματος για 200, 400 και 600 s της προσομοίωσης (Περίπτωση 1α, 1β, 1γ και 1δ).



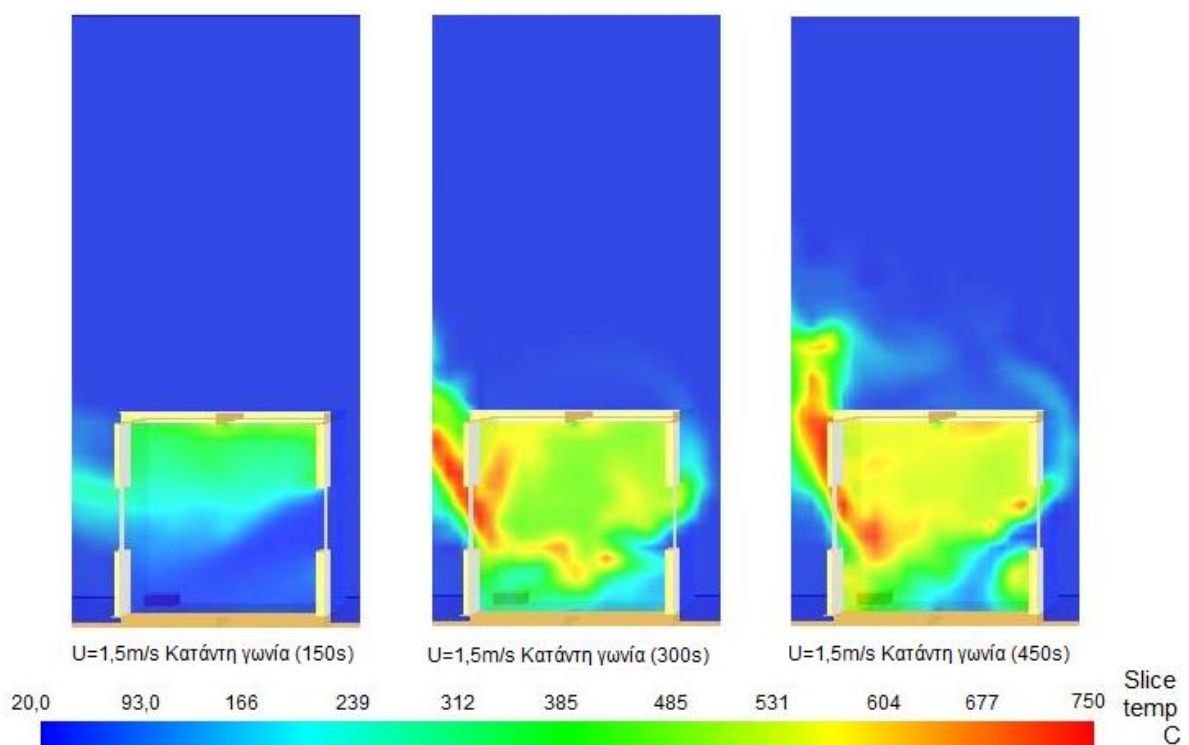
Σχήμα 4.18 Παρουσίαση θερμοκρασιακού πεδίου για την περίπτωση ταχύτητας εξωτερικού ανέμου 0,0 m/s και για εστία στη γωνία του διαμερίσματος για 200, 400 και 600s της προσομοίωσης (Περίπτωση 1ε).



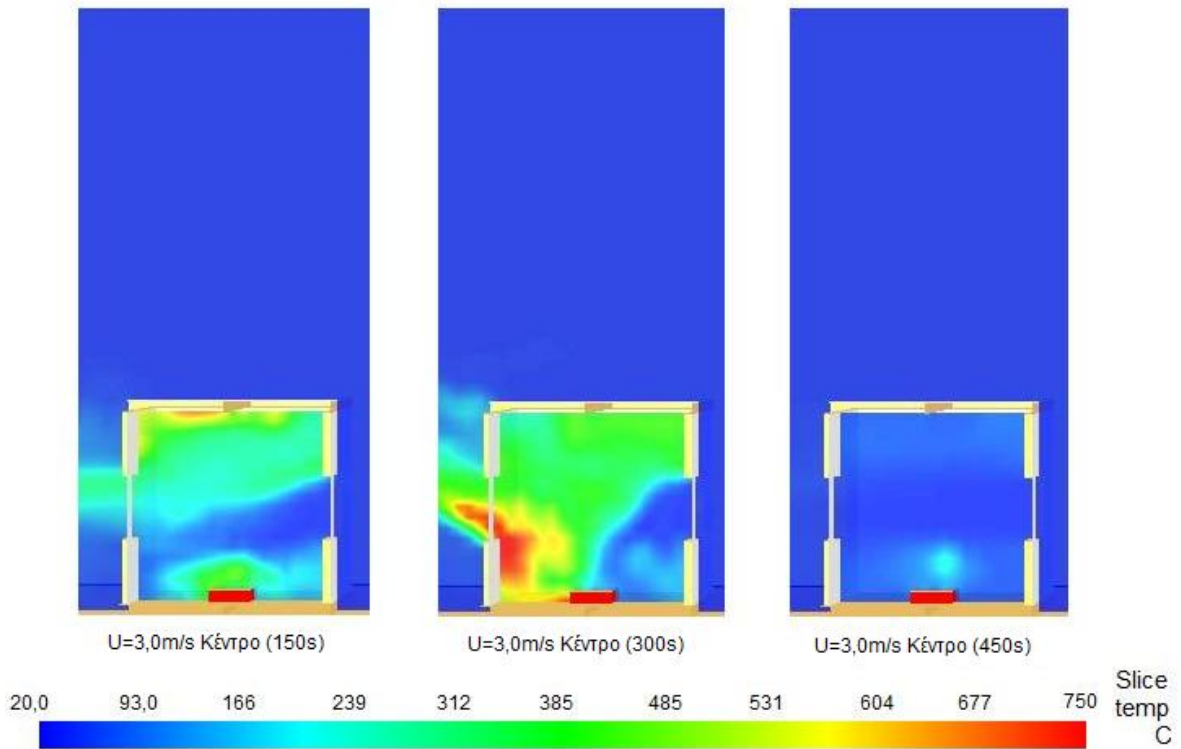
Σχήμα 4.19 Παρουσίαση θερμοκρασιακού πεδίου για την περίπτωση ταχύτητας εξωτερικού ανέμου 1,5 m/s και για εστία στο κέντρο του διαμερίσματος για 150, 300 και 450 s της προσομοίωσης (Περίπτωση 2α).



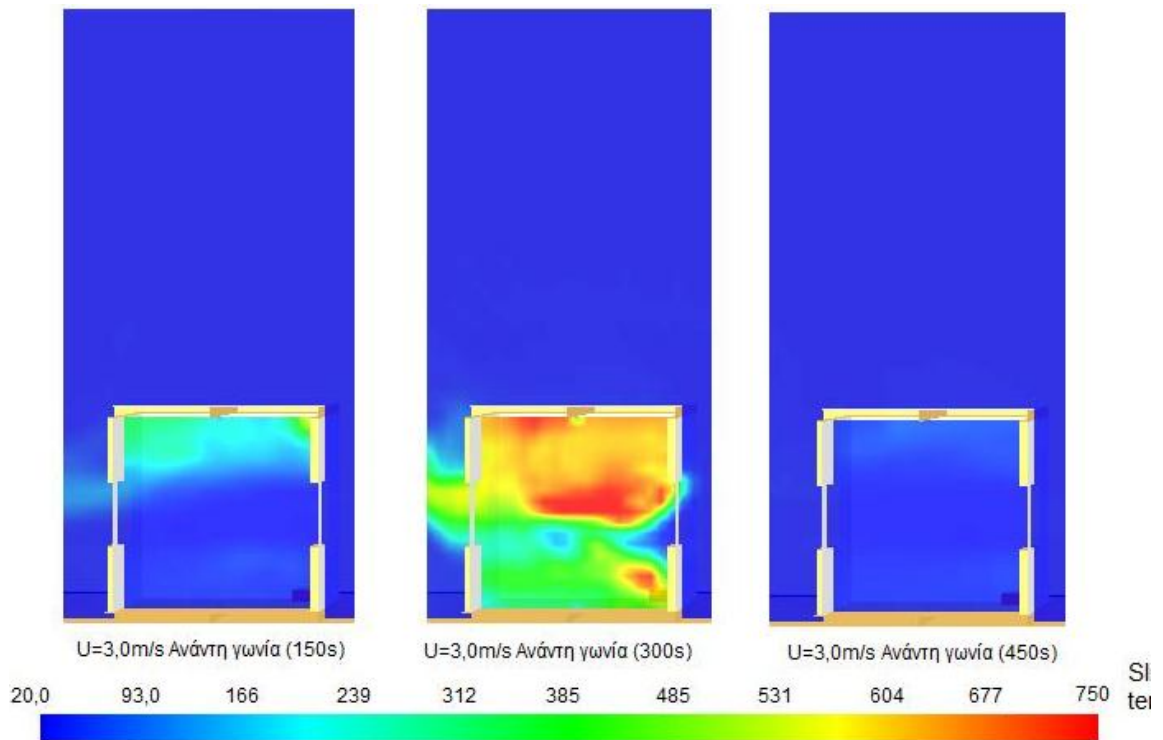
Σχήμα 4.20 Παρουσίαση θερμοκρασιακού πεδίου για την περίπτωση ταχύτητας εξωτερικού ανέμου 1,5 m/s και για εστία στην ανάντη γωνία του διαμερίσματος για 150, 300 και 450 s της προσομοίωσης (Περίπτωση 2β).



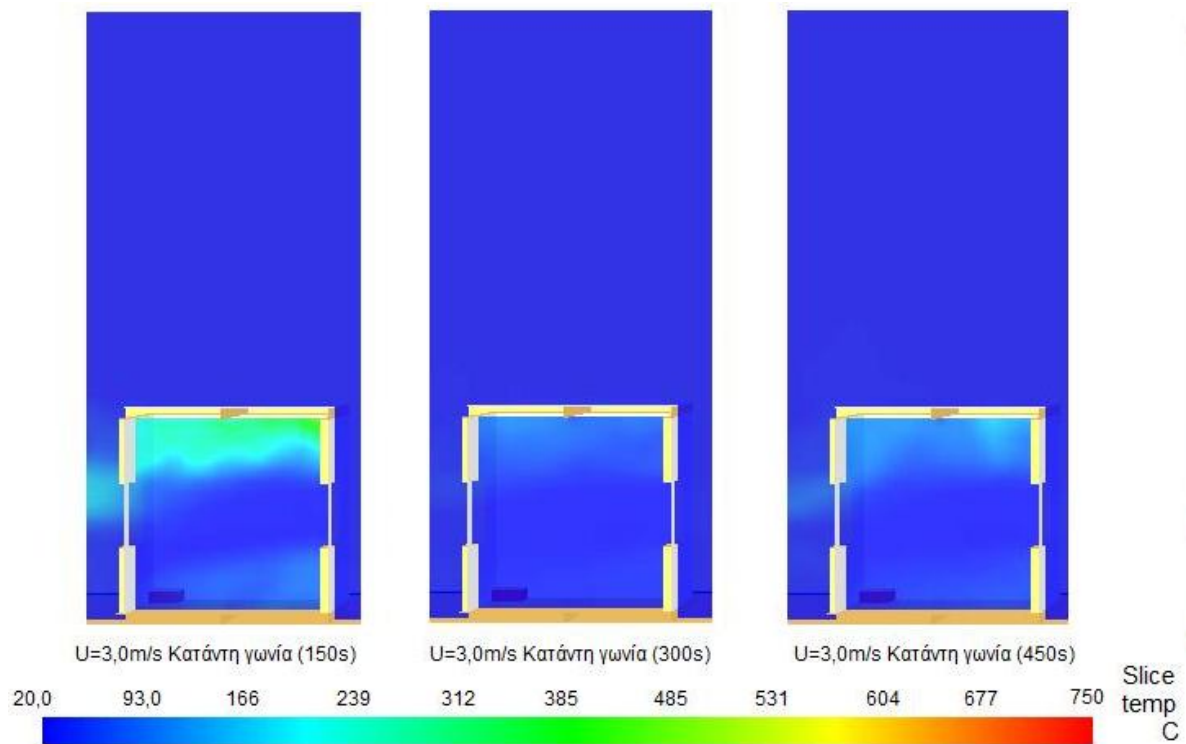
Σχήμα 4.21 Παρουσίαση θερμοκρασιακού πεδίου για την περίπτωση ταχύτητας εξωτερικού ανέμου 1,5 m/s και για εστία στην κατάντη γωνία του διαμερίσματος για 150, 300 και 450 s της προσομοίωσης (Περίπτωση 2γ).



Σχήμα 4.22 Παρουσίαση θερμοκρασιακού πεδίου για την περίπτωση ταχύτητας εξωτερικού ανέμου 3,0 m/s και για εστία στο κέντρο του διαμερίσματος για 150, 300 και 450 s της προσομοίωσης (Περίπτωση 3α).



Σχήμα 4.23 Παρουσίαση θερμοκρασιακού πεδίου για την περίπτωση ταχύτητας εξωτερικού ανέμου 3,0 m/s και για εστία στην ανάντη γωνία του διαμερίσματος για 150, 300 και 450 s της προσομοίωσης (Περίπτωση 3β).



Σχήμα 4.24 Παρουσίαση θερμοκρασιακού πεδίου για την περίπτωση ταχύτητας εξωτερικού ανέμου 3,0 m/s και για εστία στο κέντρο του διαμερίσματος για 150, 300 και 450 s της προσομοίωσης (Περίπτωση 3γ).

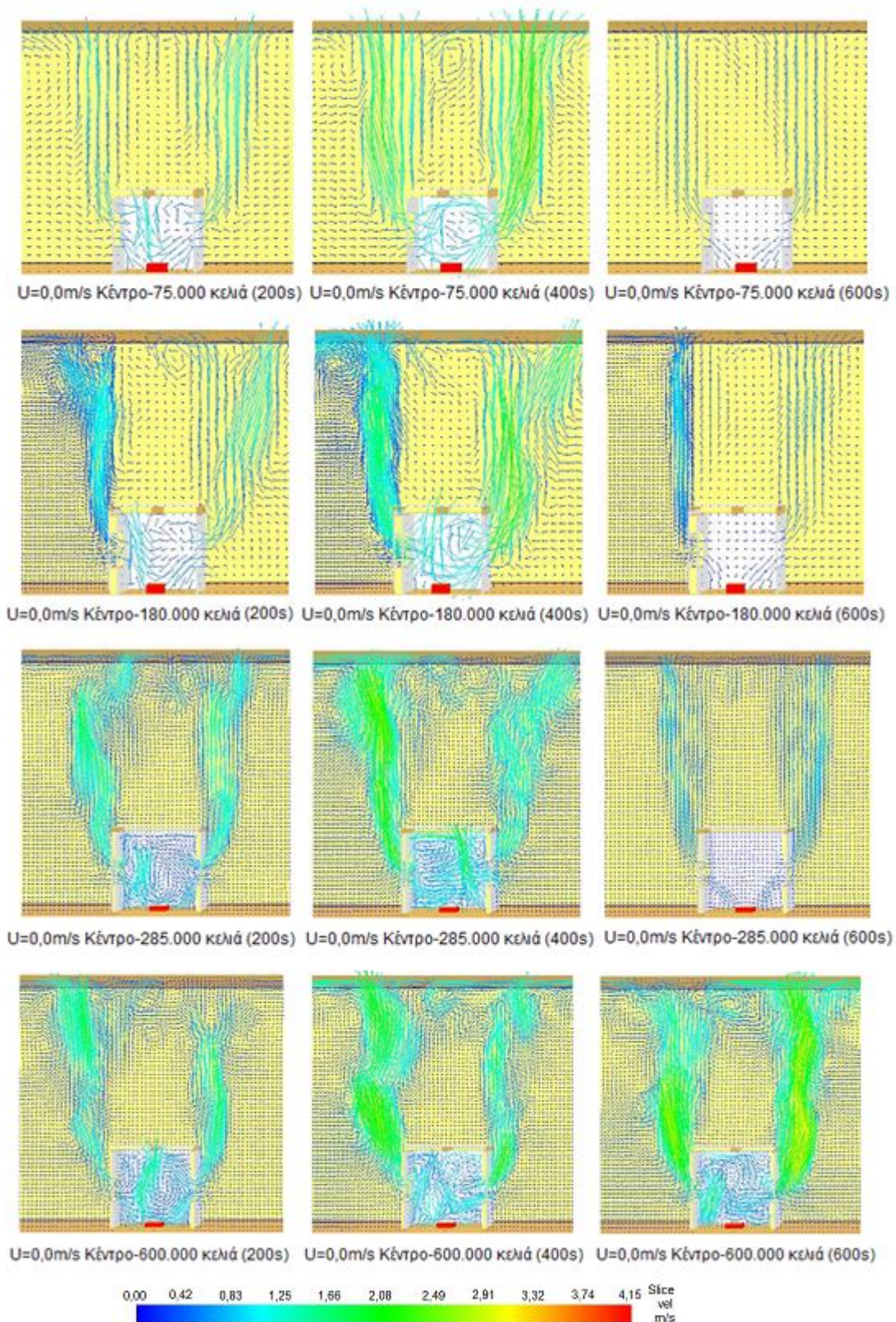
4.6.2.2 Απεικόνιση του ροϊκού πεδίου

Η απεικόνιση του ροϊκού πεδίου όπως διαμορφώνεται μέσα κι έξω από το χώρο του μοντέλου απεικονίζεται στα σχήματα 4.25, 4.26, 4.27, 4.28, 4.29 και 4.30, 4.31 και 4.32 για κάθε περίπτωση ταχύτητας και θέσης της εστίας και για τις χρονικές στιγμές 200, 400 και 600s της προσομοίωσης. Σε γενικές γραμμές, παρατηρείται ότι το πεδίο είναι συμμετρικό κι ότι τα θερμά αέρια εξέρχονται κι από τα δύο ανοίγματα. Ακόμα, πιο έντονοι στροβιλισμοί παρατηρούνται κατά την ανάπτυξη της φλόγας και κοντά στην περιοχή της οροφής. Όσο αυξάνεται η ταχύτητα του αέρα παρατηρείται εντονότερη κλίση και κίνηση των καυσαερίων που εξέρχονται από το άνοιγμα.

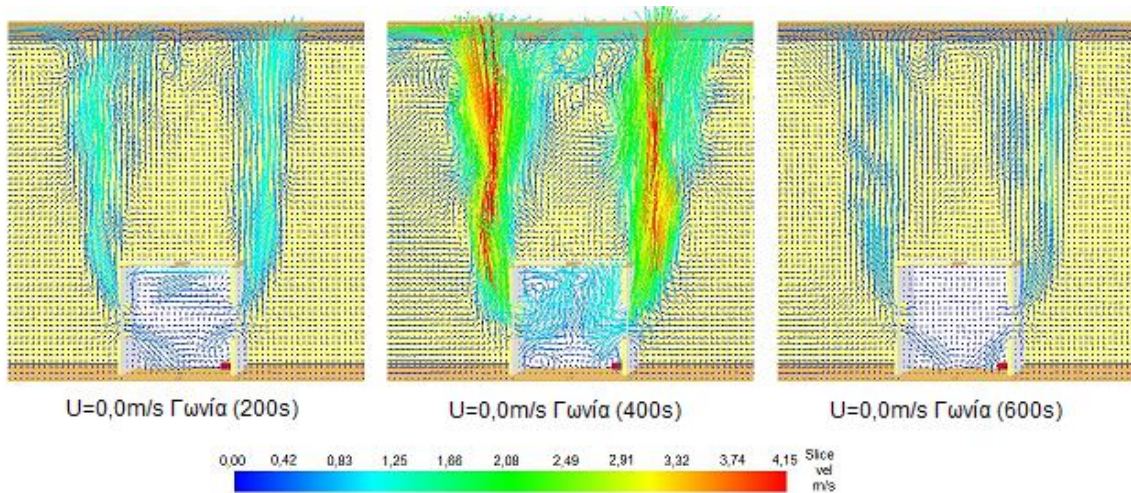
Για την κατάσταση νηνεμίας, όπως ήταν αναμενόμενο, το ροϊκό πεδίο δεν παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις. Σημειώνεται ότι το πλέγμα των 600.000 κελιών, για ταχύτητα ανέμου 0,0 m/s και θέση της εστίας στο κέντρο του μοντέλου, εμφανίζει τις μεγαλύτερες ταχύτητες ροής γύρω από το μοντέλο.

Για τις περιπτώσεις ύπαρξης εξωτερικού ανέμου στα 400s παρατηρείται ήδη μεγάλη αύξηση της ταχύτητας της ροής τόσο στον περιβάλλοντα χώρο γύρω από το διαμέρισμα όσο και κοντά στο άνοιγμα, ενώ η μάζα των καυσαερίων όπου εξέρχεται από το παράθυρο εμφανίζεται ιδιαίτερα αυξημένη. Τα θερμά αέρια που παράγονται από την καύση απομακρύνονται μέσω του ανοίγματος στον εξωτερικό χώρο. Παράλληλα, διαπιστώνονται έντονοι στροβιλισμοί στην περιοχή πάνω από το διαμέρισμα. Οι στροβιλισμοί που σημειώνονται στην περιοχή αυτή ενδέχεται να οφείλονται στη θερμοκρασιακή διαφορά των θερμών αερίων που εξέρχονται από το δυτικό άνοιγμα και του αέρα περιβάλλοντος. Στον περιβάλλοντα χώρο η ταχύτητα φτάνει μέχρι και 4,15 m/s.

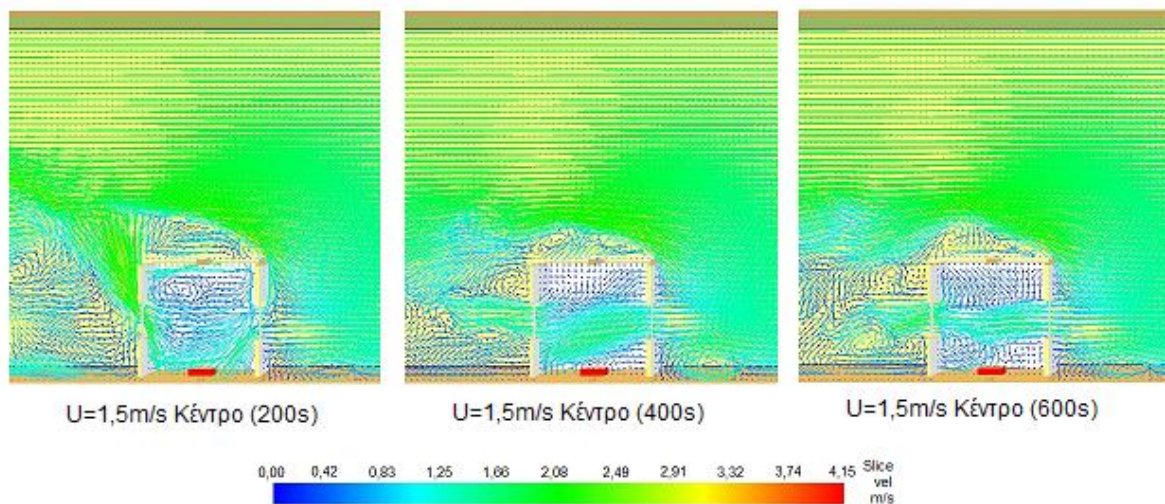
Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση ταχύτητας ανέμου 1,5 m/s παρατηρείται εντονότερη ανακυκλοφορία των θερμών αερίων μέσα στο διαμέρισμα σε σχέση με την περίπτωση 3,0 m/s. Τέλος, στην περίπτωση της μεγαλύτερης ταχύτητας ανέμου (3m/s) παρατηρείται ότι δεν προλαβαίνουν να αναπτυχθούν σημαντικοί στροβιλισμοί στο εσωτερικό του διαμερίσματος, καθώς εντονότερη επίδραση του ανέμου προκαλεί απομάκρυνση και αραίωση των θερμών αερίων στο εσωτερικό του διαμερίσματος.



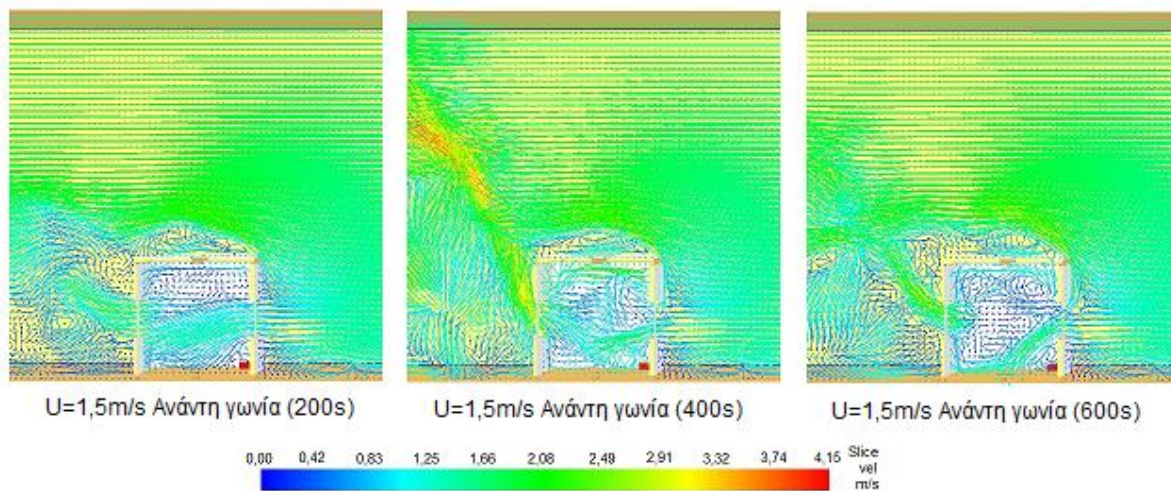
Σχήμα 4.25 Παρουσίαση διανυσματικού πεδίου ταχυτήτων για την περίπτωση ταχύτητας εξωτερικού ανέμου 0,0 m/s και για εστία στο κέντρο του διαμερίσματος για 200, 400, 600 s της προσομοίωσης (Περίπτωση 1α, 1β, 1γ και 1δ).



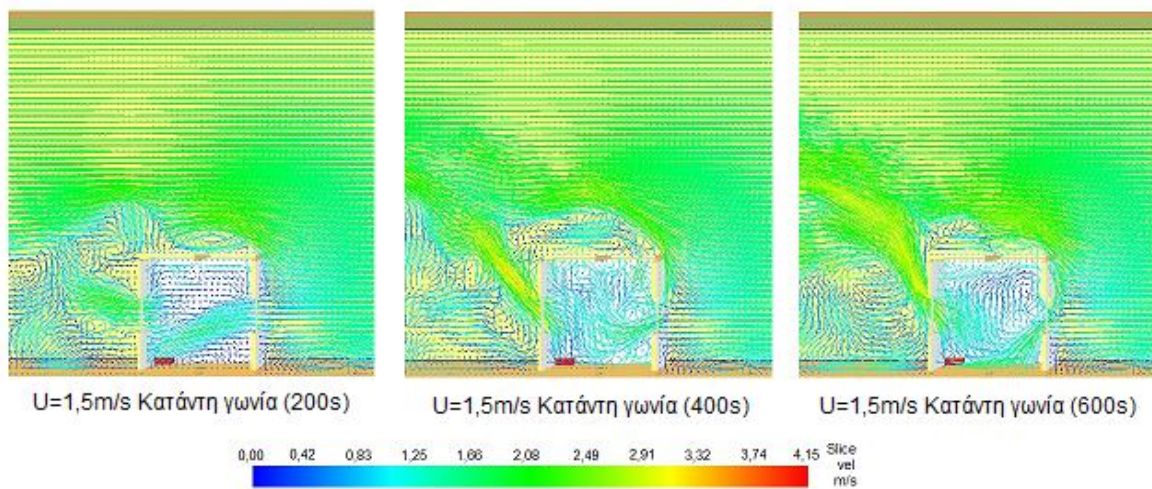
Σχήμα 4.26 Παρουσίαση διανυσματικού πεδίου ταχυτήτων για την περίπτωση ταχύτητας εξωτερικού ανέμου 0,0 m/s και για εστία στη γωνία του διαμερίσματος για 200, 400, 600 s της προσομοίωσης (Περίπτωση 1ε).



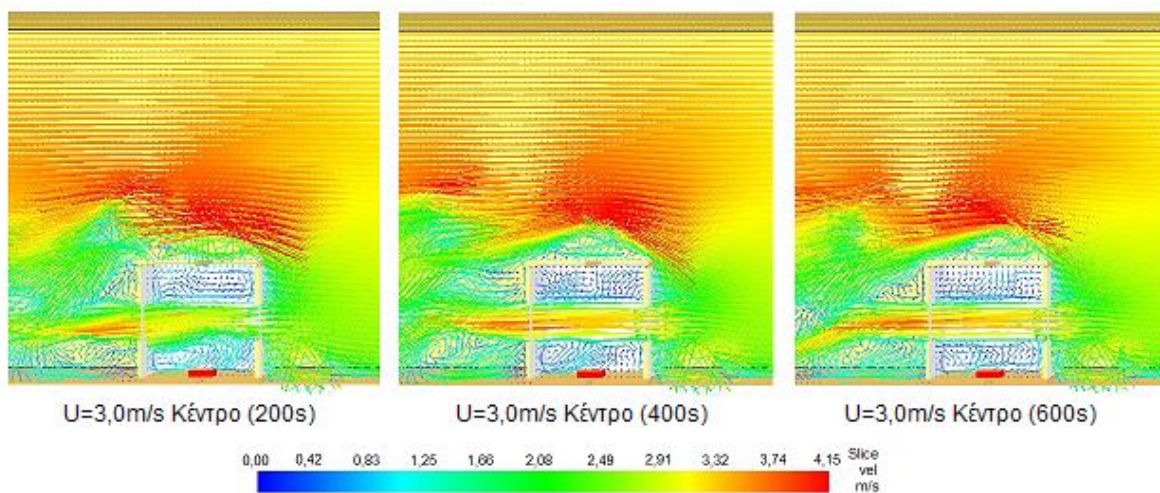
Σχήμα 4.27 Παρουσίαση διανυσματικού πεδίου ταχυτήτων για την περίπτωση ταχύτητας εξωτερικού ανέμου 1,5 m/s και για εστία στο κέντρο του διαμερίσματος για 200, 400, 600 s της προσομοίωσης (Περίπτωση 2α).



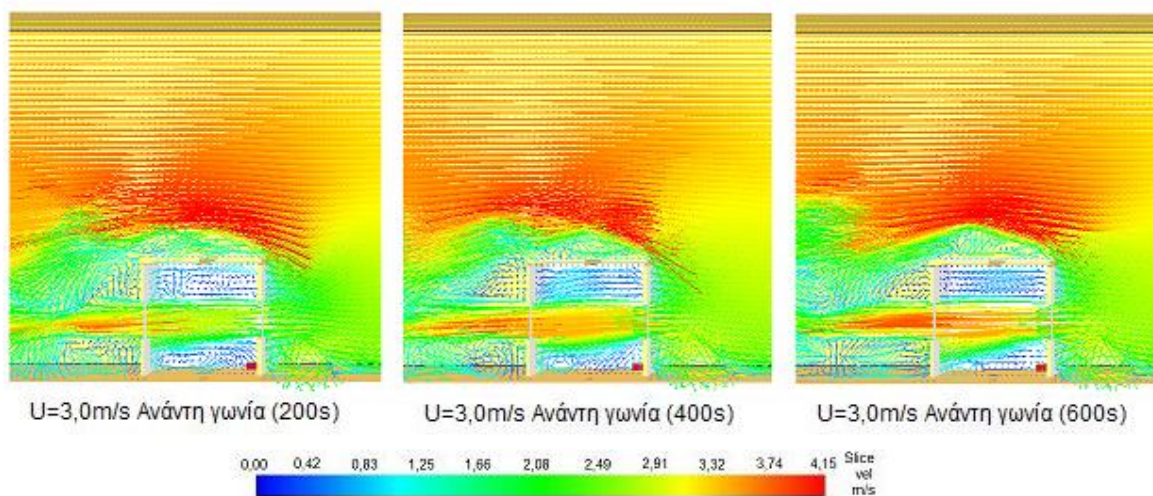
Σχήμα 4.28 Παρουσίαση διανυσματικού πεδίου ταχυτήτων για την περίπτωση ταχύτητας εξωτερικού ανέμου 1,5 m/s και για εστία στην ανάντη γωνία του διαμερίσματος για 200, 400, 600 s της προσομοίωσης (Περίπτωση 2β).



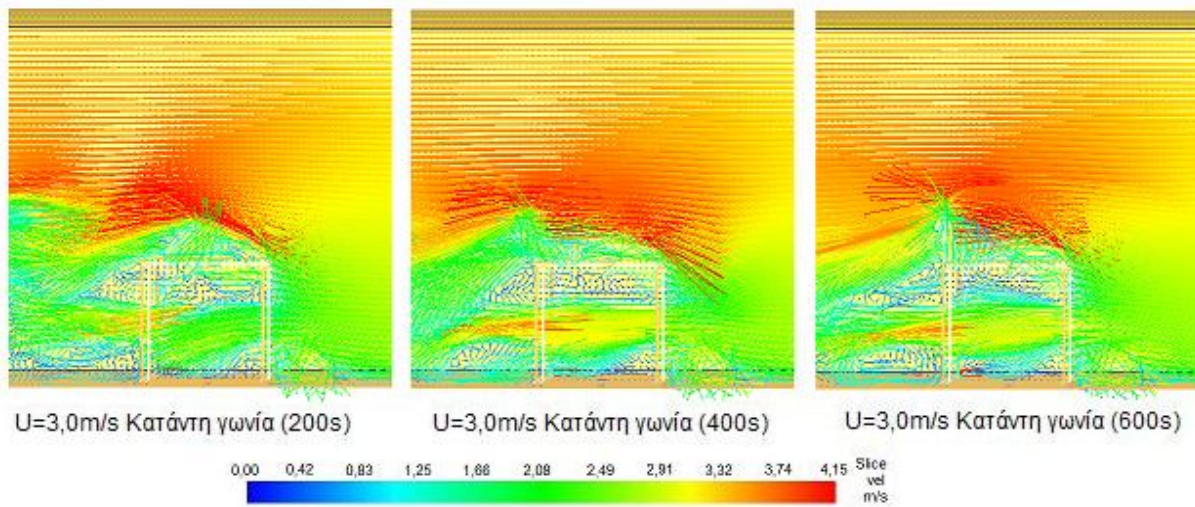
Σχήμα 4.29 Παρουσίαση διανυσματικού πεδίου ταχυτήτων για την περίπτωση ταχύτητας εξωτερικού ανέμου 1,5 m/s και για εστία στην κατάντη γωνία του διαμερίσματος για 200, 400, 600 s της προσομοίωσης (Περίπτωση 2γ).



Σχήμα 4.30 Παρουσίαση διανυσματικού πεδίου ταχυτήτων για την περίπτωση ταχύτητας εξωτερικού ανέμου 3,0 m/s και για εστία στο κέντρο του διαμερίσματος για 200, 400, 600 s της προσομοίωσης (Περίπτωση 3α).



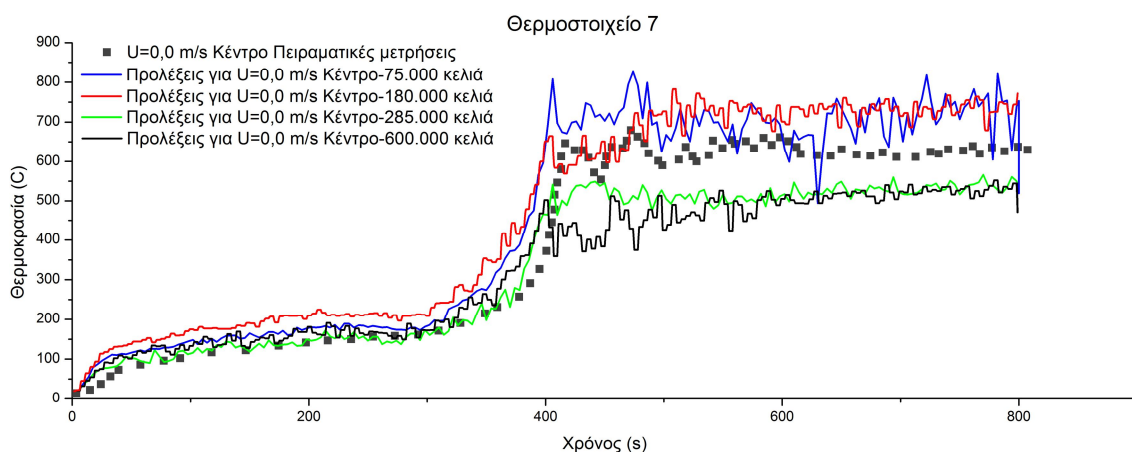
Σχήμα 4.31 Παρουσίαση διανυσματικού πεδίου ταχυτήτων για την περίπτωση ταχύτητας εξωτερικού ανέμου 3,0 m/s και για εστία στην ανάντη γωνία του διαμερίσματος για 200, 400, 600 s της προσομοίωσης (Περίπτωση 3β).



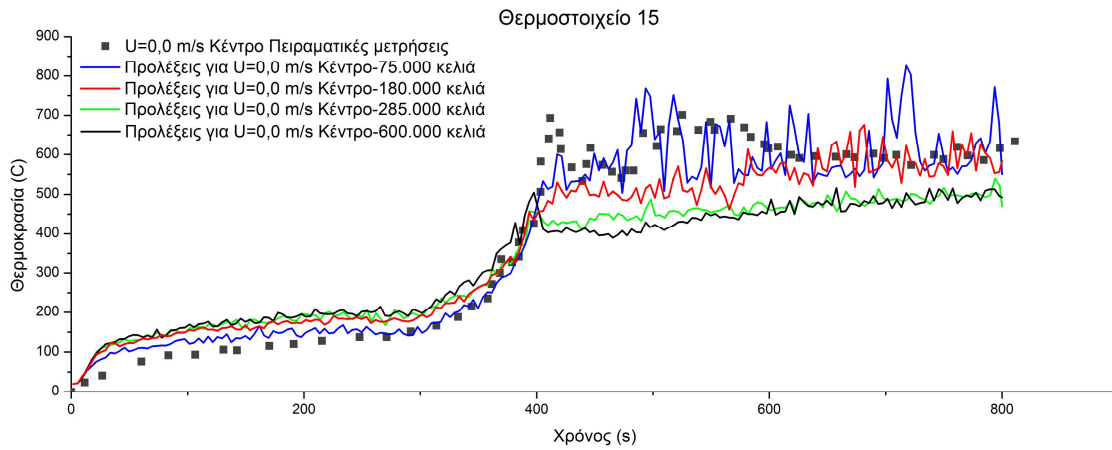
Σχήμα 4.32 Παρουσίαση διανυσματικού πεδίου ταχυτήτων για την περίπτωση ταχύτητας εξωτερικού ανέμου $3,0\text{ m/s}$ και για εστία στην κατάνη γωνία του διαμερίσματος για 200, 400, 600 s της προσομοίωσης (Περίπτωση 3γ).

4.6.2.3 Χρονικές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του αέρα στο εσωτερικό του μοντέλου

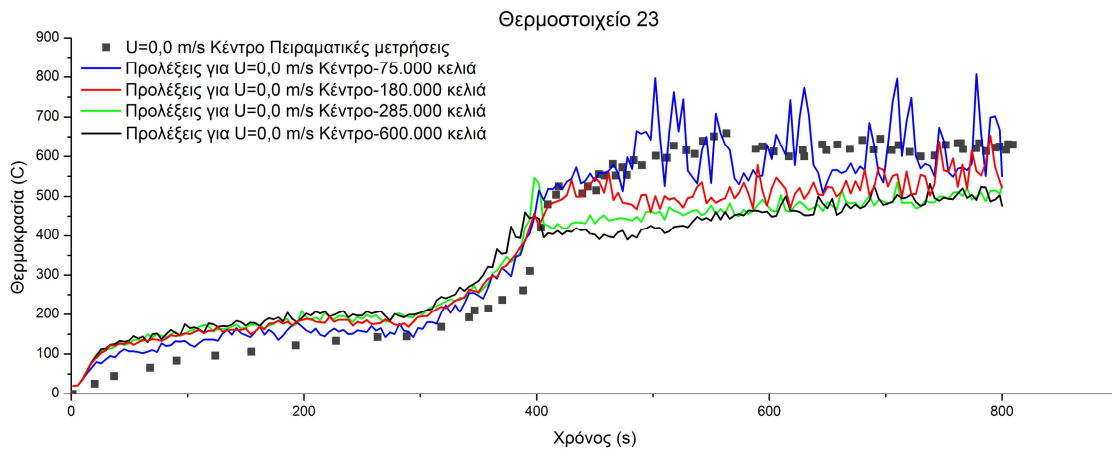
Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι χρονικές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του αέρα για τα θερμοστοιχεία 7, 15, 23 και 31, που αφορούν θερμοκρασίες μέσα στο διαμέρισμα. Τα θερμοστοιχεία αυτά βρίσκονται στο ύψος των ανοιγμάτων (σχήμα 4.13). Στα παρακάτω σχήματα γίνεται σύγκριση των προλέξεων θερμοκρασίας με τις πειραματικές τιμές. Σημειώνεται ότι τα πειραματικά δεδομένα συμβολίζονται με κουκίδες (διακριτές τιμές), ενώ τα υπολογιστικά αποτελέσματα συμβολίζονται με ενιαία γραμμή. Οι προλέξεις της θερμοκρασίας, που προέκυψαν από τα διάφορα πλέγματα στην περίπτωση όπου η εστία βρισκόταν στο κέντρο του διαμερίσματος και για ταχύτητα του αέρα 0,0 m/s (Περιπτώσεις 1α,1β,1γ,1δ) συγκρίθηκαν με τα πειραματικά δεδομένα στα διαγράμματα 4.33, 4.34, 4.35 και 4.36. Όπως φαίνεται και από τα τέσσερα διαγράμματα οι προλέξεις της θερμοκρασίας για όλα τα πλέγματα εμφανίζουν κατά περίπτωση ικανοποιητική συμφωνία με τις πειραματικές μετρήσεις. Η χρονική περίοδος της πλήρους αναπτυσσόμενης φλόγας ξεκινάει μετά τα 400s, ενώ παρατηρείται ότι το πιο αραιό πλέγμα των 75.000 κελιών προσεγγίζει καλύτερα τις πειραματικές μετρήσεις.



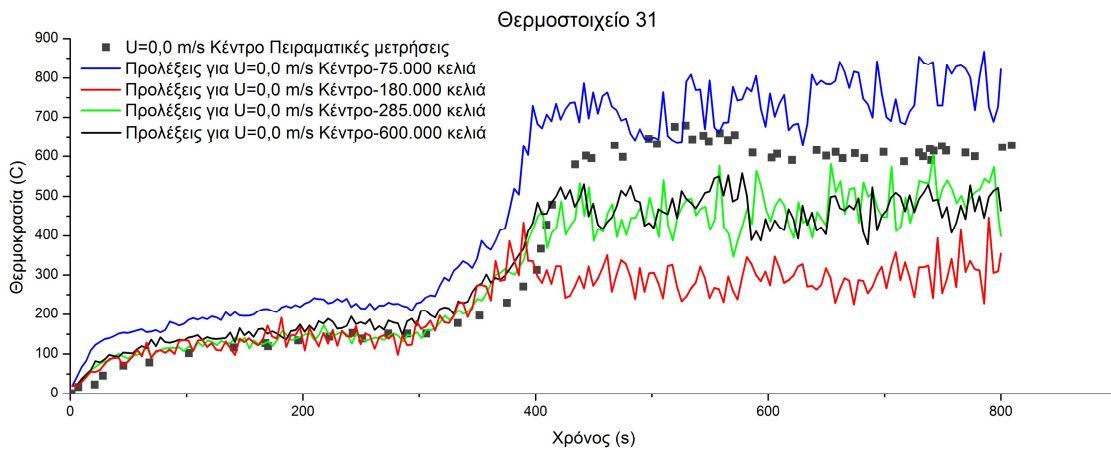
Σχήμα 4.33 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 7 στο εσωτερικό του δωματίου για $U=0,0\text{m/s}$ -Κέντρο.



Σχήμα 4.34 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 15 στο εσωτερικό του δωματίου για $U=0,0\text{m/s}$ -Κέντρο.

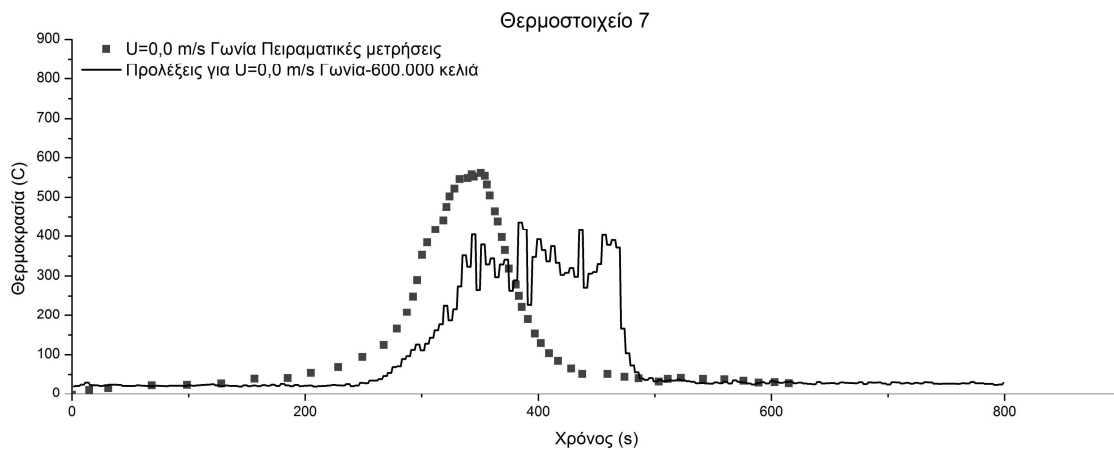


Σχήμα 4.35 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 23 στο εσωτερικό του δωματίου για $U=0,0\text{m/s}$ -Κέντρο.

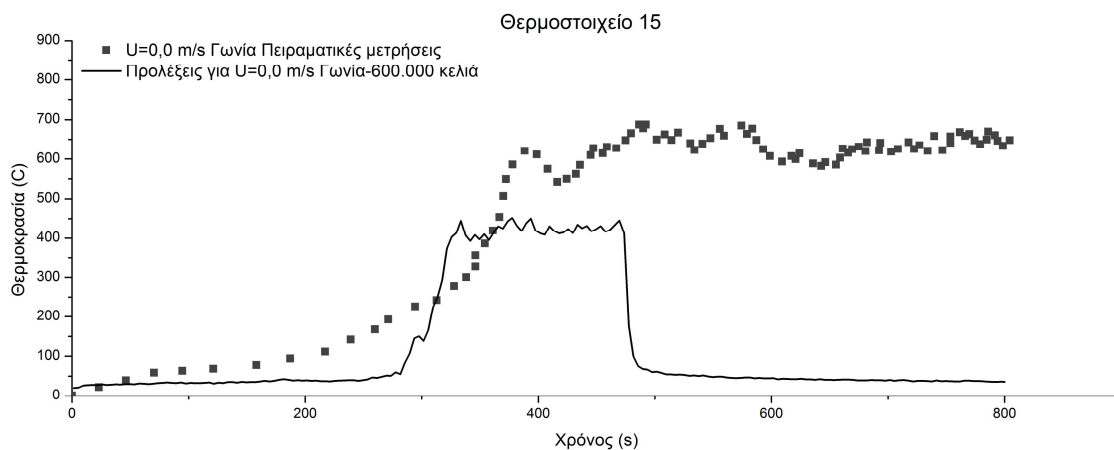


Σχήμα 4.36 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας, του θερμοστοιχείου 31 στο εσωτερικό του δωματίου για $U=0,0\text{m/s}$ -Κέντρο.

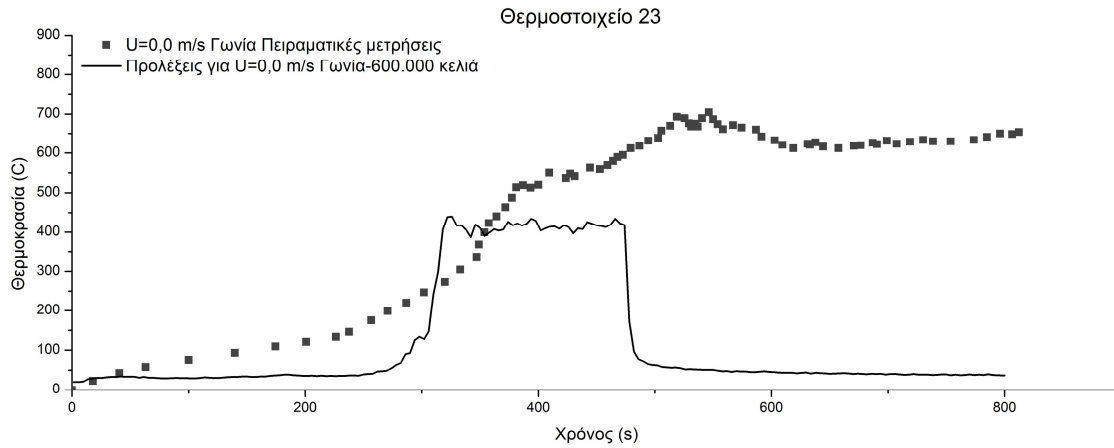
Στα σχήματα 4.37, 4.38, 4.39 και 4.40 για την περίπτωση όπου η εστία βρίσκεται σε γωνία του διαμερίσματος και για ταχύτητα αέρα $0,0\text{ m/s}$ (Περίπτωση 1ε) παρατηρείται κατά περίπτωση ικανοποιητική συμφωνία των προλέξεων θερμοκρασίας και των πειραματικών τιμών. Η περίοδος της πλήρους ανεπτυγμένης φλόγας εμφανίζεται μετά τα πρώτα 350s και η διάρκεια της είναι μεγαλύτερη σύμφωνα με τις πειραματικές μετρήσεις. Συγκεκριμένα, διαπιστώνεται μία υποεκτίμηση των προλέξεων θερμοκρασίας σε σχέση με τις πειραματικές τιμές. Μετά το στάδιο της ανάπτυξης της φλόγας παρατηρείται μία απόκλιση των προλέξεων θερμοκρασίας σε σχέση με τις πειραματικές μετρήσεις περίπου 200°C .



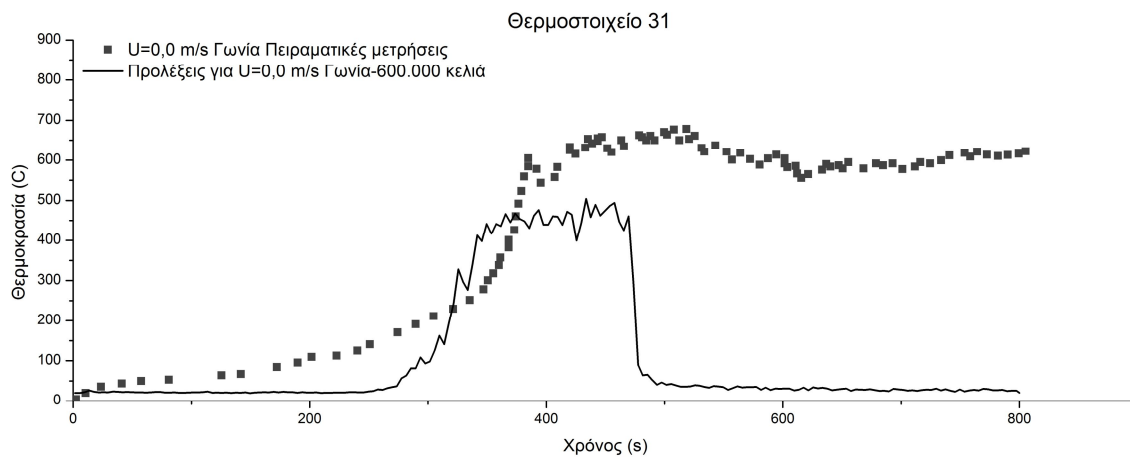
Σχήμα 4.37 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 7 στο εσωτερικό του δωματίου για $U=0,0\text{m/s}$ -Γωνία.



Σχήμα 4.38 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 15 στο εσωτερικό του δωματίου για $U=0,0\text{m/s}$ -Γωνία.

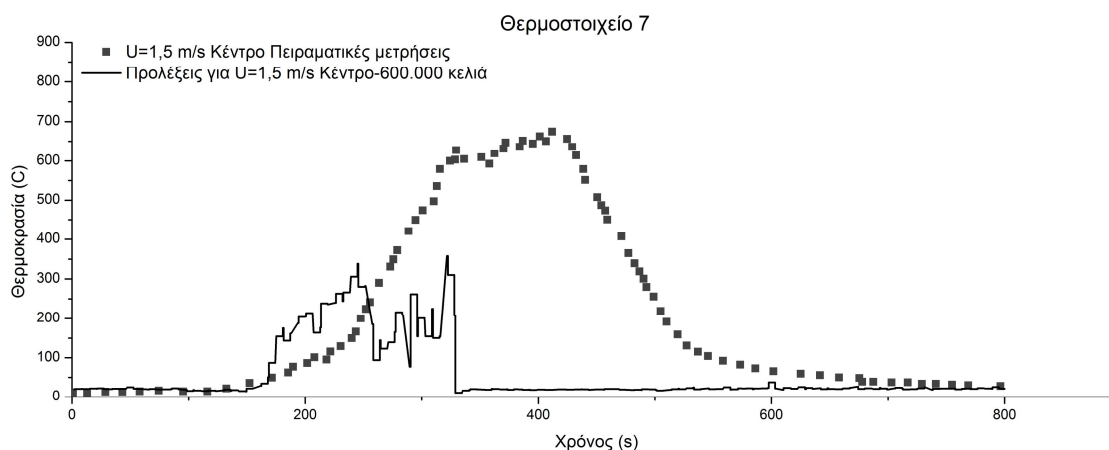


Σχήμα 4.39 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 23 στο εσωτερικό του δωματίου για $U=0,0\text{m/s}$ -Γωνία.

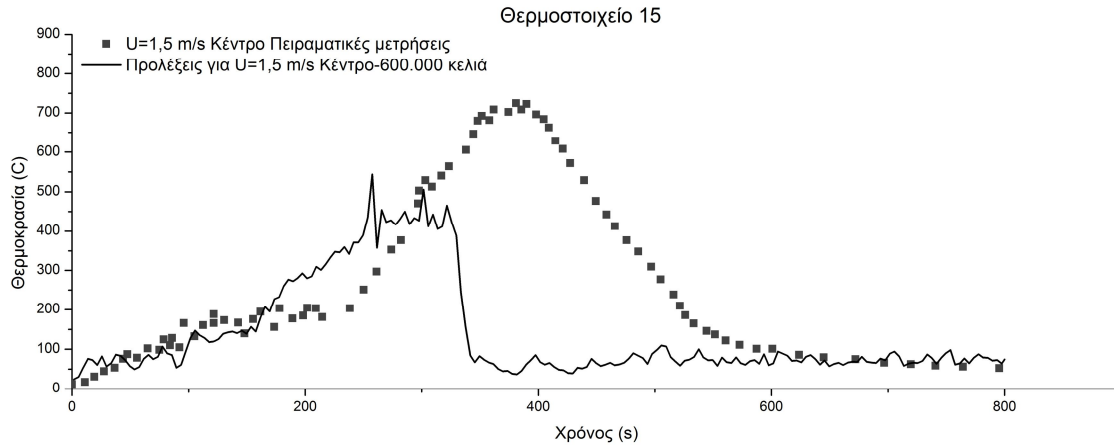


Σχήμα 4.40 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 31 στο εσωτερικό του δωματίου για $U=0,0\text{m/s}$ -Γωνία.

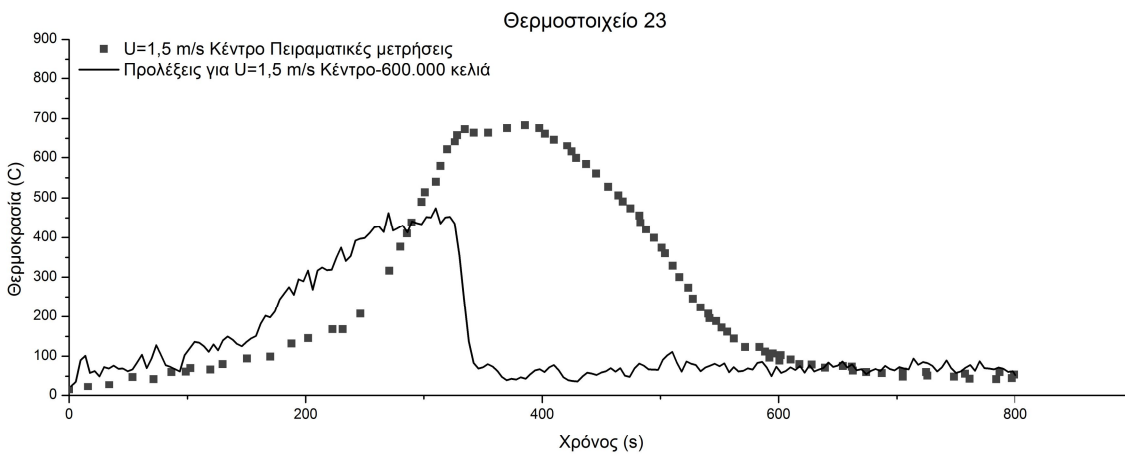
Τα διαγράμματα 4.41, 4.42, 4.43 και 4.44 αφορούν την περίπτωση όπου η εστία βρίσκεται στο κέντρο του διαμερίσματος και η ταχύτητα του αέρα είναι 1,5 m/s (Περίπτωση 2α). Στα διαγράμματα αυτά, παρατηρείται μία ποιοτική συμφωνία μεταξύ των πειραματικών τιμών και των προλέξεων κατά τα στάδια ανάπτυξης της φλόγας. Όπως διαπιστώνεται, ο χρόνος διάρκειας της ανάπτυξης της φλόγας εμφανίζεται λίγο μικρότερος σύμφωνα με τις πειραματικές μετρήσεις. Ωστόσο, διαπιστώνεται μία μετατόπιση του σταδίου ανάπτυξης της φλόγας, καθώς σύμφωνα με τις πειραματικές μετρήσεις το στάδιο αυτό ξεκινάει μετά από 100-120s σε σχέση με τις προλέξεις θερμοκρασίας του πλέγματος που επιλέχθηκε. Και σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται έντονα μία υποεκτίμηση των προλέξεων θερμοκρασίας σε σχέση με τις πειραματικές τιμές, η οποία εκτιμάται γύρω στους 200°C.



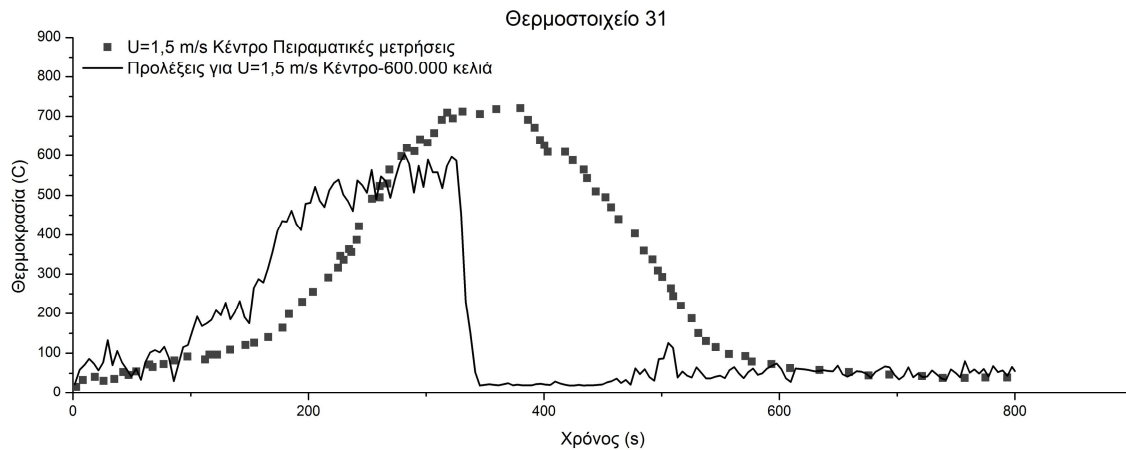
Σχήμα 4.41 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 7 στο εσωτερικό του δωματίου για 1,5m/s-Κέντρο.



Σχήμα 4.42 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 15 στο εσωτερικό του δωματίου για 1,5m/s-Κέντρο

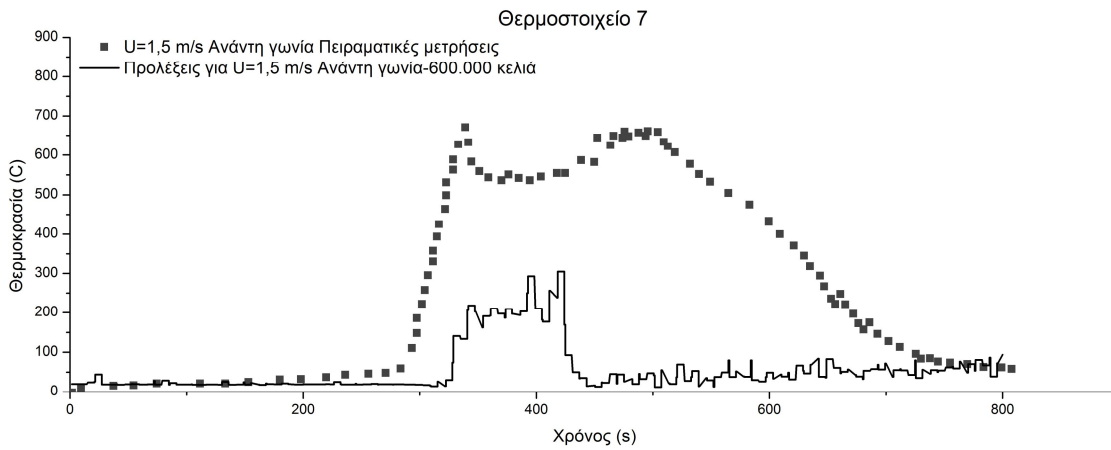


Σχήμα 4.43 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 23 στο εσωτερικό του δωματίου για 1,5m/s-Κέντρο.

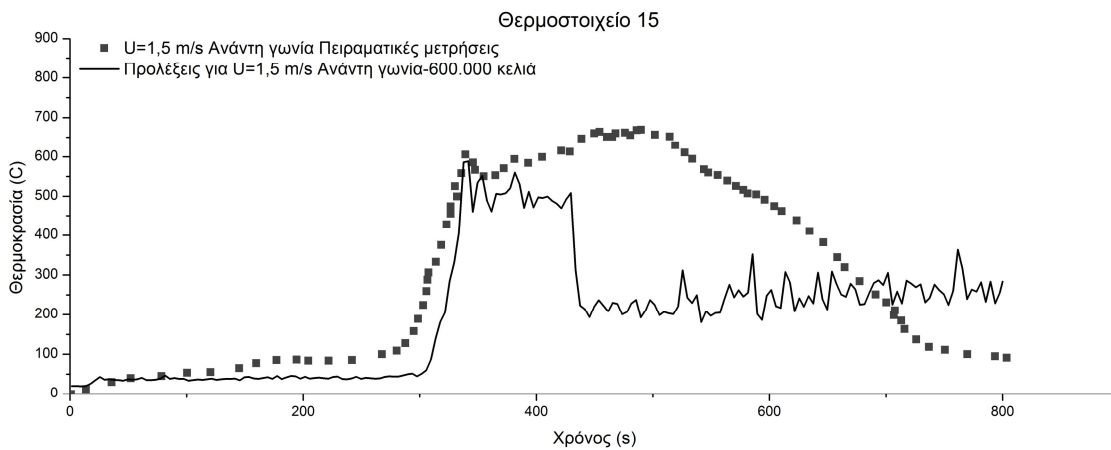


Σχήμα 4.44 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 31 στο εσωτερικό του δωματίου για 1,5m/s-Κέντρο.

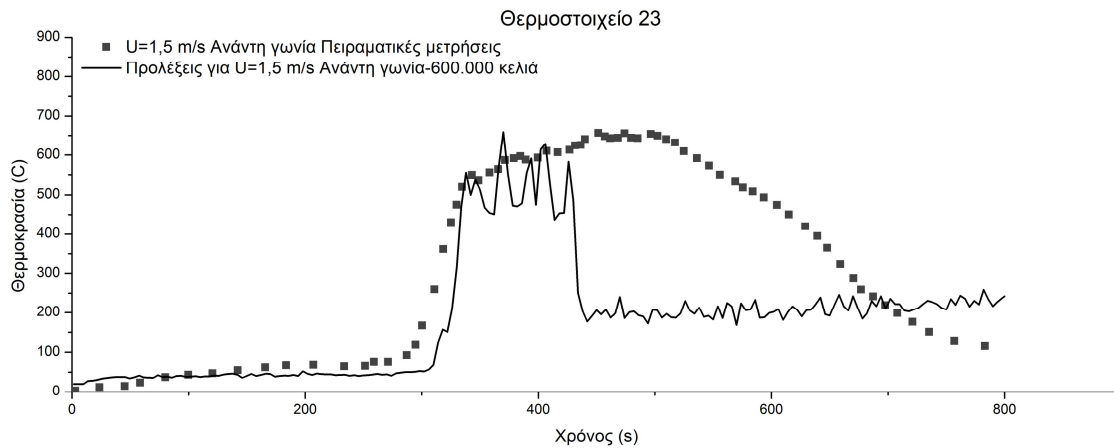
Για την περίπτωση όπου η εστία βρίσκεται στην ανάντη γωνία του διαμερίσματος και για ταχύτητα αέρα 1,5 m/s (Περίπτωση 2β) παρατηρείται από τα διαγράμματα 4.45, 4.46, 4.47 και 4.48 ότι υπάρχει κατά περίπτωση ικανοποιητική συμφωνία των πειραματικών τιμών και προλέξεων της θερμοκρασίας. Διαπιστώνεται στα διαγράμματα αυτά ότι το χρονικό διάστημα ανάπτυξης της φλόγας διαφέρει ανάμεσα στα πειραματικά δεδομένα και στις προλέξεις θερμοκρασίας κατά περίπου 150s, καθώς στα πειραματικά αποτελέσματα παρατηρείται παράταση της περιόδου αυτής. Σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται ότι η διαφορά των πειραματικών τιμών σε σχέση με τις προλέξεις θερμοκρασίας είναι αρκετά μικρότερη και εκτιμάται γύρω στους 100-120 °C.



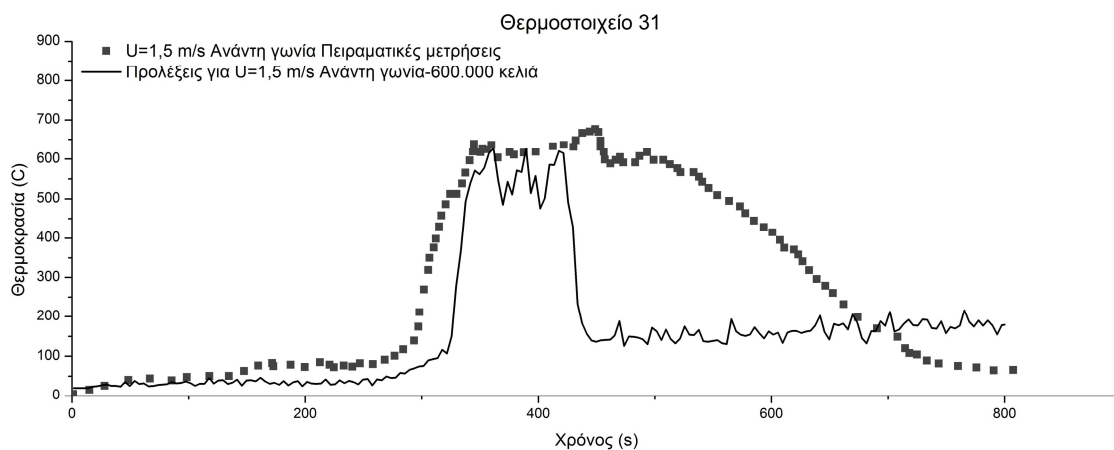
Σχήμα 4.45 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 7 στο εσωτερικό του δωματίου για 1,5m/s-Ανάντη γωνία.



Σχήμα 4.46 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 15 στο εσωτερικό του δωματίου για 1,5m/s-Ανάντη γωνία.

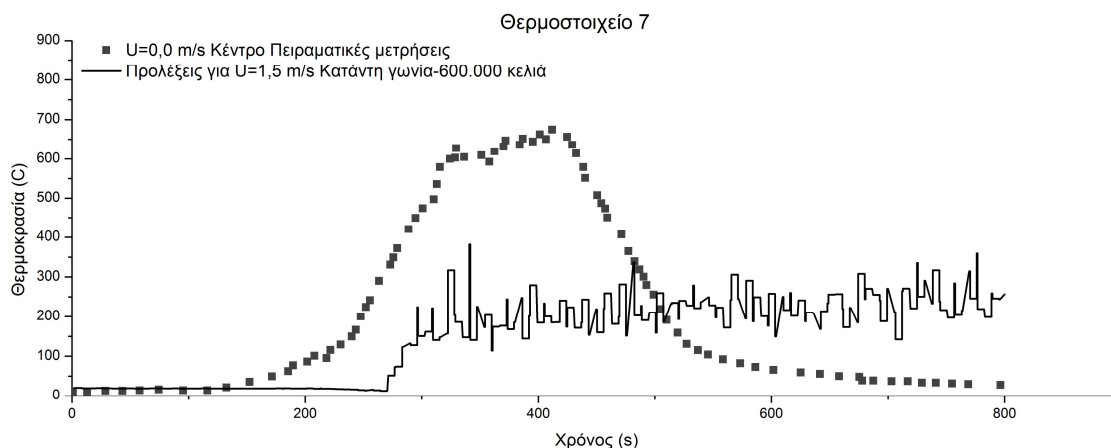


Σχήμα 4.47 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 23 στο εσωτερικό του δωματίου για 1,5m/s-Ανάντη γωνία.

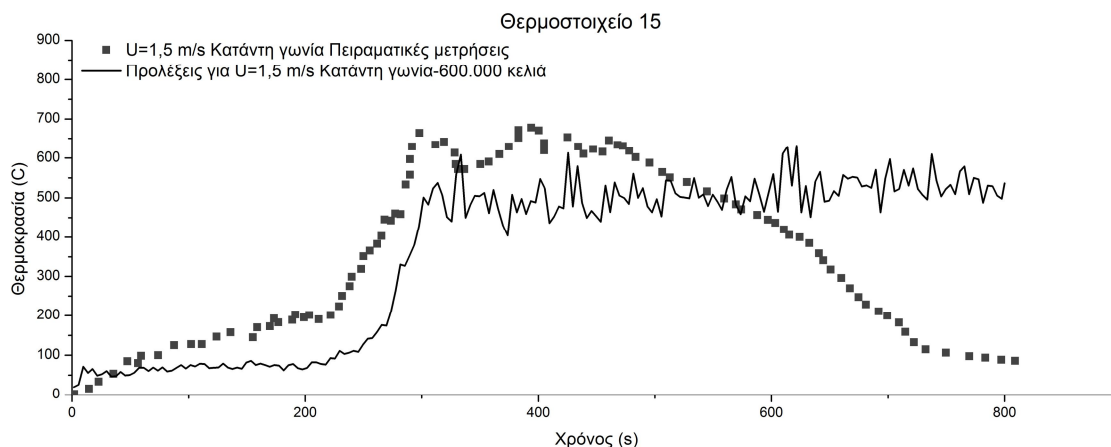


Σχήμα 4.48 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 31 στο εσωτερικό του δωματίου για 1,5m/s-Ανάντη γωνία.

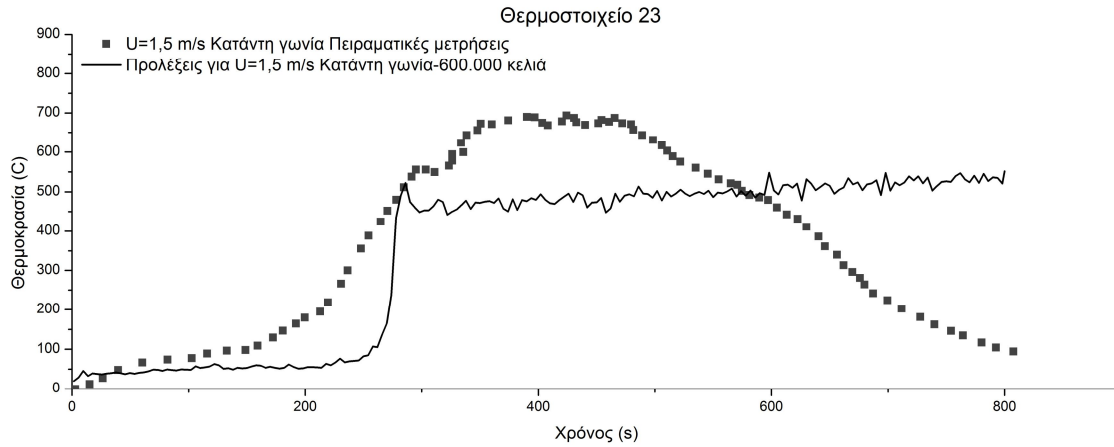
Για την περίπτωση όπου η εστία βρίσκεται στην κατάντη γωνία του διαμερίσματος και για ταχύτητα αέρα 1,5 m/s (Περίπτωση 2γ) από τα διαγράμματα 4.49, 4.50, 4.51 και 4.52 παρατηρείται ότι υπάρχει συμφωνία μεταξύ πειραματικών τιμών και προλέξεων της θερμοκρασίας. Και σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται ότι οι προλέξεις θερμοκρασίας του πλέγματος των 600.000 κελιών, που επιλέχτηκε για την προσομοίωση, υποεκτιμούν τις πειραματικές μετρήσεις με μία μικρή διαφορά η οποία εκτιμάται γύρω στους 100-150 °C.



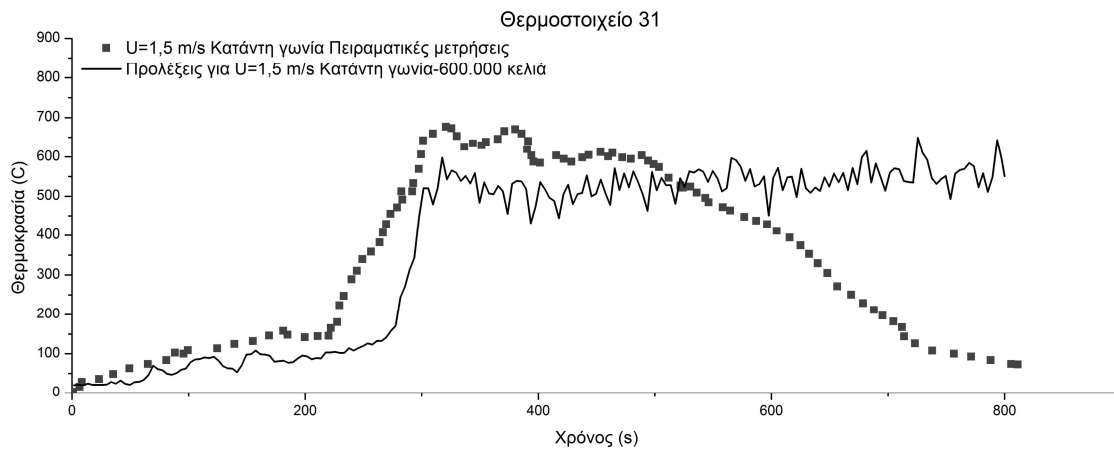
Σχήμα 4.49 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 7 στο εσωτερικό του δωματίου για 1,5m/s-Κατάντη γωνία.



Σχήμα 4.50 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 15 στο εσωτερικό του δωματίου για 1,5m/s-Κατάντη γωνία.

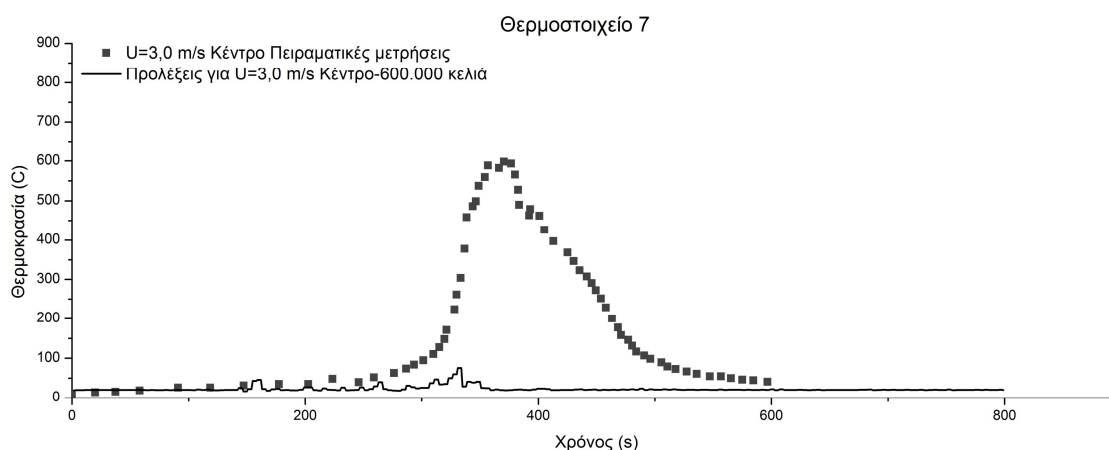


Σχήμα 4.51 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 23 στο εσωτερικό του δωματίου για 1,5m/s-Κατάντη γωνία.

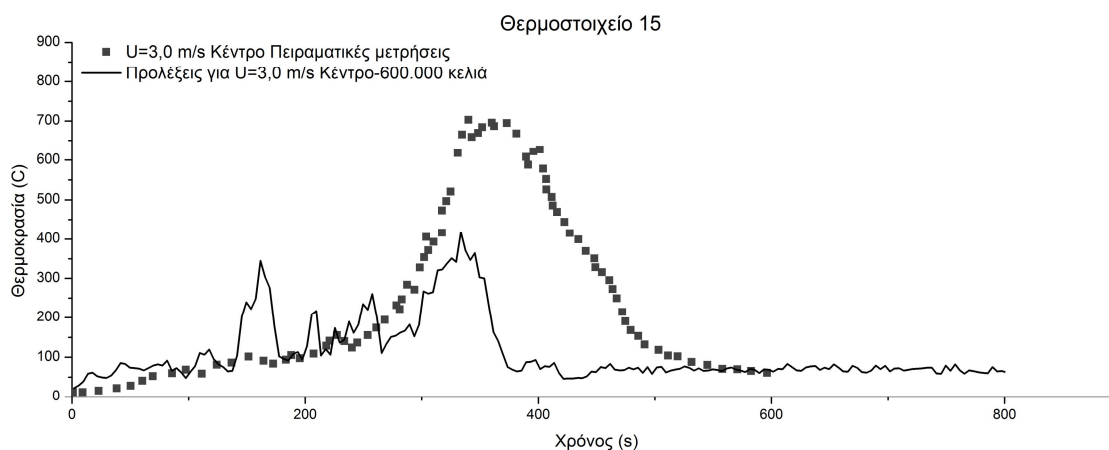


Σχήμα 4.52 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 31 στο εσωτερικό του δωματίου για 1,5m/s-Κατάντη γωνία.

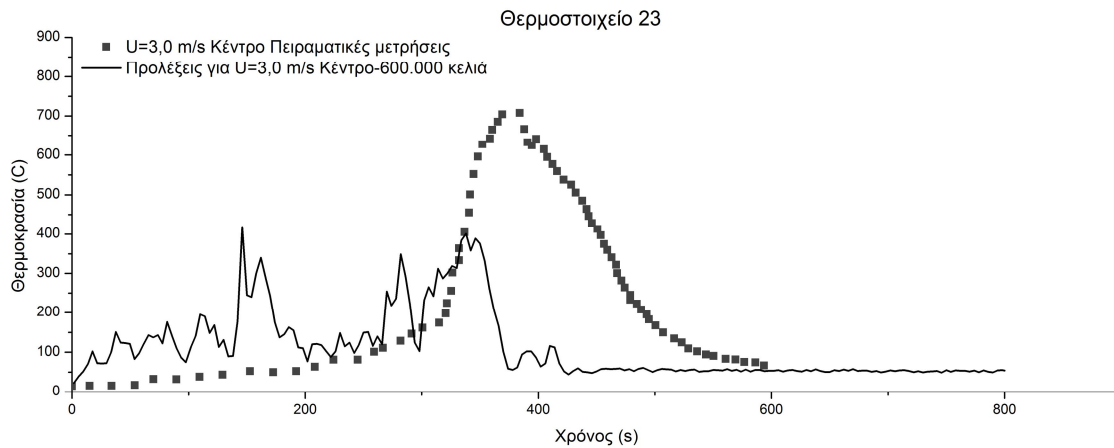
Για την περίπτωση όπου η εστία βρίσκεται στο κέντρο του διαμερίσματος και για ταχύτητα αέρα 3,0 m/s (Περίπτωση 3α) παρατηρείται στα διαγράμματα 4.53, 4.54, 4.55 και 4.56 ότι υπάρχει ποιοτική συμφωνία μεταξύ πειραματικών τιμών και προλέξεων της θερμοκρασίας. Συγκεκριμένα, διαπιστώνεται μία μετατόπιση της χρονικής διάρκειας ανάπτυξης τη φλόγας, καθώς σύμφωνα με τις πειραματικές μετρήσεις το στάδιο ανάπτυξης της ξεκινάει μετά από 50-60s σε σχέση με τις προλέξεις θερμοκρασίας του πλέγματος που επιλέχτηκε. Και σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται έντονα ότι οι προλέξεις θερμοκρασίας υποεκτιμούν τις πειραματικές τιμές κατά 300°C.



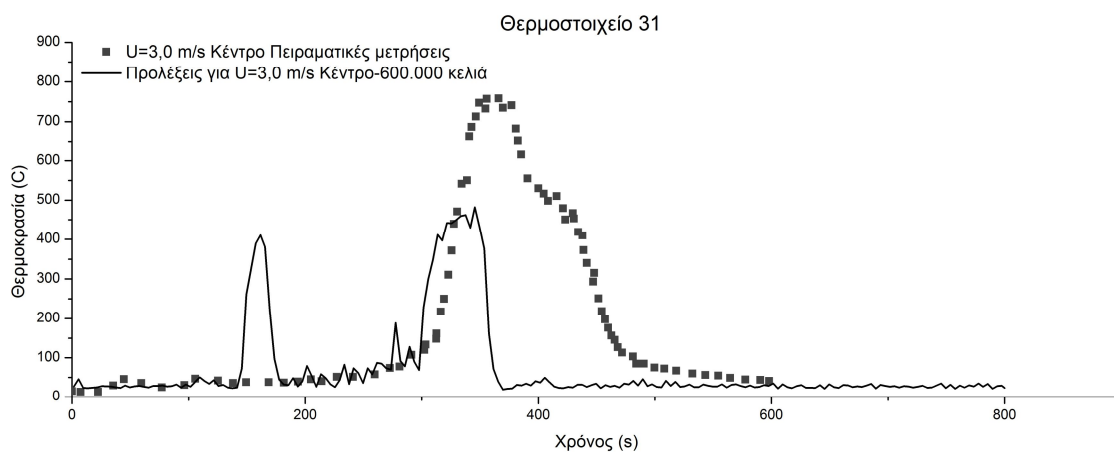
Σχήμα 4.53 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 7 στο εσωτερικό του δωματίου για 3,0m/s-Κέντρο.



Σχήμα 4.54 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 15 στο εσωτερικό του δωματίου για 3,0m/s-Κέντρο.

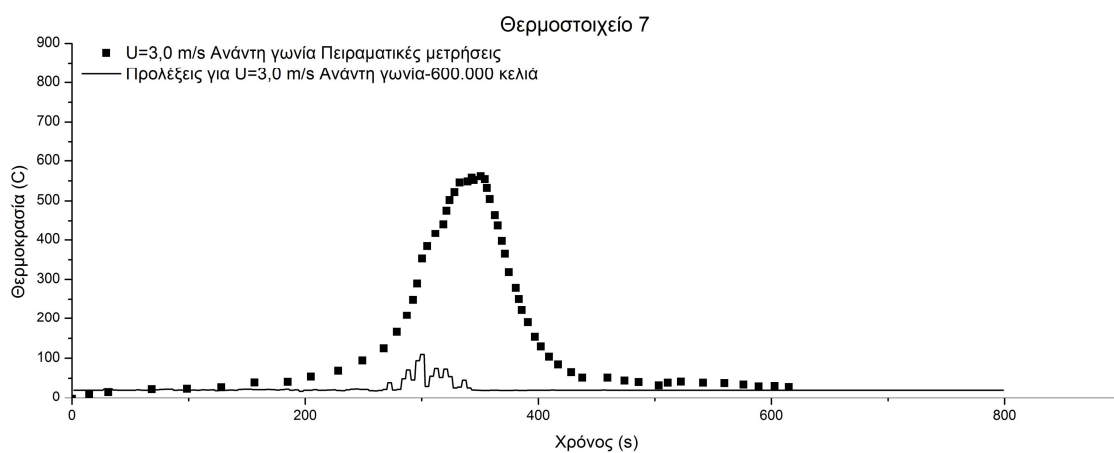


Σχήμα 4.55 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 23 στο εσωτερικό του δωματίου για 3,0m/s-Κέντρο.

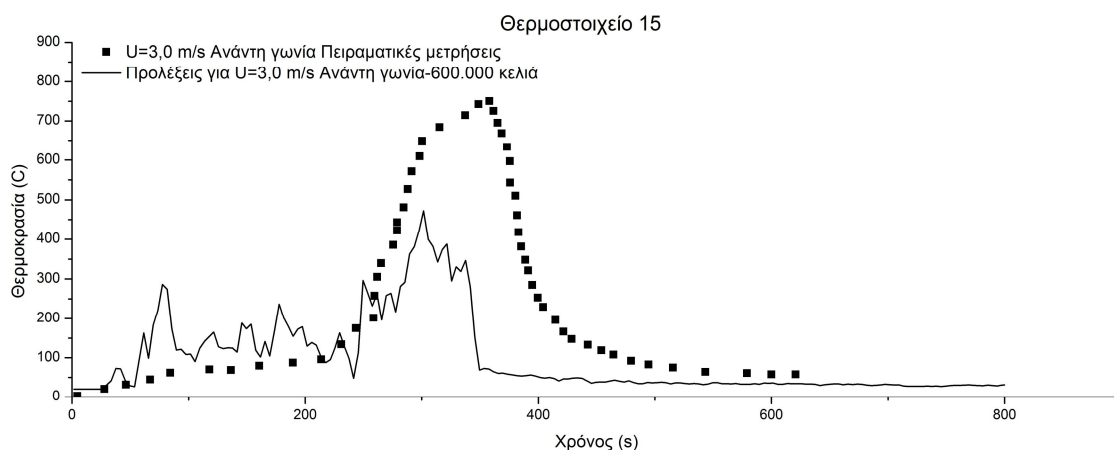


Σχήμα 4.56 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 31 στο εσωτερικό του δωματίου.

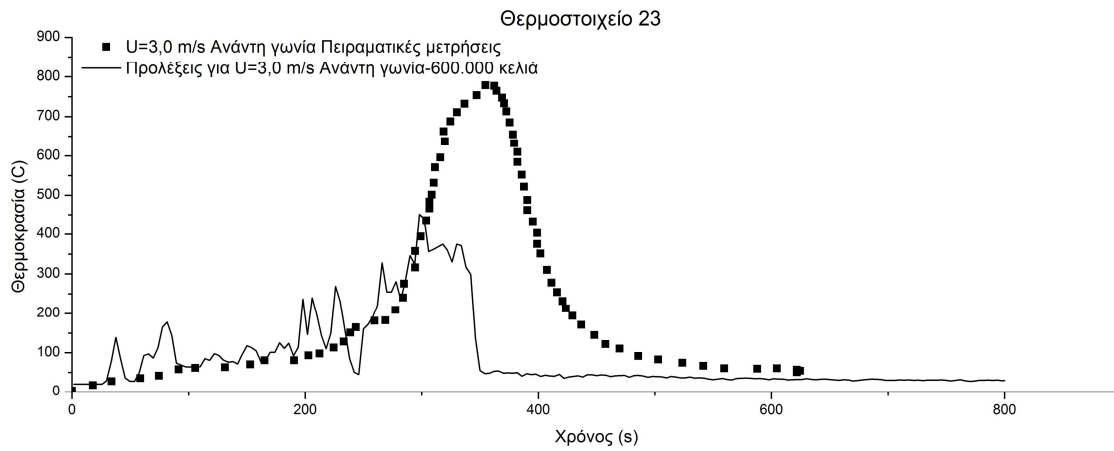
Για την περίπτωση όπου η εστία βρίσκεται στην ανάντη γωνία του διαμερίσματος και για ταχύτητα αέρα 3,0 m/s (Περίπτωση 3β) παρατηρείται στα διαγράμματα 4.57, 4.58, 4.59 και 4.60 ότι υπάρχει ποιοτική συμφωνία μεταξύ πειραματικών τιμών και προλέξεων της θερμοκρασίας. Στα διαγράμματα αυτά διαπιστώνεται ότι ο χρόνος διάρκειας της ανάπτυξης της φλόγας εκτιμάται γύρω στα 100s. Ωστόσο κι εδώ παρατηρείται μία μετατόπιση της χρονικής διάρκειας ανάπτυξης τη φλόγας, καθώς σύμφωνα με τις πειραματικές μετρήσεις το στάδιο ανάπτυξης της ξεκινάει μετά από 50-60s σε σχέση με τις προλέξεις θερμοκρασίας. Και σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται έντονα μία υποεκτίμηση των προλέξεων θερμοκρασίας σε σχέση με τις πειραματικές τιμές, η οποία εκτιμάται γύρω στους 350-400°C.



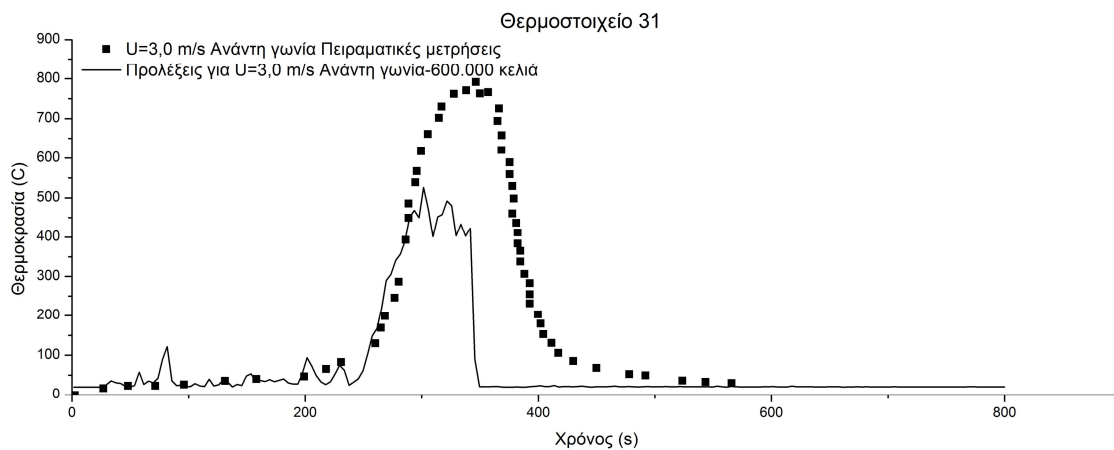
Σχήμα 4.57 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 7 στο εσωτερικό του δωματίου για 3,0m/s-Ανάντη γωνία.



Σχήμα 4.58 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 15 στο εσωτερικό του δωματίου για 3,0m/s-Ανάντη γωνία.

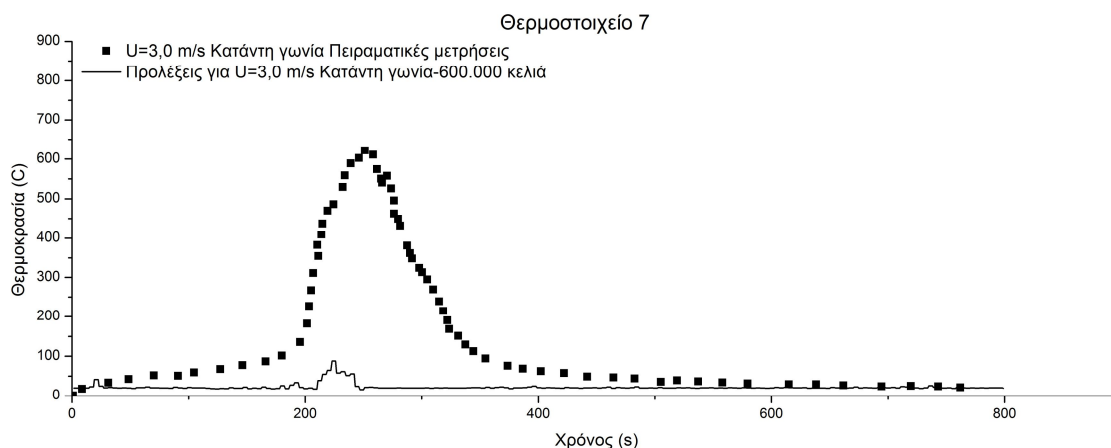


Σχήμα 4.59 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 23 στο εσωτερικό του δωματίου για 3,0m/s-Ανάντη γωνία.

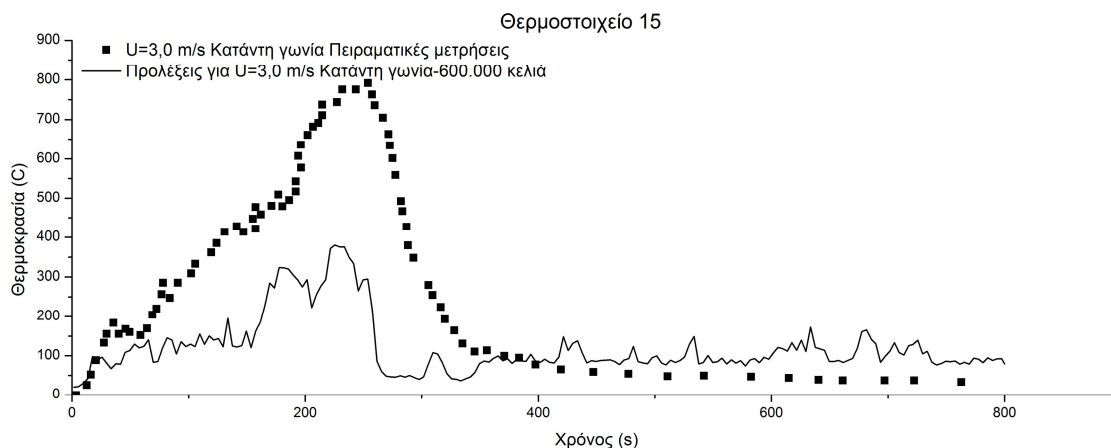


Σχήμα 4.60 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 31 στο εσωτερικό του δωματίου για 3,0m/s-Ανάντη γωνία.

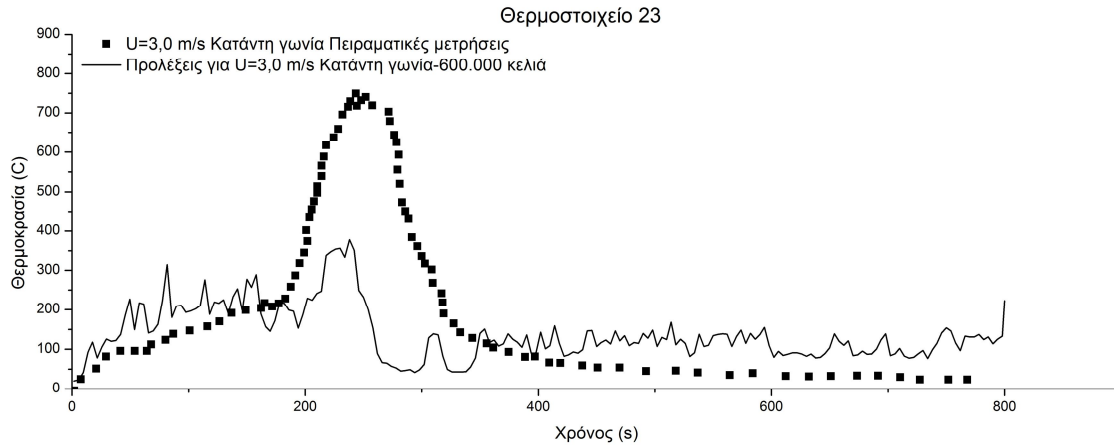
Στα διαγράμματα 4.61, 4.62, 4.63 και 4.64 που αφορούν την περίπτωση όπου η εστία βρίσκεται στην κατάντη γωνία του διαμερίσματος και για ταχύτητα αέρα 3,0 m/s (Περίπτωση 3γ) παρατηρείται ότι υπάρχει ποιοτική συμφωνία μεταξύ πειραματικών τιμών και προλέξεων της θερμοκρασίας. Διαπιστώνεται στα διαγράμματα αυτά ότι ο χρόνος διάρκειας της πλήρους ανεπτυγμένης φλόγας είναι γύρω στα 50-70s. Και σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται έντονα μία υποεκτίμηση των προλέξεων θερμοκρασίας σε σχέση με τις πειραματικές τιμές, η οποία εκτιμάται γύρω στους 250°C.



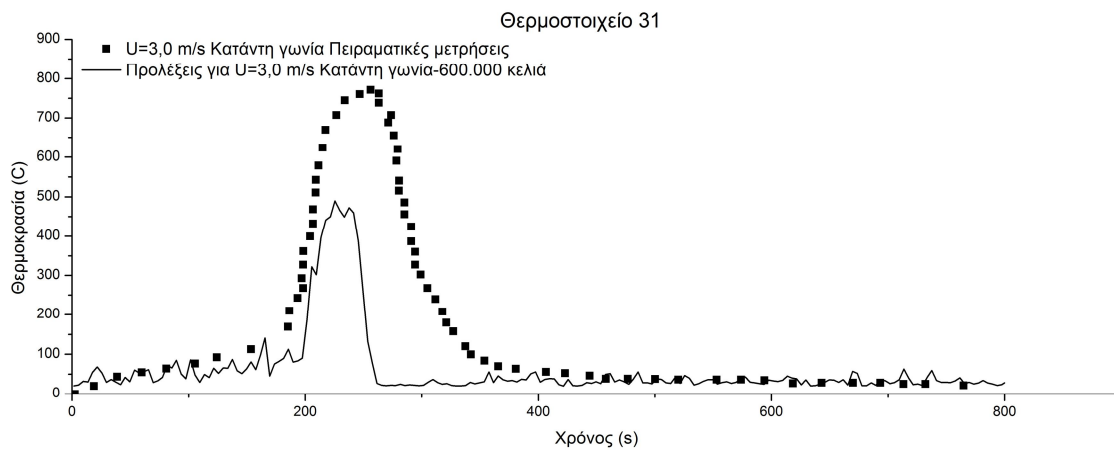
Σχήμα 4.61 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 7 στο εσωτερικό του δωματίου για 3,0m/s-Κατάντη γωνία.



Σχήμα 4.62 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 15 στο εσωτερικό του δωματίου για 3,0m/s-Κατάντη γωνία.



Σχήμα 4.63 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 23 στο εσωτερικό του δωματίου για 3,0m/s-Κατάνη γωνία.



Σχήμα 4.64 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 31 στο εσωτερικό του δωματίου για 3,0m/s-Κατάνη γωνία.

4.6.2.4 Συμπεράσματα για τη σύγκριση πειραματικών τιμών και προλέξεων της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του διαμερίσματος.

Σε γενικές γραμμές, παρόλο που οι ποσοτικές διαφοροποιήσεις μεταξύ πειραματικών τιμών και προλέξεων της θερμοκρασίας αυξάνονται καθώς αυξάνεται ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας, παρατηρείται ότι υπάρχει συμφωνία στη συμπεριφορά των αποτελεσμάτων. Από τις προλέξεις της θερμοκρασίας σε σχέση με το χρόνο φαίνεται ότι ο κώδικας FDS προσεγγίζει ικανοποιητικά τα πειραματικά δεδομένα. Η ανάπτυξη της φλόγας μέσα στο διαμέρισμα διαφοροποιείται στις περιπτώσεις όπου υπάρχει επίδραση ή μη του εξωτερικού ανέμου. Αύξηση της ταχύτητας του ανέμου συνεπάγεται πιο γρήγορη ανάπτυξης της φλόγας και μείωση του χρόνου καύσης. Αυτό σημαίνει ότι η περίοδος ανάπτυξης της φλόγας διαπιστώνεται νωρίτερα όσο η ταχύτητα του αέρα αυξάνεται.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, για ταχύτητα του εξωτερικού αέρα 1,5 m/s, σημειώνονται υψηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με την περίπτωση ταχύτητας 3,0 m/s. Αυτό συμβαίνει γιατί το πλούμιο της φωτιάς εξέρχεται με πιο γρήγορο ρυθμό από το άνοιγμα του διαμερίσματος για μεγαλύτερη ταχύτητα αέρα, με αποτέλεσμα να μην αναπτύσσονται πολύ υψηλές θερμοκρασίες στο εσωτερικό του.

Παράλληλα, διαφοροποιήσεις στις προλέξεις θερμοκρασίας παρατηρήθηκαν και με την επίδραση της παραμέτρου της θέσης της εστίας. Συγκεκριμένα, για ταχύτητα ανέμου 1,5 m/s όταν η εστία βρίσκεται στην ανάντη ή κατάντη γωνία του διαμερίσματος η ανάπτυξη της φλόγας καθυστερεί να ξεκινήσει και διαρκεί περισσότερο. Η σύγκριση των θέσεων της εστίας της φωτιάς για την περίπτωση των 3 m/s δεν παρουσίασε ιδιαίτερες διαφορές, καθώς η επίδραση του ανέμου καταστέλλει γρηγορότερα τη φωτιά στο εσωτερικό του διαμερίσματος.

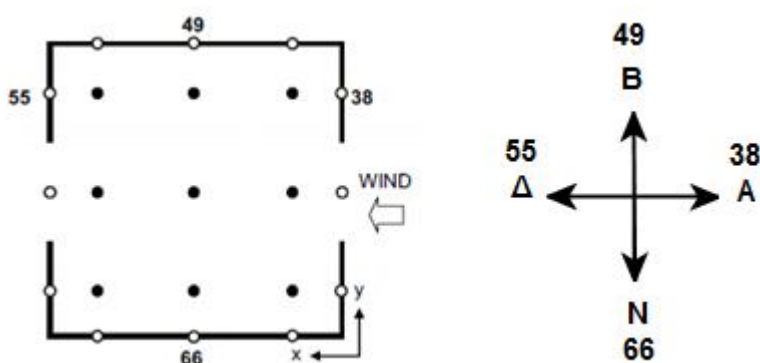
Η θέση για την οποία διαπιστώνονται οι μεγαλύτερες θερμοκρασίες είναι η θέση που βρίσκεται το θερμοστοιχείο 31, κοντά στο δυτικό τοίχο του διαμερίσματος. Η παρατήρηση αυτή ήταν αναμενόμενη, καθώς το πλούμιο της φλόγας, εξαιτίας της επίδρασης του ανέμου τείνει προς τη δυτική πλευρά του διαμερίσματος με σκοπό τη διαφυγή του από το άνοιγμα, με αποτέλεσμα τη ανάπτυξη μεγαλύτερων θερμοκρασιών προς εκείνη την κατεύθυνση.

Να σημειωθεί επίσης ότι οι προλέξεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 7, το οποίο βρίσκεται κοντά στο δεξί άνοιγμα του διαμερίσματος (σχήμα 4.13), εμφανίζουν μία αρκετά μεγάλη υποεκτίμηση των πειραματικών δεδομένων, ειδικά για τις περιπτώσεις επίδρασης εξωτερικού ανέμου. Προφανώς διαπιστώνεται ότι σε εκείνο το σημείο δεν επιλύεται αρκετά ικανοποιητικά το ροϊκό πεδίο.

4.6.2.5 Χρονικές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας των τοίχων στο διαμέρισμα

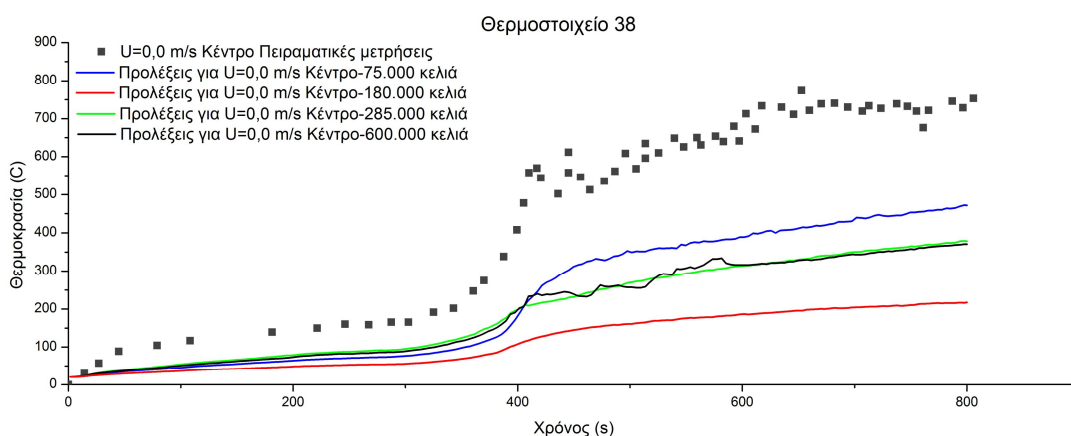
Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι χρονικές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας στους τοίχους για τα θερμοστοιχεία 38, 49, 55 και 66, τα οποία βρίσκονται στο ύψος των ανοιγμάτων (σχήμα 4.65). Τα θερμοστοιχεία 38 και 55 βρίσκονται στον ανατολικό και δυτικό τοίχο και κοντά στην ανάντη και κατάντη γωνία αντίστοιχα. Τα θερμοστοιχεία 49 και 66 βρίσκονται στον βόρειο και δυτικό τοίχο αντίστοιχα. Επίσης να σημειωθεί ότι τα θερμοστοιχεία τοποθετήθηκαν στην εσωτερική πλευρά του τοίχου, επαπτόμενα στη ξύλινη σανίδα (πρώτο υλικό που συναντάται στην εσωτερική πλευρά του τοίχου) και πολύτιμα συμπεράσματα προέκυψαν για τη θέρμανση του υλικού κατά τη χρονική διάρκεια που μελετήθηκε.

Στα παρακάτω σχήματα αυτά γίνεται σύγκριση των προλέξεων θερμοκρασίας με τις πειραματικές τιμές.

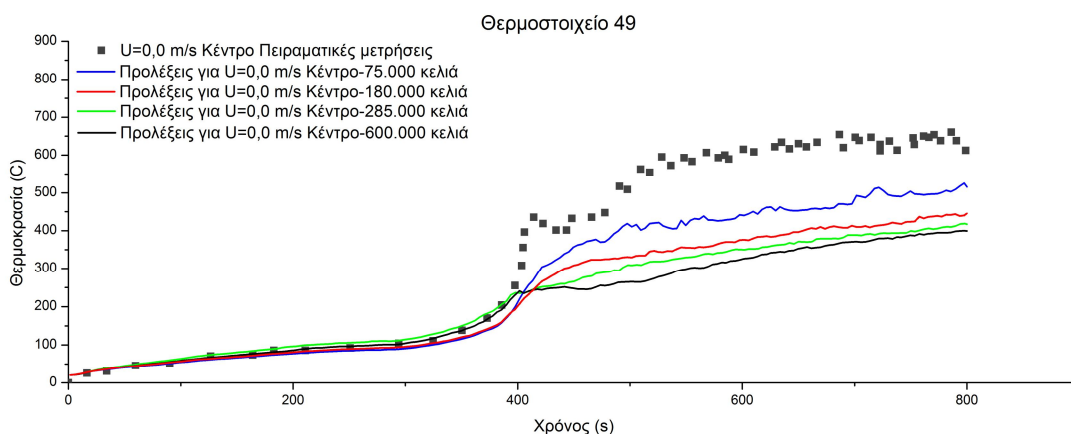


Σχήμα 4.65 Θέσεις των θερμοστοιχείων για μέτρηση της θερμοκρασίας στους τοίχους.

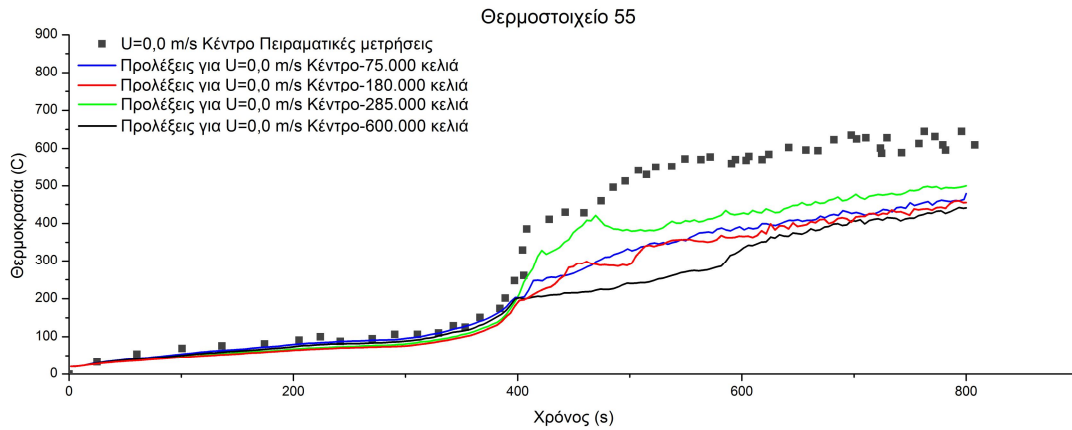
Οι προλέξεις της θερμοκρασίας, που προέκυψαν από τα διάφορα πλέγματα στην περίπτωση όπου η εστία βρισκόταν στο κέντρο του διαμερίσματος και για ταχύτητα του αέρα 0,0 m/s (Περιπτώσεις 1α,1β, 1γ και 1δ), συγκρίθηκαν με τα πειραματικά δεδομένα στα διαγράμματα 4.66, 4.67, 4.68 και 4.69. Όπως φαίνεται και από τα τέσσερα διαγράμματα υπάρχει σχετικά κακή σχέση των προλέξεων θερμοκρασίας και των πειραματικών αποτελεσμάτων, καθώς παρατηρείται μία αισθητή υποεκτίμηση των πειραματικών τιμών γύρω στους 150-200°C. Φαίνεται ότι το πιο αραιό πλέγμα των 75.000 κελιών προσεγγίζει καλύτερα τις πειραματικές μετρήσεις.



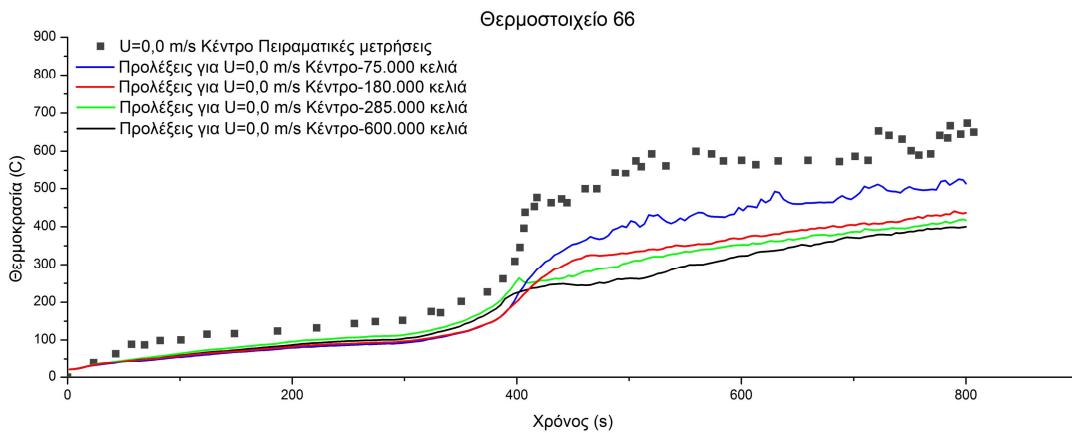
Σχήμα 4.66 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 38, στον ανατολικό τοίχο για $U=0,0\text{m/s}$ -Κέντρο.



Σχήμα 4.67 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 49, στο βόρειο τοίχο για $U=0,0\text{m/s}$ -Κέντρο.

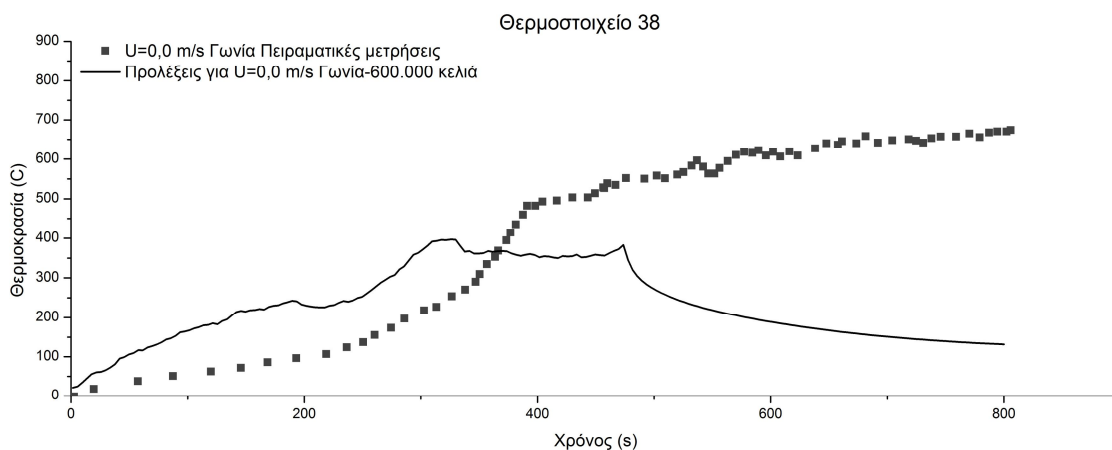


Σχήμα 4.68 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 55, στο δυτικό τοίχο για U=0,0m/s-Κέντρο.

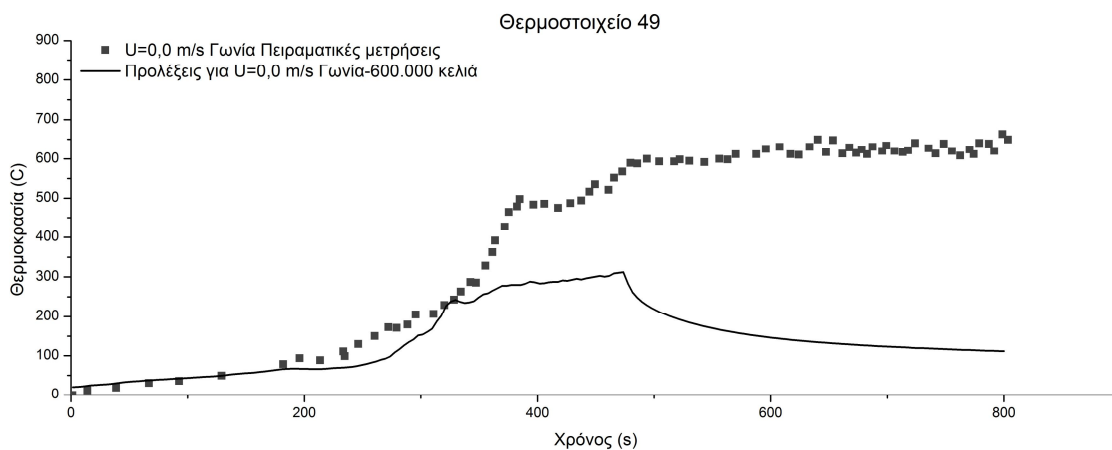


Σχήμα 4.69 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 66, στο νότιο τοίχο για U=0,0m/s-Κέντρο.

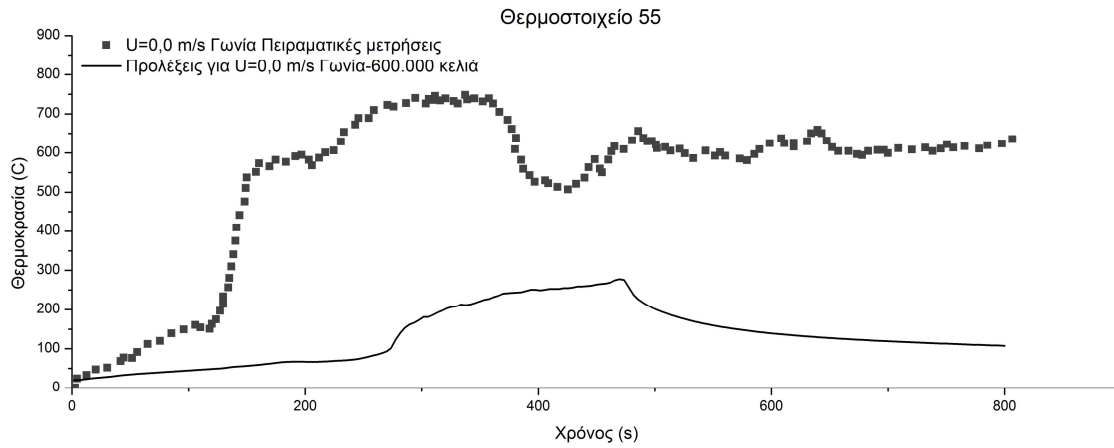
Στα διαγράμματα 4.70, 4.71, 4.72 και 4.73 για την περίπτωση όπου η εστία βρίσκεται σε γωνία του διαμερίσματος και για ταχύτητα αέρα 0,0 m/s (Περίπτωση 1ε) παρατηρείται ότι υπάρχει σχετικά κακή συμφωνία των προλέξεων θερμοκρασίας και των πειραματικών αποτελεσμάτων, καθώς παρατηρείται μία αισθητή υποεκτίμηση των πειραματικών τιμών η οποία εκτιμάται πάνω από 300°C. Διαπιστώνεται ότι μεγαλύτερες θερμοκρασίες λαμβάνονται στο δυτικό τοίχο, ενώ μεγαλύτερη είναι και η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ πειραματικών τιμών και των προλέξεων θερμοκρασίας στο συγκεκριμένο τοίχο.



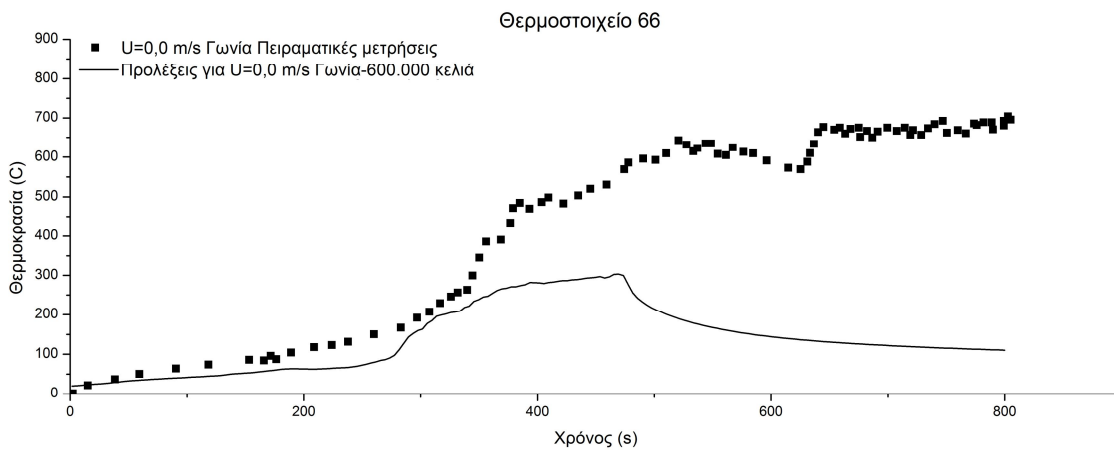
Σχήμα 4.70 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 38, στον ανατολικό τοίχο για $U=0,0\text{m/s}$ -Γωνία.



Σχήμα 4.71 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 49, στο βόρειο τοίχο για $U=0,0\text{m/s}$ -Γωνία.

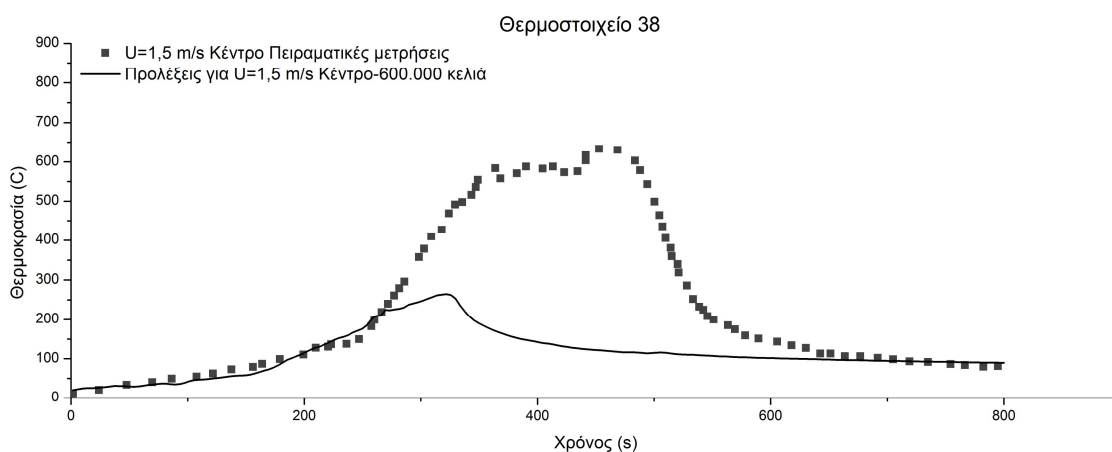


Σχήμα 4.72 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 55, στο δυτικό τοίχο για $U=0,0\text{m/s}$ -Γωνία.

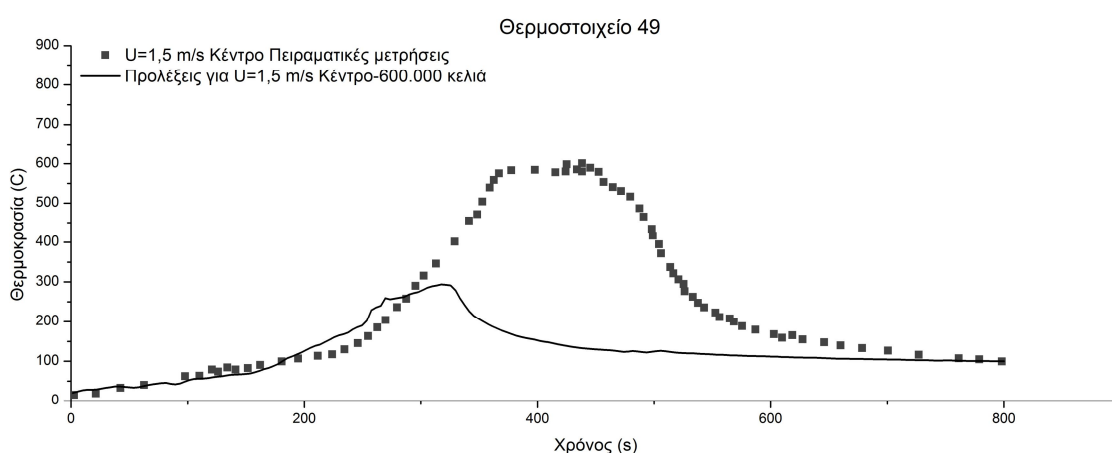


Σχήμα 4.73 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 66, στο νότιο τοίχο για $U=0,0\text{m/s}$ -Γωνία.

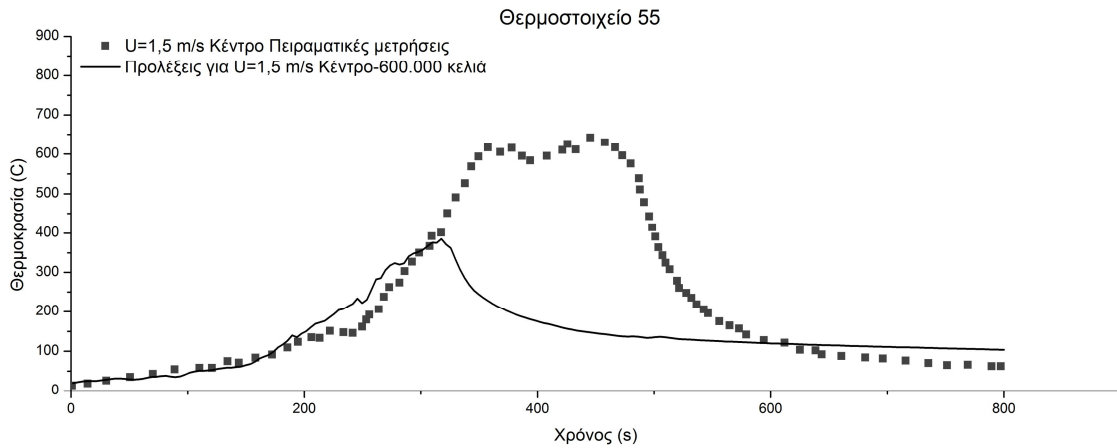
Στα διαγράμματα 4.74, 4.75, 4.76 και 4.77 για την περίπτωση όπου η εστία βρίσκεται στο κέντρο του διαμερίσματος και για ταχύτητα αέρα 1,5 m/s (Περίπτωση 2α) παρατηρείται ότι οι προλέξεις της θερμοκρασίας προσεγγίζουν τα πειραματικά αποτελέσματα ως ένα βαθμό, αν και παρατηρείται μία αισθητή υποεκτίμηση των πειραματικών τιμών η οποία εκτιμάται γύρω στους 300°C. Διαπιστώνεται ότι μεγαλύτερες θερμοκρασίες λαμβάνονται στο δυτικό και στον ανατολικό τοίχο, ενώ μεγαλύτερη είναι και η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των πειραματικών τιμών και των προλέξεων θερμοκρασίας στους τοίχους αυτούς.



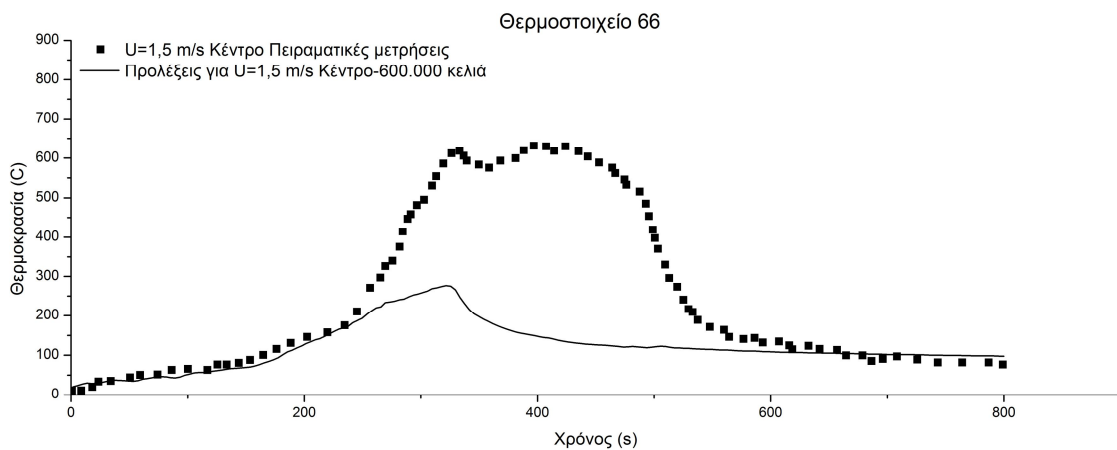
Σχήμα 4.74 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 38, στον ανατολικό τοίχο για $U=1,5\text{m/s}$ -Κέντρο.



Σχήμα 4.75 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 49, στο βόρειο τοίχο για $U=1,5\text{m/s}$ -Κέντρο.

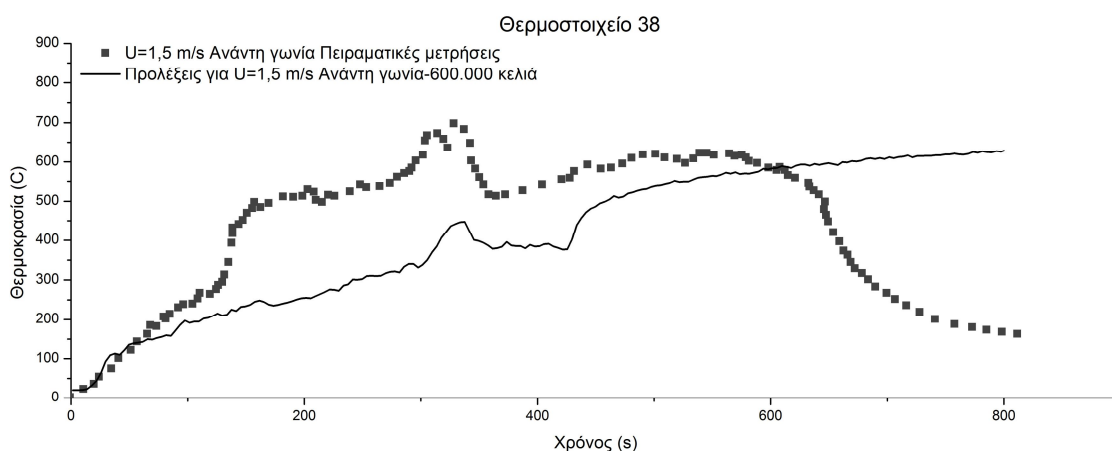


Σχήμα 4.76 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 55, στον δυτικό τοίχο για $U=1,5\text{m/s}$ -Κέντρο.

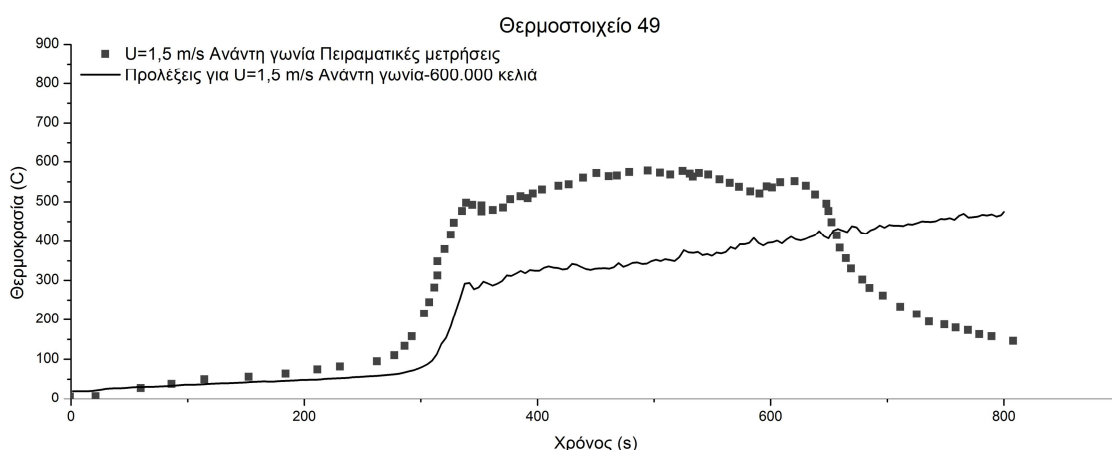


Σχήμα 4.77 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 66, στο νότιο τοίχο για $U=1,5\text{m/s}$ -Κέντρο.

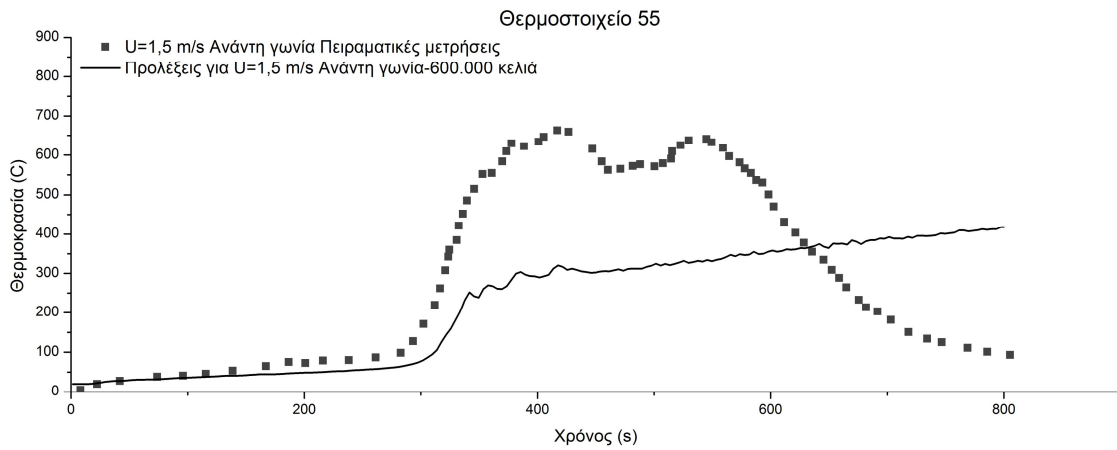
Στα διαγράμματα 4.78, 4.79, 4.80 και 4.81 για την περίπτωση όπου η εστία βρίσκεται στην ανάντη γωνία του διαμερίσματος και για ταχύτητα αέρα 1,5 m/s (Περίπτωση 2β) παρατηρείται ότι οι προλέξεις της θερμοκρασίας συμφωνούν με τα πειραματικά αποτελέσματα σε ικανοποιητικό βαθμό. Φαίνεται ωστόσο ότι οι προλέξεις της θερμοκρασίας υποεκτιμούν τις πειραματικές τιμές, με μία θερμοκρασιακή διαφορά που κυμαίνεται γύρω στους 100-200°C. Διαπιστώνεται ότι μεγαλύτερες θερμοκρασίες λαμβάνονται στο δυτικό τοίχο, ενώ μεγαλύτερη είναι και η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ πειραματικών τιμών και προλέξεων θερμοκρασίας στον τοίχο αυτό (περίπου 200 °C).



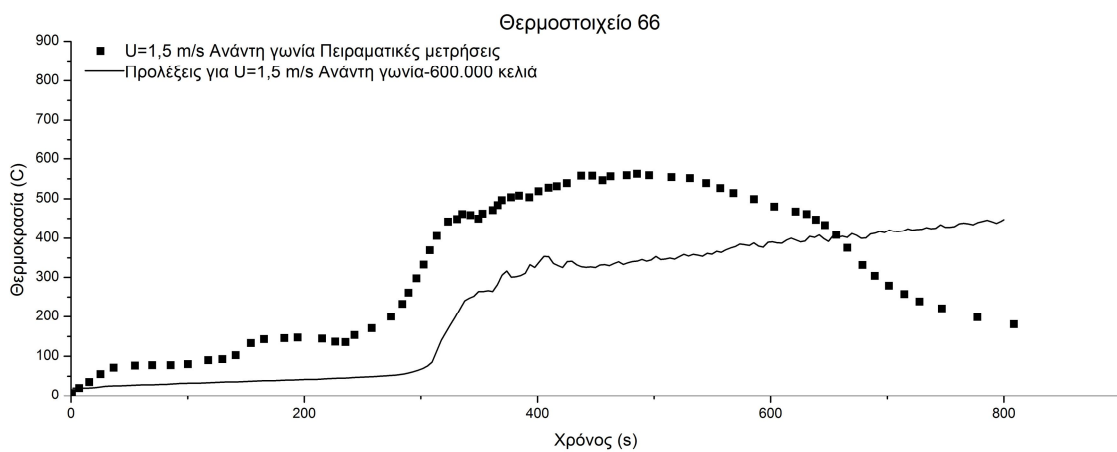
Σχήμα 4.78 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 38, στον ανατολικό τοίχο για $U=1,5\text{m/s}$ -Ανάντη γωνία.



Σχήμα 4.79 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 49, στον βόρειο τοίχο για $U=1,5\text{m/s}$ -Ανάντη γωνία.

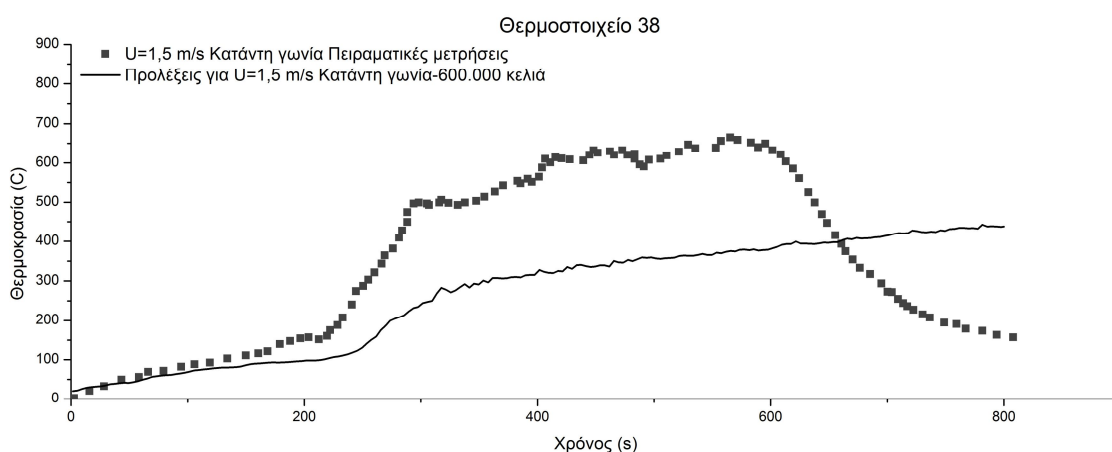


Σχήμα 4.80 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 55, στο δυτικό τοίχο για $U=1,5\text{m/s}$ -Ανάντη γωνία.

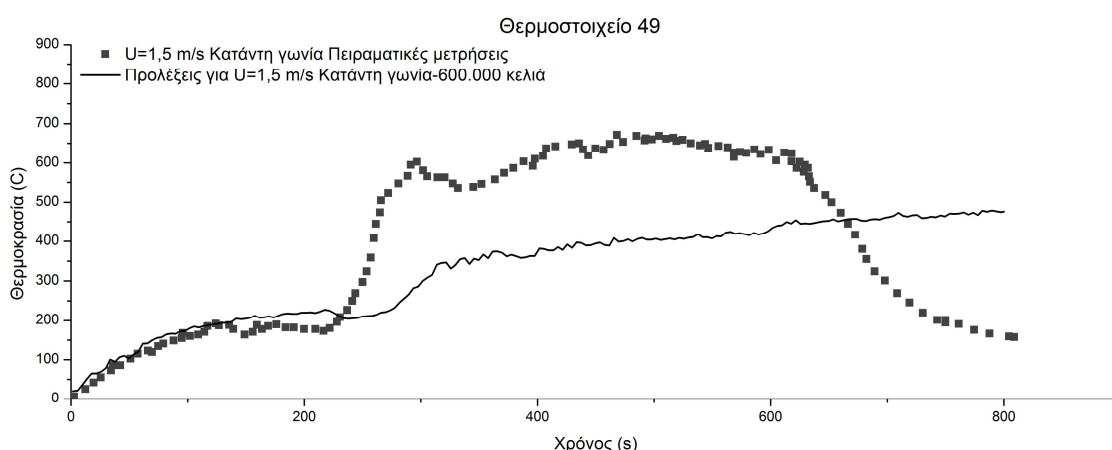


Σχήμα 4.81 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 66, στο νότιο τοίχο για $U=1,5\text{m/s}$ -Ανάντη γωνία.

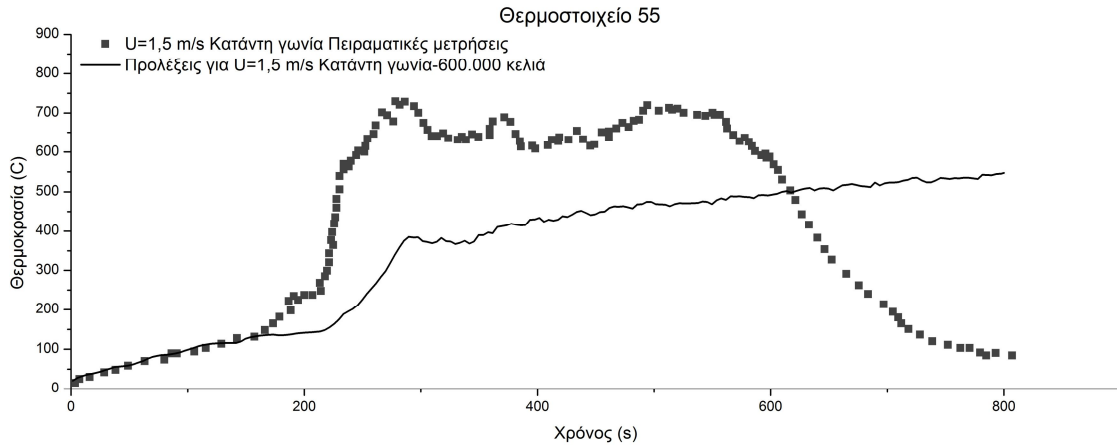
Στα διαγράμματα 4.82, 4.83, 4.84 και 4.85 για την περίπτωση όπου η εστία βρίσκεται στην κατάντη γωνία του διαμερίσματος και για ταχύτητα αέρα 1,5 m/s (Περίπτωση 2γ) παρατηρείται μία σχετική συσχέτιση μεταξύ των προλέξεων θερμοκρασίας και των πειραματικών αποτελεσμάτων. Ωστόσο παρατηρείται μία αισθητή υποεκτίμηση των πειραματικών τιμών η οποία εκτιμάται γύρω στους 200°C. Διαπιστώνεται ότι μεγαλύτερες θερμοκρασίες λαμβάνονται στο δυτικό τοίχο, ενώ μεγαλύτερη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ πειραματικών τιμών και προλέξεων θερμοκρασίας παρατηρείται στο βόρειο και δυτικό τοίχο (περίπου 200 °C).



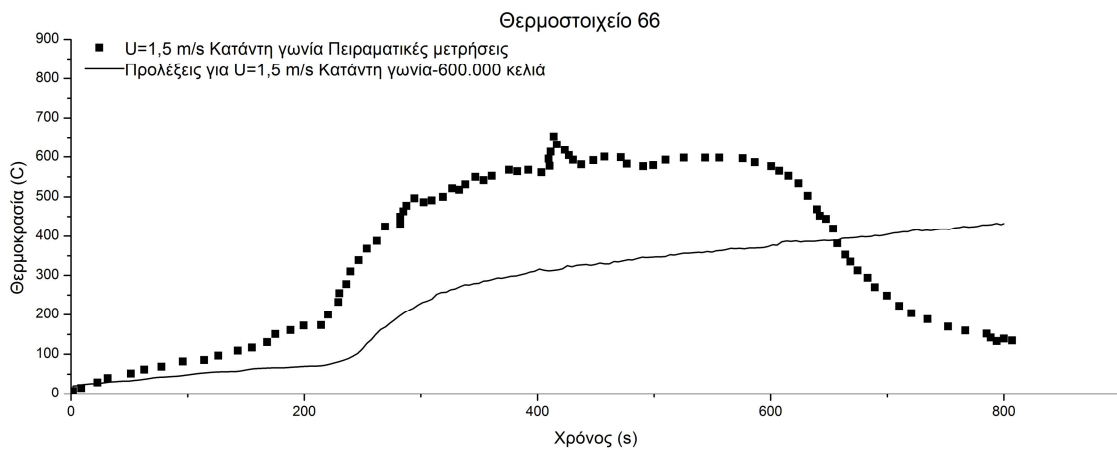
Σχήμα 4.82 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 38, στον ανατολικό τοίχο για $U=1,5\text{m/s}$ -Κατάντη γωνία.



Σχήμα 4.83 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 49, στον βόρειο τοίχο για $U=1,5\text{m/s}$ -Κατάντη γωνία.

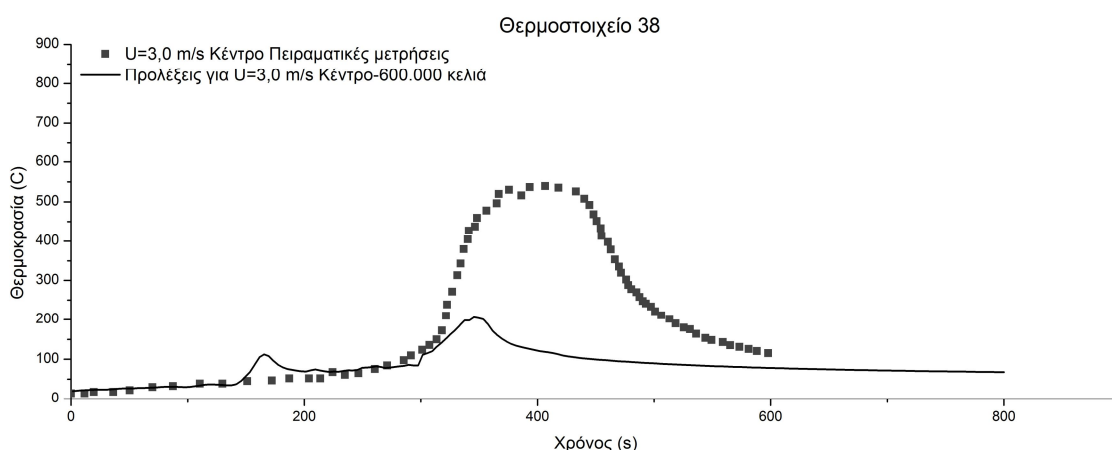


Σχήμα 4.84 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 55, στον δυτικό τοίχο για $U=1,5\text{m/s}$ -Κατάντη γωνία.

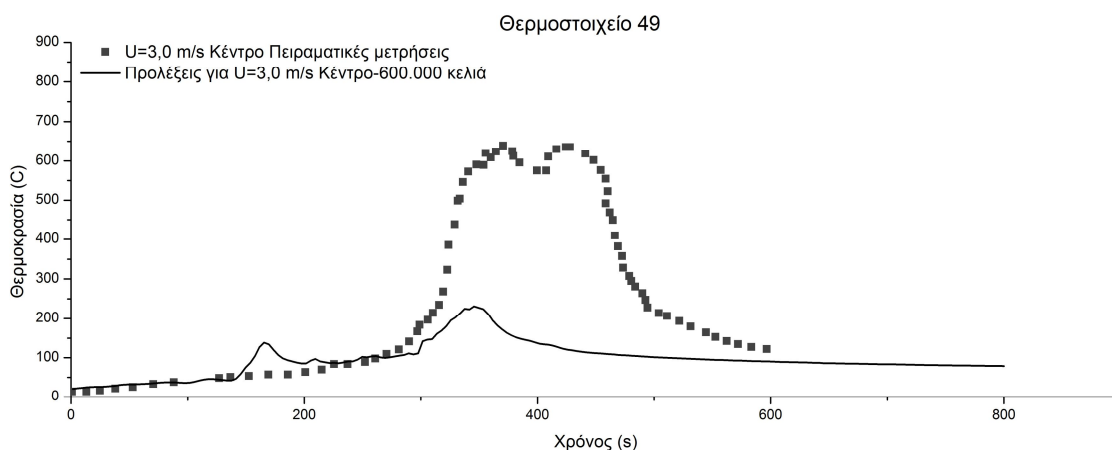


Σχήμα 4.85 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 66, στο νότιο τοίχο για $U=1,5\text{m/s}$ -Κατάντη γωνία.

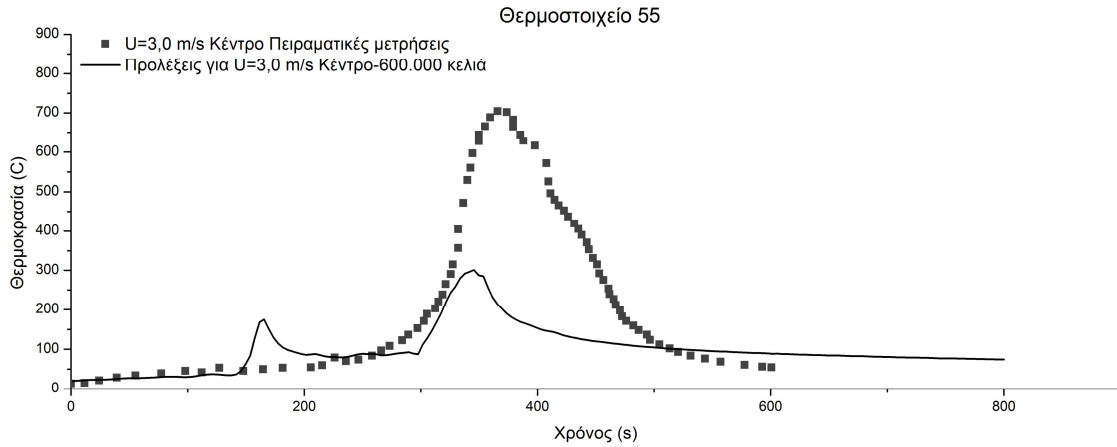
Στα διαγράμματα 4.86, 4.87, 4.88 και 4.89 για την περίπτωση όπου η εστία βρίσκεται στο κέντρο του διαμερίσματος και για ταχύτητα αέρα 3,0 m/s (Περίπτωση 3α) παρατηρείται κακή προσέγγιση των προλέξεων θερμοκρασίας σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα. Σημειώνεται μία σημαντική υποεκτίμηση των πειραματικών τιμών η οποία εκτιμάται γύρω στους 350-400°C. Ταυτόχρονα διαπιστώνεται ότι μεγαλύτερες θερμοκρασίες λαμβάνονται στο δυτικό τοίχο, ενώ μεγαλύτερη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ πειραματικών τιμών και προλέξεων θερμοκρασίας παρατηρείται στον ανατολικό και δυτικό τοίχο (περίπου 400 °C).



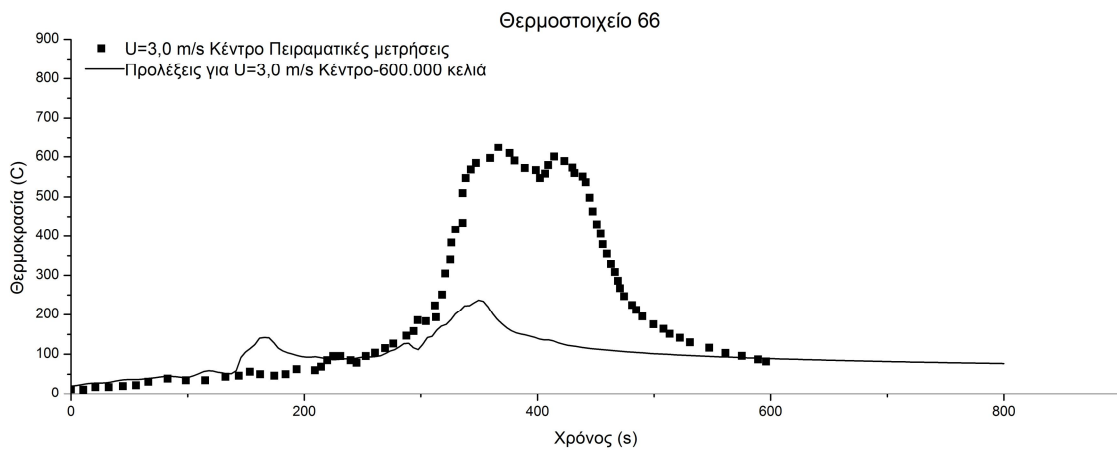
Σχήμα 4.86 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 38, στον ανατολικό τοίχο για $U=3,0\text{m/s}$ -Κέντρο.



Σχήμα 4.87 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 49, στον βόρειο τοίχο για $U=3,0\text{m/s}$ -Κέντρο.

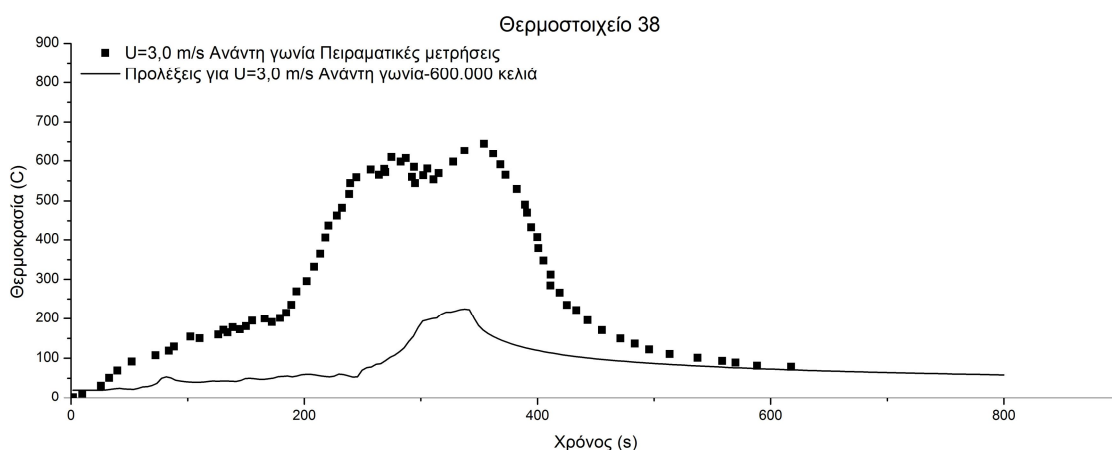


Σχήμα 4.88 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 55, στο δυτικό τοίχο για U=3,0m/s-Κέντρο.

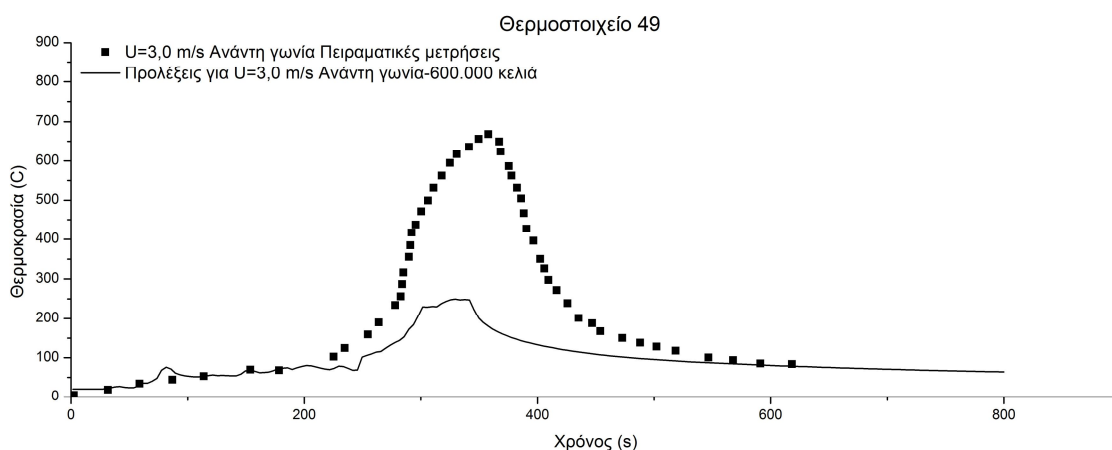


Σχήμα 4.89 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 66, στο νότιο τοίχο για U=3,0m/s-Κέντρο.

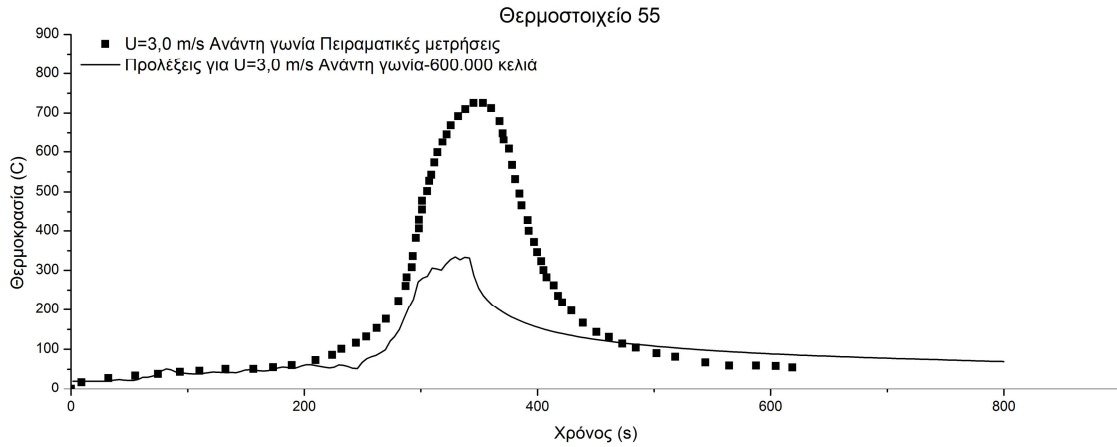
Τα διαγράμματα 4.90, 4.91, 4.92 και 4.93 αφορούν την περίπτωση όπου η εστία βρίσκεται στην ανάντη γωνία του διαμερίσματος και για ταχύτητα εξωτερικού ανέμου 3,0 m/s (Περίπτωση 3β). Σε αυτήν την περίπτωση, παρατηρείται μία σχετικά κακή προσέγγιση των προλέξεων θερμοκρασίας σε σχέση με τις πειραματικά αποτελέσματα. Κι εδώ παρατηρείται μία σημαντική υποεκτίμηση των πειραματικών τιμών η οποία εκτιμάται γύρω στους 400°C Διαπιστώνεται ότι μεγαλύτερες θερμοκρασίες λαμβάνονται στο δυτικό τοίχο, ενώ μεγαλύτερη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ πειραματικών τιμών και προλέξεων θερμοκρασίας παρατηρείται στο δυτικό τοίχο (περίπου 400 °C).



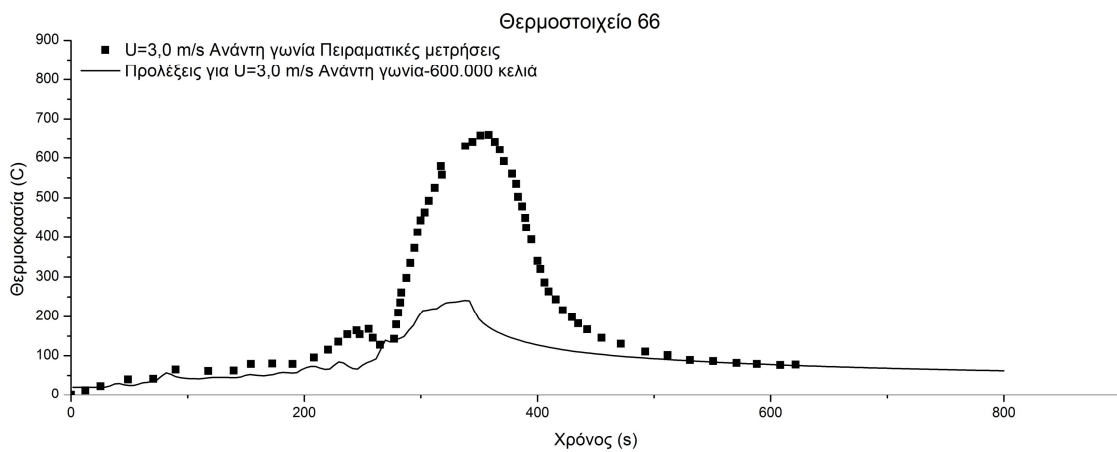
Σχήμα 4.90 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 38, στον ανατολικό τοίχο για $U=3,0\text{m/s}$ -Ανάντη γωνία.



Σχήμα 4.91 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 49, στο βόρειο τοίχο για $U=3,0\text{m/s}$ -Ανάντη γωνία.

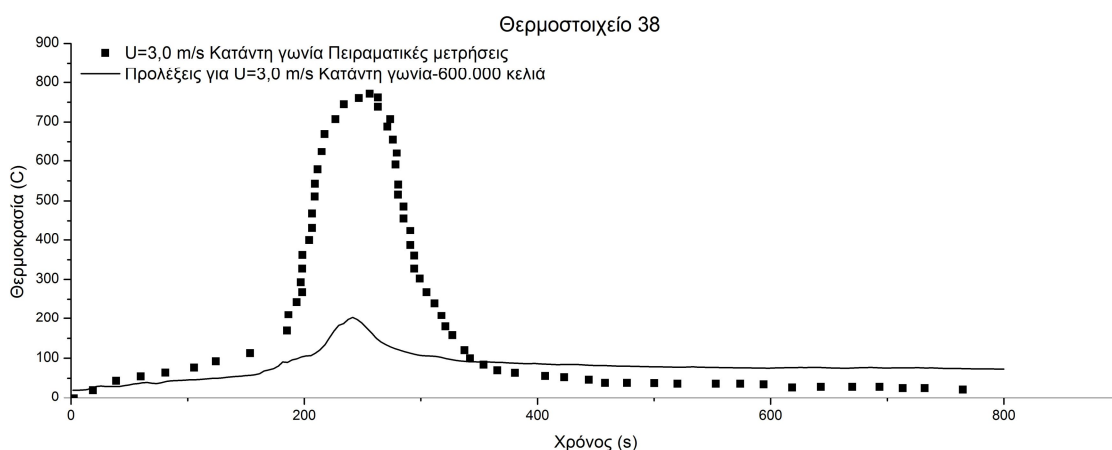


Σχήμα 4.92 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 55, στο δυτικό τοίχο για $U=3,0\text{m/s}$ -Ανάντη γωνία.

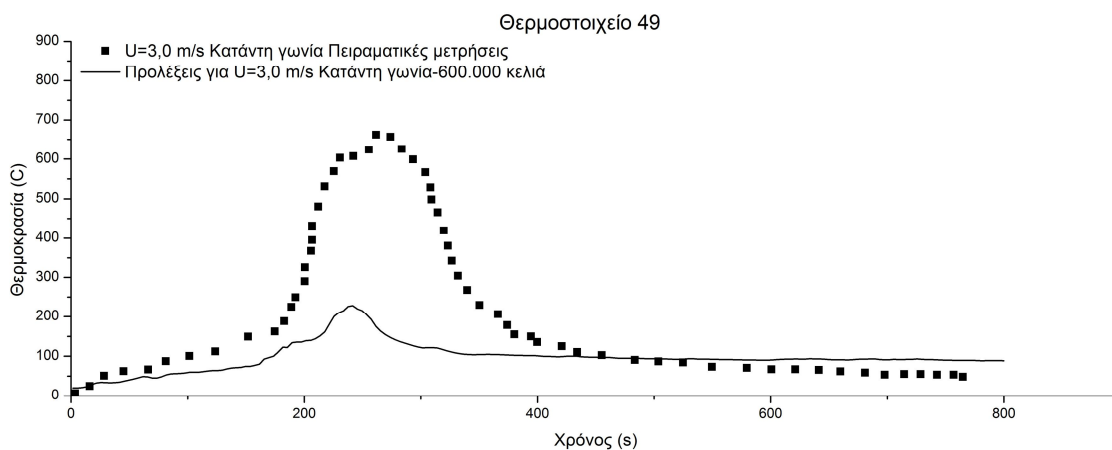


Σχήμα 4.93 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 66, στο νότιο τοίχο για $U=3,0\text{m/s}$ -Ανάντη γωνία.

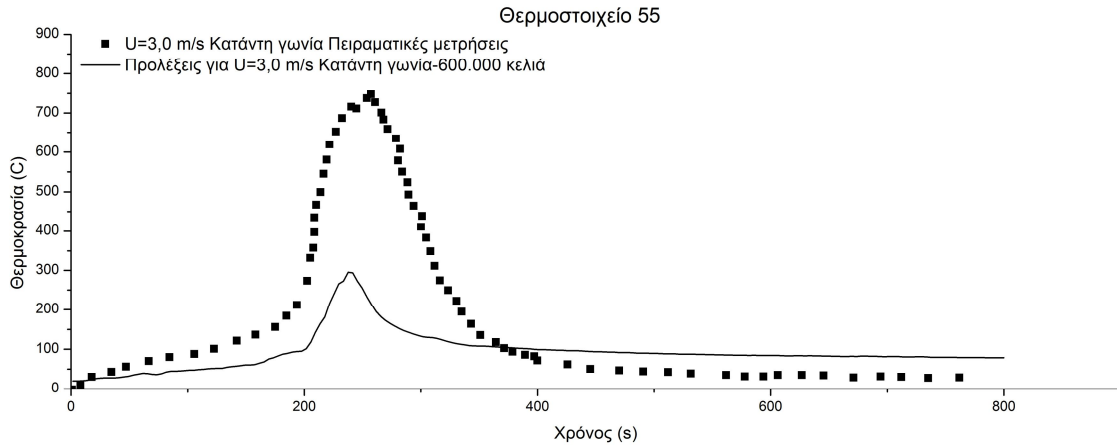
Στα διαγράμματα 4.94, 4.95, 4.96 και 4.97 για την περίπτωση όπου η εστία βρίσκεται στην κατάντη γωνία του διαμερίσματος και για ταχύτητα αέρα 3,0 m/s (Περίπτωση 3γ) παρατηρείται ότι υπάρχει κακή συμφωνία μεταξύ των προλέξεων θερμοκρασίας και των πειραματικών αποτελεσμάτων. Σημειώνεται ότι σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται η μεγαλύτερη υποεκτίμηση των πειραματικών τιμών, καθώς εκτιμάται πάνω από 450-500°C. Παράλληλα, διαπιστώνεται ότι μεγαλύτερες θερμοκρασίες λαμβάνονται στον ανατολικό και δυτικό τοίχο, ενώ μεγαλύτερη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ πειραματικών τιμών και προλέξεων θερμοκρασίας παρατηρείται στον ανατολικό τοίχο (περίπου 500 °C).



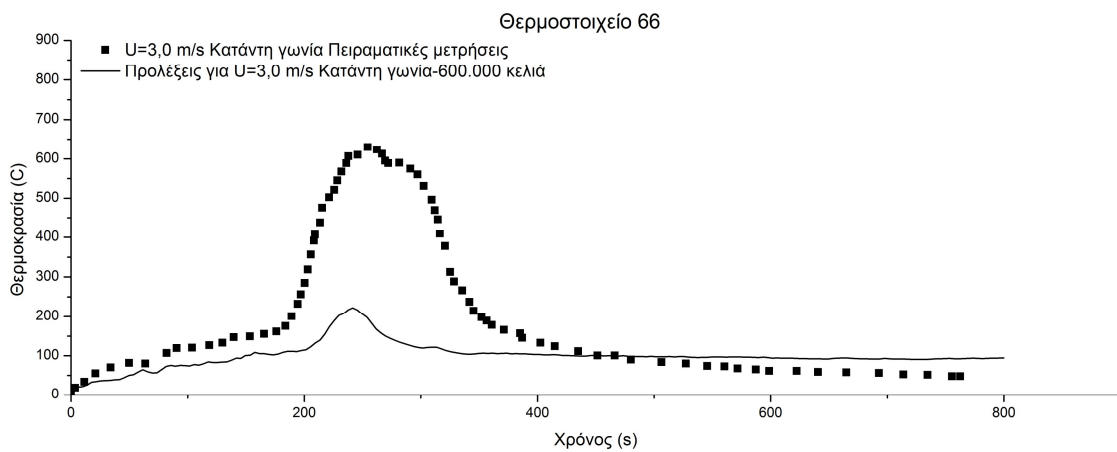
Σχήμα 4.94 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 38, στον ανατολικό τοίχο για U=3,0m/s-Κατάντη γωνία.



Σχήμα 4.95 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 49, στο βόρειο τοίχο για U=3,0m/s-Κατάντη γωνία.



Σχήμα 4.96 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 55, στον δυτικό τοίχο για $U=3,0\text{m/s}$ -Κατάντη γωνία.



Σχήμα 4.97 Προλέξεις και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 66, στο νότιο τοίχο για $U=3,0\text{m/s}$ -Κατάντη γωνία.

4.6.2.6 Συμπεράσματα για τη σύγκριση πειραματικών τιμών και των προλέξεων της θερμοκρασίας στους τοίχους του διαμερίσματος

Στην κατάσταση νηνεμίας παρατηρείται ότι η ξύλινη σανίδα θερμαίνεται για πάνω από 800s. Για όλες τις περιπτώσεις επιβολής εξωτερικής συνθήκης ανέμου η ξύλινη σανίδα θερμαίνεται σταδιακά λόγω της φωτιάς μέχρι να φτάσει το σημείο ανάφλεξης, ενώ η φωτιά σχεδόν σβήνει μέσα στο χρόνο που μελετάται (800s).

Παρατηρήθηκε ότι όταν η εστία της φωτιάς βρίσκεται στην ανάντη ή κατάντη γωνία, η θερμοκρασία αυξάνεται πιο γρήγορα στην περίπτωση των 3 m/s σε σχέση με την περίπτωση 1,5m/s. Αυτό συμβαίνει γιατί μεγαλύτερη η ταχύτητα αέρα φαίνεται να ενισχύει την είσοδο οξυγόνου και να προωθεί την καύση του καυσίμου, φαινόμενο το οποίο προκαλεί πιο γρήγορη αύξηση θερμοκρασίας στο εσωτερικό του διαμερίσματος. Όσον αφορά την ταχύτερη εξέλιξη του φαινομένου της φωτιάς και την υποβάθμιση της που διαπιστώνεται νωρίτερα στην περίπτωση των 3 m/s, είναι δυνατό να υποθεθεί ότι για μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου τα εύφλεκτα αέρια τείνουν να κινηθούν έξω από το διαμέρισμα με αποτέλεσμα οι επιφάνειες των τοίχων να ψύχονται από τον άνεμο γρηγορότερα.

Όπως ήταν αναμενόμενο, το θερμοστοιχείο 55 το οποίο βρίσκεται στο δυτικό τοίχο του μοντέλου παρουσίασε τις μεγαλύτερες τιμές θερμοκρασίας. Στο συγκεκριμένο τοίχο παρατηρήθηκε και πιο γρήγορη ανάπτυξη της φωτιάς κι ειδικά στην περίπτωση όπου η εστία τοποθετήθηκε στην κατάντη γωνία. Η επίδραση του ανέμου ωθεί τα θερμά αέρια προς το δυτικό άνοιγμα με αποτέλεσμα το πλούσιο της φωτιάς να κλίνει προς το δυτικό τοίχο και η θερμοκρασία στον τοίχο αυτό να είναι ιδιαίτερα αυξημένη. Τέλος, να σημειωθεί πιο γρήγορη αύξηση της θερμοκρασίας παρατηρήθηκε σε συνθήκες νηνεμίας και για θέση της εστίας στη γωνία του διαμερίσματος.

Σε γενικές γραμμές, κατά τη σύγκριση των θερμοκρασιακών καμπυλών συναρτήσει του χρόνου, παρατηρείται ότι οι προλέξεις της θερμοκρασίας στους τοίχους του μοντέλου υποεκτιμούν τις πειραματικές τιμές. Πιο συγκεκριμένα, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων υπάρχει καλή συμφωνία αποτελεσμάτων κατά την αρχή και το τέλος της χρονικής περιόδου που εξετάζεται. Ωστόσο, στο ενδιάμεσο παρατηρείται ότι οι προλέξεις της θερμοκρασίας υποεκτιμούν σημαντικά τις πειραματικές μετρήσεις με μία διαφορά που φτάνει τους 400°C.

Μια εξήγηση για την υποεκτίμηση των προλέξεων θερμοκρασίας στους τοίχους είναι η επιλογή του μοντέλου ακτινοβολίας, που ορίζεται από τον κώδικα FDS, η οποία στην παρούσα προσομοίωση είχε ως αποτέλεσμα την πρόλεξη μεγαλύτερων απωλειών λόγω ακτινοβολίας από αυτές που παρατηρήθηκαν κατά την εκτέλεση των πειραμάτων. Επίσης, ενδέχεται να υπάρχει πρόβλημα στην επίλυση της μεταφοράς θερμότητας στις στερεές επιφάνειες που ορίστηκαν στον κώδικα. Στον FDS η επίλυση μεταφοράς θερμότητας γίνεται μονοδιάστατα, με αποτέλεσμα κάποιες φορές οι προλέξεις για τις θερμοκρασίες των στερεών τοιχωμάτων να μην είναι οι πλέον έγκυρες.

4.6.2.7 Μέγιστη κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα μέσα στο διαμέρισμα

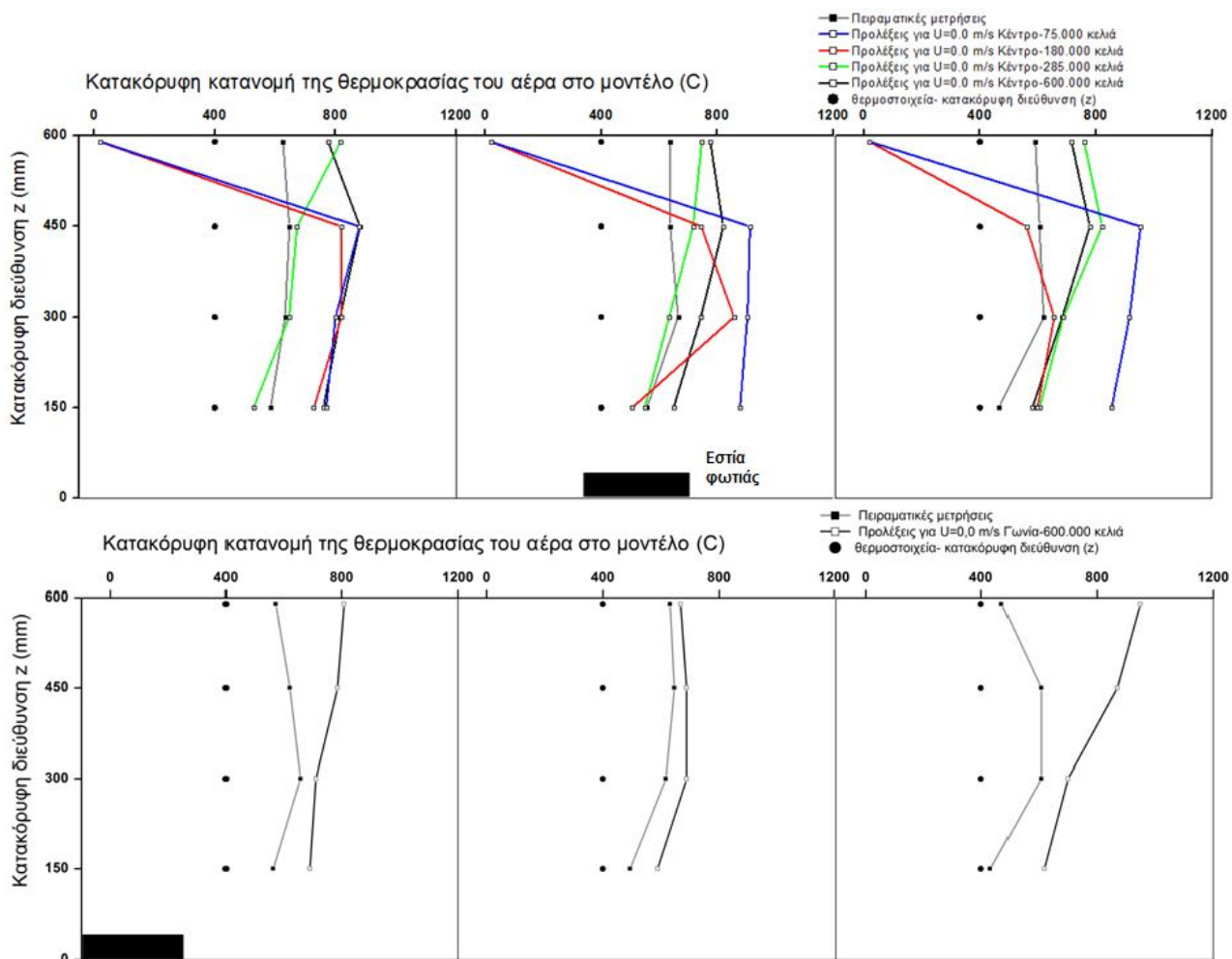
Η ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων σε σχέση με τις προλέξεις θερμοκρασίας συνεχίζεται για τη μέγιστη κατακόρυφη κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα, όπως διαμορφώνεται από τα σημεία μέτρησης στο εσωτερικό του διαμερίσματος. Στο Σχήμα 4.98 φαίνονται σε τομή A-A' (κάτοψη) και πλάγια όψη τα σημεία μέτρησης μέσα στο διαμέρισμα. Να σημειωθεί ότι τα θερμοστοιχεία λήφθηκαν ανά τριάδες για τρεις διαφορετικές θέσεις (κέντρο διαμερίσματος, αριστερά και δεξιά από το κέντρο του διαμερίσματος), όπως φαίνεται και στο συγκεκριμένο σχήμα και βρέθηκε η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας ανά τριάδα. Οι τιμές της θερμοκρασίας που προέκυψαν απεικονίζονται στα παρακάτω διαγράμματα για κάθε περίπτωση ταχύτητας και θέσης της εστίας.

● Θερμοστοιχεία για μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα



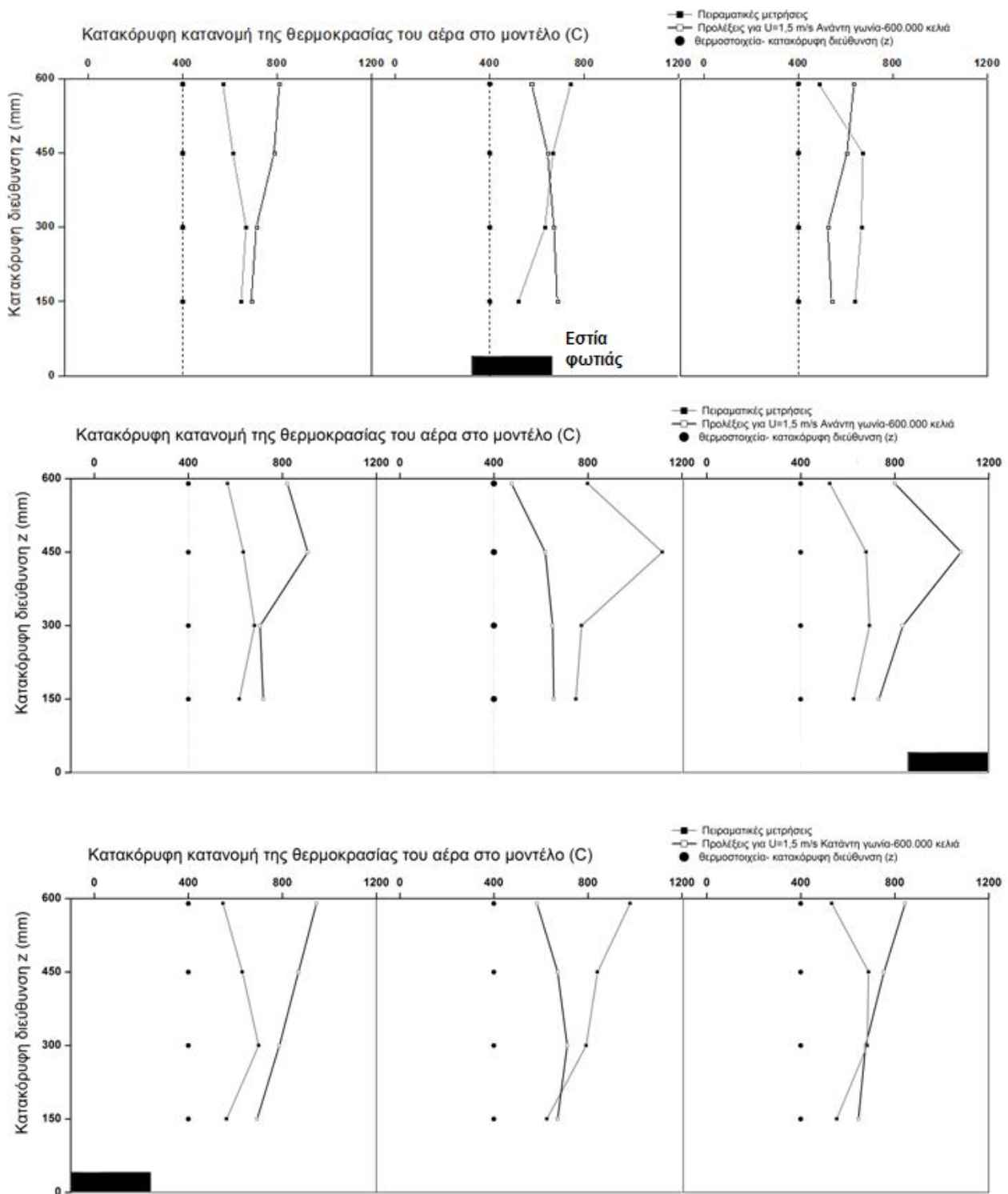
Σχήμα 4.98 Κάτοψη σε τομή A-A' και πλάγια όψη του διαμερίσματος.

Στα διαγράμματα της εικόνας 4.99 παρουσιάζεται η μέγιστη κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα στο εσωτερικό του διαμερίσματος για ταχύτητα εξωτερικού ανέμου 0,0 m/s και για τις τρεις διαφορετικές θέσεις της εστίας (Περίπτωση 1α, 1β, 1γ, 1δ και 1ε). Μέσα από τη σύγκριση πειραματικών τιμών και προλέξεων της θερμοκρασίας διαπιστώνεται υπερεκτίμηση των πειραματικών τιμών θερμοκρασίας και για τις τρεις θέσεις της εστίας. Επίσης, μεγαλύτερη διαφορά πειραματικών τιμών και προλέξεων παρατηρείται για τα σημεία μέτρησης που γειτνιάζουν στον ανατολικό τοίχο. Τέλος, για την περίπτωση όπου η εστία βρίσκεται στο κέντρο του διαμερίσματος, για την οποία πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για διάφορα πλέγματα, το πλέγμα που φαίνεται να προσεγγίζει καλύτερα τις πειραματικές τιμές της θερμοκρασίας είναι αυτό με τα 600.000 κελιά. Στην περίπτωση αυτή παρατηρείται ότι για τα υπολογιστικά πεδία με μικρότερη διακριτική ικανότητα (75.000 και 180.000 κελιά) η συσχέτιση των πειραματικών και υπολογιστικών μεγεθών δεν είναι ικανοποιητική.



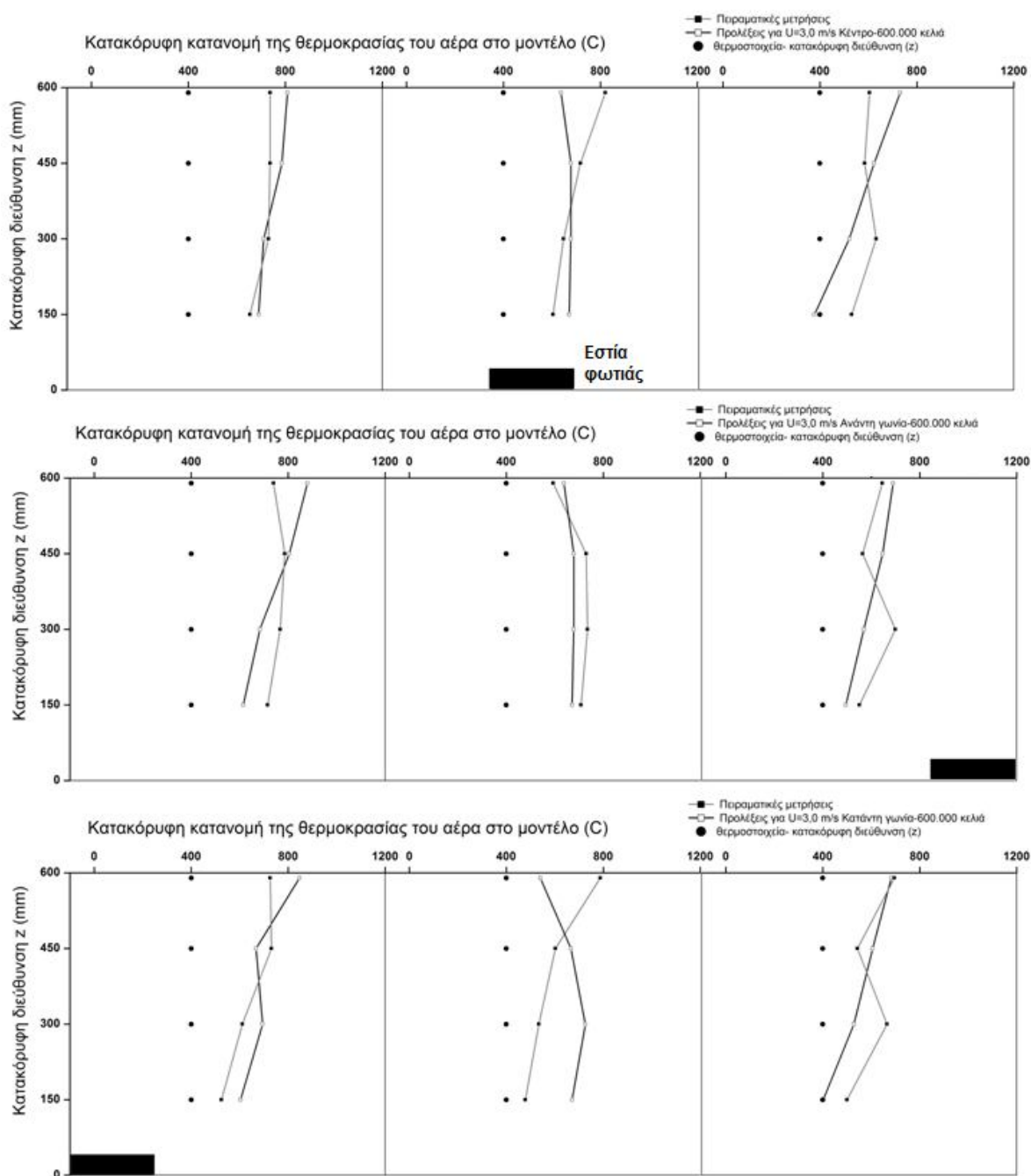
Σχήμα 4.99 Κατακόρυφη κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα στο εσωτερικό του διαμερίσματος για $U=0,0\text{m/s}$ -Κέντρο και Γωνία αντίστοιχα (Περιπτώσεις 1α, 1β, 1γ, 1δ, 1ε).

Στα διαγράμματα της εικόνας 4.100 παρουσιάζεται η μέγιστη κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα στο εσωτερικό του διαμερίσματος για ταχύτητα αέρα $1,5\text{ m/s}$ και για τις 3 διαφορετικές θέσεις της εστίας (Περίπτωση 2α, 2β και 2γ). Παρατηρείται ότι οι προλέξεις της θερμοκρασίας συμφωνούν σχετικά με τα πειραματικά δεδομένα. Ωστόσο παρατηρείται μία υπερεκτίμηση των πειραματικών τιμών στην πλειονότητα των περιπτώσεων που εκτιμάται από $100\text{--}500^\circ\text{C}$. Να σημειωθεί ότι οι προλέξεις των θερμοστοιχείων που βρίσκονται πιο κοντά στην οροφή του μοντέλου παρουσιάζουν μεγαλύτερες αποκλίσεις σε σχέση με τις πειραματικές τιμές. Επίσης, μεγαλύτερη διαφορά πειραματικών τιμών και προλέξεων παρατηρείται για τα σημεία μέτρησης που γειτνιάζουν στο κέντρο του μοντέλου.



Σχήμα 4.100 Κατακόρυφη κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα στο εσωτερικό του διαμερίσματος για $U=1,5$ m/s-Κέντρο, Ανάντη και Κατάντη γωνία αντίστοιχα (Περιπτώσεις 2α, 2β, 2γ).

Στα διαγράμματα της εικόνας 4.101 παρουσιάζεται η μέγιστη κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα στο εσωτερικό του διαμερίσματος για ταχύτητα αέρα 3,0 m/s και για τις 3 διαφορετικές θέσεις της εστίας (Περίπτωση 3α, 3β και 3γ). Παρατηρείται ότι οι προλέξεις της θερμοκρασίας παρουσιάζουν καλή συμφωνία σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα, σε μεγαλύτερο βαθμό από την περίπτωση όπου η ταχύτητα του αέρα είναι 1,5 m/s. Οι διαφορές πειραματικών τιμών και προλέξεων της θερμοκρασίας δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικές. Να σημειωθεί ότι οι προλέξεις που αφορούν τα σημεία μέτρησης που γειτνιάζουν με τον ανατολικό παρουσιάζουν μία απότομη μείωση από την οροφή προς το πάτωμα του μοντέλου και για τις τρεις θέσεις της εστίας.



Σχήμα 4.102 Κατακόρυφη κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα στο εσωτερικό του διαμερίσματος για $U=3,0$ m/s-Κέντρο, Ανάντη και Κατάντη γωνία αντίστοιχα (Περίπτώσεις 3α, 3β, 3γ).

4.6.2.8 Συμπεράσματα για τη σύγκριση πειραματικών τιμών και προλέξεων κατακόρυφης κατανομής της θερμοκρασίας του αέρα στο εσωτερικό του μοντέλου

Σε γενικές γραμμές οι προλέξεις της θερμοκρασίας προσεγγίζουν ικανοποιητικά τις πειραματικές τιμές. Σημειώνεται ότι μεγαλύτερη διαφορά των δύο μεγεθών παρατηρείται στην περίπτωση ταχύτητας εξωτερικού ανέμου 1,5 m/s.

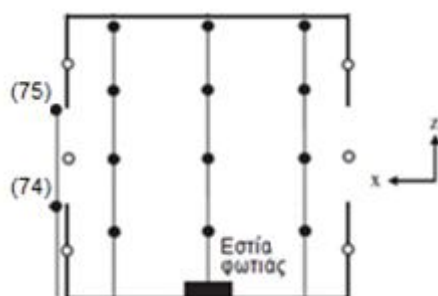
Στις περισσότερες περιπτώσεις, όπως ήταν αναμενόμενο μεγαλύτερες θερμοκρασίες σημειώθηκαν στις θέσεις των θερμοστοιχείων που βρίσκονταν πιο κοντά στην εκάστοτε θέση της εστίας. Επιβεβαιώθηκε σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα ότι σε συνθήκες εξωτερικής επίδρασης αέρα οι υψηλότερες θερμοκρασίες σημειώνονται περίπου στη μέση της κατακόρυφης διεύθυνσης του μοντέλου. Αυτό σημαίνει ότι τα θερμά αέρια που παράγονται κατά την καύση απομακρύνονται εξαιτίας της επίδρασης του ανέμου πριν φτάσουν στην οροφή του διαμερίσματος. Παράλληλα διαπιστώθηκε, όπως αναμενόταν από τις πειραματικές ενδείξεις, ότι η υψηλότερη θερμοκρασία στην οροφή του μοντέλου σημειώθηκε στην κατάσταση νηνεμίας και για θέση της εστίας στο κέντρο του μοντέλου.

Μία ακόμη εποπτική παρατήρηση αφορά την περίπτωση όπου η επίδραση του ανέμου είναι πιο έντονη (3m/s). Στην περίπτωση αυτή διαπιστώθηκε ότι μεγαλύτερες θερμοκρασίες εμφανίζονται περίπου στη μέση του ανοίγματος του δυτικού τοίχου ενώ οι χαμηλότερες θερμοκρασίες σημειώνονται κοντά στο άνοιγμα του ανατολικού τοίχου όπου εισέρχεται ο αέρας. Το φαινόμενο αυτό σχετίζεται και πάλι με την κίνηση των καυσαερίων προς το άνοιγμα του δυτικού τοίχου, σύμφωνα με τη φορά του ανέμου, με αποτέλεσμα τη ψύξη των σημείων εκείνων που έρχονται σε επαφή με τα θερμά αέρια για μικρότερο χρονικό διάστημα.

4.6.3 Αποτελέσματα υπολογιστικής προσομοίωσης για την εξωτερική φλόγα

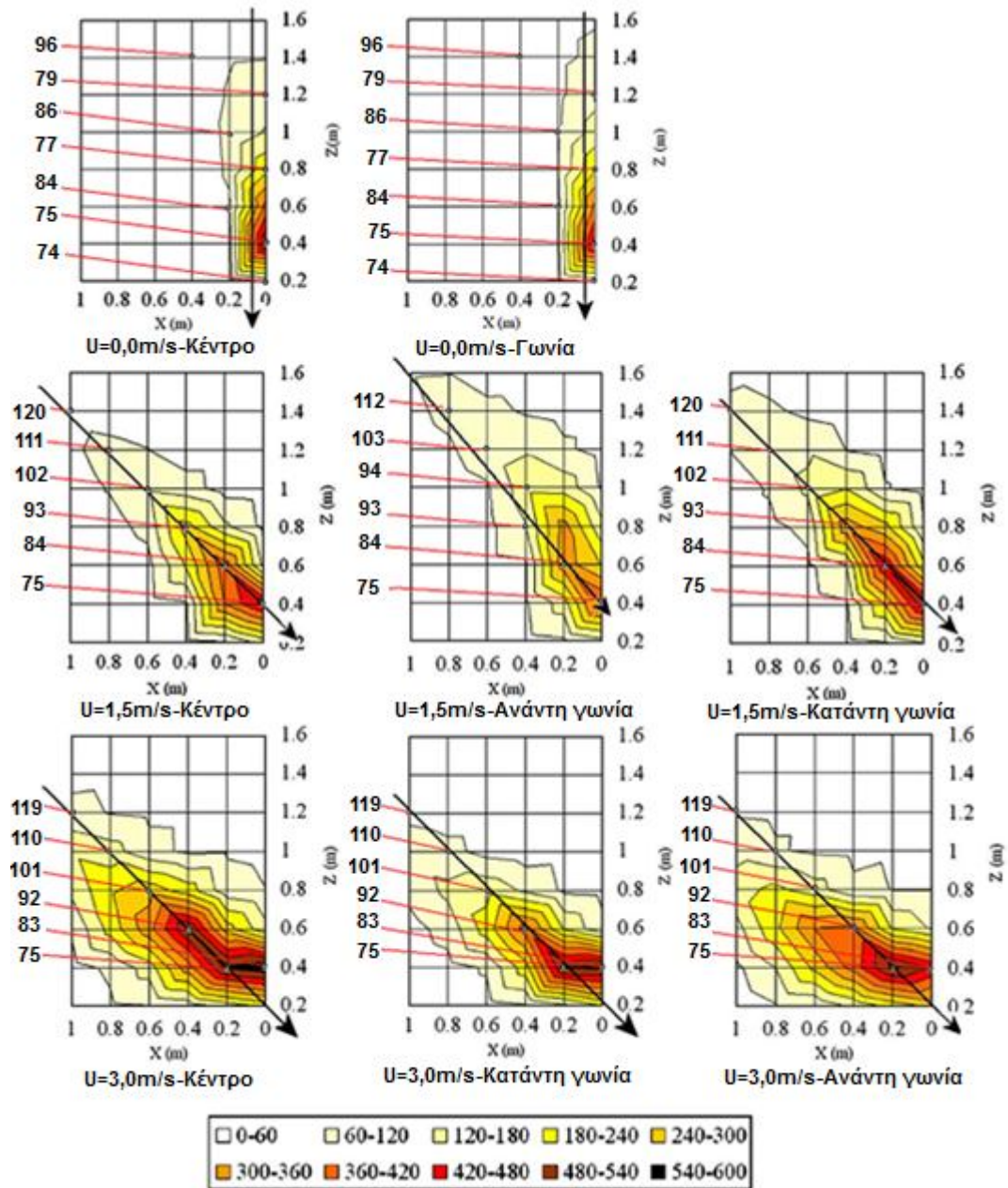
4.6.3.1 Μελέτη της εξωτερικής φλόγας

Στην παρούσα διπλωματική ακολουθήθηκε μία συγκεκριμένη διαδικασία για την εύρεση της περιόδου της πλήρους ανεπτυγμένης φλόγας. Αρχικά, για κάθε μία περίπτωση, βρέθηκε η μέγιστη θερμοκρασία των προλέξεων θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου 75. Το θερμοστοιχείο αυτό βρίσκεται ακριβώς στο άνοιγμα του δυτικού τοίχου του διαμερίσματος (σχήμα 4.103).



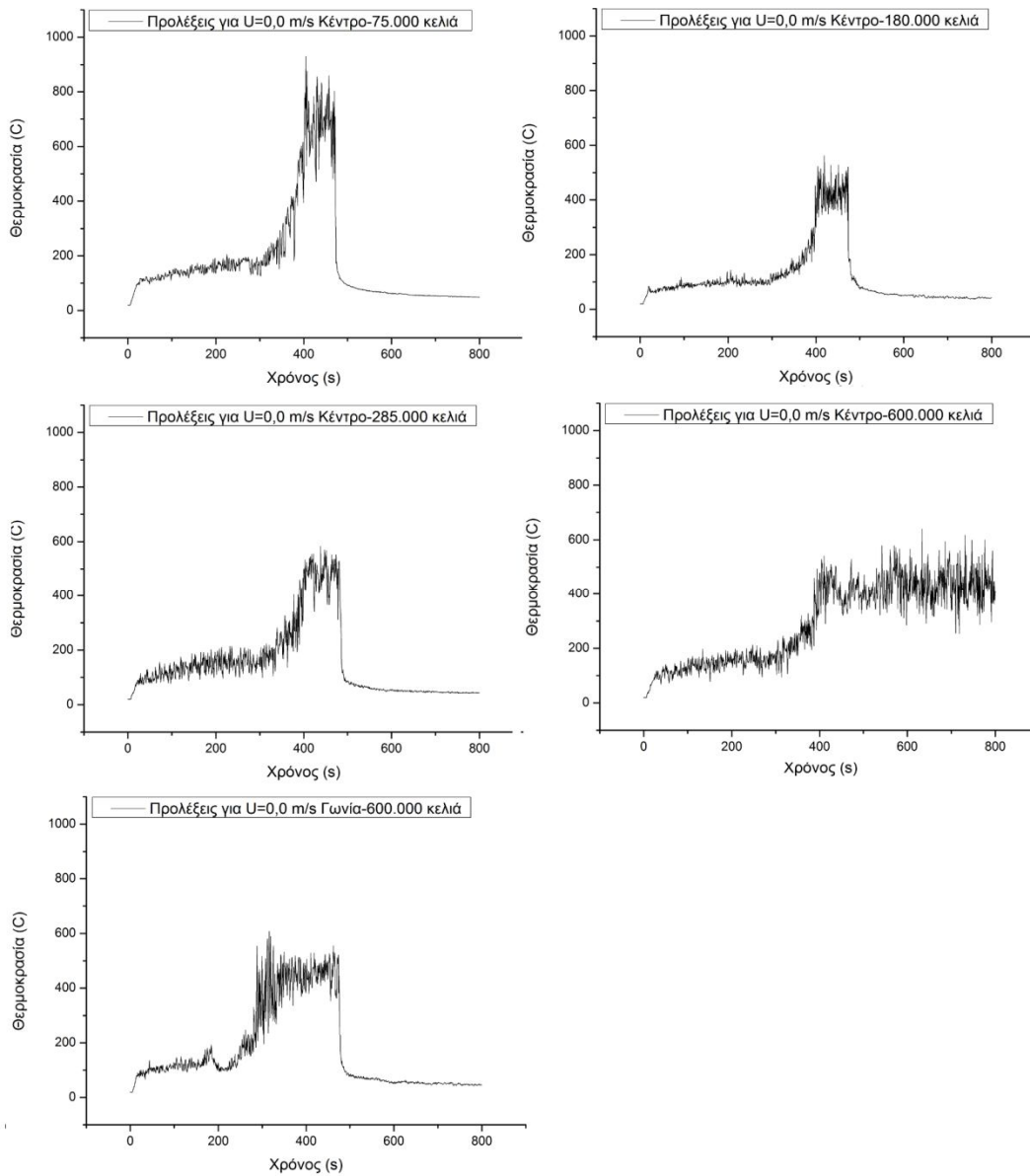
Σχήμα 4.103 Θέση του θερμοστοιχείου 75 ακριβώς στο άνοιγμα του δυτικού τοίχου.

Γύρω από αυτή τη θερμοκρασία υπολογίστηκε μία χρονική περίοδος 20s, η οποία θεωρήθηκε ότι αντιστοιχεί στην πλήρως ανεπτυγμένη περίοδο της φωτιάς. Με βάση αυτή τη χρονική περίοδο κατέστη δυνατή η σύγκριση των πειραματικών τιμών με τις προλέξεις θερμοκρασίας για την εξωτερική φλόγα. Στο σχήμα 4.104 παρατηρείται για κάθε μία περίπτωση η εξωτερική φλόγα όπως εξέρχεται από το δυτικό άνοιγμα του διαμερίσματος. Κάθε ένα σημείο της εξωτερικής φλόγα αντιστοιχεί σε μία μέση θερμοκρασία για μία περίοδο 20s. Η χρονικά αυτή περίοδος των 20s κατά τα πειραματικά δεδομένα αφορά τη σταθερή πλήρως ανεπτυγμένη περίοδο της φωτιάς.

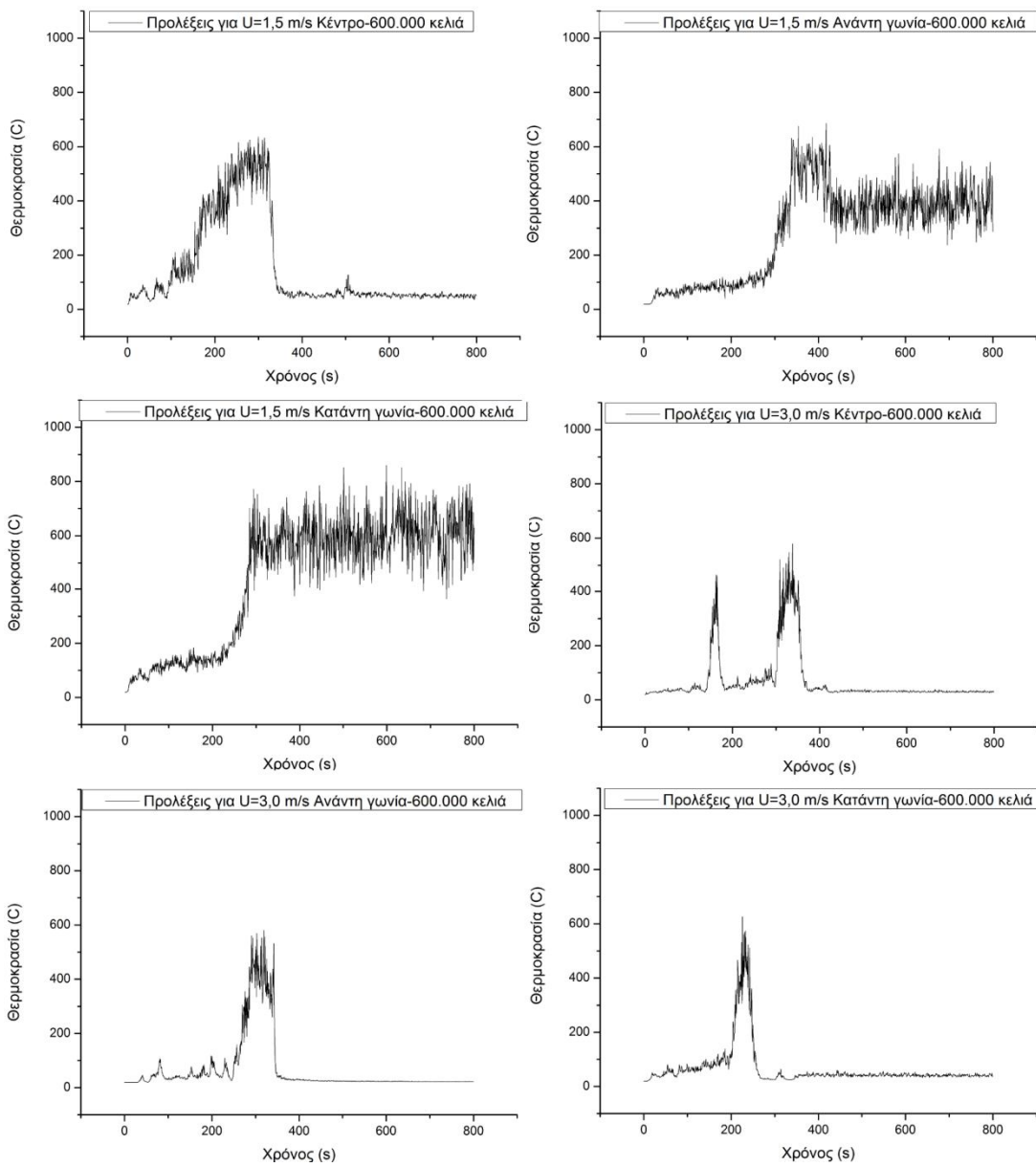


Σχήμα 4.104 Θερμοκρασιακή κατανομή της εξωτερικής φλόγας κατά την περίοδο πλήρους ανάπτυξης της σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Οι προλέξεις του θερμοστοιχείου 75 για τις όλες τις περιπτώσεις απεικονίζονται στα σχήματα 4.105 και 4.106.



Σχήμα 4.105 Προλέξεις της θερμοκρασίας στη θέση του θερμοστοιχείου 75 για τις Περιπτώσεις 1α, 1β, 1γ, 1δ, 1ε.



Σχήμα 4.106 Προλέξεις της θερμοκρασίας στη θέση του θερμοστοιχείου 75 για τις Περιπτώσεις 2α, 2β, 2γ και 3α, 3β, 3γ.

Οι χρονικές περίοδοι των 20s για κάθε μία περίπτωση φαίνονται στον πίνακα 4.9.

	Περίοδος (20s)
Περίπτωση 1α	394-414
Περίπτωση 1β	407-427
Περίπτωση 1γ	426-446
Περίπτωση 1δ	622-642
Περίπτωση 1ε	305-325
Περίπτωση 2α	288-308
Περίπτωση 2β	406-426
Περίπτωση 2γ	587-607
Περίπτωση 3α	326-346
Περίπτωση 3β	307-327
Περίπτωση 3γ	214-234

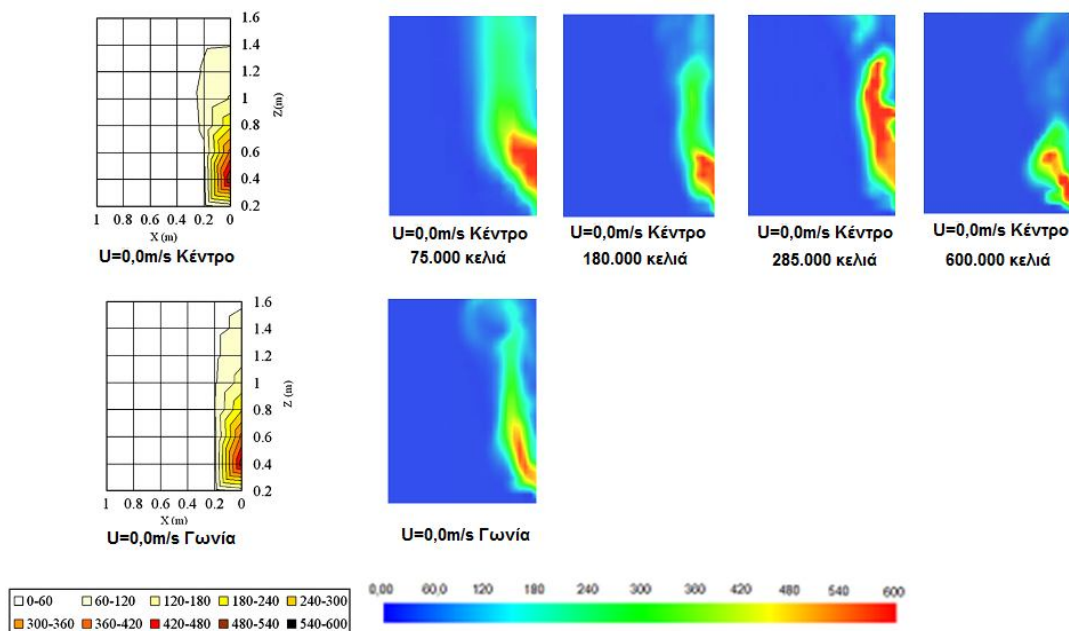
Πίνακας 4.9 Χρονικές περίοδοι πλήρους αναπτυγμένης φλόγας σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα.

Για τη μελέτη της εξωτερικής φλόγας επιλέχθηκαν σημεία κατά μήκος της φλόγας όπως φαίνεται και στις εικόνες του σχήματος 4.105. Τα σημεία αυτά, όπως αναφέρθηκε, αντιστοιχούν σε θέσεις θερμοστοιχείων στον κεντρικό άξονα της φλόγας κατά την πλήρως ανεπτυγμένη περίοδο. Οι προλέξεις θερμοκρασίας των θερμοστοιχείων που βρίσκονται στις αντίστοιχες θέσεις κατά μήκος της φλόγας συγκρίθηκαν με τις πειραματικές τιμές. Να σημειωθεί ότι οι προλέξεις σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα εμφανίζουν μέσο σφάλμα $\pm 30^{\circ}\text{C}$.

4.6.3.2 Θερμοκρασιακό πεδίο της εξωτερικής φλόγας

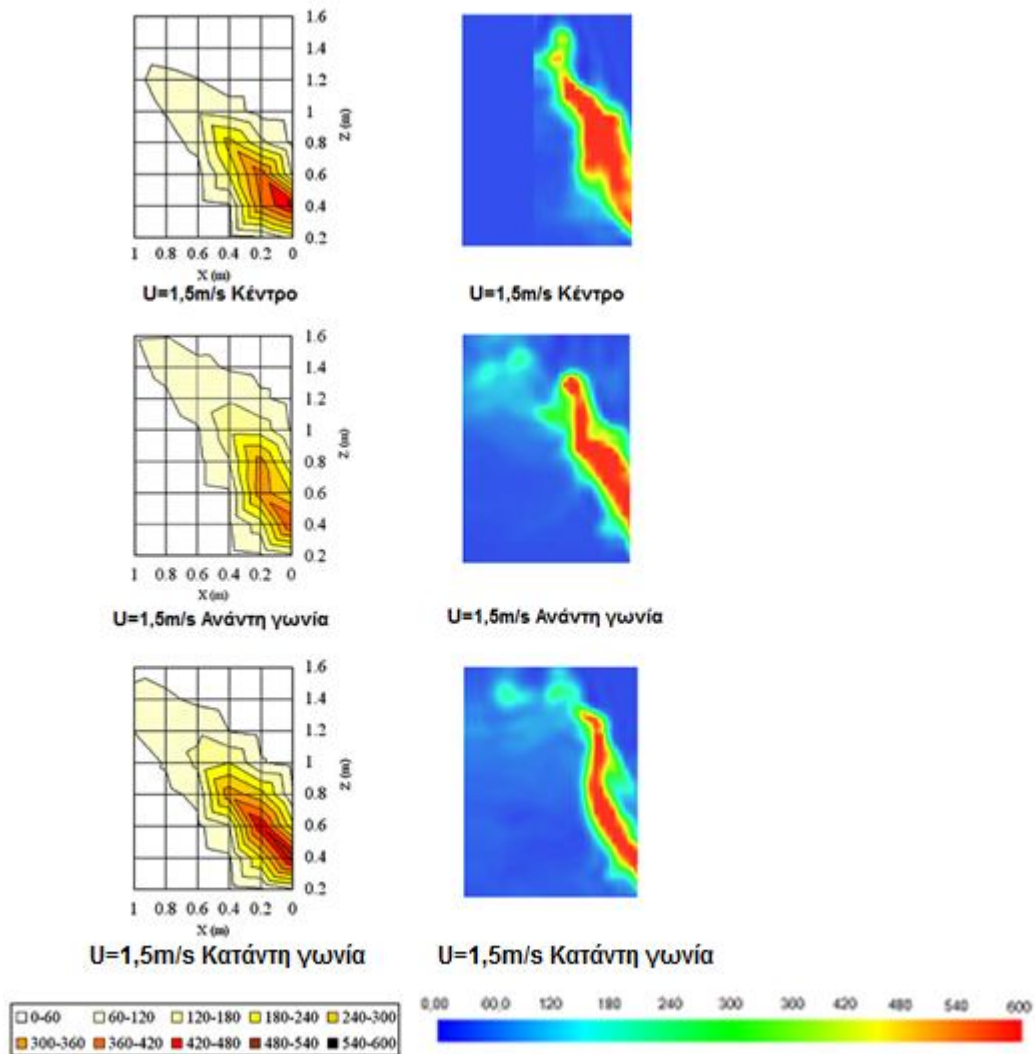
Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται σύγκριση του θερμοκρασιακού προφίλ της εξωτερικής φλόγας, κατά το στάδιο πλήρους ανάπτυξης της, ανάμεσα σε πειραματικά αποτελέσματα (εικόνες στα αριστερά) και στιγμιότυπα από το Smokeview για την ίδια χρονική περίοδο (εικόνες στα δεξιά).

Για τις περιπτώσεις όπου η ταχύτητα εξωτερικού ανέμου είναι 0,0 m/s (Σχήμα 4.107), Περιπτώσεις 1α, 1β, 1γ, 1δ και 1ε, παρατηρείται ότι η μορφή του πλουμίου της φλόγας είναι παρεμφερής για πειραματικά και υπολογιστικά δεδομένα. Το στιγμιότυπο που αντιστοιχεί στο πλέγμα των 600.000 κελιών φαίνεται να προσεγγίζει καλύτερα τη θερμοκρασιακή κατανομή της φλόγας των πειραματικών δεδομένων. Σε γενικές γραμμές, στις προλέξεις για την εξωτερική φλόγα φαίνεται να επικρατούν μεγαλύτερες θερμοκρασίες σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα.



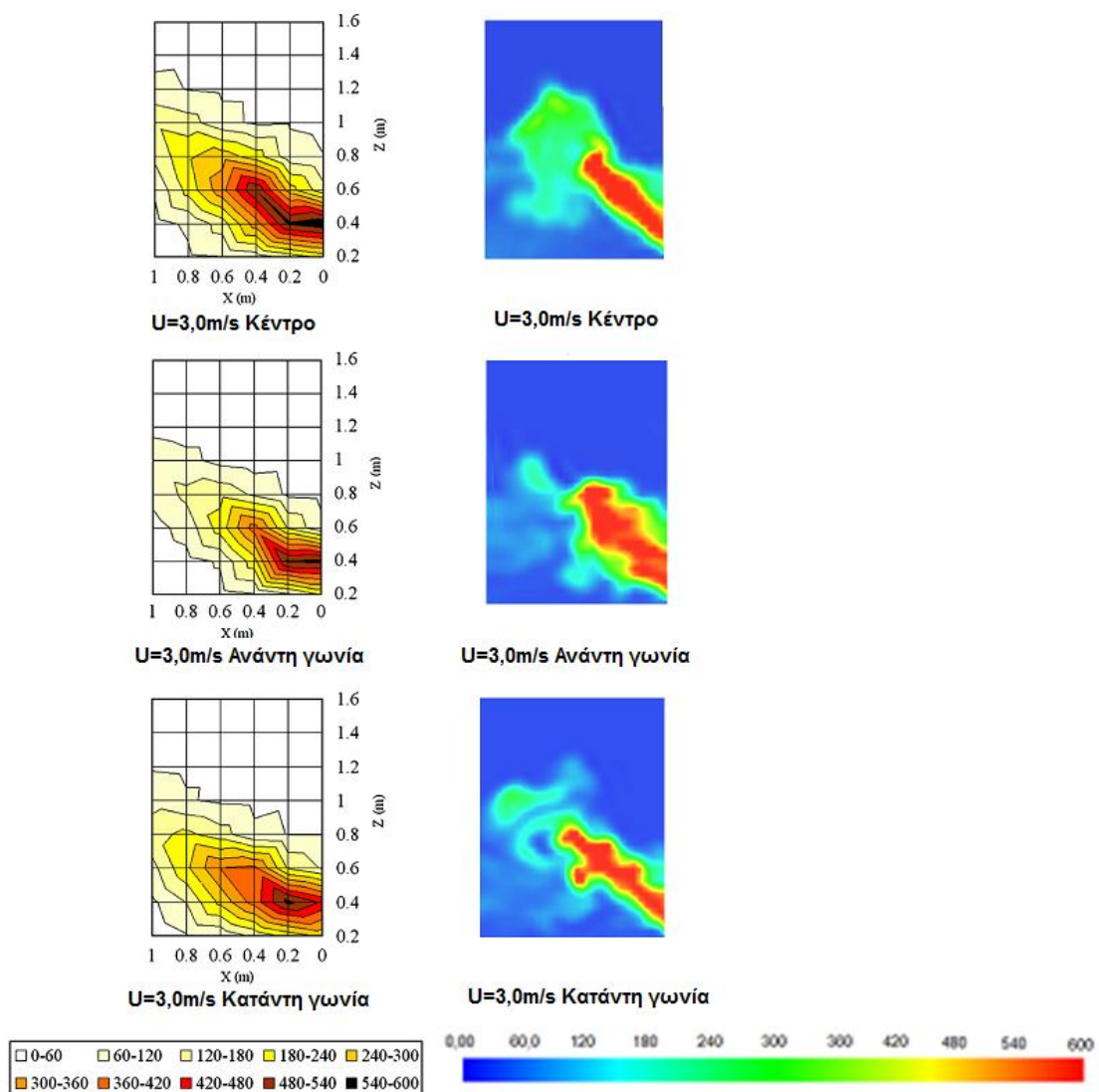
Σχήμα 4.107 Θερμοκρασιακή κατανομή της εξωτερικής φλόγας για την περίπτωση ταχύτητας εξωτερικού ανέμου 0,0 m/s, Περιπτώσεις 1α, 1β, 1γ,1δ (πάνω) και 1ε(κάτω).

Για την περίπτωση όπου η ταχύτητα εξωτερικού ανέμου είναι 1,5 m/s (Σχήμα 4.108), Περιπτώσεις 2α, 2β και 2γ, διαπιστώνεται ότι η μορφή του πλουμίου της φλόγας προσεγγίζει ικανοποιητικά τα πειραματικά αποτελέσματα. Και σε αυτήν την περίπτωση, στα θερμοκρασιακά πεδία που έχουν προκύψει από την προσομοίωση φαίνεται να επικρατούν μεγαλύτερες θερμοκρασίες σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα. Παράλληλα, επιβεβαιώνεται ότι στην περίπτωση όπου η εστία βρίσκεται στην κατάντη γωνία το πλούμιο της φλόγας έχει μεγαλύτερη κλίση.



Σχήμα 4.108 Θερμοκρασιακή κατανομή της εξωτερικής φλόγας για την περίπτωση ταχύτητας εξωτερικού ανέμου 1,5 m/s, Περιπτώσεις 2α, 2β και 2γ (από πάνω προς τα κάτω).

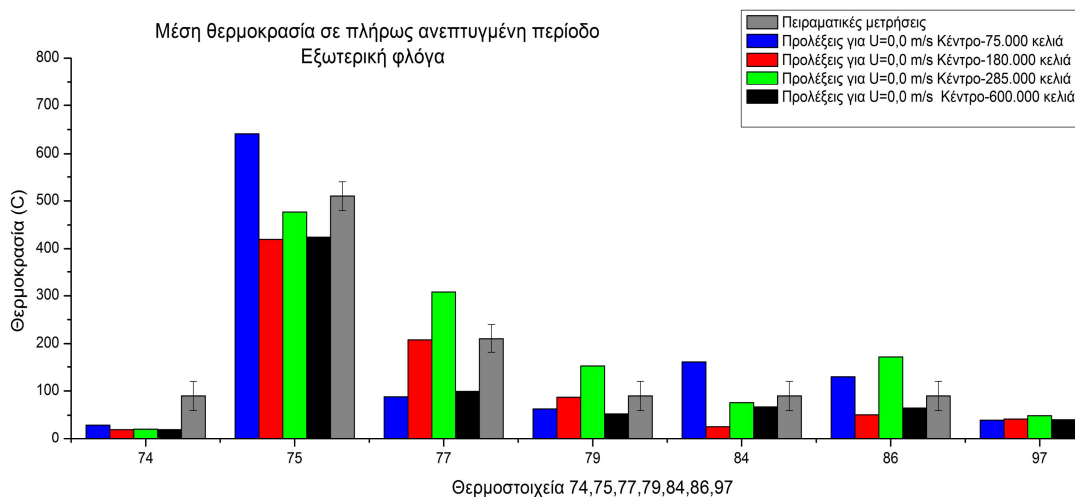
Για τις περιπτώσεις όπου η ταχύτητα εξωτερικού ανέμου είναι 1,5 m/s (Σχήμα 4.109), Περιπτώσεις 3α, 3β και 3γ, διαπιστώνεται ότι οι προλέξεις της θερμοκρασίας προσεγγίζουν ικανοποιητικά τη μορφή του πλουμίου σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα. Και σε αυτές τις περιπτώσεις, οι προλέξεις της θερμοκρασίας είναι υψηλότερες σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα, ενώ στην περίπτωση όπου η εστία βρίσκεται στην κατάντη γωνία το πλούμιο της φλόγας έχει μεγαλύτερη κλίση.



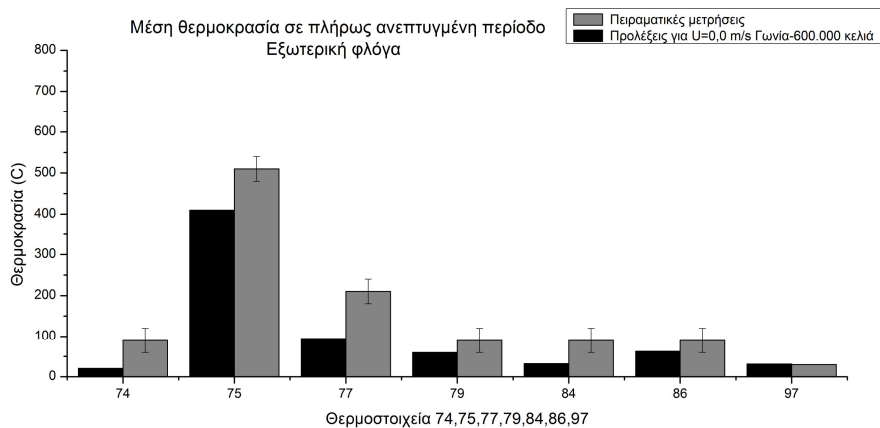
Σχήμα 4.109 Θερμοκρασιακή κατανομή της εξωτερικής φλόγας για την περίπτωση ταχύτητας εξωτερικού ανέμου 3,0 m/s, Περιπτώσεις 3α, 3β και 3γ (από πάνω προς τα κάτω).

4.6.3.3 Μέση θερμοκρασία εξωτερικής φλόγας κατά την περίοδο πλήρους ανάπτυξης

Παρακάτω γίνεται σύγκριση πειραματικών τιμών και προλέξεων της θερμοκρασίας για τη μέση θερμοκρασία της εξωτερικής φλόγας κατά την περίοδο της πλήρους ανεπτυγμένης φάσης. Για την περίπτωση όπου η εστία βρίσκεται στο κέντρο του διαμερίσματος και για ταχύτητα εξωτερικού ανέμου 0,0m/s (Σχήμα 4.111), Περίπτωση 1δ, οι προλέξεις της θερμοκρασίας συμφωνούν σε ικανοποιητικό βαθμό με τις πειραματικές τιμές. Ωστόσο, διαπιστώνεται μία διαφορά θερμοκρασίας η οποία εκτιμάται γύρω στους 100°C. Ακόμα μία οπτική παρατήρηση είναι ότι τα πλέγματα των 180.000, Περίπτωση 1β, και 600.000 κελιών, Περίπτωση 1δ, προσεγγίζουν καλύτερα τις πειραματικές τιμές. Για την περίπτωση όπου η εστία βρίσκεται σε γωνία του διαμερίσματος και για ταχύτητα εξωτερικού ανέμου 0,0m/s (Σχήμα 4.111), Περίπτωση 1ε, παρατηρείται ότι υπάρχει συμφωνία πειραματικών τιμών και προλέξεων της θερμοκρασίας. Συγκριτικά διαπιστώνεται μία διαφορά θερμοκρασίας η οποία εκτιμάται γύρω στους 50-100°C.

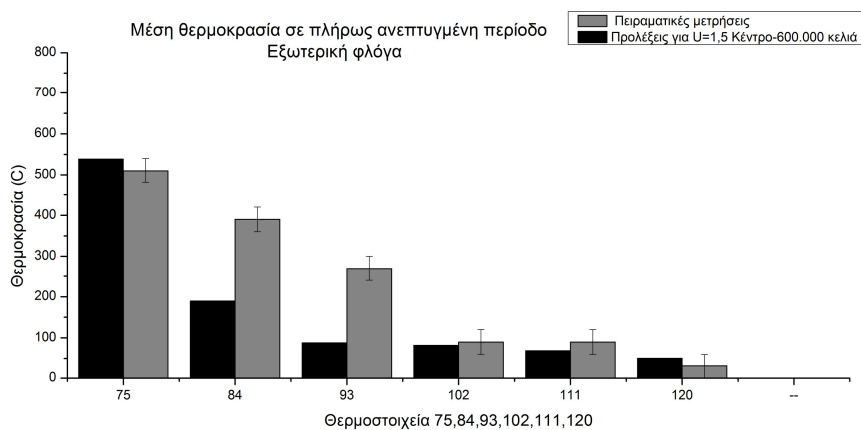


Σχήμα 4.110 Μέση θερμοκρασία εξωτερικής φλόγας σε πλήρως ανεπτυγμένη περίοδο για U=0,0m/s (Περίπτώσεις 1α, 1β, 1γ και 1δ).

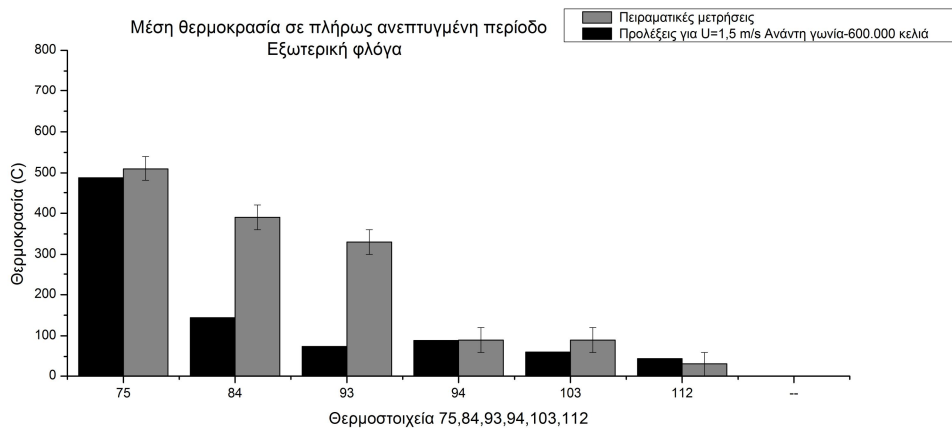


Σχήμα 4.111 Μέση θερμοκρασία εξωτερικής φλόγας σε πλήρως ανεπτυγμένη περίοδο για $U=0,0\text{m/s}$ (Περίπτωση 1ε).

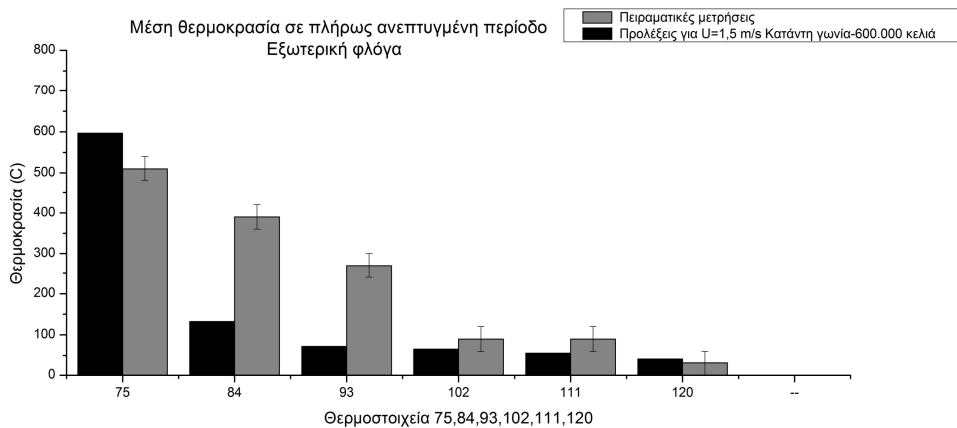
Στα διαγράμματα των σχημάτων 4.112, 4.113 και 4.114 παρουσιάζεται η σύγκριση πειραματικών τιμών και προλέξεων της θερμοκρασίας για την περίπτωση ταχύτητας εξωτερικού ανέμου $1,5\text{m/s}$, Περιπτώσεις 2α, 2β και 2γ αντίστοιχα. Γενικά παρατηρείται καλή συμφωνία μεταξύ των δύο για όλα τα σημεία μέτρησης της θερμοκρασίας. Ειδικότερα, η μεγαλύτερη διαφορά θερμοκρασίας στην περίοδο που εξετάζεται διαπιστώνεται για την περίπτωση όπου η εστία βρίσκεται στην ανάντη θέση, με τις προλέξεις θερμοκρασίας να υποεκτιμούν τις πειραματικές τιμές, για την πλειονότητα των θερμοστοιχείων. Η διαφορά θερμοκρασιών σε αυτήν την περίπτωση εκτιμάται από 70 ως 350°C . Να σημειωθεί ότι καλύτερη συμφωνία αποτελεσμάτων συγκριτικά για τρεις περιπτώσεις εμφανίζει η πρώτη περίπτωση όπου η εστία βρίσκεται στο κέντρο του διαμερίσματος, Περίπτωση 2α.



Σχήμα 4.112 Μέση θερμοκρασία εξωτερικής φλόγας σε πλήρως ανεπτυγμένη περίοδο για $U=1,5\text{m/s}$ (Περίπτωση 2α).

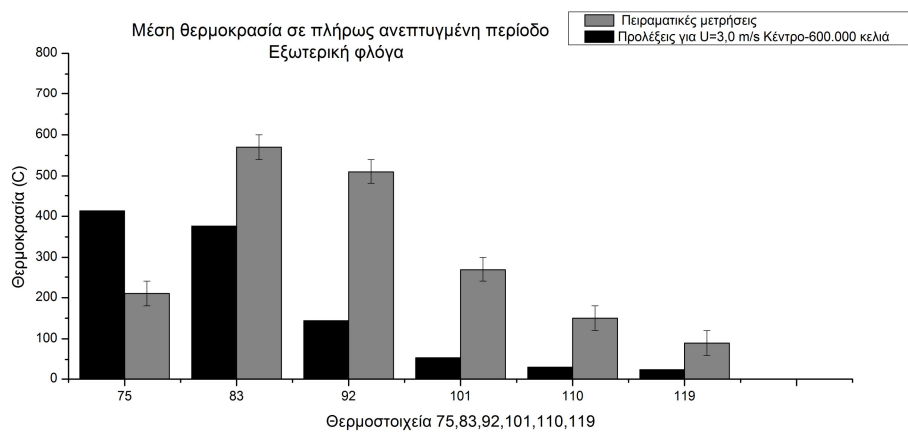


Σχήμα 4.113 Μέση θερμοκρασία εξωτερικής φλόγας σε πλήρως ανεπτυγμένη περίοδο για U=1,5 m/s (Περίπτωση 2β).

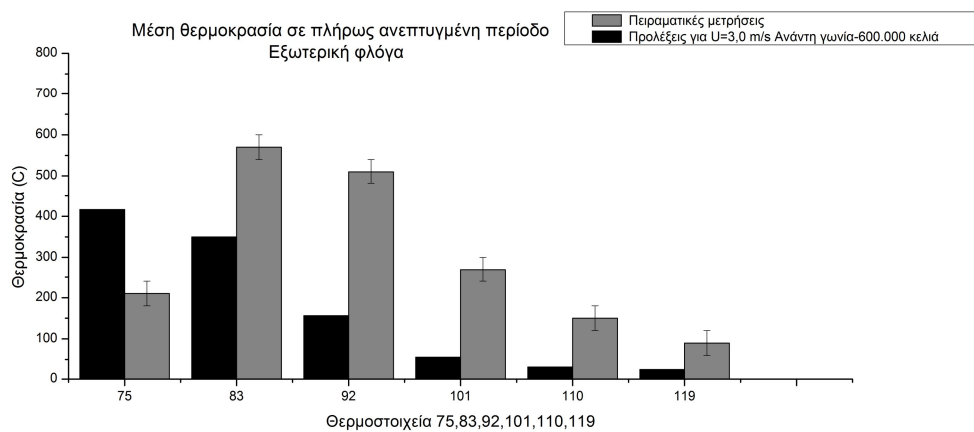


Σχήμα 4.114 Μέση θερμοκρασία εξωτερικής φλόγας σε πλήρως ανεπτυγμένη περίοδο για U=1,5 m/s (Περίπτωση 2γ).

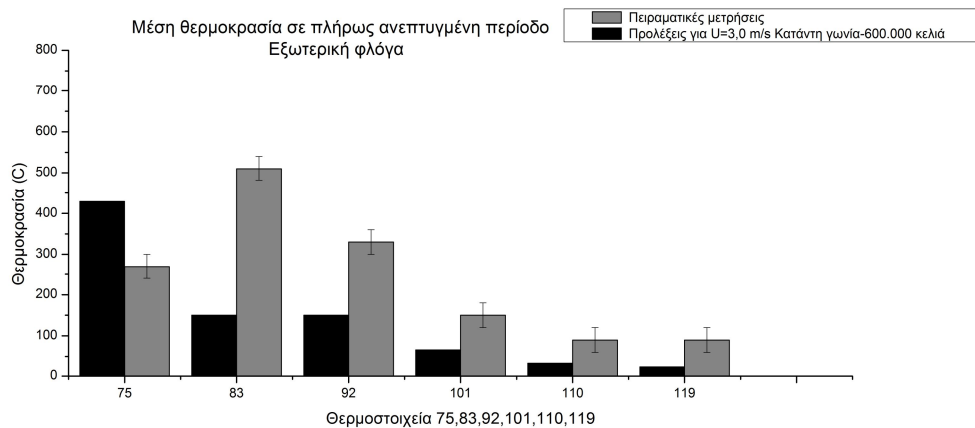
Στα διαγράμματα των σχημάτων 4.116, 4.117 και 4.118 παρουσιάζεται η σύγκριση πειραματικών τιμών και προλέξεων της θερμοκρασίας για την περίπτωση ταχύτητας εξωτερικού ανέμου 3,0m/s, Περιπτώσεις 3α, 3β και 3γ αντίστοιχα. Εδώ παρατηρείται μεγαλύτερη απόκλιση μεταξύ πειραματικών αποτελεσμάτων και προλέξεων της θερμοκρασίας σε όλα τα σημεία μέτρησης. Και πάλι η μεγαλύτερη διαφορά θερμοκρασίας στην περίοδο της πλήρους ανεπτυγμένης φλόγας διαπιστώνεται για την περίπτωση όπου η εστία βρίσκεται στην ανάντη θέση, Περίπτωση 3β,, με τις προλέξεις θερμοκρασίας να υποεκτιμούν τις πειραματικές τιμές στην πλειονότητα τους. Η διαφορά θερμοκρασιών σε αυτήν την περίπτωση εκτιμάται από 90 ως 350°C. Να σημειωθεί ότι καλύτερη συμφωνία αποτελεσμάτων συγκριτικά και για τρεις περιπτώσεις εμφανίζει η πρώτη περίπτωση όπου η εστία βρίσκεται στο κέντρο του διαμερίσματος, Περίπτωση 3α.



Σχήμα 4.115 Μέση θερμοκρασία εξωτερικής φλόγας σε πλήρως ανεπτυγμένη περίοδο για U=3,0 m/s (Περίπτωση 3α).



Σχήμα 4.116 Μέση θερμοκρασία εξωτερικής φλόγας σε πλήρως ανεπτυγμένη περίοδο για U=3,0 m/s (Περίπτωση 3β).



Σχήμα 4.117 Μέση θερμοκρασία εξωτερικής φλόγας σε πλήρως ανεπτυγμένη περίοδο για $U=3,0$ m/s (Περίπτωση 3γ).

4.6.3.4 Συμπεράσματα για τη σύγκριση πειραματικών τιμών και προλέξεων της μέσης θερμοκρασίας της εξωτερικής φλόγας κατά τη διάρκεια της περιόδου πλήρους ανάπτυξης

Σε γενικές γραμμές, διαπιστώνεται ότι με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου αυξάνεται η κλίση της εξωτερικής φλόγας και το πλούμιο της διευρύνεται. Ακόμα, σημειώνεται αύξηση της θερμοκρασίας με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου από 1,5 m/s σε 3 m/s, ενώ παρατηρείται ότι οι πιο μεγάλες θερμοκρασίες λαμβάνονται στην περίπτωση όπου η εστία βρίσκεται στην κατάντη γωνία του διαμερίσματος.

Έχοντας μία συνολική εποπτική εικόνα όλων των διαγραμμάτων σύγκρισης πειραματικών τιμών και προλέξεων της θερμοκρασίας για την εξωτερική φλόγα παρατηρείται ότι υπάρχει καλή συμφωνία μεταξύ των δύο μεγεθών. Ειδικότερα, με την επίδραση του εξωτερικού ανέμου διαπιστώθηκε μεγαλύτερη θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα σε πειραματικές τιμές και προλέξεις της θερμοκρασίας. Η μεγαλύτερη διαφορά ανάμεσα σε πειραματικά και υπολογιστικά μεγέθη σημειώθηκε στην περίπτωση όπου η εστία βρίσκεται στην ανάντη γωνία του διαμερίσματος και για ταχύτητα αέρα 3 m/s. Τέλος, από την ανάλυση των προλέξεων που πραγματοποιήθηκε, παρατηρήθηκε ότι οι μέγιστες θερμοκρασίες για την εξωτερική φλόγα παρατηρούνται νωρίτερα για μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου. Αυτό ενδέχεται να συμβαίνει γιατί με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου τα εύφλεκτα αέρια απομακρύνονται και εξέρχονται από το διαμέρισμα με πιο γρήγορο ρυθμό, με αποτέλεσμα την πιο γρήγορη μείωση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του δωματίου και στο κατάντη άνοιγμα.

4.6.3.5 Αδιάστατη θερμοκρασία στον κεντρικό άξονα του πλουμίου της φωτιάς εκτός του διαμερίσματος

Το 1960 πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά μία έρευνα από τον Yokoι, σχετικά με τη μορφολογία και το χαρακτηρισμό/περιγραφή των πλουμίων φωτιάς που εξέρχονται από ανοίγματα διαμερισμάτων σε συνθήκες εξαναγκασμένου αερισμού. Τα συμπεράσματα της έρευνας αυτής χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα. Ειδικότερα, η μελέτη που πραγματοποιήθηκε αφορά την τροχιά του πλουμίου μίας τυρβώδους φλόγας που εξέρχεται από παράθυρα/ανοίγματα σε συνθήκες νηνεμίας. Μέσα από τη διεξαγωγή πειραμάτων σε μικρότερα ή μεγαλύτερα μοντέλα υπό-κλίμακα βρέθηκε ότι η αδιάστατη θερμοκρασία της φλόγας είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος του μοντέλου, ενώ τα αποτελέσματα της μελέτης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη της τροχιάς του πλουμίου της φλόγας και σε πραγματικές συνθήκες (Yokoι, 1960). Από την ανάλυση του Yokoι προέκυψαν κάποιες εμπειρικές σχέσεις για το μέγεθος της αδιάστατης θερμοκρασίας του κεντρικού άξονα του πλουμίου της φωτιάς συναρτήση του ύψους, οι οποίες διατυπώνονται παρακάτω:

$$\Theta = \Delta T_0 r_0^{5/3} / (T_\infty Q^2 / c_p^2 \rho^2 g)^{1/3} \quad (4.10),$$

$$\text{Όπου } Q = c_p m_{out} \Delta T \quad (4.11)$$

Όπου ΔT_0 : η θερμοκρασιακή αύξηση σε μία αυθαίρετη θέση κατά τον άξονα του πλουμίου της φλόγας (K)

r_0 : η ισοδύναμη ακτίνα του ανοίγματος ($\sqrt{BH} / 2\pi$, (m),

B και H είναι το πάχος και το ύψος του ανοίγματος αντίστοιχα,

Q: η ενθαλπία του εξερχόμενου αερίου (kW),

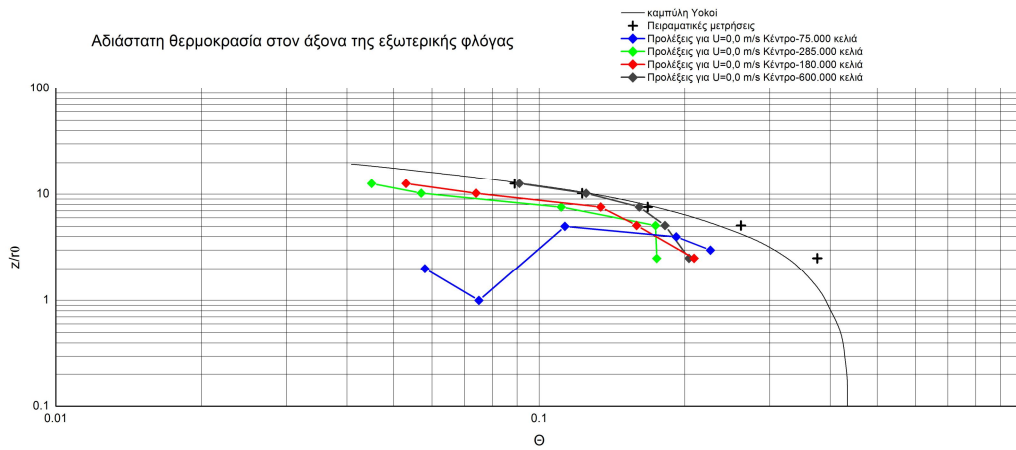
ΔT : η διαφορά της θερμοκρασίας ανάμεσα στο εσωτερικό του διαμερίσματος και στο εξωτερικό περιβάλλον (K),

c_p : η ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα (kJ/kg/K),

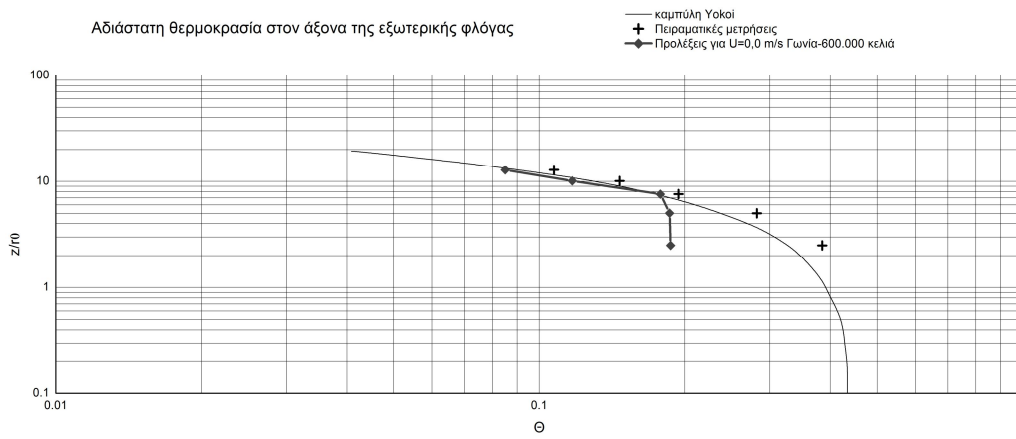
ρ : η πυκνότητα του αέρα (kg/m³)

m_{out} : ο ρυθμός εκροής του αέρα από το άνοιγμα (m³).

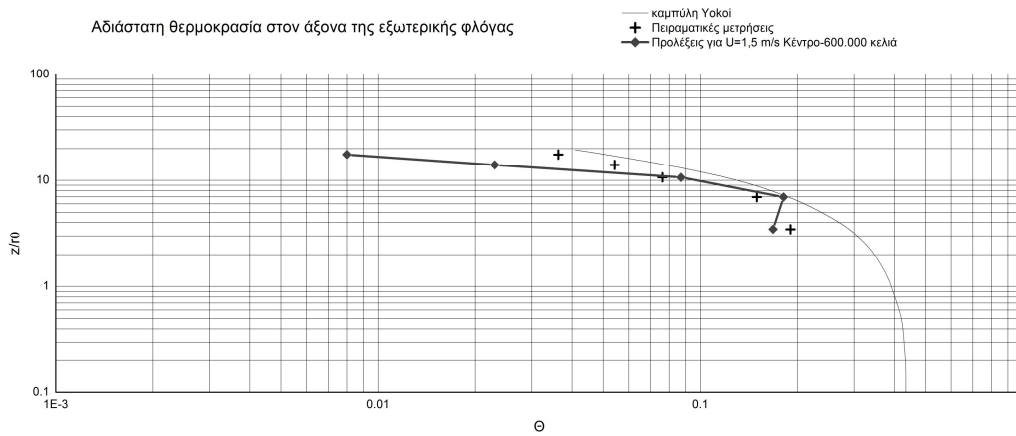
Τα αποτελέσματα της έρευνας του Yokoι συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα του πειράματος που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική για τις περιπτώσεις νηνεμίας αλλά και επίδρασης εξωτερικού ανέμου. Επιπρόσθετα, στα διαγράμματα που αφορούν τη σύγκριση της αδιάστατης θερμοκρασίας, βάσει των εμπειρικών σχέσεων του Yokoι, εισάχθηκαν και οι πληροφορίες που προέκυψαν από τις προλέξεις θερμοκρασίας κατά την προσομοίωση του πειράματος με τον κώδικα FDS. Να σημειωθεί ότι στα παρακάτω διαγράμματα η καμπύλη αφορά τα δεδομένα της έρευνας του Yokoι, τα πειραματικά δεδομένα σημειώνονται με κουκίδες και οι προλέξεις της θερμοκρασίας με γραμμές. Το μέγεθος Θ εκφράζει την αδιάστατη θερμοκρασία της φλόγας, ενώ το αδιάστατο μέγεθος z/r_0 εκφράζει το μήκος της φλόγας κατά τον κεντρικό άξονα της προς την ισοδύναμη ακτίνα του ανοίγματος. Στα παρακάτω διαγράμματα 4.118, ως 4.125 παρατηρείται για κάθε περίπτωση ταχύτητας η σύγκριση πειραματικών τιμών και προλέξεων της θερμοκρασίας με την καμπύλη Yokoι.



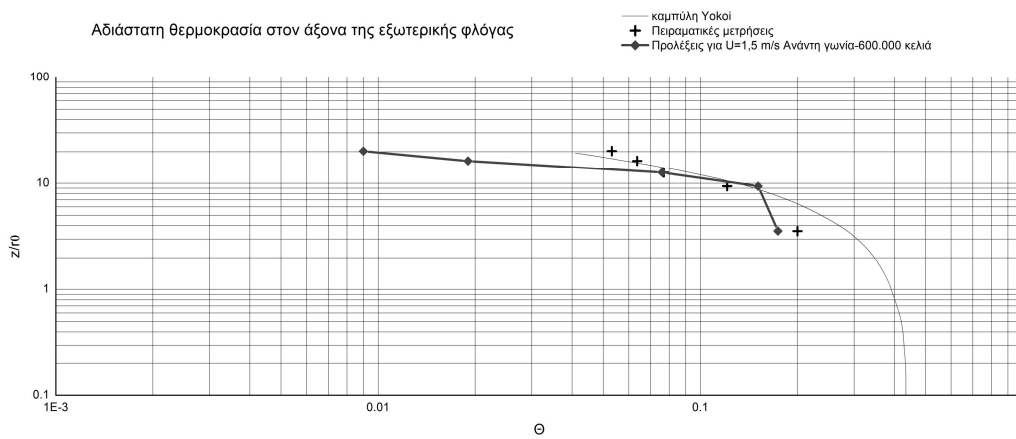
Σχήμα 4.118 Αδιάστατη θερμοκρασία κατά τον κεντρικό άξονα της εξωτερικής φλόγας για $U=0,0$ m/s (Περίπτώσεις 1α, 1β, 1γ και 1δ).



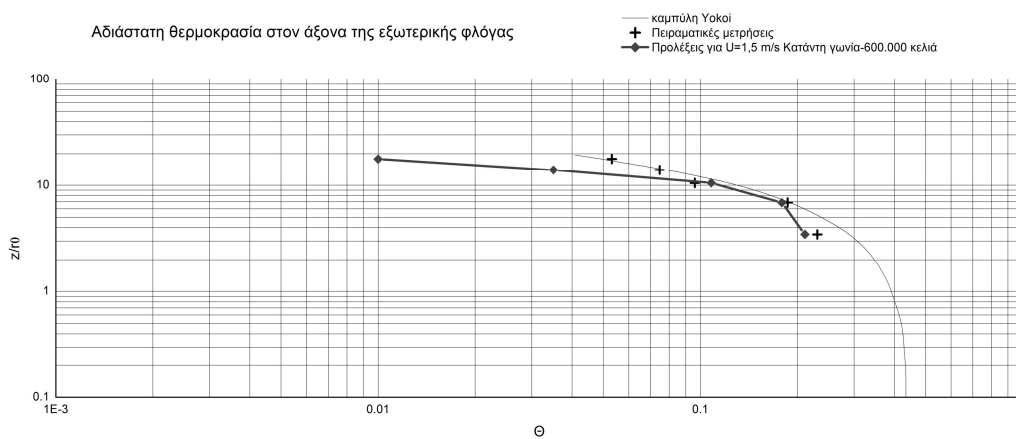
Σχήμα 4.119 Αδιάστατη θερμοκρασία κατά τον κεντρικό άξονα της εξωτερικής φλόγας για $U=0,0$ m/s (Περίπτωση 1ε).



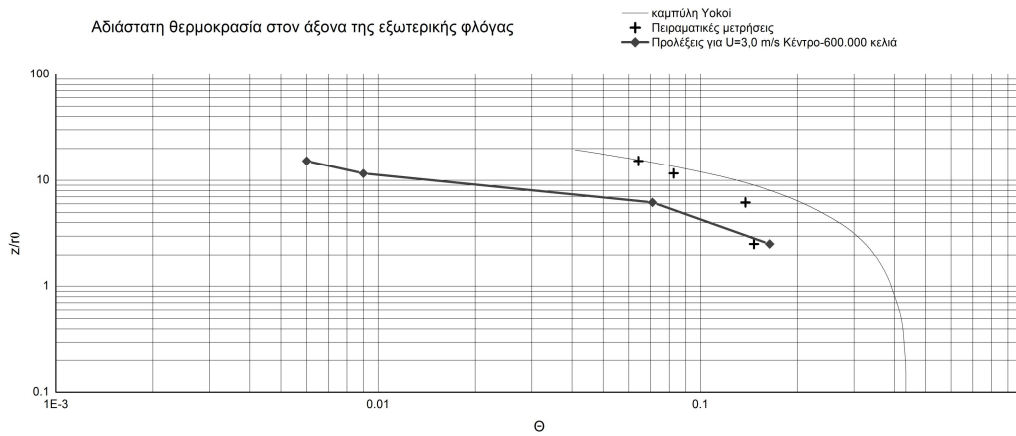
Σχήμα 4.120 Αδιάστατη θερμοκρασία κατά τον κεντρικό άξονα της εξωτερικής φλόγας για $U=1,5$ m/s (Περίπτωση 2α).



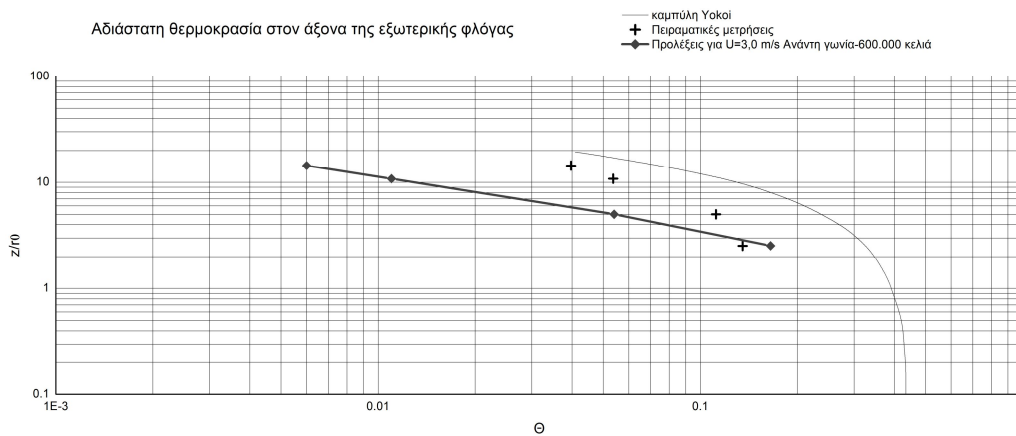
Σχήμα 4.121 Αδιάστατη θερμοκρασία κατά τον κεντρικό άξονα της εξωτερικής φλόγας για $U=1,5$ m/s (Περίπτωση 2β).



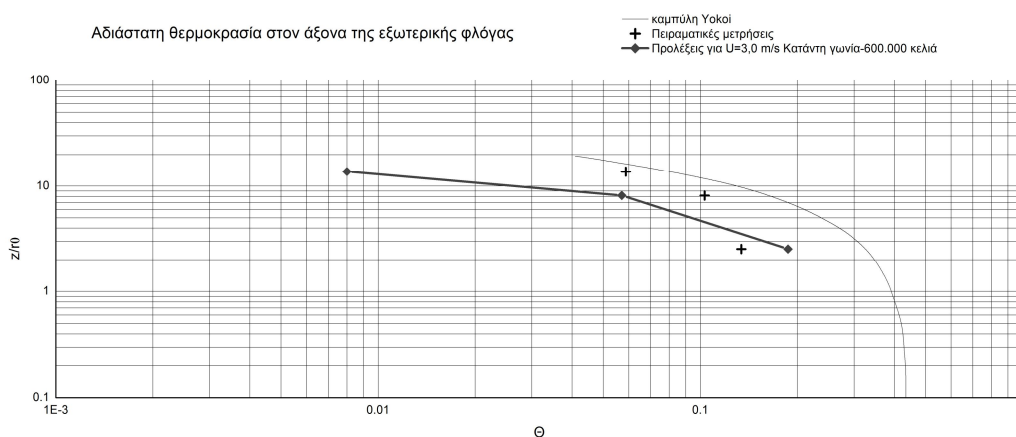
Σχήμα 4.122 Αδιάστατη θερμοκρασία κατά τον κεντρικό άξονα της εξωτερικής φλόγας για $U=1,5$ m/s (Περίπτωση 2γ).



Σχήμα 4.123 Αδιάστατη θερμοκρασία κατά τον κεντρικό άξονα της εξωτερικής φλόγας για $U=3,0$ m/s (Περίπτωση 3α).



Σχήμα 4.124 Αδιάστατη θερμοκρασία κατά τον κεντρικό άξονα της εξωτερικής φλόγας για $U=3,0$ m/s (Περίπτωση 3β).



Σχήμα 4.125 Αδιάστατη θερμοκρασία κατά τον κεντρικό άξονα της εξωτερικής φλόγας για $U=3,0$ m/s (Περίπτωση 3γ).

4.6.3.6 Συμπεράσματα για την αδιάστατη θερμοκρασία στον άξονα της εξωτερικής φλόγας

Από τα παραπάνω διαγράμματα επιβεβαιώνεται ότι στην περίπτωση νηνεμίας οι πειραματικές τιμές και οι προλέξεις θερμοκρασίας προσεγγίζουν σε ικανοποιητικό βαθμό την μορφή της καμπύλης του Υοκοί. Το πλέγμα που προσεγγίζει καλύτερα τη συγκεκριμένη καμπύλη για την περίπτωση 0,0 m/s και θέσης της εστίας στο κέντρο του μοντέλου είναι αυτό των 600.000 κελιών (Περίπτωση 1δ).

Επίσης, σε γενικές γραμμές διαπιστώθηκε ότι για την περίπτωση ύπαρξης εξωτερικού ανέμου η αδιάστατη θερμοκρασία είναι χαμηλότερη σε σχέση με τα αποτελέσματα του Υοκοί. Η απόκλιση αυτή μεγαλώνει όσο αυξάνεται η ταχύτητα του αέρα. Σημειώνεται ότι η διαφορά αυτή ενδέχεται να οφείλεται στο γεγονός ότι η επίδραση του ανέμου καταστέλλει πιο γρήγορα την ανάπτυξη της εξωτερικής φλόγας.

Παράλληλα, παρατηρείται ότι για μεγαλύτερη ταχύτητα ανέμου υπάρχει μεγαλύτερη απόκλιση ανάμεσα σε πειραματικές τιμές και προλέξεις της θερμοκρασίας. Διαπιστώνεται για όλες τις περιπτώσεις ότι οι προλέξεις της θερμοκρασίας που αφορούν την ανάντη και κατάντη γωνία παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόκλιση από τα πειραματικά δεδομένα σε σχέση με αυτές στο κέντρο του μοντέλου.

Κεφάλαιο 5^ο

Γενικά συμπεράσματα της υπολογιστικής μελέτης

Στη παρούσα μελέτη ανάπτυξης της φωτιάς μέσα σε μοντέλο υπό-κλίμακα σε συνθήκες εξαναγκασμένου αερισμού εξήχθησαν σημαντικά συμπεράσματα για την επίδραση της θέσης της εστίας και της έντασης του ανέμου στην ανάπτυξη φωτιάς σε κλειστούς χώρους υπό συνθήκες εξαναγκασμένου αερισμού.

Στην περίπτωση νηνεμίας, το ροϊκό πεδίο βρέθηκε συμμετρικό και τα θερμά αέρια εξέρχονται κι από τα δύο ανοίγματα. Έντονοι στροβιλισμοί παρατηρούνται κατά την ανάπτυξη της φλόγας κοντά στην περιοχή της οροφής. Γενικά, όσο αυξάνεται η ταχύτητα του αέρα παρατηρείται εντονότερη κλίση στην κίνηση των καυσαερίων που εξέρχονται από το άνοιγμα.

Τα θερμά αέρια που παράγονται από την καύση απομακρύνονται μέσω του ανοίγματος στον εξωτερικό χώρο, ενώ λόγω της θερμοκρασιακής διαφοράς των θερμών αερίων και του ψυχρότερου αέρα περιβάλλοντος αναπτύσσονται έντονοι στροβιλισμοί στην περιοχή του κατάντη ανοίγματος. Στην περίπτωση της μεγαλύτερης ταχύτητας ανέμου (3m/s) παρατηρείται ότι δεν αναπτύσσονται σημαντικοί στροβιλισμοί στο εσωτερικό του διαμερίσματος, καθώς εντονότερη επίδραση του ανέμου προκαλεί απομάκρυνση των θερμών αερίων από το εσωτερικό του διαμερίσματος.

Παράλληλα όσον αφορά το εσωτερικό του διαμερίσματος διαπιστώθηκε ότι, κατά το στάδιο ανάπτυξης της φωτιάς, στην κατάσταση νηνεμίας σημειώνονται ιδιαίτερα αυξημένες θερμοκρασίες στην οροφή του μοντέλου. Παρατηρήθηκε στο χρόνο που μελετάται ότι η υψηλότερη θερμοκρασία στην περίπτωση αυτή σημειώθηκε για θέση της εστίας στο κέντρο του μοντέλου.

Σε γενικές γραμμές, διαπιστώνεται ότι με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου αυξάνεται η κλίση της εξωτερικής φλόγας και το πλούμιο της διευρύνεται. Στην περίπτωση ταχύτητας 1,5 m/s αναπτύσσονται πιο μεγάλες θερμοκρασίες σε σχέση με την περίπτωση 3m/s, καθώς η επίδραση πιο ισχυρού ανέμου ωθεί τα θερμά αέρια προς το άνοιγμα του διαμερίσματος. Για μεγαλύτερη ταχύτητα, 3 m/s, το πλούμιο της φωτιάς εξέρχεται με πιο γρήγορο ρυθμό από το άνοιγμα, με αποτέλεσμα να μην αναπτύσσονται πολύ υψηλές θερμοκρασίες στο εσωτερικό του κι οι επιφάνειες των τοίχων να ψύχονται από τον άνεμο γρηγορότερα. Όσον αφορά την ταχύτερη εξέλιξη του φαινομένου της φωτιάς και την υποβάθμιση της, που διαπιστώνεται νωρίτερα στην περίπτωση των 3 m/s, η μεγαλύτερη ταχύτητα αέρα φαίνεται να ενισχύει την είσοδο οξυγόνου στο δωμάτιο και να προωθεί την καύση του επτανίου. Έτσι σημειώνεται πιο γρήγορη αύξηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του διαμερίσματος, ενώ παράλληλα προκαλείται ταχύτερη, σε σχέση με τις άλλες περιπτώσεις, ανάπτυξη της φωτιάς και επίσπευση του φαινομένου υποβάθμισης και σβέσης της.

Η θέση για την οποία διαπιστώνονται οι μεγαλύτερες θερμοκρασίες είναι η θέση, κοντά στο δυτικό τοίχο του διαμερίσματος. Η παρατήρηση αυτή ήταν αναμενόμενη, καθώς το πλούμιο της φλόγας, εξαιτίας της επίδρασης του ανέμου τείνει προς τη δυτική πλευρά του διαμερίσματος και διαφεύγει από το άνοιγμα, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεγαλύτερων θερμοκρασιών προς εκείνη την κατεύθυνση.

Μία ακόμη εποπτική παρατήρηση είναι ότι οι μεγαλύτερες θερμοκρασίες στο εσωτερικό του διαμερίσματος εμφανίζονται περίπου στη μέση του ανοίγματος του δυτικού τοίχου ενώ οι χαμηλότερες θερμοκρασίες σημειώνονται κοντά στο άνοιγμα του ανατολικού τοίχου όπου εισέρχεται

ο αέρας. Συγκεκριμένα, επιβεβαιώθηκε σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα ότι σε συνθήκες ύπαρξης εξωτερικού αέρα οι υψηλότερες θερμοκρασίες σημειώνονται περίπου στη μέση της κατακόρυφης διεύθυνσης του διαμερίσματος, καθώς τα θερμά αέρια που παράγονται κατά την καύση απομακρύνονται πριν φτάσουν στην οροφή του. Το φαινόμενο αυτό σχετίζεται και πάλι με την κίνηση των καυσαερίων προς το άνοιγμα του δυτικού τοίχου, σύμφωνα με τη φορά του ανέμου, με αποτέλεσμα τη ψύξη των σημείων εκείνων που έρχονται σε επαφή με τα θερμά αέρια.

Παράλληλα, διαφοροποιήσεις στο θερμοκρασιακό πεδίο παρατηρήθηκαν και σε σχέση με τις διαφορετικές θέσεις της εστίας μέσα στο διαμέρισμα. Γενικότερα, διαπιστώνεται ότι οι πιο μεγάλες θερμοκρασίες λαμβάνονται νωρίτερα στην περίπτωση όπου η εστία βρίσκεται στην κατάντη γωνία του διαμερίσματος σε σχέση με την ανάντη γωνία. Ειδικότερα, για ταχύτητα ανέμου 1,5 m/s όταν η εστία βρίσκεται στην ανάντη ή κατάντη γωνία του διαμερίσματος η ανάπτυξη της φλόγας καθυστερεί να ξεκινήσει και διαρκεί περισσότερο, ενώ πιο γρήγορη αύξηση της θερμοκρασίας παρατηρήθηκε σε συνθήκες νηνεμίας και για θέση της εστίας σε γωνία του διαμερίσματος. Παρατηρήθηκε ότι όταν η εστία της φωτιάς βρίσκεται στην ανάντη ή κατάντη γωνία, η θερμοκρασία αυξάνεται πιο γρήγορα στην περίπτωση των 3 m/s σε σχέση με την περίπτωση 1,5m/s. Η σύγκριση των θέσεων της εστίας της φωτιάς για την περίπτωση των 3 m/s δεν παρουσίασε ιδιαίτερες διαφορές, καθώς η επίδραση του ανέμου καταστέλλει γρηγορότερα τη φωτιά στο εσωτερικό του διαμερίσματος. Γενικότερα διαπιστώθηκε ότι όταν η εστία βρίσκεται σε γωνία εμφανίζονται εντονότερες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις.

Μέσα από την εποπτική μελέτη του φαινομένου αυτού διαπιστώθηκε ότι ο εξωτερικός άνεμος επιδρά στην εξέλιξη του φαινομένου με δύο διαφορετικούς τρόπους. Η αυξημένη ποσότητα αέρα που εισέρχεται μέσα στο διαμέρισμα όταν αυξάνεται η ταχύτητα αέρα προωθεί την καύση προκαλώντας αύξηση της θερμοκρασίας μέσα σε αυτό. Επίσης, για μεγαλύτερη ταχύτητα ανέμου παρατηρήθηκε απομάκρυνση και αραίωση των καυσαερίων μέσα στο διαμέρισμα με αποτέλεσμα τη μείωση της θερμοκρασίας και την επίσπωση του φαινομένου υποβάθμισης και τελικά σβέσης της φλόγας.

Τέλος, όσον αφορά την αδιάστατη θερμοκρασία στον άξονα της εξωτερικής φλόγας επιβεβαιώθηκε ότι για την περίπτωση επίδρασης εξωτερικού ανέμου η αδιάστατη θερμοκρασία είναι χαμηλότερη από τα αποτελέσματα της εμπειρικής σχέσης του Yokoi. Η διαφορά αυτή μεγαλώνει όσο αυξάνεται η ταχύτητα του αέρα.

Σε γενικές γραμμές, παρόλο που οι ποσοτικές διαφοροποιήσεις μεταξύ πειραματικών τιμών και προλέξεων της θερμοκρασίας αυξάνονται καθώς αυξάνεται ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας, παρατηρείται ότι υπάρχει κατά περιπτώσεις ικανοποιητική συμφωνία στη συμπεριφορά των αποτελεσμάτων. Ωστόσο, παρατηρείται ότι οι προλέξεις της θερμοκρασίας στους τοίχους του μοντέλου υποεκτιμούν σημαντικά τις πειραματικές τιμές. Αυτό ενδέχεται να συμβαίνει γιατί στον FDS η επίλυση μεταφοράς θερμότητας γίνεται μονοδιάστατα, με αποτέλεσμα κάποιες φορές να οδηγούμαστε σε απλουστευτικές προσεγγίσεις.

Από τις προλέξεις της θερμοκρασίας σε σχέση με το χρόνο φαίνεται ότι η επιλογή του πλέγματος των 600.000 κελιών, που πραγματοποιήθηκε βάση κάποιων στατιστικών κριτηρίων από διαθέσιμες έρευνες που έχουν προηγηθεί, προσεγγίζει σε ικανοποιητικό βαθμό τα πειραματικά αποτελέσματα. Επίσης, διασφαλίζεται η εγκυρότητα του κώδικα FDS για τη διεξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων κατά την προσομοίωση πειραμάτων σε πραγματικές συνθήκες.

Βιβλιογραφία

- C. Best, Measurement of Fuel Regression Rate of a Pool Fire in Crosswind With and Without a Large Downwind Blocking Object, Waterloo, Ontario, Canada, 2010.
- S.R. Bishop., P.G. Holbor, A.N. Beard, D.D. Drysdale. Nonlinear dynamics of flashover in compartment fires. *Fire Safety Journal*, 21, 11-45, 1993.
- E.G. Brehob, A.K. Kulkarni. Experimental measurements of upward flame spread on vertical wall with external radiation. *Fire safety Journal*, 31:181-200, 1998.
- J.H. Burgoyne, and Williams, G.Leir. Inflammability of liquids, *Fuel*, 28:145-149, 1949.
- J.H. Burgoyne and A.F. Roberts. The spread of flame across a liquid surface, Part 2. *Proceedings of the Royal Society (London)*, A308: 55-68, 1968.
- E.G. Butcher, G.K. Bedford, P.J. Fardell, Further experiments on temperatures reached by steel in building fires. *Joint Fire Research Organization Symposium*, 2: 2-17, 1968.
- Z. Chen, K. Sato, J. Wen, R. Huo, L. Hub. Burning behavior of two adjacent pool fires behind a building in across-wind. *Fire Safety Journal*, 44:989–996, 2009.
- H.X. Chen, N.A. Liu, W.K. Chow. Wind tunnel tests on compartment fires with cross flow ventilation. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 99:1025–1035, 2011.
- R.J. McDermott, G.P. Forney, K. McGrattan, and W.E. Mell. V european conference on computational fluid dynamics, ECCOMAS CFD 2010. In *Towards FDS6: complex geometry, embedded meshes and quality assessment*, 2010.
- P.J. DiNenno, D. Drysdale, C.L. Beyler, W.D. Walton, R.L.P. Cruster, J.R. Hall, and J.M. Watts. *S.F.P.E. Handbook for Fire Engineering*, 3rd Edition. National Fire Protection Association, U.S.A., 2002.
- D. Drysdale. *An introduction to fire dynamics*. John Wiley and Sons Ltd, Sussex, England, 1999.
- E. Gissi, *An introduction to Fire Simulation with FDS and Smokeview*. Updated to FDS 5.5.1 and Blender FDS, 2010.
- D. Gross, and A.F. Robertson. Experimental fires in enclosures. 10th Symposium (International) on combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, pp. 93 1-942, 1965.K. Himoto, T. Tsuchihashi, Y. Tanaka, T. Tanaka. Modeling the trajectory of window flames with regard to flow attachment to the adjacent wall. *Fire Safety Journal*, 44:250–258, 2009.
- H. Huang, R. Ooka, N. Liu, L. Zhang, Z. Deng, S. Kato. Experimental study of fire growth in a reduced-scale compartment under different approaching external wind conditions. *Fire Safety Journal*, 44:311–321, 2009.

- J.A. Ierardi, J.R. Barnett. A quantitative method for calibrating CFD model calculations. CIB Publication:290, 2003.
- N. Iqbal, M.H. Salley. Fire Dynamics Tools (FDT^s) Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program, Office of Nuclear Reactor Regulation U.S. Nuclear Regulatory Commission Washington, 2003.
- S. Klopovic, O.F. Turan. Flames venting externally during full-scale flashover fires: two sample ventilation cases. *Fire Safety Journal*, 31:117-142, 1998.
- J.H. Klote and L.Y. Cooper, Model of a Simple Fan-Resistance Ventilation System and Its Application to Fire Modeling, NISTIR 89-4141, Nat. Inst. of Stand. and Technology, 1989.
- C.H. Lin, Y.M. Ferng, W.S. Hsu. Investigating the effect of computational grid sizes on the predicted characteristics of thermal radiation for a fire. *Applied Thermal Engineering*, 29:2243–2250, 2009.
- H. Longhua, L. Kaihua, M. Delichatsios, L. He, F. Tang. An experimental investigation and statistical characterization of intermittent flame ejecting behavior of enclosure fires with an opening, 2011.
- K. McGrattan, S. Hostikka, J. Floyd, H. Baum, R. Rehm, W. Mell, and R. MacDermott. Fire dynamics simulation (version 5) technical reference guide. NIST Special Publication 1018-5, 2007.
- K.B. McGrattan, J. Floyd, G. Forney, H. Baum, and S. Hostikka. Fire safety science - proceedings of the seventh international symposium, worcester, ma. In *Improved Radiation and Combustion Routines for a Large Eddy Simulation Fire Model*, June 2002.
- A.O.M. Mahmoud, J. Bouslimi, R.B. Maad. Experimental study of the effects of a thermal plume entrainment mode on the flow structure: Application to fire. *Fire Safety Journal*, 44:475–486, 2009.
- J.H. Mammoser, F. Battaglia. A computational study on the use of balconies to reduce flame spread in high-rise apartment fires. *Fire Safety Journal* 39:277–296, 2004.
- K.B. McGrattan, J. Floyd, G. Forney, H. Baum, and S. Hostikka. Fire safety science proceedings of the seventh international symposium, Worcester, MA. In *Improved Radiation and Combustion Routines for a Large Eddy Simulation Fire Model*, June 2002.
- K. McGrattan, R. McDermott, S. Hostikka, and J. Floyd. *Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide*. 2010.
- K. McGrattan. CFD Modeling of Fire. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 00:1–20, July 2011.
- T. Naruse, A.S. Rangwala, B.A. Ringwelski, Y. Utiskul, K. Wakatsuki, J.G. Quintiere, Compartment fire behavior under limited ventilation, in *Fire and Explosion Hazards, Proceedings of the 4th International Seminar, Fire SERT, University of Ulster*, 109–120, 2004.
- I.Oleszkiewicz. Heat Transfer from a Window Fire Plume to a Building Façade, *Collected Papers in Heat Transfer. American Society of Mechanical Engineers*, 123:163-170, 1989
- Y. Pizzo, J.L. Consalvi, P. Querre, M. Coutin, B. Porterie. Width effects on the early stage of upward flame spread over PMMA slabs: Experimental observations, *Fire Safety Journal* 44:407–414, 2009.

- J.G. Quintiere. Fundamentals of Fire Phenomena. John Wiley & Sons Ltd., Sussex, England, 2006.
- R. Schiestel, A. Dejoan. Towards A New Partially Integrated Transport Model For Coarse Grid And Unsteady Turbulent Flow Simulations. Theoretical Computational Fluid Dynamics, 18:443-468, 2005.
- W.A., Sirignano and I. Glassman, (1970). Flame spreading above liquid fuels: surface tension-driven flows. Combustion Science and Technology, 1, 307-312.
- Y. Snegirev, G. M. Makhviladze, V. A. Talalov, and A. V. Shamshin. Turbulent Diffusion Combustion under Conditions of Limited Ventilation: Flame Projection Through an Opening. Combustion, Explosion and Shock Waves, 39: No. 1, 3-14, 2003.
- F. Tang, L.H. Hu, M.A. Delichatsios, K.H. Lu, W. Zhu. Experimental study on flame height and temperature profile of buoyant window spill plume from an under-ventilated compartment fire. International Journal of Heat and Mass Transfer, 55:93–101, 2012.
- P.H. Thomas, A.J.M. Heselden, M. Law, Fully developed compartment fires: two kinds of behaviour. Fire Research Technical Paper No. 18, HMSO, London 1967.
- P.H. Thomas, and A.J.M. Heselden, Fully developed fires in single compartments. A cooperative research programme of the Conseil Internationale du Batiment. Conseil Internationale du Batiment Report No. 20, Fire Research Note No. 923, 1972
- S. Yokoi, Study on the prevention of fire-spread caused by hot upward current, Report of the Building Research Institute No. 34, 1960.
- Σ. Επαμεινώνδας. Υπολογιστική προσομοίωση της εξάπλωσης πυρκαγιάς σε κτίρια με χρήση της μεθόδου 'προσομοίωσης μεγάλης δίνης. Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Μάρτιος 2008.
- Γ. Μπεργελές. Υπολογιστική Ρευστομηχανική. ΣΥΜΕΩΝ, Αθήνα, 2006.
- Μ. Φούντη. Θεωρία Καύσης και Συστήματα Καύσης. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2005.

