



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΤΕΡΟΓΕΝΩΝ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΥΣΗΣ
ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: Κα. Μ. ΦΟΥΝΤΗ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΕΞΑΠΛΩΣΗΣ
ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ
‘ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΕΓΑΛΗΣ ΔΙΝΗΣ’**

ΣΕΡΑΦΕΙΜ ΕΠΑΜΕΙΝΩΝΔΑΣ

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2008

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κυρία Μαρία Φούντη, αναπληρώτρια καθηγήτρια και τους κυρίους Διονύση Κολαΐτη και Δήμο Κοντογεώργο, υποψήφιους διδάκτορες, για την βοήθειά τους, τις συμβουλές τους και την αμέριστη συμπαράστασή τους σε όλη τη διάρκεια της εργασίας μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	7
1.1 Φωτιές σε κτίρια.....	7
1.1.1 Εισαγωγή.....	7
1.1.2 Στάδιο ανάπτυξης της φωτιάς και ορισμός της έκλαμψης.....	8
1.1.3 Απαραίτητες συνθήκες για την εμφάνιση έκλαμψης.....	10
1.1.4 Παράγοντες που επηρεάζουν το χρόνο για την εμφάνιση της έκλαμψης.....	13
1.1.5 Παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη της φωτιάς.....	14
1.1.6 Διάδοση της φωτιάς.....	15
1.1.7 Πλήρως ανεπτυγμένη φωτιά.....	25
1.1.8 Παραγωγή και κίνηση καπνού.....	27
1.2 Ιδιότητες γυψοσανίδων.....	29
1.2.1 Εισαγωγή.....	29
1.2.2 Συμπεριφορά γυψοσανίδας έναντι πυρκαγιάς.....	29
1.2.3 Θερμικές ιδιότητες.....	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	44
2.1 Παρουσίαση του κώδικα υπολογιστικής ρευστομηχανικής FDS.....	44
2.1.1 Εισαγωγή.....	44
2.1.2 Ο κώδικας FDS.....	45
2.1.3 Υδροδυναμικό μοντέλο.....	45
2.1.4 Μοντέλο καύσης.....	48
2.1.5 Γεωμετρία.....	48
2.1.6 Θερμικές οριακές συνθήκες.....	48
2.1.7 Μοντέλο θερμικής ακτινοβολίας.....	51
2.1.8 Αριθμητική μέθοδος.....	52
2.1.9 Ευαισθησία του κώδικα FDS.....	56
2.2 Μοντέλο Καύσης ‘Κλάσματος Μείγματος’.....	58
2.2.1 Εισαγωγή.....	58
2.2.2 Ορισμός του κλάσματος μείγματος.....	58

2.2.3	Εξισώσεις φλογιδίων (flamelet).....	63
2.2.4	Δομή της φλόγας για μη αντιστρεπτή και απείρως γρήγορη χημική αντίδραση.....	65
2.2.5	Δομή της φλόγας σύμφωνα με τους Burke και Schumann.....	66
2.2.6	Αριθμητικοί και φυσικοί περιορισμοί.....	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....		70
3.1	Εισαγωγή.....	70
3.2	Παρουσίαση του πειράματος.....	70
3.3	Αναλυτική παρουσίαση των πειραματικών περιπτώσεων.....	74
3.4	Παραμετρική Μελέτη.....	78
3.4.1	Σταθερά Smagorinsky.....	78
3.4.2	Κλάσμα ακτινοβολίας.....	80
3.4.3	Μοντέλο ακτινοβολίας.....	83
3.4.4	Αριθμός γωνιών ακτινοβολίας.....	86
3.5	Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	88
3.6	Συμπεράσματα.....	102
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....		105
4.1	Εισαγωγή.....	105
4.2	Χημική αντίδραση της καύσης.....	107
4.3	Ιδιότητες υλικών.....	113
4.4	Σύγκριση συμπεριφοράς τούβλου και γυψοσανίδας σε συνθήκες φωτιάς...	116
4.5	Αποτελέσματα υπολογιστικής προσομοίωσης φωτιάς σε μονοκατοικία.....	123
4.5.1	Θερμοκρασία.....	123
4.5.2	Καπνός.....	124
4.5.3	Ορατότητα.....	126
4.5.4	Ταχύτητα.....	129
4.5.5	Συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα.....	130
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....		134
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		136

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναφέρεται στην προσομοίωση της εξάπλωσης φωτιάς σε κτίριο με την χρήση ενός κώδικα υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Τα κύρια φαινόμενα που εξετάζονται είναι τα χαρακτηριστικά της φωτιάς και ο τρόπος εξάπλωσής της στο εσωτερικό του κτιρίου. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της φωτιάς ονομάζεται Fire Dynamics Simulator και βασίζεται στο ‘Μοντέλο Προσομοίωσης Μεγάλης Δίνης’ (Large Eddy Simulation – LES).

Αρχικά, στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται μια γενική αναφορά στα χαρακτηριστικά της φωτιάς και στις συνθήκες που απαιτούνται για την ανάπτυξή της. Επίσης, περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο διαδίδεται η φωτιά και αναφέρονται οι παράγοντες που επηρεάζουν την εξάπλωση της σε ένα κτίριο. Στη συνέχεια, γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στη συμπεριφορά της γυψοσανίδας σε συνθήκες φωτιάς και περιγράφονται αναλυτικά όλες οι θερμικές της ιδιότητες.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάζεται ο κώδικας υπολογιστικής ρευστομηχανικής FDS και αναφέρονται, αναλυτικά, οι εξισώσεις που επιλύονται σε αυτόν, καθώς και τα διάφορα μοντέλα που χρησιμοποιούνται. Επίσης, περιγράφεται λεπτομερώς το μοντέλο καύσης ‘κλάσματος μείγματος’ (Mixture Fraction) και γίνεται αναφορά στη θεωρία των ‘φλογιδίων’ (flamelet theory).

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ενός πραγματικού πειράματος φωτιάς σε εσωτερικό χώρο και οι προλέξεις του κώδικα FDS συγκρίνονται με τις διαθέσιμες μετρήσεις. Στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι η πιστοποίηση του κώδικα FDS όσον αφορά την προσομοίωση της φωτιάς και η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με το ποιοι παράγοντες επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την ακρίβεια των υπολογιστικών αποτελεσμάτων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, γίνεται προσομοίωση της φωτιάς σε ένα πραγματικό κτίριο με στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με το πώς διαδίδεται η φλόγα σε μία συμβατική μονοκατοικία. Επίσης, γίνεται σύγκριση των ιδιοτήτων της γυψοσανίδας με αυτές του τούβλου όταν τα δύο υλικά χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των τοίχων ενός δωματίου.

Τέλος, στο τελευταίο κεφάλαιο, παρουσιάζονται συνοπτικά όλα τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, τα οποία αφορούν τον κώδικα υπολογιστικής ρευστομηχανικής FDS και την προσομοίωση της φωτιάς σε ένα κτίριο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1. ΦΩΤΙΕΣ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ

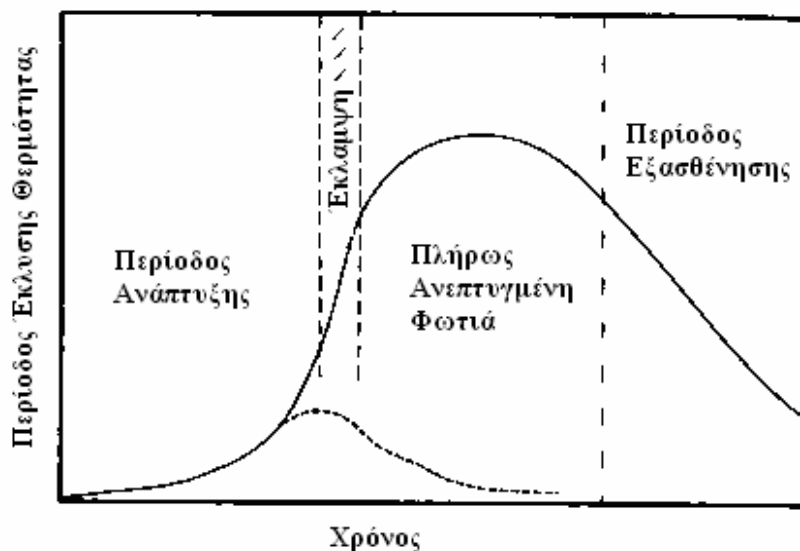
1.1.1. Εισαγωγή

Ο όρος ‘φωτιά σε κτίριο’ χρησιμοποιείται για την περιγραφή της μη-ελεγχόμενης καύσης σε κάποιον κλειστό χώρο, ο όγκος του οποίου δεν ξεπερνά συνήθως τα 100m³. Στην περίπτωση αυτή, η φωτιά εξελίσσεται ελεύθερα και οι ρυθμοί πυρόλυσης και έκλυσης θερμότητας επηρεάζονται, αρχικά, μόνο από τα φαινόμενα της καύσης και όχι από τα όρια του δωματίου, τα οποία επηρεάζουν την φωτιά μόνο όταν αυτή αυξηθεί σε μέγεθος (Drysdale, 1999). Στο σχήμα 1.1.1 παρουσιάζεται η εξέλιξη του ρυθμού έκλυσης θερμότητας συναρτήσει του χρόνου. Στην περίπτωση που ο αερισμός είναι επαρκής, η φωτιά σε ένα κτίριο μπορεί να διαχωριστεί σε τρία βασικά στάδια:

- **Στάδιο ανάπτυξης της φωτιάς**, κατά το οποίο η μέση θερμοκρασία του δωματίου είναι σχετικά χαμηλή και η φωτιά περιορίζεται κοντά στην περιοχή από την οποία ξεκίνησε (pre-flashover fire).
- **Στάδιο πλήρως ανεπτυγμένης φωτιάς** (post-flashover fire), κατά το οποίο παρατηρείται καύση όλων των αναφλέξιμων αντικειμένων και οι φλόγες εξαπλώνονται σε όλο το χώρο.
- **Στάδιο εξασθένησης της φωτιάς**, το οποίο επιτυγχάνεται όταν η μέση θερμοκρασία του χώρου γίνει χαμηλότερη του 80% της μέγιστης τιμής της.

Το σημείο μετάβασης από το πρώτο στο δεύτερο στάδιο, αναφέρεται ως **έκλαμψη** (flashover) και περιλαμβάνει την γρήγορη εξάπλωση της φωτιάς από το αρχικό σημείο έναυσης προς όλες τις αναφλέξιμες επιφάνειες του δωματίου. Η έκλαμψη έχει μικρή χρονική διάρκεια σε σχέση με τα υπόλοιπα στάδια, αποτελεί όμως ένα κρίσιμο χρονικό σημείο, μετά από το οποίο μειώνονται δραματικά οι πιθανότητες επιβίωσης στο εσωτερικό του χώρου. Κατά το δεύτερο στάδιο, ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του και η φωτιά είναι δυνατόν να επεκταθεί και σε γειτονικά δωμάτια, μέσω των ανοιγμάτων (πόρτες, παράθυρα), γεγονός το οποίο μπορεί να οδηγήσει στην μερική ή ολική κατάρρευση του κτιρίου. Τέλος, κατά το

τρίτο στάδιο ο ρυθμός καύσης και η ένταση της φωτιάς μειώνονται καθώς η καύσιμη ύλη εξαντλείται, αλλά, κατά περίπτωση, τα αναφλέξιμα στερεά συνεχίζουν να καίγονται αργά, διατηρώντας υψηλές θερμοκρασίες.



Σχήμα 1.1.1. Η εξέλιξη μιας τυπικής φωτιάς σε ένα κτίριο συναρτίζεται του χρόνου.
(Drysdale, 1999)

1.1.2. Στάδιο ανάπτυξης της φωτιάς και ορισμός της έκλαμψης

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η έκλαμψη σχετίζεται άμεσα με την πυρασφάλεια ενός κτιρίου, καθώς από τη στιγμή που θα λάβει χώρα κινδυνεύουν άμεσα όλοι οι ένοικοι του κτιρίου. Ο χρόνος μέχρι την εμφάνιση της έκλαμψης είναι ένας σημαντικός παράγοντας που καθορίζει το πόσο επικίνδυνη είναι μία φωτιά, γεγονός το οποίο απεικονίζεται και στην παρακάτω ανισότητα (Drysdale, 1999):

$$t_p + t_a + t_{rs} \leq t_u \quad (1.1.1)$$

όπου, t_p είναι ο χρόνος που περνάει από την έναυση της φωτιάς μέχρι την στιγμή εντοπισμού της, t_a είναι ο χρόνος από την στιγμή που εντοπίζεται η φωτιά μέχρι την έναρξη της εκκένωσης του δωματίου, t_{rs} είναι ο χρόνος που απαιτείται για να προσεγγιστεί ένα μέρος σχετικά ασφαλές και t_u είναι ο χρόνος που περνάει από την στιγμή της έναυσης της φωτιάς μέχρι την στιγμή κατά την οποία οι συνθήκες διαβίωσης μέσα στο δωμάτιο είναι αφόρητες. Ενώ οι χρόνοι t_p και t_a εξαρτώνται από

την αντίληψη των ενοίκων, ο χρόνος t_{rs} επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως για παράδειγμα η ευκινησία του κάθε ατόμου, η γεωμετρία του κτιρίου και ο βαθμός στον οποίο επηρεάζεται κάθε άτομο από τα προϊόντα της φωτιάς. Για να μπορέσει κάποιος να διαφύγει έγκαιρα από ένα κτίριο στο οποίο έχει εκδηλωθεί φωτιά θα πρέπει είτε να υπάρχουν μέσα ανίχνευσης της φωτιάς (μείωση του t_p), είτε να αποφεύγεται η χρήση υλικών που βοηθούν την γρήγορη εξάπλωση της πυρκαγιάς (αύξηση του t_u). Διαφορετικά, θα πρέπει να ληφθούν μέτρα για την μείωση των χρόνων t_a και t_{rs} , όπως η δημιουργία εύκολα προσβάσιμων και καλά σχεδιασμένων διαδρομών διαφυγής, οι οποίες θα παραμένουν ελεύθερες από καπνό για όσο χρόνο απαιτείται μέχρι την πλήρη εκκένωση του κτιρίου. Όπως γίνεται κατανοητό, όσο περισσότερο χρόνο διαρκεί η μετάβαση από το πρώτο στο δεύτερο στάδιο, τόσο περισσότερο αυξάνεται η πιθανότητα για ανίχνευση και κατάσβεση της πυρκαγιάς αλλά και για την ασφαλή εκκένωση του χώρου.

Όταν υπάρχει επαρκής ποσότητα καυσίμου και αέρα, η φωτιά μπορεί να εξαπλωθεί σε ολόκληρο το δωμάτιο και όλες οι εκτεθειμένες αναφλέξιμες επιφάνειες να καούν. Σε αυτήν την περίπτωση, η οποία είναι και η πλέον πιθανή σε πραγματικές συνθήκες φωτιάς σε κτίριο, παίζουν σημαντικό ρόλο οι συνθήκες που επικρατούν στο χώρο κατά την έναρξη της έκλαμψης, αλλά κυρίως η χρονική διάρκεια του σταδίου ανάπτυξης της φωτιάς. Όσον αφορά την έκλαμψη, η διάρκειά της εξαρτάται από ένα πλήθος παραγόντων, όπως για παράδειγμα το μέγεθος και το σχήμα του δωματίου ή οι φυσικές ιδιότητες και η χωρική κατανομή των αναφλέξιμων αντικειμένων. Σε ένα τυπικό δωμάτιο η έκλαμψη μπορεί να διαρκέσει μόλις 15-30s (Drysdale, 1999), ενώ σε έναν μεγαλύτερο χώρο, όπως μια αποθήκη, είναι πιθανόν να διαρκέσει περισσότερο. Δεδομένου ότι η έκλαμψη σηματοδοτεί την έναρξη του σταδίου της πλήρους ανεπτυγμένης φωτιάς, είναι σημαντικό να οριστεί επ'ακριβώς η χρονική στιγμή εμφάνισής της ώστε να εξεταστούν οι παράγοντες που επηρεάζουν την διάρκεια του σταδίου ανάπτυξης της φωτιάς. Στην βιβλιογραφία είναι διαθέσιμοι διάφοροι ορισμοί ένας εκ των οποίων είναι ο εξής (Thomas, 1981): Η έκλαμψη είναι η χρονική περίοδος μετάβασης μιας περιορισμένης φωτιάς σε εκτεταμένη πυρκαγιά στο εσωτερικό ενός χώρου, όπου καίγονται όλες οι αναφλέξιμες επιφάνειες.

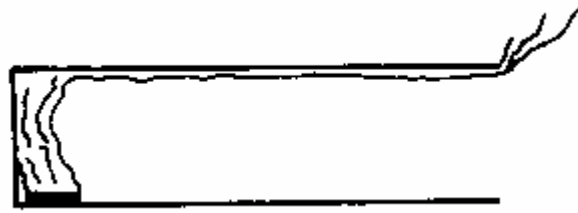
1.1.3. Απαραίτητες συνθήκες για την εμφάνιση έκλαμψης

Όταν αναπτύσσεται μια φωτιά μέσα σε ένα δωμάτιο, εκτός από τις φλόγες πάνω ακριβώς από την φωτιά, εμφανίζονται και άλλες πηγές θερμικής ακτινοβολίας, όπως (Drysdale, 1999):

- Οι θερμές επιφάνειες που βρίσκονται στο ανώτερο μέρος του χώρου.
- Οι φλόγες κάτω από την οροφή.
- Τα θερμά προϊόντα καύσης που παγιδεύονται κάτω από την οροφή.

Η επίδραση της κάθε πηγής μεταβάλλεται όσο αναπτύσσεται η φωτιά και η αιτία εμφάνισης της έκλαμψης εξαρτάται από την φύση του καυσίμου και τον αερισμό του δωματίου. Για παράδειγμα, όταν καίγεται μεθανόλη τον σημαντικότερο ρόλο τον παίζουν οι ανώτερες θερμές επιφάνειες, λόγω της χαμηλής ακτινοβολίας των φλογών και των προϊόντων καύσης. Αντίθετα, για την παραγωγή καπνού, καθοριστικό ρόλο παίζουν το ύψος και η θερμοκρασία του θερμού στρώματος των προϊόντων καύσης κάτω από την οροφή. Για λόγους ευκολίας θεωρείται ότι υπάρχουν δύο περιπτώσεις αλληλεπίδρασης της φωτιάς με την οροφή ενός δωματίου, όπως φαίνεται και στα σχήματα 1.1.2 και 1.1.3.

Στην πρώτη περίπτωση (σχήμα 1.1.2) το δωμάτιο είναι ουσιαστικά ένας μονοδιάστατος χώρος μεγάλου μήκους σαν διάδρομος. Στη μία άκρη βρίσκεται η πηγή έναυσης της φωτιάς, ενώ η άλλη είναι ανοιχτή ώστε να μην περιορίζεται η οριζόντια διάδοση της φωτιάς κατά την κατεύθυνση της ροής. Έτσι, το ύψος του στρώματος που σχηματίζεται εξαρτάται μόνο από το πλάτος του 'διαδρόμου' και το ρυθμό με τον οποίο ρέει το θερμό αέριο στο στρώμα που σχηματίζεται στην οροφή. Αν η φωτιά έχει επαρκές μέγεθος ώστε οι φλόγες να απομακρύνονται, τότε σύμφωνα με τον Hinkley (1968) δύο πράγματα μπορούν να συμβούν: είτε να υπάρχει περίσσεια αέρα, επομένως και οξυγόνου, οπότε η καύση να είναι φτωχή σε καύσιμο, είτε ο αέρας να μην επαρκεί με αποτέλεσμα να υπάρχει μικρή συγκέντρωση οξυγόνου και επομένως μεγάλη ποσότητα άκαυστου καυσίμου στο στρώμα του καπνού, οπότε η καύση είναι πλούσια σε καύσιμο.



Σχήμα 1.1.2. Αλληλεπίδραση ενός πλουμίου φωτιάς με την οροφή ενός διαδρόμου.
(Drysdale, 1999)

Στην δεύτερη περίπτωση (σχήμα 1.1.3), φαίνεται ο σχηματισμός του στρώματος του καπνού κάτω από την οροφή ενός ‘τυπικού’ δωματίου. Αμέσως μόλις τοποθετηθεί η φωτιά, όσο αυτή μεγαλώνει, οι φλόγες ανεβαίνουν προς την οροφή και σχηματίζουν ένα ρεύμα που κινείται προς τα έξω ώσπου να συναντήσει κάποιον τοίχο. Ταυτόχρονα, σχηματίζεται ένα στρώμα καπνού ακριβώς κάτω από την οροφή, το οποίο, όσο η φωτιά συνεχίζει να καίει, μεγαλώνει και κατεβαίνει προς τα κάτω. Όταν αυτό το στρώμα καπνού συναντήσει κάποιο άνοιγμα, σταθεροποιεί το ύψος του σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο (ουδέτερο επίπεδο – neutral level), με αποτέλεσμα να μειώνεται το ύψος μέσω του οποίου εισάγεται ψυχρός αέρας στο δωμάτιο και η θερμοκρασία του στρώματος να αυξάνει όλο και περισσότερο (Quintiere, 1976). Στην περιοχή κοντά στους τοίχους, το αέριο που βρίσκεται εκεί ψύχεται με αποτέλεσμα να γίνεται ελαφρύτερο από το υπόλοιπο αέριο. Συνεπώς, αρχίζει να ακολουθεί μια καθοδική ροή συμπαρασύροντας μαζί του και ένα μέρος του καπνού. Ο καπνός αυτός αναμειγνύεται με τον αέρα και επομένως η θερμοκρασία εκεί είναι μικρότερη σε σχέση με την οροφή όπου παρουσιάζονται οι υψηλότερες θερμοκρασίες. Η οροφή, καθώς και τα υψηλότερα σημεία των τοίχων αρχικά θερμαίνονται λόγω της μεταφοράς θερμότητας, στη συνέχεια όμως, η ακτινοβολία είναι αυτή που κυριαρχεί όσο η θερμοκρασία του στρώματος και η συγκέντρωση των σωματιδίων καπνού αυξάνει.



Σχήμα 1.1.3. Αλληλεπίδραση ενός πλουμίου φωτιάς με την οροφή ενός τυπικού δωματίου. (Drysdale, 1999)

Καθώς η φωτιά μεγαλώνει σε μέγεθος, η φλόγα αρχίζει να διαπερνά το στρώμα καπνού που έχει σχηματιστεί. Μόλις συμβεί αυτό, το ανώτερο μέρος της φλόγας εισάγει αέρα ο οποίος είναι 'νοθευμένος' με διάφορα προϊόντα καύσης. Αυτό οδηγεί στην αύξηση του ρυθμού συγκέντρωσης καπνού, γεγονός το οποίο σε συνδυασμό με την συνεχή αύξηση της θερμοκρασίας του στρώματος οδηγεί στην εντονότερη εκπομπή ακτινοβολίας προς τα κάτω. Έτσι, μεγαλώνει ο ρυθμός με τον οποίο καίει η ήδη υπάρχουσα φωτιά καθώς επίσης και ο ρυθμός με τον οποίο διαδίδεται η φλόγα στις διάφορες γειτονικές επιφάνειες. Ταυτόχρονα, το στρώμα καπνού κατεβαίνει, αν και με πιο αργό ρυθμό απ' ό τι προηγουμένως, περιβάλλοντας όλο και μεγαλύτερο τμήμα της φλόγας. Αυτή ακριβώς η κατάσταση είναι η πιο πιθανή να συμβεί κατά την εμφάνιση της έκλαμψης, όταν, δηλαδή, η φωτιά υφίσταται μια γρήγορη μετατροπή προς την πλήρως ανέπτυγμένη της μορφή.

Πρέπει, επίσης, να σημειωθεί ότι αν το δωμάτιο δεν αερίζεται επαρκώς και το οξυγόνο που καταναλώνεται κατά την διάρκεια της φωτιάς δεν ανανεώνεται, τότε υπάρχει και η περίπτωση να μην γίνει έκλαμψη. Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση που καίγεται αμέσως ολόκληρο το καύσιμο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η περίπτωση ενός μικρού δωματίου, στο οποίο ο αέρας δεν ανανεώνεται συχνά, όπου μια φωτιά που έχει γρήγορο ρυθμό καύσης μπορεί να σβήσει από μόνη της ή, το πιο πιθανό, να καίει σιγά σιγά με ρυθμό που της επιβάλει η είσοδος του αέρα. Υπό τις συνθήκες που αναφέρθηκαν παραπάνω, η καύση είναι ατελής και τα άκαυστα και τα μερικώς καμμένα προϊόντα της καύσης συσσωρεύονται στον χώρο.

Τέλος, σύμφωνα με τον Bullen (1978), εάν η φωτιά καίει για ένα παρατεταμένο χρονικό διάστημα υπό τις παραπάνω συνθήκες και ξαφνικά εισαχθεί μια ποσότητα αέρα στο δωμάτιο, υπάρχει περίπτωση η είσοδος του φρέσκου αέρα να οδηγήσει στο κάψιμο διάφορων άκαυστων καταλοίπων του καυσίμου και σε μια ξαφνική

‘φούντωση’ της φλόγας. Αν και στη συνέχεια μπορεί να υπάρξει μια πλήρως ανεπτυγμένη φωτιά, δεν είναι το ίδιο με την έκλαμψη, στην οποία δεν απαιτείται η ξαφνική είσοδος αέρα (Drysdale, 1999) και μπορεί να συμβεί και σε έναν καλά αεριζόμενο χώρο.

1.1.4. Παράγοντες που επηρεάζουν το χρόνο για την εμφάνιση της έκλαμψης

Ο χρόνος που χρειάζεται για να εμφανιστεί η έκλαμψη είναι ουσιαστικά ο χρόνος που απαιτείται ώστε οι φλόγες να εξαπλωθούν σε όλες τις επιφάνειες του δωματίου. Έχει βρεθεί πειραματικά (Heselden και Melinek, 1975) ότι ο χρόνος αυτός δεν επηρεάζεται σημαντικά από το σχήμα του δωματίου και επηρεάζεται ελάχιστα από το μέγεθος του ανοίγματος αερισμού και την συνεχή παρουσία του καυσίμου. Αντιθέτως, εξαρτάται σε μεγαλύτερο βαθμό από την θέση της πηγής έναυσης, την επιφάνεια που αυτή καταλαμβάνει, την μέση πυκνότητα του καυσίμου και την φύση του υλικού επένδυσης (Drysdale, 1999). Αναλυτικότερα:

- Πηγή Έναυσης: Ο χρόνος μέχρι την εμφάνιση της έκλαμψης είναι μικρότερος όταν η πηγή έναυσης βρίσκεται στο κέντρο του δωματίου, διότι η περιοχή που καταλαμβάνει η αρχική φωτιά αυξάνεται με ταχύτερο ρυθμό. Ομοίως, όσο μεγαλύτερη επιφάνεια καταλαμβάνει η πηγή έναυσης, τόσο πιο γρήγορα συμβαίνει η έκλαμψη, διότι το καύσιμο βρίσκεται αρχικά σε μεγαλύτερη επιφάνεια.
- Μέση Πυκνότητα: Τα αντικείμενα χαμηλής πυκνότητας έχουν την τάση να διαδίδουν την φωτιά γρηγορότερα, με αποτέλεσμα το μέγεθος της φωτιάς να αυξάνει με γρηγορότερο ρυθμό και η έκλαμψη να συμβαίνει νωρίτερα
- Υλικό Επένδυσης: Ένα εύφλεκτο υλικό επένδυσης μειώνει το χρόνο για την εμφάνιση της έκλαμψης αλλά έχει παρατηρηθεί ότι οι εύφλεκτες επενδύσεις των τοίχων δεν εμπλέκονται στην διάδοση της φωτιάς παρά μόνο όταν αυτή έχει αναπτυχθεί αρκετά.

Αξίζει, πάντως, να σημειωθεί ότι ο σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει το χρόνο για την εμφάνιση της έκλαμψης είναι η αλληλεπίδραση της θέσης της πηγής έναυσης και του υλικού επένδυσης των τοίχων. Αν το υλικό αυτό είναι εύφλεκτο και

εμπλέκεται στην διάδοση της φωτιάς άμεσα διότι η πηγή είναι τοποθετημένη σε μία γωνία του δωματίου, τότε ο χρόνος για την εμφάνιση της έκλαμψης είναι κατά πολύ μειωμένος. Υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που μπορεί να επηρεάζουν σημαντικά τον χρόνο εμφάνισης της έκλαμψης, όπως για παράδειγμα το ποσοστό της υγρασίας του καυσίμου, η σχετική υγρασία και η κίνηση του αέρα μέσα στον χώρο. Η εξέταση όλων των παραπάνω στοιχείων δείχνει ότι η ανάπτυξη της φωτιάς κατά τα πρώτα στάδια επηρεάζεται από αρκετούς παράγοντες, καθιστώντας δύσκολη την ακριβή πρόλεξη των σχετικών φαινομένων στα αρχικά στάδια εκδήλωσης της φωτιάς.

1.1.5. Παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη της φωτιάς

Εάν το αντικείμενο που αναφλέγεται αρχικά δεν είναι ικανό να παράγει την απαραίτητη θερμότητα για να συμβεί η έκλαμψη, τότε για να περάσουμε από την φάση της ανάπτυξης της φωτιάς στην έκλαμψη θα πρέπει να ανάψουν και άλλα καύσιμα αντικείμενα. Το αν θα ανάψει κάποιο άλλο αντικείμενο εξαρτάται από την απόστασή του από το αρχικό σημείο έναυσης. Ανάφλεξη ενός αντικειμένου παρατηρείται όταν αυτό βρίσκεται αρκετά κοντά στην πηγή έναυσης και έχει κατάλληλο σχήμα ώστε η φλόγα να έρχεται σε άμεση επαφή με αυτό. Αν αυτό δεν είναι δυνατό, τότε η φωτιά μπορεί να εξαπλωθεί μόνο μέσω της ακτινοβολούμενης θερμότητας. Ο Babrauskas (1982) διαπίστωσε ότι η ροή της ακτινοβολούμενης θερμότητας σε κάποια απόσταση εξαρτάται άμεσα από τον ρυθμό καύσης. Έτσι, αντικείμενα που καίγονται γρήγορα είναι ικανά να προσδώσουν μια σημαντική ποσότητα ακτινοβολούμενης θερμότητας σε απόσταση μέχρι και 1m από την επιφάνειά τους. Στην πραγματικότητα, όλες οι επιφάνειες που βρίσκονται στο εσωτερικό ενός χώρου είναι πιθανό να οδηγήσουν στην γρήγορη ανάπτυξη της φλόγας για δύο λόγους:

- α) Λόγω του εγκλωβισμού ενός μεγάλου ποσού θερμότητας στην περιοχή των εύφλεκτων επιφανειών και
- β) λόγω της δημιουργίας δυναμικής ροής που οδηγεί σε υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης θερμότητας.

Επομένως, η ανάπτυξη της φωτιάς σε έναν χώρο που η επένδυσή του αποτελείται από εύφλεκτο υλικό, ή που περιέχει εύφλεκτα υλικά (όπως για παράδειγμα καλώδια) θα είναι γρήγορη, από την στιγμή που θα αναφλεγεί κάποιο αντικείμενο.

Τέλος, ένας άλλος τρόπος διάδοσης της φωτιάς είναι τα θερμοπλαστικά καύσιμα, τα οποία όταν καίγονται λιώνουν και δημιουργούν λίμνες φωτιάς (liquid pool fires), οι οποίες μπορούν να επεκταθούν και σε άλλα εύφλεκτα αντικείμενα (Drysdale, 1999).

1.1.6. Διάδοση της φωτιάς

Ο ρυθμός με τον οποίο αναπτύσσεται μια φωτιά εξαρτάται από το πόσο γρήγορα διαδίδεται η φλόγα από το σημείο ανάφλεξης μέχρι να αρχίσει να επεκτείνεται σε επιφάνειες που βρίσκονται στον ίδιο χώρο και αποτελούνται από κάποιο εύφλεκτο υλικό. Σε έναν κλειστό χώρο για να έχουμε πλήρη ανάπτυξη της φωτιάς, θα πρέπει να αναπτυχθούν υψηλές θερμοκρασίες πάνω από ένα όριο (συνήθως μεγαλύτερες των 600°C) στο επίπεδο της οροφής. Παρ'όλο που τα αυξημένα επίπεδα ακτινοβολίας αυξάνουν τον τοπικό ρυθμό καύσης, ο συνεχώς αυξανόμενος χώρος που καταλαμβάνει η φωτιά είναι αυτός που επηρεάζει περισσότερο το μέγεθος της φλόγας και τον ρυθμό καύσης (Thomas, 1981).

Σημαντικό είναι το γεγονός ότι ο ρυθμός εξάπλωσης της φλόγας εξαρτάται όχι μόνο από τις φυσικές ιδιότητες ενός υλικού, αλλά και από την χημική του σύνθεση. Σημαντικό ρόλο στις φωτιές σε κτίρια, παίζει η εξάπλωση της φωτιάς σε στερεά αντικείμενα. Οι παράγοντες που είναι γνωστό ότι επηρεάζουν τον ρυθμό εξάπλωσης της φλόγας σε εύφλεκτα στερεά παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1.1 (Friedman, 1977).

Πίνακας 1. Παράγοντες που επηρεάζουν τον ρυθμό εξάπλωσης της φλόγας πάνω σε εύφλεκτα στερεά (Friedman, 1977).

Παράγοντες που αφορούν το υλικό		Περιβαλλοντικοί παράγοντες
Χημικοί	Φυσικοί	
Σύνθεση του καυσίμου	Αρχική θερμοκρασία	Σύνθεση της ατμόσφαιρας
Παρουσία επιβραδυντικών	Προσανατολισμός επιφάνειας	Πίεση της ατμόσφαιρας
	Κατεύθυνση εξάπλωσης	Θερμοκρασία
	Πάχος	Μετάδοση θερμότητας μέσω ακτινοβολίας
	Θερμοχωρητικότητα	Ταχύτητα αέρα
	Θερμική αγωγιμότητα	
	Πυκνότητα	
	Γεωμετρία	

Προσανατολισμός της επιφάνειας και κατεύθυνση εξάπλωσης της φλόγας

Γενικά, οι στερεές επιφάνειες μπορούν να καούν σε κάθε προσανατολισμό, αλλά η εξάπλωση της φλόγας είναι ταχύτερη όταν κατευθύνεται προς τα πάνω σε μια κάθετη επιφάνεια. Όσο αυξάνει η γωνία που σχηματίζει μια επιφάνεια με το οριζόντιο επίπεδο, τόσο αυξάνει και ο αντίστοιχος ρυθμός διάδοσης της φλόγας (Magee και McAlevy, 1971), λόγω του διαφορετικού τρόπου αλληλεπίδρασης της φλόγας με το άκαυστο καύσιμο σε κάθε προσανατολισμό. Στο σχήμα 1.1.4 φαίνεται ο τρόπος διάδοσης της φλόγας για πέντε διαφορετικές κλίσεις της επιφάνειας του στερεού.

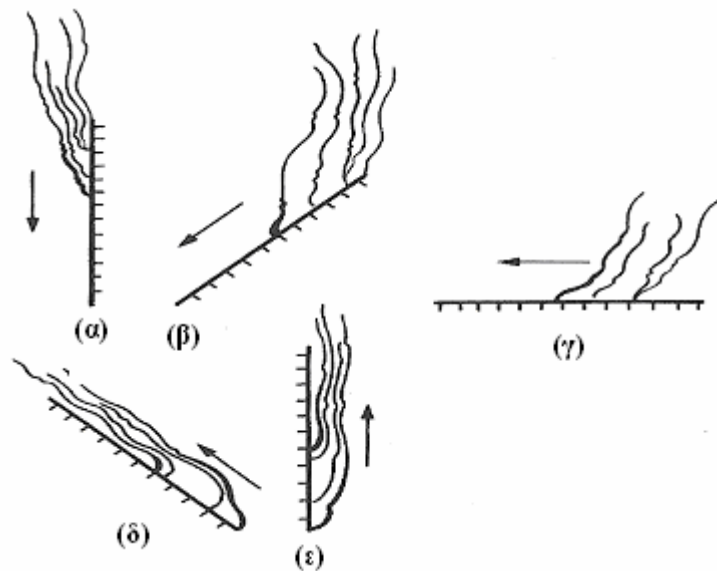
Όταν η διάδοση της φλόγας είναι προς τα κάτω (περίπτωση α), η ροή του αέρα είναι αντίθετη με αυτήν της φλόγας με αποτέλεσμα να εμποδίζει την εξάπλωσή της. Επομένως, τα θερμά αέρια ρέουν μακριά από το άκαυστο υλικό και έτσι η μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής είναι αμελητέα. Η φλόγα σε αυτήν την περίπτωση εξαπλώνεται με αργό αλλά σταθερό ρυθμό. Σύμφωνα με τους Markstein και de Ris (1972) ισχύει:

$$V_p \propto l_p^n \quad (1.1.2)$$

όπου V_p είναι ο ρυθμός της κάθετης διάδοσης του μετώπου της φλόγας, l_p είναι το μήκος της ζώνης της πυρόλυσης και n είναι μία σταθερά, περίπου ίση με 0.5.

Αντίθετα, όταν η διάδοση της φλόγας είναι ανοδική σε μια κάθετη επιφάνεια (περίπτωση ε), η άνωση που δημιουργείται από την ίδια την φλόγα οδηγεί σε συμπιέσιμα πορεία του αέρα και της φλόγας, με αποτέλεσμα η φλόγα και τα θερμά αέρια να κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση, αυξάνοντας έτσι τον ρυθμό μεταφοράς θερμότητας. Σε αυτήν την περίπτωση, η φλόγα διαδίδεται με αυξανόμενο ρυθμό.

Τέλος, όσον αφορά την οριζόντια διάδοση της φλόγας σε μία οροφή (περίπτωση γ), εάν δεν υπάρχει κάποιο άνοιγμα στον χώρο (π.χ. πόρτα, παράθυρο) που οδηγεί στην συνεχή εισαγωγή φρέσκου αέρα, δεν προκαλείται η γρήγορη εξάπλωσή της. Έτσι, τα θερμά αέρια παραμένουν αδρανοποιημένα κάτω από την οροφή, χωρίς να κινούνται προς κάποια κατεύθυνση. Εάν, όμως, αρχίσει η φλόγα να εξαπλώνεται, όχι μόνο θα δημιουργηθεί ροή των θερμών προϊόντων της καύσης, αλλά θα εξαπλώνεται και πάνω από άκαυστα αντικείμενα που βρίσκονται μακριά από την φωτιά.



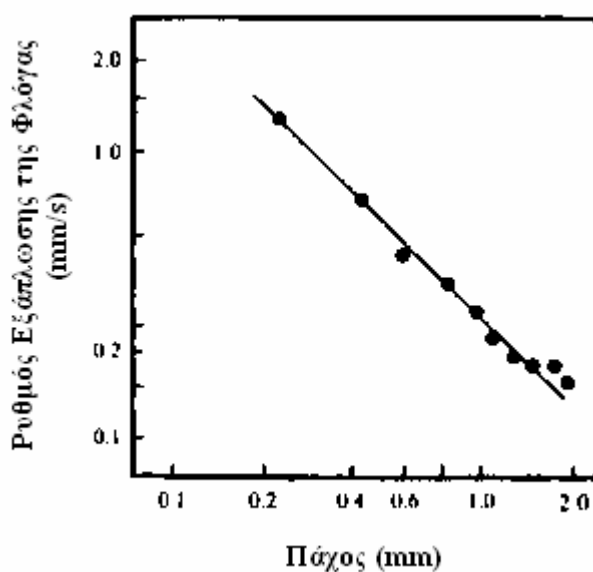
Σχήμα 1.1.4. Περιπτώσεις εξάπλωσης της φλόγας για πέντε διαφορετικές κλίσεις της αναφλέξιμης επιφάνειας. (Drysdale, 1999)

Πάχος του καυσίμου

Έχει βρεθεί ότι εάν το καύσιμο αντικείμενο είναι πολύ λεπτό και το δοκίμιο έχει σε όλα τα σημεία του την ίδια θερμοκρασία, τότε ο ρυθμός εξάπλωσης της φλόγας είναι αντιστρόφως ανάλογος με το πάχος του υλικού. Δηλαδή, ισχύει:

$$V \propto \tau^{-1} \quad (1.1.3)$$

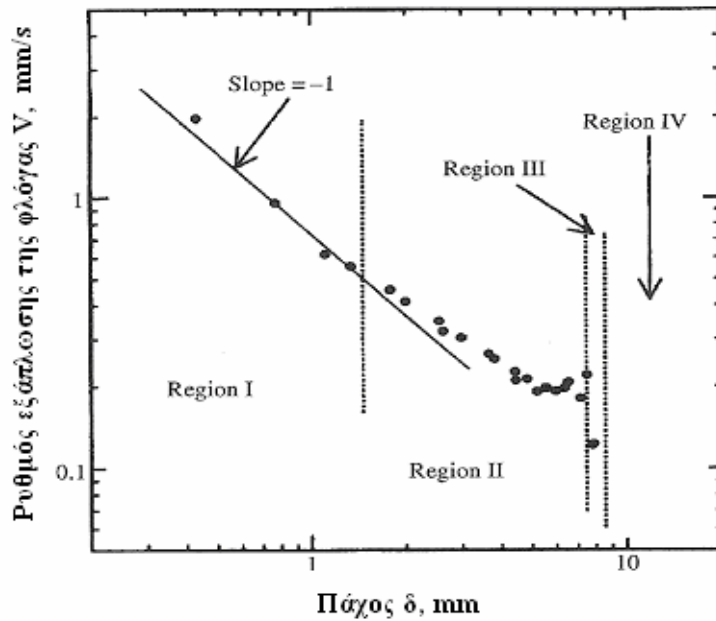
Αυτό το απέδειξαν οι Magee and McAlevy (1971), οι οποίοι χρησιμοποίησαν δεδομένα του Royal (1970) που αφορούσαν την καθοδική μετάδοση φλόγας σε κάθετα δοκίμια από 'λεπτά' καύσιμα σελιλόζης με πάχη μικρότερα των 1.5 mm (Σχήμα 1.1.5).



Σχήμα 1.1.5. Εξάρτηση του ρυθμού εξάπλωσης καθοδικής φλόγας σε κάθετα δοκίμια από λεπτά καύσιμα σελιλόζης συναρτήσεως του πάχους.

(Magee και McAlevy, 1971)

Γενικά, όσο το πάχος του υλικού αυξάνει, ο ρυθμός εξάπλωσης της φλόγας παύει να εξαρτάται από το πάχος. Ο Suzuki (1994) έδειξε ότι η εξάρτηση του ρυθμού μετάδοσης θερμότητας από το πάχος γίνεται λιγότερο αισθητή για πάχη μεγαλύτερα των 1.5 mm και ο ρυθμός καταλήγει να είναι σταθερός για πάχη στην περιοχή 5.0-7.5 mm (Σχήμα 1.1.6).



Σχήμα 1.1.6. Εξάρτηση του ρυθμού εξάπλωσης φλόγας συναρτήσει του πάχους του υλικού (Περιοχές I και II: σταθερή εξάπλωση, Περιοχή III: ασταθής εξάπλωση, Περιοχή IV: καθόλου εξάπλωση. (Suzuki, 1994)

Μεταβαίνοντας από ‘λεπτά’ σε ‘παχιά’ καύσιμα αντικείμενα, παρατηρείται μια σημαντική αλλαγή στον τρόπο με τον οποίο μεταφέρεται η θερμότητα μακριά από την φλόγα. Στα ‘λεπτά’ καύσιμα αντικείμενα εμφανίζεται μεταφορά θερμότητας λόγω αγωγής μέσω της αέριας φάσης, ενώ στα ‘παχιά’ καύσιμα αντικείμενα μέσω της στερεάς φάσης (Drysdale, 1999). Σημειώνεται ότι όσα αναφέρθηκαν παραπάνω αφορούν υλικά τα οποία δεν αλλάζουν την φυσική τους μορφή κατά τη διάρκεια της καύσης τους (π.χ. λιώσιμο του καύσιμου υλικού).

Ποκνότητα, θερμοχωρητικότητα και θερμική αγωγιμότητα

Σύμφωνα με τον Drysdale (1999), για ένα ‘λεπτό’ καύσιμο αντικείμενο, συμβολίζοντας με ρ την πυκνότητα του, με c την θερμοχωρητικότητά του και με τ το πάχος του, ισχύει ότι:

$$V \propto (\rho c \tau)^{-1} \quad (1.1.4)$$

δηλαδή, ο ρυθμός με τον οποίο διαδίδεται η φλόγα είναι αντιστρόφως ανάλογος με το γινόμενο των τριών παραπάνω μεγεθών.

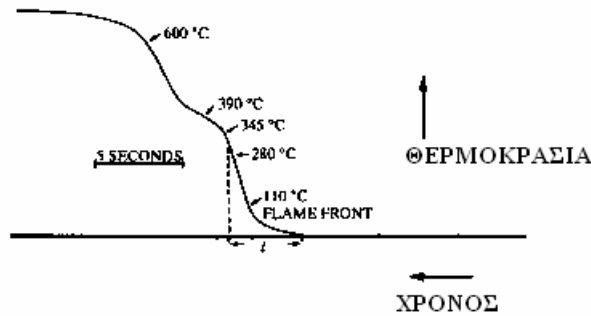
Η εξάρτηση του ρυθμού διάδοσης της φλόγας σε ένα ‘παχύ’ καύσιμο αντικείμενο από τις θερμικές ιδιότητές του, φαίνεται αν το πάχος τ αντικατασταθεί με την παρακάτω έκφραση του βάθους στο οποίο φτάνει η επίδραση των θερμικών φαινομένων στην επιφάνεια του υλικού (δ):

$$\delta = (\alpha l / V)^{0.5} \quad (1.1.5)$$

όπου το α ισούται με $k/\rho c$, ενώ l είναι το ‘μήκος θέρμανσης’. Ουσιαστικά, είναι το μήκος ενός δοκιμίου τοποθετημένου κάθετα στο μέτωπο της φλόγας από το οποίο και μετά η θερμοκρασία αυξάνεται από την θερμοκρασία περιβάλλοντος μέχρι την θερμοκρασία έναρξης της πυρόλυσης του συγκεκριμένου αντικειμένου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το μοντέλο που χρησιμοποίησε ο Parker (1972), ο οποίος χρησιμοποίησε ένα δοκίμιο από ‘λεπτό’ καύσιμο σελιλόζης του οποίου η θερμοκρασία έναρξης της πυρόλυσης είναι οι 280°C. Το ‘μήκος θέρμανσης’ για το συγκεκριμένο παράδειγμα απεικονίζεται στο σχήμα 1.1.7. Σημειώνεται ότι με k συμβολίζεται η θερμική αγωγιμότητα του υλικού, με ρ η πυκνότητά του και με c η ειδική του θερμοχωρητικότητα. Επομένως, προκύπτει:

$$V \propto \frac{1}{k \rho c} \quad (1.1.6)$$

δεδομένου ότι το l παραμένει σταθερό. Όπως είναι γνωστό, η θερμική αγωγιμότητα k ενός στερεού είναι ανάλογη της πυκνότητας του, άρα προκύπτει ότι ο ρυθμός διάδοσης της φλόγας εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από την πυκνότητα του καυσίμου ($V \propto \rho^{-2}$). Έτσι εξηγείται το γεγονός ότι τα εύφλεκτα υλικά με χαμηλή πυκνότητα συντελούν στην γρήγορη ανάπτυξη της φωτιάς, διότι αρκεί μια πολύ μικρή ποσότητά τους για να επιτραπεί στην φλόγα να εξαπλωθεί.



Σχήμα 1.1.7. Το ‘μήκος θέρμανσης’ για ένα δοκίμιο από ‘λεπτό’ καύσιμο σε λιλόζης.
(Parker, 1972)

Γεωμετρία του αντικειμένου

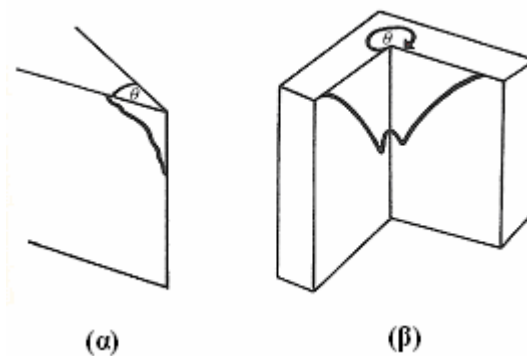
α) Πλάτος.

Το πλάτος του αντικειμένου επηρεάζει ελάχιστα ή καθόλου τον ρυθμό εξάπλωσης μιας κάθετης φλόγας με φορά προς τα κάτω. Αντίθετα, για μια φλόγα που εξαπλώνεται κάθετα και με φορά προς τα πάνω, ισχύει (Thomas, 1981):

$$V \propto (\text{πλάτος})^{0.5} \tag{1.1.7}$$

β) Παρουσία ακμών - γωνιών.

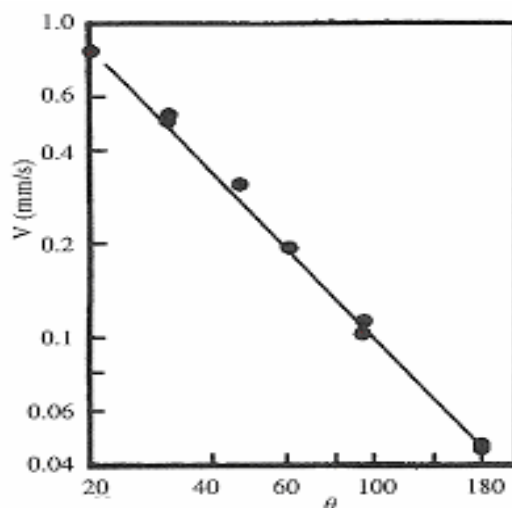
Η φλόγα διαδίδεται γρηγορότερα κατά μήκος μιας ακμής ή σε μια γωνία απ’ότι πάνω σε μία επίπεδη επιφάνεια. Βρέθηκε (Markstein και de Ris, 1972) ότι ο ρυθμός εξάπλωσης της φλόγας εξαρτάται από την γωνία θ , η οποία σε μια ακμή και σε μία γωνία ορίζεται όπως φαίνεται στο σχήμα 1.1.8.



Σχήμα 1.1.8. Ορισμός της γωνίας θ σε μία ακμή (α) και μια γωνία (β), αντίστοιχα.
(Markstein και de Ris, 1972)

Από τις πειραματικές μετρήσεις των Markstein και de Ris (1972) για διάφορες γωνίες μεταξύ των 20° και 180° βρέθηκε ότι ισχύει:

$$V \propto (\theta)^{4/3} \quad (1.1.8)$$



Σχήμα 1.1.9. Εξάρτηση του ρυθμού εξάπλωσης της φλόγας από την γωνία θ .
(Markstein και de Ris, 1972)

Όσο μικρότερη είναι η γωνία θ σε μία μεταξύ δύο ακμών, τόσο περισσότερο το στερεό αυτό πλησιάζει την συμπεριφορά του ‘λεπτού’ καυσίμου. Μάλιστα, για $\theta=180^\circ$, ο ρυθμός με τον οποίο εξαπλώνεται η φλόγα γίνεται ελάχιστος (Σχήμα 1.1.9).

Περιβαλλοντικοί παράγοντες

α) Σύνθεση της ατμόσφαιρας.

Τα εύφλεκτα υλικά ανφλέγονται πιο εύκολα και η φλόγα εξαπλώνεται γρηγορότερα αν η συγκέντρωση του οξυγόνου είναι υψηλή, όπως για παράδειγμα περιοχές όπου μπορούν να παραχθούν μεγάλες ποσότητες οξυγόνου τυχαία ή περοχές που μπορεί να είναι σκόπιμα πλούσιες σε οξυγόνο. Για να θεωρηθεί ότι μια περιοχή είναι πλούσια σε οξυγόνο πρέπει η μερική πίεση του οξυγόνου στην περιοχή αυτή να είναι μεγαλύτερη από αυτήν της κανονικής ατμόσφαιρας, δηλαδή μεγαλύτερη από 160mmHg (National Fire Protection Association, 1994). Γενικότερα, οποιαδήποτε

αύξηση της συγκέντρωσης του οξυγόνου στον αέρα συνοδεύεται από αύξηση του ρυθμού εξάπλωσης της φλόγας.

β) Θερμοκρασία του καυσίμου

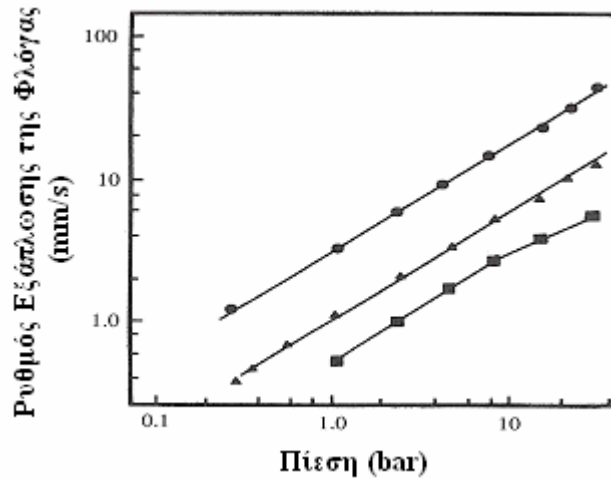
Αυξανόμενη της θερμοκρασίας του καυσίμου, αυξάνεται ο ρυθμός εξάπλωσης της φλόγας (Drysdale, 1999). Αυτό βέβαια είναι αναμενόμενο διότι όσο μεγαλύτερη είναι η αρχική θερμοκρασία του καυσίμου, τόσο λιγότερη θερμότητα απαιτείται ώστε το άκαυστο καύσιμο που βρίσκεται μακριά από το σημείο έναυσης της φωτιάς να αρχίσει να καίγεται.

γ) Μετάδοση θερμότητας μέσω ακτινοβολίας

Η μετάδοση θερμότητας μέσω ακτινοβολίας προκαλεί αύξηση στον ρυθμό εξάπλωσης της φλόγας, διότι με αυτόν τον τρόπο προθερμαίνεται το καύσιμο μακριά και από το μέτωπο της φλόγας. Όμως, ο αυξημένος ρυθμός καύσης πίσω από το μέτωπο της φλόγας οδηγεί στην εμφάνιση ισχυρότερων φλογών, οι οποίες αυξάνουν την μετάδοση θερμότητας μέσω ακτινοβολίας, ενισχύοντας έτσι την εξάπλωση της πυρκαγιάς (Drysdale, 1999).

δ) Ατμοσφαιρική πίεση.

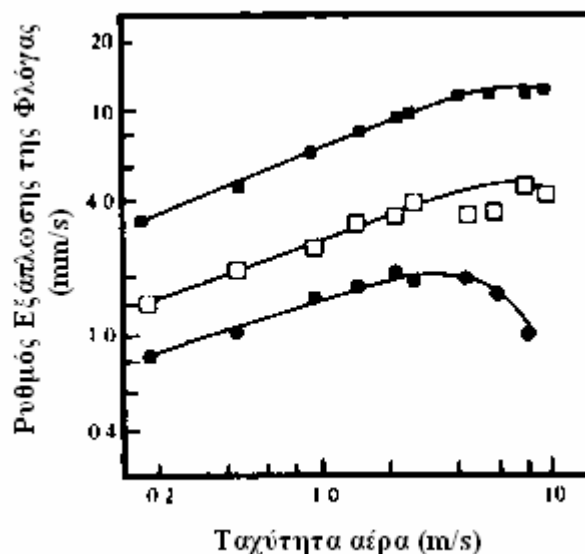
Έχει παρατηρηθεί ότι όταν η ατμοσφαιρική πίεση είναι αυξημένη, τότε ο ρυθμός εξάπλωσης της φλόγας είναι γρηγορότερος και αυτό οφείλεται στον εμπλουτισμό με οξυγόνο, το οποίο ενισχύει την σταθερότητα της φλόγας σε μια επιφάνεια. Το παραπάνω συμπέρασμα απεικονίζεται στο σχήμα 1.1.10, στο οποίο παρουσιάζεται ο ρυθμός εξάπλωσης της φλόγας συναρτήσει της ατμοσφαιρικής πίεσης για τρεις διαφορετικές τιμές της συγκέντρωσης του οξυγόνου. Να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα προέκυψαν από πειράματα των McAlevy και Magee (1969) σε οριζόντια δοκίμια από PMMA (Polymethyl methacrylate).



Σχήμα 1.1.10. Εξάρτηση του ρυθμού εξάπλωσης της φλόγας από την πίεση σε μείγματα οξυγόνου-αζώτου. Τα τετράγωνα αντιστοιχούν σε μείγμα με περιεκτικότητα 46% οξυγόνο, τα τρίγωνα σε 62% οξυγόνο και οι κύκλοι σε 100% οξυγόνο. (Magee και McAlevy, 1969)

ε) Κίνηση του αέρα.

Γενικά, όταν η κίνηση του αέρα έχει την ίδια κατεύθυνση με αυτή της φλόγας, ενισχύεται ο ρυθμός με τον οποίο αυτή εξαπλώνεται σε μια εύφλεκτη επιφάνεια. Αν όμως η κίνηση του αέρα αντιτίθεται στην εξάπλωση της φλόγας, τότε το πώς θα επηρεάσει την φλόγα εξαρτάται από την ταχύτητα του αέρα. Όταν ο αέρας κινείται με μεγάλη ταχύτητα, ο ρυθμός με τον οποίο εξαπλώνεται η φλόγα μειώνεται. Αν όμως η ταχύτητα του αέρα είναι σχετικά μικρή, η εξάπλωση της φλόγας ενισχύεται (Drysdale, 1999). Στο σχήμα 1.1.11 φαίνεται το πώς μεταβάλλεται ο ρυθμός εξάπλωσης της φλόγας συναρτήσει της ταχύτητας του αέρα για ροή αέρα αντίθετη από αυτή της φλόγας, για τρεις διαφορετικές συγκεντρώσεις οξυγόνου. Να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα προέκυψαν από πειράματα των McAlevy και Magee (1969) σε οριζόντια δοκίμια από PMMA.



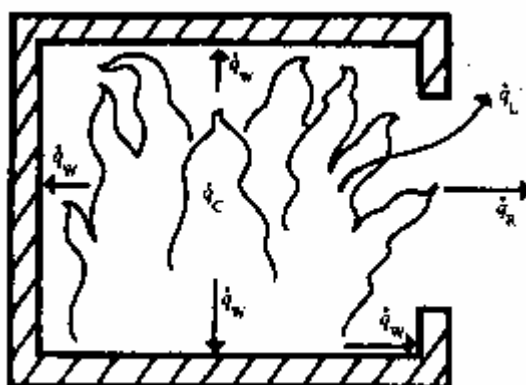
Σχήμα 1.1.11. Εξάρτηση του ρυθμού εξάπλωσης της φλόγας από την ταχύτητα του αέρα, για ροή αέρα αντίθετη από αυτή της φλόγας, σε μείγματα οξυγόνου-αζώτου. Τα τετράγωνα αντιστοιχούν σε μείγμα με περιεκτικότητα 46% οξυγόνο, τα τρίγωνα σε 62% οξυγόνο και οι κύκλοι σε 100% οξυγόνο. (Magee και McAlevy, 1969)

1.1.7. Πλήρως ανεπτυγμένη φωτιά

Μόλις η φωτιά αναπτυχθεί πλήρως, οι εκτεθειμένες επιφάνειες όλων των εύφλεκτων αντικειμένων που βρίσκονται κοντά σε αυτήν αρχίζουν να καίγονται και ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας αυξάνεται μέχρι μια μέγιστη τιμή, ενώ παράλληλα αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες. Συνήθως, αυτές οι θερμοκρασίες είναι κοντά στους 1100°C αλλά μπορεί να είναι και υψηλότερες υπό ορισμένες συνθήκες. Η θερμοκρασία διατηρείται σε αυτά τα επίπεδα μέχρι να μειωθεί ο ρυθμός έκλυσης εύφλεκτων πτητικών ως αποτέλεσμα της κατανάλωσης του καυσίμου. Κατά την περίοδο της πλήρως ανεπτυγμένης φωτιάς τα οικοδομικά υλικά προσεγγίζουν τις θερμοκρασίες οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν την μείωση της αντοχής τους. Η μείωση της αντοχής κάποιου υλικού, με την σειρά της, μπορεί να προκαλέσει τοπική ή ολική κατάρρευση του κτιρίου (Drysdale, 1999). Συνήθως, είναι γνωστό σε ποιά θερμοκρασία ένα υλικό χάνει μέρος της αντοχής του, όμως, το πόσο γρήγορα θα καταρεύσει εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως το φορτίο που δέχεται, η υποστήριξη που δέχεται από άλλα υλικά καθώς και η εξάρτηση των ιδιοτήτων του από την θερμοκρασία. Μια καλή μέθοδος για την προστασία αυτών των υλικών είναι

η χρήση κατάλληλου μονωτικού υλικού, το οποίο φέρει κάποια αντίσταση ενάντια στη φωτιά. Για παράδειγμα, ο οπλισμός που περιέχεται στο οπλισμένο σκυρόδεμα περιβάλλεται από το τσιμέντο, αν και το τσιμέντο εξασθενεί όταν υπόκειται σε υψηλές θερμοκρασίες (π.χ. αφυδάτωση ή απώλεια του κρυσταλλικού νερού).

Όσον αφορά την θερμότητα που εκλύεται λόγω της καύσης, οι Petterson *et al.* (1976) θεώρησε ένα δωμάτιο απλής γεωμετρίας, όπως αυτό του σχήματος 1.1.12, στο οποίο παρουσιάζονται οι διάφορες μορφές ροής θερμότητας.



Εικόνα 1.1.12. Απώλειες θερμότητας κατά τη διάρκεια μιας πλήρως ανεπτυγμένης φωτιάς σε ένα δωμάτιο. (Petterson *et al.*, 1976).

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίοδος κατά την οποία μπορεί να εμφανιστεί μείωση της αντοχής των δομικών υλικών του κτιρίου και επομένως, το στάδιο πριν την έκλαμψη μπορεί να αμεληθεί, λόγω των σχετικά χαμηλών θερμοκρασιών. Στο δωμάτιο η θερμική ισορροπία εκφράζεται ως εξής:

$$\dot{q}_C = \dot{q}_L + \dot{q}_W + \dot{q}_R + \dot{q}_B \quad (1.1.9)$$

όπου:

\dot{q}_C = ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας λόγω της καύσης,

\dot{q}_L = ο ρυθμός απώλειας θερμότητας λόγω της αντικατάστασης των θερμών αερίων με ψυχρά,

\dot{q}_W = ο ρυθμός απώλειας θερμότητας μέσω των τοίχων, της οροφής και του πατώματος,

\dot{q}_R = ο ρυθμός απώλειας θερμότητας με ακτινοβολία από τα ανοίγματα,

q_B = ο ρυθμός αποθήκευσης θερμότητας στον όγκο που καταλαμβάνει το αέριο (συνήθως αμελείται).

1.1.8. Παραγωγή και κίνηση καπνού

Ο καπνός, ουσιαστικά, είναι διάφορα σωματίδια άκαυστου άνθρακα που οφείλονται σε ατελή καύση. Εκτός από πολύ λίγες εξαιρέσεις, σε όλες τις φωτιές παρατηρείται παραγωγή καπνού. Ο καπνός προκαλεί μείωση της ορατότητας, με αποτέλεσμα να δυσκολεύεται η εκκένωση ενός κτιρίου, προκαλώντας επιμήκυνση του χρόνου κατά τον οποίο οι ένοικοι είναι εκτεθειμένοι στα προϊόντα της καύσης. Τα προϊόντα της καύσης αποτελούν πολλές φορές ένα εξαιρετικά σύνθετο μείγμα χημικών ενώσεων, μερικές από τις οποίες είναι ικανές να προκαλέσουν ακόμα και το θάνατο, είτε λόγω μικρής χρονικής έκθεσης σε υψηλής συγκέντρωσης δηλητηριώδη αέρια, όπως για παράδειγμα το μονοξείδιο του άνθρακα, είτε λόγω μεγάλης χρονικής έκθεσης σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις. Αυτό που είναι σημαντικό είναι η δόση του αερίου που εισπνέεται, δηλαδή η συγκέντρωση των προϊόντων κάθε χρονική στιγμή. Αν η συγκέντρωση αυτή ξεπερνά κάποια συγκεκριμένη τιμή (Purser, 1995), τότε η εκκένωση ενός χώρου χωρίς εξωτερική βοήθεια είναι αδύνατη. Η διάρκεια της έκθεσης μεγαλώνει εάν η ορατότητα είναι περιορισμένη ή αν τα προϊόντα της καύσης προκαλούν ερεθισμούς στα μάτια και την αναπνοή.

Υπάρχουν δύο ξεχωριστά στάδια όσον αφορά τον καπνό που παράγεται (Drysdale, 1999):

1. Τα πρώτα στάδια της φωτιάς, όπου η φωτιά είναι μικρή σε μέγεθος και καίγεται μόνο ένα αντικείμενο.
2. Η πλήρως ανεπτυγμένη φωτιά (αφού έχει παρατηρηθεί έκλαμψη), όπου καίγονται όλα τα αντικείμενα σε ένα δωμάτιο.

Όσον αφορά το πρώτο στάδιο, αυτό σχετίζεται με την ανίχνευση του καπνού σε ένα δωμάτιο. Στο δεύτερο στάδιο, παράγονται μεγάλες ποσότητες καπνού που είναι ικανές να μετατρέψουν σε μη προσβάσιμα, ακόμα και σημεία τα οποία βρίσκονται μακριά από την φωτιά.

Αυτό που έχει ιδιαίτερη σημασία κατά την εξάπλωση μιας πυρκαγιάς σε ένα κτίριο είναι οι λόγοι κίνησης του καπνού και ο τρόπος κίνησής του από την στιγμή που

αρχίζει να παράγεται. Ο καπνός, όπως συμβαίνει και με κάθε ρευστό, κινείται λόγω της επίδρασης δυνάμεων που ασκούνται σε ολόκληρο τον όγκο του. Τέτοιες δυνάμεις δημιουργούνται από (Drysdale, 1999):

- την άνωση που δημιουργείται άμεσα από την φωτιά,
- την άνωση που προκύπτει από διαφορές ανάμεσα στην εσωτερική και την εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος,
- την επίδραση εξωτερικών ανέμων και την κίνηση του αέρα,
- το σύστημα διακίνησης του αέρα μέσα στο κτίριο.

Σχετικά με τον τρόπο κίνησης του καπνού, παρατηρούνται τα εξής (Drysdale, 1999): Κατά τα πρώτα στάδια μιας φωτιάς, τα προϊόντα της καύσης αρχίζουν να αραιώνουν καθώς κινούνται κάθετα με φορά προς τα πάνω ώσπου να φτάσουν στην οροφή. Ο θερμός καπνός κινείται στη συνέχεια οριζόντια ώσπου να συναντήσει κάποιο άνοιγμα και να συνεχίσει την ανοδική του πορεία ή, όπως είναι πιο πιθανό, ώσπου να συναντήσει κάποιο εμπόδιο, όπως για παράδειγμα έναν τοίχο, το οποίο θα τον αναγκάσει να σταματήσει την πορεία του. Έτσι, το στρώμα καπνού που είχε δημιουργηθεί αρχίζει να γίνεται πιο πυκνό και να εκτείνεται πιο χαμηλά, ενώ ο όγκος που καταλαμβάνει ο καπνός περιορίζεται από την οροφή και τους τοίχους του δωματίου. Ο ρυθμός με τον οποίο πυκνώνει αυτό το στρώμα καπνού εξαρτάται εν μέρει από τον ρυθμό της καύσης, αλλά κυρίως εξαρτάται από την ποσότητα αέρα που εισάγεται στο πλούμιο της φωτιάς (fire plume).

1.2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΓΥΨΟΣΑΝΙΔΩΝ

1.2.1. Εισαγωγή

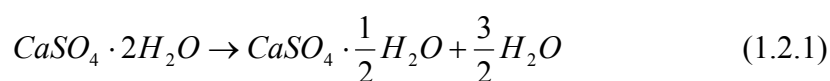
Οι γυψοσανίδες χρησιμοποιούνται ευρέως ως οικοδομικά υλικά σε ολόκληρο τον κόσμο. Κατασκευάζονται και διαμορφώνονται εύκολα, ενώ η πρώτη ύλη από την οποία παράγονται είναι ο γύψος, ο οποίος είναι διαθέσιμος σε μεγάλες ποσότητες ανά τον κόσμο. Χρησιμοποιούνται στην κατασκευή τοίχων και οροφών και αποτελούν ένα υλικό το οποίο είναι αισθητικά όμορφο και φιλικό προς το περιβάλλον. Το πιο σημαντικό πλεονέκτημα που προσφέρουν οι γυψοσανίδες είναι ότι παρέχουν προστασία έναντι πυρκαγιάς. Η ικανότητα τους να επιβραδύνουν την επέκταση της φωτιάς καθώς αυτή προσεγγίζει έναν τοίχο οφείλεται στις θερμοφυσικές ιδιότητές τους, οι οποίες προκαλούν πτώση της θερμοκρασίας στον τοίχο. Όταν η γυψοσανίδα είναι εκτεθειμένη σε φωτιά, το ελεύθερο νερό που περιέχει (υπό τη μορφή υγρασίας), καθώς και το κρυσταλλικό νερό εξατμίζονται και μετακινούνται απορροφώντας μεγάλα ποσά θερμότητας με αποτέλεσμα να ελαττώνεται η θερμοκρασία του τοίχου. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό από άποψη ασφάλειας, καθώς προσφέρει επαρκή χρόνο για την εκκένωση ενός κτιρίου (Axenenko και Thorpe, 1995).

1.2.2. Συμπεριφορά γυψοσανίδας έναντι πυρκαγιάς

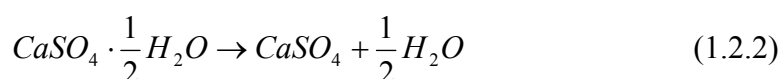
Η γυψοσανίδα αποτελείται κυρίως από γύψο, ενώ περιέχει επίσης ελεύθερο νερό υπό τη μορφή υγρασίας. Η συμπεριφορά του γύψου στις πυρκαγιές μελετάται από το 1960 περίπου (Ryan, 1962). Ο καθαρός γύψος στην φυσική του μορφή είναι ουσιαστικά ένα ορυκτό με κρυσταλλική μορφή, το οποίο περιέχει κρυσταλλικό νερό σε ποσοστό 21% κατά βάρος (Ang και Wang, 2004) και έχει χημικό τύπο $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (διωδρίτης θειικού ασβεστίου) (Thomas, 2002). Οι βιομηχανίες παραγωγής γυψοσανίδων προσθέτουν διάφορες χημικές ενώσεις (σε μικρές ποσότητες) για να αυξήσουν την απόδοσή του όταν είναι εκτεθειμένος σε υψηλές θερμοκρασίες.

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της γυψοσανίδας είναι η συμπεριφορά της έναντι πυρκαγιάς. Όταν μια γυψοσανίδα είναι εκτεθειμένη σε μία πηγή θερμότητας, το κρυσταλλικό νερό αποσπάται από το κρυσταλλικό πλέγμα και

ατμοποιείται (Thomas, 2002),. Κατά την θέρμανσή της, η γυψοσανίδα υφίσταται δύο ενδόθερμες αντιδράσεις αποσύνθεσης. Αυτές οι δύο αντιδράσεις, οι οποίες συνοδεύονται από απορρόφηση ενός μεγάλου ποσού ενέργειας, προκαλούν την επιβράδυνση του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας μέσα στη γυψοσανίδα. Η πρώτη αντίδραση που λαμβάνει χώρα είναι η διάσπαση του διυδρίτη σε ημιυδρίτη:



Αυτή η αντίδραση ξεκινάει περίπου στους 80°C, με έναν αργό ρυθμό, και κορυφώνεται περίπου στους 120°C, ενώ ολοκληρώνεται πριν από τους 160°C. Το προϊόν που προκύπτει ονομάζεται ημιυδρίτης θειϊκού ασβεστίου, το οποίο με την σειρά του αφυδατώνεται. Αυτή η δεύτερη αντίδραση λαμβάνει χώρα περίπου στους 200-300°C και περιγράφεται ως εξής:

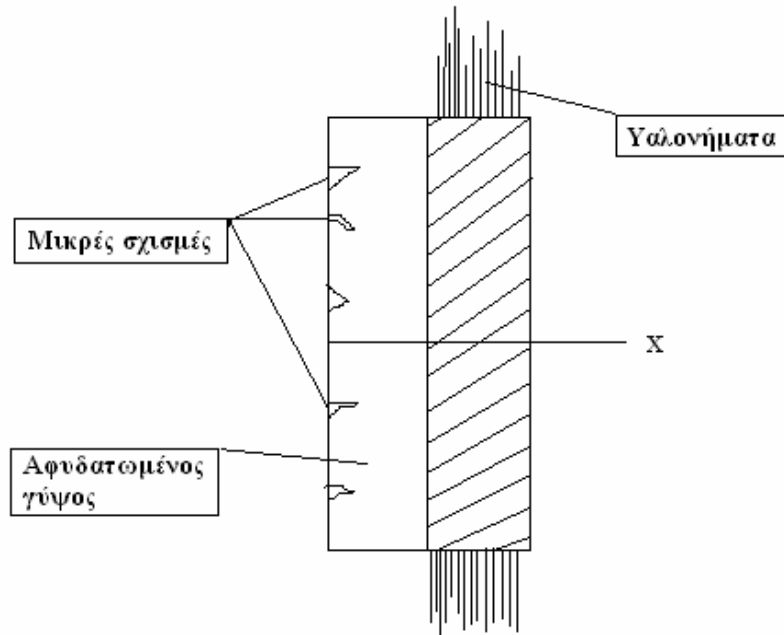


Το προϊόν που προκύπτει ονομάζεται ανυδρίτης θειϊκού ασβεστίου και έχει τη μορφή μιας ξηρής και μη συνεκτικής σκόνης η οποία μετά αποσπάται από την γυψοσανίδα. Για την επιβράδυνση αυτής ακριβώς της διαδικασίας χρησιμοποιούνται υαλονήματα (fiberglass) ως πρόσθετα.

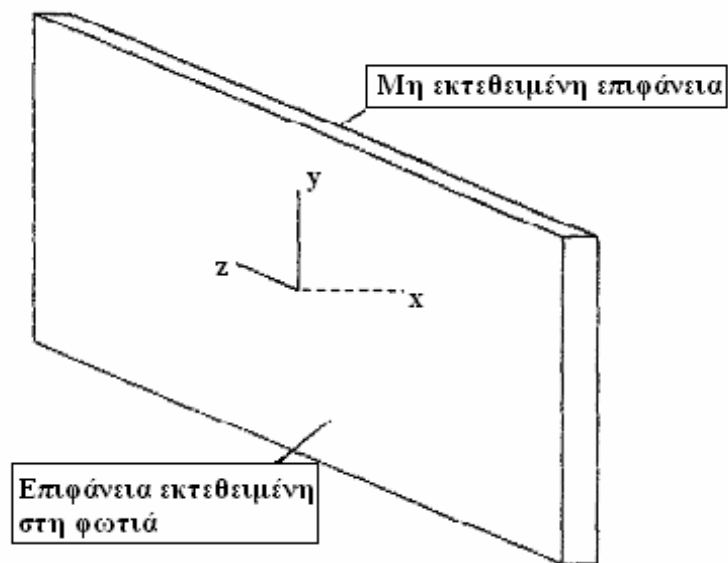
Επίσης, αξίζει να αναφερθεί ότι γύρω στους 800°C λαμβάνει χώρα η αποσύνθεση του ανθρακικού ασβεστίου ($CaCO_3$), η οποία περιγράφεται από την αντίδραση (Wakili *et al.*, 2007):



Για να γίνει περισσότερο κατανοητό το πώς ακριβώς λειτουργεί σαν μονωτικό υλικό η γυψοσανίδα σε περίπτωση πυρκαγιάς, θεωρείται ότι ένα φύλλο γυψοσανίδας έχει την μορφή που φαίνεται στα σχήματα 1.2.1 και 1.2.2 (Axenenko και Thorpe, 1995)



Σχήμα 1.2.1. Τομή ενός φύλλου γυψοσανίδας. (Axenenko και Thorpe, 1995)



Σχήμα 1.2.2. Τυπική μορφή ενός φύλλου γυψοσανίδας. (Axenenko και Thorpe, 1995)

Έστω, ότι το φύλλο αυτό θερμαίνεται από την μία μόνο πλευρά, όπως φαίνεται και στο σχήμα. Κατά την κατεύθυνση της μεταφοράς θερμότητας είναι ορατές δύο σαφώς διαχωρισμένες ζώνες. Η αριστερή ζώνη δεν περιέχει καθόλου ίνες γυαλιού, αλλά περιέχει μικρές σχισμές (microcracks). Από την άλλη πλευρά, η δεξιά ζώνη είναι γεμάτη από ολόκληρες ίνες γυαλιού. Τα πάχη αυτών των δύο ζωνών μπορούν

να μετρηθούν εύκολα ακριβώς επειδή οι δύο ζώνες είναι ευκρινώς διαχωρισμένες. Επομένως, δικαιολογείται να αποκαλούνται ‘αφυδατωμένη’ (αριστερή) και ‘μη-αφυδατωμένη’ (δεξιά) ζώνη αντίστοιχα. Η αφυδάτωση και η ατμοποίηση λαμβάνουν χώρα στο όριο που χωρίζει τις δύο ζώνες, το οποίο ονομάζεται ‘μέτωπο αφυδάτωσης’ (dehydration front). Όσο περνάει ο χρόνος, το μέτωπο αυτό μετακινείται από την πλευρά της γυψοσανίδας που είναι εκτεθειμένη στην φωτιά προς την άλλη πλευρά, αφήνοντας πίσω του το αφυδατωμένο υλικό. Όταν φτάσει στην δεξιά επιφάνεια η διαδικασία της ατμοποίησης ολοκληρώνεται.

1.2.3. Θερμικές ιδιότητες

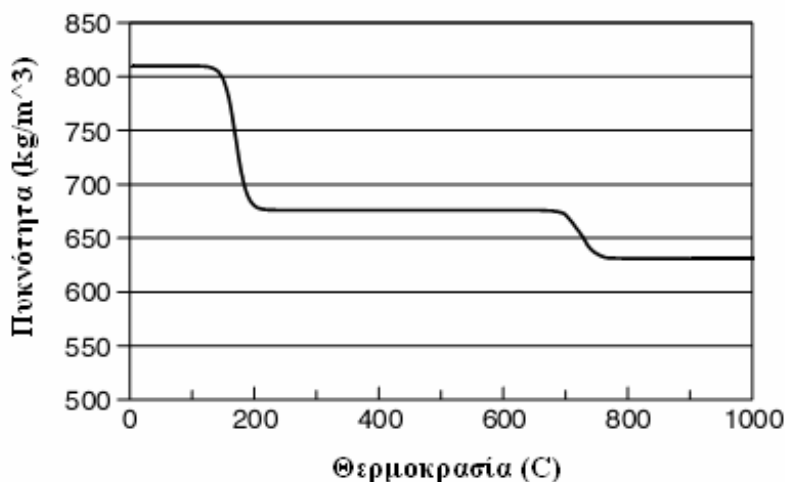
Οι θερμικές ιδιότητες της γυψοσανίδας σε υψηλές θερμοκρασίες δεν είναι πλήρως γνωστές όπως συμβαίνει με άλλα υλικά. Οι ιδιότητες αυτές είναι δύσκολο να μετρηθούν διότι η μετρητική μέθοδος που χρησιμοποιείται κάθε φορά επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα που προκύπτουν. Οι τιμές αυτές επηρεάζονται επίσης και από τις αλλαγές της θερμοκρασίας. Στη συνέχεια αναφέρονται κάποιες ιδιότητες της γυψοσανίδας και δίνονται κάποιες ενδεικτικές τιμές γι’ αυτές.

Πυκνότητα

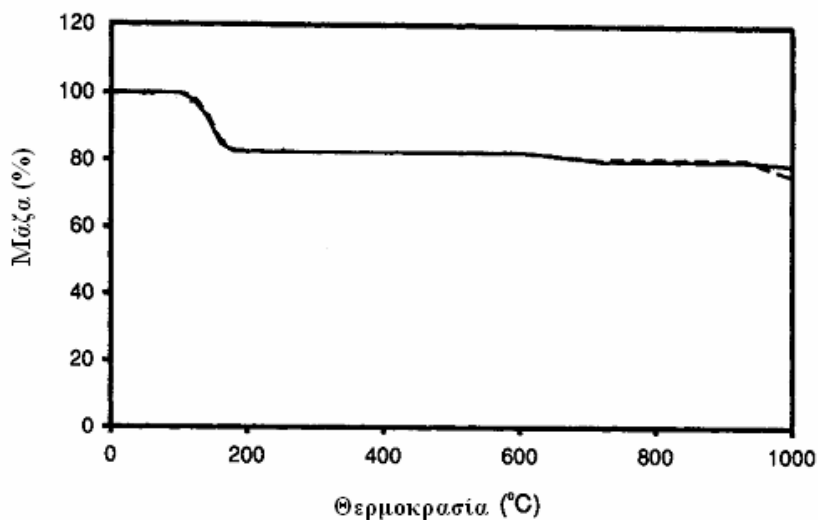
Η πυκνότητα της γυψοσανίδας δεν έχει κάποια σταθερή τιμή και μεταβάλλεται συναρτήσει της θερμοκρασίας λόγω της εξάτμισης του νερού που περιέχει (Wakili *et al.*, 2007). Στο σχήμα 1.2.3 παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές της πυκνότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας της γυψοσανίδας, όπου φαίνονται και τα δύο βήματα αφυδάτωσης. Επίσης, στο σχήμα 1.2.4 απεικονίζεται το ποσοστό της αρχικής πυκνότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας για δύο είδη γυψοσανίδας, τύπου X και τύπου C (Mehaffey *et al.*, 1994).

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, η γυψοσανίδα είναι ένα προϊόν το οποίο αποτελείται κυρίως από ένα μη εύφλεκτο υλικό, τον γύψο. Η γυψοσανίδα τύπου X έχει έναν ειδικά διαμορφωμένο πυρήνα ο οποίος παρέχει μεγαλύτερη αντίσταση στη φωτιά απ’ ότι μια συμβατική γυψοσανίδα με το ίδιο πάχος, ενώ θεωρείται ότι η γυψοσανίδα τύπου C έχει ακόμα καλύτερη επίδοση στη φωτιά. Μια τυπική τιμή της

πυκνότητας για γυψοσανίδα τύπου X με πάχος 15,9 mm είναι 648 kg/m^3 ενώ για μια γυψοσανίδα τύπου C με πάχος 12,7 mm είναι 732 kg/m^3 .



Σχήμα 1.2.3. Πυκνότητα συναρτήσει της θερμοκρασίας της γυψοσανίδας.
(Wakili *et al.*, 2007)



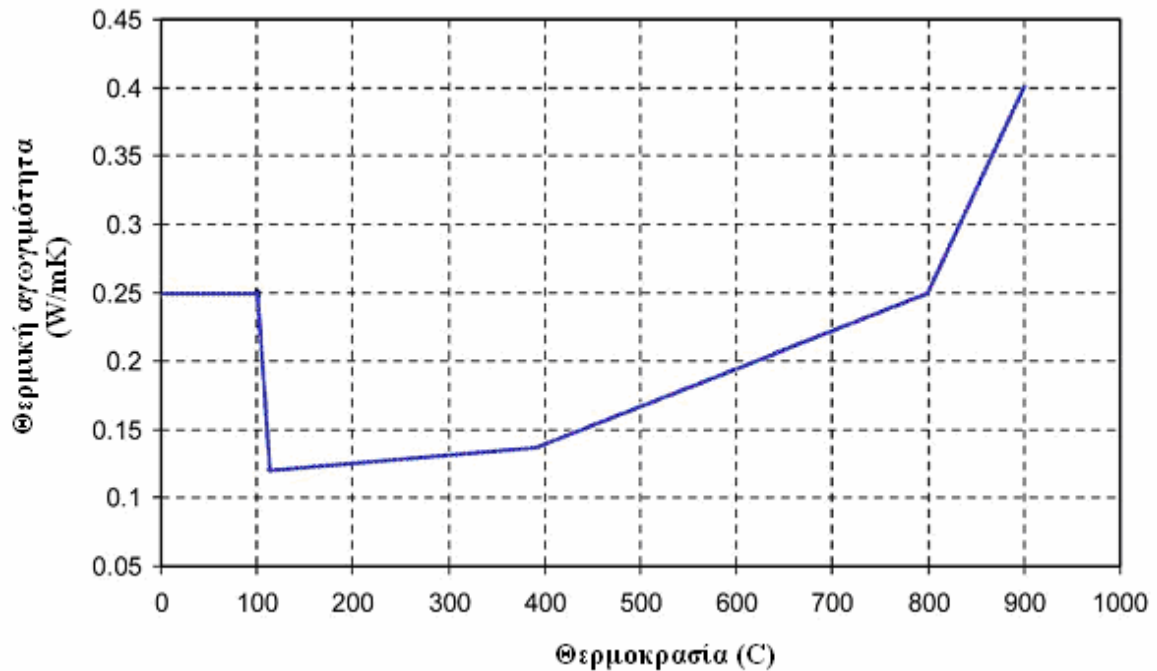
Σχήμα 1.2.4. Μάζα (πυκνότητα) συναρτήσει της θερμοκρασίας της γυψοσανίδας
(τύπου X – ενιαία γραμμή, τύπου C – διακεκομμένη γραμμή). (Mehaffey *et al.*, 1994)

Θερμική αγωγιμότητα

Έχουν γίνει προσπάθειες από διάφορους ερευνητές για να προσδιοριστεί ο τρόπος μεταβολής της θερμικής αγωγιμότητας μιας γυψοσανίδας συναρτήσει της θερμοκρασίας. Για παράδειγμα, ο Harmathy (1988) χρησιμοποίησε μια τεχνική στην

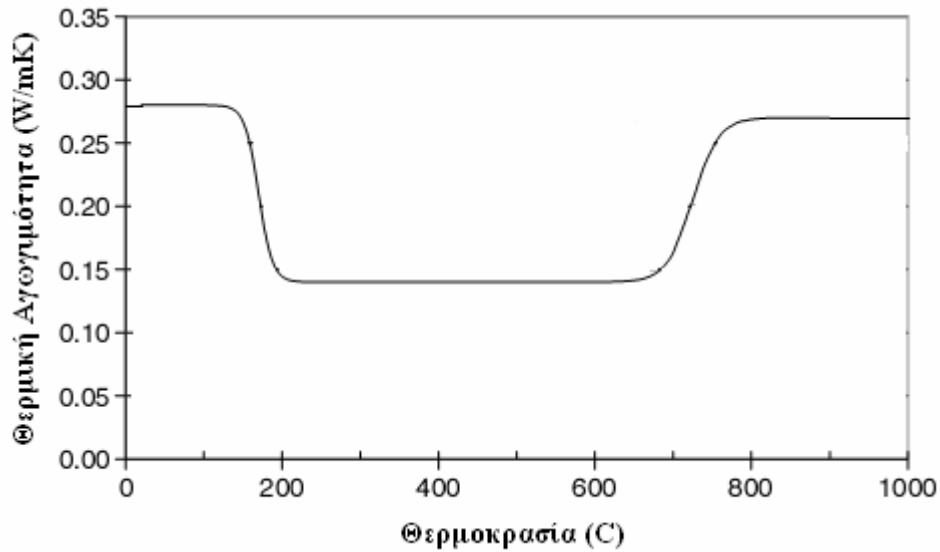
οποία η θερμοκρασία μεταβάλεται ελάχιστα κάθε φορά που γίνεται μια μέτρηση. Το σφάλμα της μέτρησης με τη χρήση αυτής της μεθόδου είναι περίπου 7%. Οι Anderson και Jansson (1987) χρησιμοποίησαν την μέθοδο THS (Transient Hot Strip) για να προσδιορισθούν τις τιμές της θερμικής αγωγιμότητας. Με τη μέθοδο αυτή γίνεται μέτρηση της αντίστασης ενός μεταλλικού φύλλου, το οποίο είναι ενσωματωμένο στην γυψοσανίδα, μέσω της οποίας υπολογίζεται η αγωγιμότητα. Τέλος, ο Mehaffey (1994) χρησιμοποίησε ένα μετρητικό όργανο, το οποίο χρησιμοποιεί την ανάλυση μόνιμης κατάστασης, για τον υπολογισμό της αγωγιμότητας. Οι πειραματικές δοκιμές αφορούσαν γυψοσανίδες τύπου C, με πάχος 12.7 mm και τύπου X, με πάχος 15.9 mm, οι οποίες είναι και οι δύο ενισχυμένες με ίνες. Στην περίπτωση αυτή, προκειμένου να ληφθεί υπ' όψιν αύξηση της αγωγιμότητας λόγω του ανοίγματος των σχισμών στον γύψο σε υψηλές θερμοκρασίες και λόγω της αποκόλλησης, έγινε χρήση τροποποιημένων τιμών αγωγιμότητας πάνω από τους 500°C, η οποία αυξάνεται γραμμικά μέχρι την τιμή 0.6 W/mK στους 1000°C. Στην συνέχεια, για την γυψοσανίδα τύπου X, στους 1000°C η αγωγιμότητα ανεβαίνει απότομα στα 0.775 W/mK και έπειτα, ακολουθώντας μια γραμμική μεταβολή φτάνει τα 10 W/mK στους 4000°C. Αυτές οι υψηλές τιμές λαμβάνουν υπ' όψιν την αποκόλληση αλλά αγνοούν την μεταφορά θερμότητας λόγω της εξάτμισης της υγρασίας και της περαιτέρω συμπύκνωσής της μακριά από την πηγή θερμότητας.

Στο σχήμα 1.2.5 παρουσιάζονται οι τιμές της θερμικής αγωγιμότητας της γυψοσανίδας συναρτήσει της θερμοκρασίας μέχρι τους 900°C περίπου, με βάση τις μετρήσεις του Mehaffey (1994).



Σχήμα 1.2.5. Θερμική αγωγιμότητα συναρτήσεως της θερμοκρασίας της γυψοσανίδας.
(Ang και Wang, 2004)

Τέλος, σύμφωνα με μια πιο σύγχρονη μελέτη που έγινε από τους Wakili *et al.* (2007), η θερμική αγωγιμότητα συναρτήσεως της θερμοκρασίας φαίνεται στο σχήμα 1.2.6. Σε αυτό το σχήμα, φαίνονται δύο διακριτά βήματα. Το πρώτο βήμα (περίπου στους 200°C) οφείλεται στην αφυδάτωση του διυδρίτη του θειϊκού ασβεστίου, ενώ το δεύτερο (περίπου στους 700°C) στην αποσύνθεση του ανθρακικού ασβεστίου. Αυτό σημαίνει ότι η πρώτη τιμή στα αριστερά αντιστοιχεί στην γυψοσανίδα στην αρχική της μορφή, δηλαδή διυδρίτης θειϊκού ασβεστίου και ανθρακικό ασβέστιο ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$ και $CaCO_3$). Οι τιμές μετά το πρώτο βήμα αφορούν το αφυδατωμένο προϊόν, το οποίο αποτελείται από ανυδρίτη θειϊκού ασβεστίου και ανθρακικό ασβέστιο ($CaSO_4$ και $CaCO_3$) και τέλος, η τιμή μετά το δεύτερο βήμα αφορούν το προϊόν που προκύπτει μετά την αποσύνθεση του ανθρακικού ασβεστίου, το οποίο αποτελείται από ανυδρίτη θειϊκού ασβεστίου και οξείδιο του ασβεστίου ($CaSO_4$ και CaO).



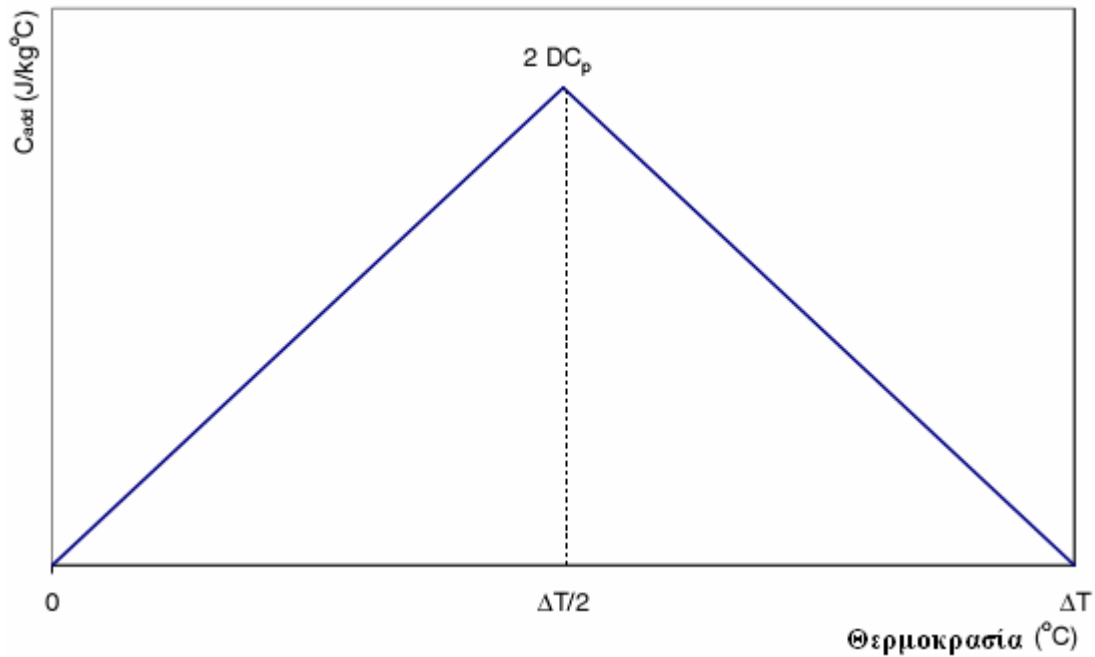
Σχήμα 1.2.6. Θερμική αγωγιμότητα συναρτήσεως της θερμοκρασίας της γυψοσανίδας. (Wakili *et al.*, 2007)

Ειδική θερμοχωρητικότητα

Η πιο συνηθισμένη τιμή για την ειδική θερμοχωρητικότητα της γυψοσανίδας είναι 950 J/kgK (Mehaffey *et al.*, 1994). Αν και για την σωστή μελέτη των υλικών σε συνθήκες φωτιάς είναι απαραίτητη η συνδυασμένη ανάλυση μεταφοράς θερμότητας και μάζας, συνήθως στις περισσότερες μεθόδους δεν συμπεριλαμβάνεται η μεταφορά μάζας. Στην περίπτωση της γυψοσανίδας, η μεταφορά μάζας περιλαμβάνει την μετακίνηση του νερού και την περαιτέρω συμπύκνωση ή ατμοποίησή του. Μια απλή μέθοδος είναι η μετατροπή της ενέργειας που καταναλώνεται για την απομάκρυνση του νερού σε πρόσθετη ειδική θερμοχωρητικότητα (Ang και Wang, 2004). Έτσι, στην περίπτωση που λαμβάνεται υπ' όψιν μόνο η μεταφορά θερμότητας, η 'ενεργός' τιμή της θερμοχωρητικότητάς της θα δίνεται από την σχέση:

$$C_p = C_{p,dry} + C_{add} \quad (1.2.4)$$

όπου $C_{p,dry} = 950$ J/kgK και C_{add} είναι η πρόσθετη ειδική θερμοχωρητικότητα που απαιτείται για την απομάκρυνση του νερού και η οποία υπολογίζεται από το σχήμα 1.2.7.



Σχήμα 1.2.7. Πρόσθετη ειδική θερμοχωρητικότητα συναρτήσει της θερμοκρασίας της γυψοσανίδας. (Ang και Wang, 2004)

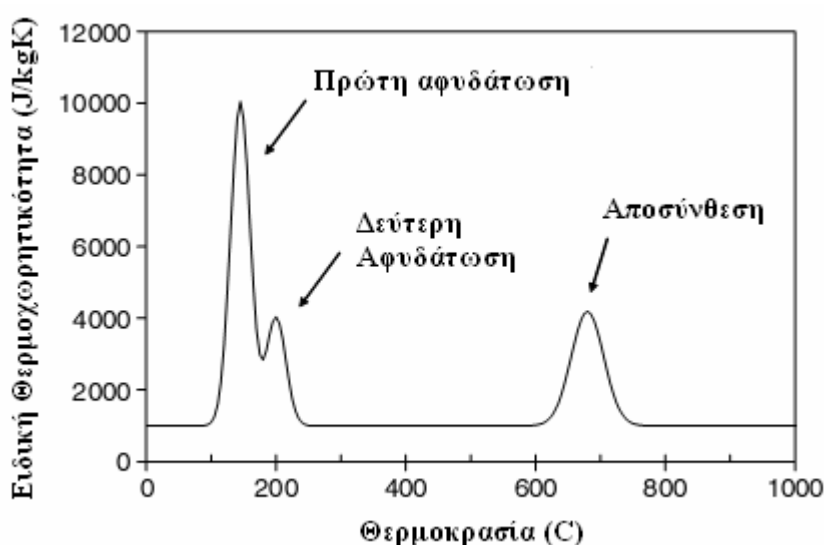
Η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης του νερού είναι 2.26×10^6 J/kg. Δεδομένου ότι το νερό που βρίσκεται σε μια γυψοσανίδα αποτελείται από δύο μέρη, το ελεύθερο και το κρυσταλλικό νερό, η αντίστοιχη μέση πρόσθετη ειδική θερμοχωρητικότητα προσδιορίζεται από τη σχέση (Ang και Wang, 2004):

$$DC_p = \frac{2.26 \times 10^6}{\Delta T} (e_d f_1 + e_{free}) f_2 \quad (1.2.5)$$

όπου e_d είναι το ποσοστό του αφυδατωμένου νερού κατά βάρος, δηλαδή $e_d = 0.75 \times 0.21 = 0.1575$ για την πρώτη αντίδραση αφυδάτωσης και $e_d = 0.25 \times 0.21 = 0.0525$ για την δεύτερη αντίδραση. Με e_{free} συμβολίζεται το ποσοστό του ελεύθερου νερού κατά βάρος και είναι $e_{free} = 0.03$ για την πρώτη αντίδραση και $e_{free} = 0$ για την δεύτερη, ενώ ΔT είναι το εύρος της θερμοκρασίας εξάτμισης. Υπενθυμίζεται ότι η θερμοκρασία στην πρώτη αντίδραση κυμαίνεται από 95°C μέχρι 155°C ενώ στην δεύτερη από 200°C μέχρι 220°C . Οι συντελεστές f_1 και f_2 είναι δύο διορθωτικοί παράγοντες που χρησιμοποιούνται, ο μὲν f_1 για να ληφθεί υπ' όψιν η ενέργεια που απαιτείται για την χημική αντίδραση κατά την αφυδάτωση, ο δε f_2 για την ερμηνεία του αποτελέσματος που προκαλεί η κίνηση του νερού και η συμπεκνωσή του στην

ψυχρή περιοχή της γυψοσανίδας. Σημειώνεται, τέλος, ότι ο f_1 παίρνει την τιμή 1.28 για την πρώτη αντίδραση και 1.42 για την δεύτερη, ενώ ο f_2 , για συντελεστή διαπερατότητας ίσο με 5×10^{-9} m/s, μπορεί να πάρει τις τιμές 1.4, 1.48 και 1.7 (Ang και Wang, 2004).

Σύμφωνα με τους Wakili *et al.* (2007), η κατανάλωση ενέργειας λόγω των δύο αντιδράσεων αφυδάτωσης που γίνονται στη γυψοσανίδα, καθώς και η αποσύνθεση του ανθρακικού ασβεστίου, δεν διατηρούν σταθερή την τιμή της ειδικής θερμοχωρητικότητας στα 950 J/kg °C, αλλά προκαλούν την αύξησή της στις αντίστοιχες θερμοκρασίες όπου λαμβάνουν χώρα (Σχήμα 1.2.8).



Σχήμα 1.2.8. Ειδική θερμοχωρητικότητα γυψοσανίδας συναρτήσει της θερμοκρασίας της. (Wakili *et al.*, 2007)

Ενθαλπία

Η ενθαλπία της γυψοσανίδας προσδιορίζεται από το εμβαδόν της περιοχής που περιλαμβάνεται κάτω από την καμπύλη της ειδικής θερμότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας (Mehaffey *et al.*, 1994). Έτσι, η σχέση που δίνει την ενθαλπία είναι η εξής:

$$H(T) = \int_{T_a}^T C_p(T) dT \quad (1.2.6)$$

όπου $H(T)$ είναι η ενθαλπία σε J/kg στην θερμοκρασία T , $C_p(T)$ είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα στην θερμοκρασία T , T είναι η μεταβλητή της ολοκλήρωσης και T_a είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος. Να σημειωθεί ότι σε αυτή την έκφραση της ενθαλπίας περιλαμβάνεται και η συνεισφορά λόγω της εξάτμισης του νερού που αναφέρθηκε παραπάνω.

Η δισδιάστατη μερική διαφορική εξίσωση που περιγράφει την μεταφορά θερμότητας διαμέσου μιας γυψοσανίδας είναι η εξής (Mehaffey *et al.*, 1994):

$$\rho C_{t,p} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k \frac{\partial T}{\partial y} \right] + Q \quad (1.2.7)$$

όπου T είναι η θερμοκρασία (K), ρ η πυκνότητα (kg/m^3), $C_{t,p}$ η ‘αισθητή’ ειδική θερμοχωρητικότητα (J/kgK), k η θερμική αγωγιμότητα (W/mK), Q ο ρυθμός παραγωγής/κατανάλωσης ενέργειας ανά μονάδα όγκου (W/m^3), t ο χρόνος (s) και x και y οι χωρικές συντεταγμένες (m).

Εάν είναι γνωστή η τιμή της απορρόφησης ενέργειας Q , η παραπάνω εξίσωση μπορεί να λυθεί με αριθμητικές μεθόδους. Κατά κανόνα, η απορρόφηση ενέργειας Q λόγω μιας χημικής αντίδρασης απεικονίζεται μέσω της έκφρασης του Arrhenius. Όμως, οι πληροφορίες που υπάρχουν σχετικά με τους συντελεστές A και E_A που απαιτούνται για αυτήν τη σχέση είναι ελάχιστες, επομένως χρησιμοποιείται μια εναλλακτική μέθοδος.

Όταν, η θέρμανση ενός στερεού συνοδεύεται με μια φυσικοχημική αλλαγή, τότε η ειδική θερμοχωρητικότητα προκύπτει από την εξής σχέση:

$$C_p = C_{t,p} - \Delta H \frac{\partial \zeta}{\partial T} \quad (1.2.8)$$

όπου, C_p είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα ($\text{J/kg}^\circ\text{C}$), $C_{t,p}$ η ‘αισθητή’ ειδική θερμοχωρητικότητα ($\text{J/kg}^\circ\text{C}$), ΔH η λανθάνουσα θερμότητα που συνδέεται με την φυσικοχημική αλλαγή (J/kg), ζ μια μεταβλητή της αντίδρασης ($0 \leq \zeta \leq 1$) και T η θερμοκρασία ($^\circ\text{C}$). Ο όρος $\partial \zeta / \partial T$ εκφράζει τον βαθμό μετατροπής των αντιδρώντων σε προϊόντα. Αντικαθιστώντας την εξίσωση (1.2.8) στην (1.2.6) προκύπτει η εξής έκφραση για την ενθαλπία:

$$H(T) = \int_{T_a}^T C_{t,p}(T') dT' - \Delta H[\zeta(T) - \zeta(T_a)] \quad (1.2.9)$$

Η μεταβολή της ενθαλπίας συναρτήσει της θερμοκρασίας φαίνεται στο σχήμα 1.2.9, όπου υποτίθεται ότι η θερμότητα που απαιτείται για την εξάτμιση του νερού κρυσταλλοποίησης και του ελεύθερου νερού απρροφάται στους 100-120°C περίπου.

Παραγωγίζοντας την σχέση (1.2.9) ως προς τον χρόνο και πολλαπλασιάζοντας επί την πυκνότητα προκύπτει η εξής σχέση:

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} = \rho C_{t,p} \frac{\partial T}{\partial t} - \rho \Delta H \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad (1.2.10)$$

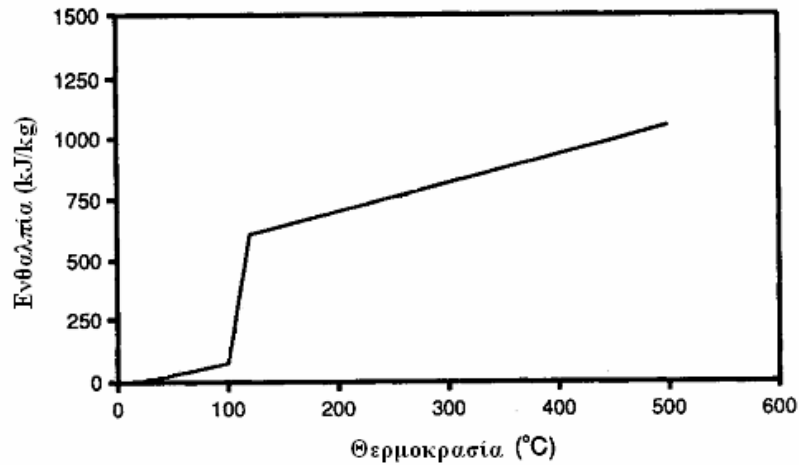
όπου ο τελευταίος όρος είναι ο ρυθμός παραγωγής/κατανάλωσης ενέργειας ανά μονάδα όγκου Q, δηλαδή:

$$\rho \Delta H \frac{\partial \zeta}{\partial t} = Q \quad (1.2.11)$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (1.2.10) και (1.2.11) στην αξίσωση (1.2.7), προκύπτει ο ρυθμός μεταβολής της ενθαλπίας:

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k \frac{\partial T}{\partial y} \right] \quad (1.2.12)$$

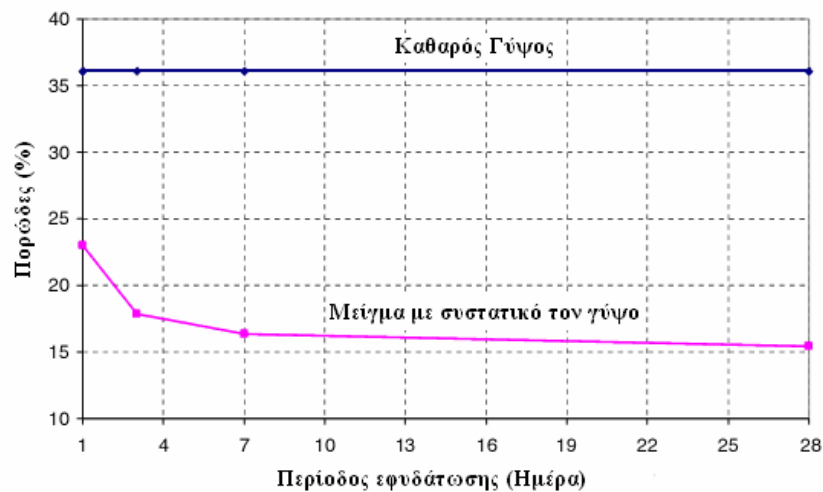
Για να ολοκληρωθεί η περιγραφή της μεταφοράς θερμότητας διαμέσου της γυψοσανίδας, είναι απαραίτητο να οριστούν οι αρχικές και οι οριακές συνθήκες.



Σχήμα 1.2.9. Ενθαλπία συναρτήσει της θερμοκρασίας της γυψοσανίδας.
(Mehaffey, *et al.*, 1994)

Πορώδες

Το πορώδες (porosity) ενός υλικού είναι το ποσοστό κατ' όγκον των πόρων (κενό) του υλικού ως προς το συνολικό όγκο του υλικού. Όσον αφορά το πορώδες του καθαρού γύψου και ενός μείγματος που ως κύριο συστατικό έχει τον γύψο, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.2.10, είναι περίπου ίσα με 0.36 και 0.15, αντίστοιχα. Επομένως, το πορώδες της γυψοσανίδας θα κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0.15-0.36. Συνήθως στις μελέτες χρησιμοποιείται μια ενδιάμεση τιμή, όπως για παράδειγμα 0.25.



Σχήμα 1.2.10. Πορώδες καθαρού και αναμειγμένου γύψου συναρτήσει της περιόδου εφυδάτωσης. (Ang και Wang, 2004)

Διαπερατότητα

Η διαπερατότητα (permeability) της γυψοσανίδας αποτελεί ένα μέτρο του ρυθμού μετατόπισης του νερού μέσα στο υλικό. Πιο συγκεκριμένα, όσο μικρότερος είναι ο συντελεστής διαπερατότητας, τόσο πιο αργά μετακινείται το νερό και τόσο περισσότερο αυξάνεται η πίεση στους πόρους (Ang και Wang, 2004). Στην υπάρχουσα βιβλιογραφία, δεν δίνεται κάποια ακριβής τιμή για την διαπερατότητα της γυψοσανίδας. Ο Wilson (1995) μέτρησε την υδραυλική αγωγιμότητα (hydraulic conductivity) του πλαστικού, που είναι παρόμοια με τον συντελεστή διαπερατότητας και βρήκε γι' αυτόν την τιμή 1.5×10^{-08} m/s. Δεδομένου ότι μια γυψοσανίδα έχει μικρότερο πορώδες από το πλαστικό (όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.2.10), η τιμή της διαπερατότητάς της θα είναι αντίστοιχα μικρότερη. Μια προτεινόμενη τιμή για τον συντελεστή διαπερατότητας της γυψοσανίδας είναι 5×10^{-09} m/s (Ang και Wang, 2004).

Περιεχόμενο νερό

Γενικά, μια γυψοσανίδα περιέχει κρυσταλλικό και ελεύθερο νερό σε ποσοστά 21% και 3% κατά βάρος αντίστοιχα. Με βάση εμπειρικές συσχετίσεις οι οποίες έχουν αναπτυχθεί για το τσιμέντο και μετά από μερικές τροποποιήσεις για την περίπτωση της γυψοσανίδας, προκύπτει ότι η σχέση που συνδέει το περιεχόμενο νερό w (kg/m³), την πίεση στους πόρους P (N/m²) και την θερμοκρασία T (K) είναι η εξής (Ang και Wang, 2004):

$$w\left(\frac{P}{P_{sat}}(T)\right) = \begin{cases} \left(\frac{P}{P_{sat}(T)} w_0\right)^{\frac{1}{m(T)}} & , \alpha\nu \frac{P}{P_{sat}(T)} \leq 0.96 \\ \frac{n}{v} & , \alpha\nu \frac{P}{P_{sat}(T)} \geq 1.04 \\ w(0.96) + \left(\frac{P}{P_{sat}(T)} - 0.96\right) \frac{w(1.04) - w(0.96)}{0.08} & , \alpha\nu 0.96 < \frac{P}{P_{sat}(T)} < 1.04 \end{cases} \quad (1.2.13)$$

όπου

$$m(T) = \frac{\left(\frac{\rho_{w0} T_0}{\gamma_0} \right)}{\left(\frac{\rho_w T}{\gamma} \right)}$$

$$n = \left(n_0 + \frac{w_d(T) - w_{d0}}{\rho_{w0}} \right)$$

Στις παραπάνω σχέσεις, w_0 είναι το αρχικό περιεχόμενο νερό (kg/m^3) = n_0/v_0 , ρ_w η πυκνότητα του νερού (kg/m^3), T η θερμοκρασία (K), $v(T,P)$ ο ειδικός όγκος του νερού (m^3/kg), n_0 το αρχικό πορώδες, n το πορώδες σε θερμοκρασία (T), w_d το περιεχόμενο νερό λόγω αφυδάτωσης (dehydration water content) και P_{sat} είναι η πίεση κορεσμού του νερού (Pa), η τιμή της οποίας δίνεται σε πίνακες. Τέλος, ο εκθέτης m σχετίζεται με την πυκνότητα του νερού, την θερμοκρασία και την επιφανειακή τάση γ . Ο εμπειρικός τύπος για την επιφανειακή τάση είναι:

$$\gamma(T) = B \left[\frac{T_c - T}{T_c} \right]^u \left[1 + b \left(\frac{T_c - T}{T_c} \right) \right].$$

(1.2.14)

Στην παραπάνω σχέση, $T_c = 674.15$ K (κρίσιμο σημείο του νερού), $B = 0.258 \times 10^6$ N/m, $b = -0.625$ και $u = 1.256$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.1. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ FDS

2.1.1. Εισαγωγή

Μέχρι σήμερα, έχουν γίνει διάφορες προσπάθειες για την υπολογιστική προσομοίωση της φωτιάς σε εσωτερικούς χώρους. Μια πρώτη προσπάθεια μοντελοποίησης τέτοιων φαινομένων είναι τα μοντέλα ζώνης (Jones, 1983). Η φυσική και υπολογιστική απλότητα αυτών των μοντέλων οδήγησε στην ευρύτερη εφαρμογή τους στην ανάλυση διαφόρων σεναρίων φωτιάς.

Η ταχύτερη ανάπτυξη, όμως, των ηλεκτρονικών υπολογιστών καθώς επίσης και του κλάδου της υπολογιστικής ρευστομηχανικής (Computational Fluid Dynamics) οδήγησαν στη δημιουργία νέων εργαλείων, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως σε προβλήματα φωτιάς σε εσωτερικούς χώρους. Η χρήση αυτών των εργαλείων επέτρεψε την περιγραφή των μηχανισμών εξάπλωσης της φωτιάς σε πολύπλοκες γεωμετρίες, μέσω της ενσωμάτωσης μιας μεγάλης ποικιλίας φυσικών ιδιοτήτων. Τα εργαλεία αυτά βασίζονται στην επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes οι οποίες ολοκληρώνονται χρονικά και προκύπτουν οι μέσες εξισώσεις Reynolds (RANS). Ωστόσο, περιορίζονται όσον αφορά την εφαρμογή τους σε διαφορετικές περιπτώσεις φωτιάς λόγω της ανακρίβειας που εισάγεται στις εξισώσεις διατήρησης της ορμής. Το γεγονός αυτό οδήγησε στην δημιουργία ενός νέου μοντέλου προσομοίωσης των τυρβωδών φαινομένων, το οποίο ονομάζεται 'Μοντέλο Προσομείωσης Μεγάλης Δίνης' (Large Eddy Simulation – LES). Στο μοντέλο αυτό, εισάγεται ένα χωρικό φίλτρο στις εξισώσεις διατήρησης της ορμής κατά τέτοιο τρόπο ώστε να επιλύονται οι κινήσεις των δινών μεγάλης κλίμακας, ενώ λαμβάνονται μέσες τιμές για τις πιο μικρές δίνες. Η λογική του LES αναφέρεται στην περιγραφή της τυρβώδους ανάμειξης του καυσίμου και των προϊόντων της καύσης με τον ατμοσφαιρικό αέρα που περιβάλλει την φωτιά (FDS, Technical Reference Guide). Βέβαια, είναι πολύ δύσκολο να περιγραφεί με ακρίβεια αυτή η ανάμειξη και γι' αυτό στις εφαρμογές καύσης η χρήση του είναι ακόμη περιορισμένη, καθώς απαιτούνται ακόμα μεγάλες ερευνητικές προσπάθειες.

2.1.2. Ο κώδικας FDS

Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία ονομάζεται Fire Dynamics Simulator (FDS). Είναι ένα υπολογιστικό πρόγραμμα γραμμένο σε γλώσσα Fortran 90, το οποίο στοχεύει στην επίλυση των εξισώσεων της ρευστομηχανικής. Ουσιαστικά, είναι ένας κώδικας υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, στον οποίο επιλύονται αριθμητικά οι εξισώσεις Navier-Stokes, διαμορφωμένες κατάλληλα για θερμικές ροές χαμηλής ταχύτητας, δίνοντας έμφαση στη μεταφορά θερμότητας και καπνού σε συνθήκες φωτιάς. Ο FDS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μοντελοποίηση μιας ποικιλίας φαινομένων, όπως για παράδειγμα η πυρόλυση, η χαμηλής ταχύτητας μεταφορά θερμότητας και προϊόντων καύσης από τη φωτιά, η διάδοση της φλόγας και η εξάπλωσή της κ.α. Χαρακτηριστικό του κώδικα FDS είναι ο υπολογισμός μιας πληθώρας φυσικών μεγεθών (θερμοκρασία, ταχύτητα, πίεση, πυκνότητα, χημική σύνθεση κ.α.) σε κάθε κελί του πλέγματος για κάθε χρονική στιγμή. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο αριθμός των ποσοτήτων που είναι δυνατόν να υπολογιστούν σε κάθε κελί είναι πολύ μεγαλύτερος από τις ποσότητες που είναι δυνατόν να μετρηθούν σε ένα πείραμα. Τα υπολογιστικά αποτελέσματα παρουσιάζονται με τη βοήθεια του προγράμματος γραφικής απεικόνισης Smokeview. Στις επόμενες ενότητες ακολουθεί μία περιγραφή των βασικών συνιστωσών του FDS.

2.1.3. Υδροδυναμικό μοντέλο

Στον κώδικα FDS επιλύονται αριθμητικά οι εξισώσεις Navier-Stokes, εκφρασμένες κατάλληλα για ροές χαμηλών ταχυτήτων, με έμφαση στην παραγωγή καπνού και την μετάδοση θερμότητας σε συνθήκες φωτιάς. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται είναι ένας αλγόριθμος πρόβλεψης-διόρθωσης και έχει ακρίβεια δεύτερης τάξης στο χώρο και το χρόνο (FDS, Technical Reference Guide). Η περιγραφή των τυρβωδών φαινομένων γίνονται με χρήση του μοντέλου Smagorinsky της μεθοδολογίας LES (Smagorinsky, 1963).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι θεμελιώδεις εξισώσεις διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας καθώς επίσης και η καταστατική εξίσωση των τελείων αερίων (Anderson, 1984), οι οποίες επιλύονται στον κώδικα FDS.

Διατήρηση Μάζας

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{u} = 0 \quad (2.1.1)$$

Διατήρηση Ορμής

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{u}) + \nabla \cdot \rho \vec{u} \vec{u} + \nabla \cdot p = \rho \vec{f} + \nabla \cdot \tau_{ij} \quad (2.1.2)$$

Διατήρηση Ενέργειας

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot \rho h \vec{u} = \frac{Dp}{Dt} + q''' - \nabla \cdot \vec{q} + \Phi \quad (2.1.3)$$

Καταστατική Εξίσωση Τελείου Αερίου

$$p = \frac{\rho RT}{M} \quad (2.1.4)$$

Στις παραπάνω σχέσεις, ο όρος τ_{ij} είναι ο πίνακας τάσεων που δίνεται από την σχέση:

$$\tau_{ij} = \mu \left(2\vec{S}_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} (\nabla \cdot \vec{u}) \right) \quad (2.1.5)$$

$$\text{όπου } \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad \text{και} \quad \vec{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad i, j = 1, 2, 3.$$

Ο όρος Φ είναι ο ρυθμός με τον οποίο η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμική λόγω της συνεκτικότητας του ρευστού και δίνεται από την εξής σχέση:

$$\vec{\Phi} \equiv \tau_{ij} \cdot \nabla \vec{u} \equiv \mu \left(2\vec{S}_{ij} \cdot \vec{S}_{ij} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{u})^2 \right) \quad (2.1.6)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτές οι εξισώσεις αποτελούν ένα σύνολο έξι εξισώσεων με έξι αγνώστους, την πυκνότητα ρ , την θερμοκρασία T , την πίεση p και τις τρεις συνιστώσες του διανύσματος της ταχύτητας $u(u,v,w)$. Η ενθαλπία δεν αποτελεί άγνωστο μέγεθος διότι υπολογίζεται συναρτήσει της θερμοκρασίας από την σχέση

$$h = \int_{T_0}^T c_p(T) dT \quad (2.1.7)$$

Ο κώδικας FDS εστιάζεται σε ροές μικρού αριθμού Mach. Γενικά, η πίεση υπολογίζεται ως το άθροισμα της ατμοσφαιρικής πίεσης, ενός υδροστατικού όρου και ενός όρου που οφείλεται στην τυρβώδη διακύμανση της ροής από την σχέση:

$$p = p_0 - \rho_\infty g z + \tilde{p} \quad (2.1.8)$$

Στην παραπάνω σχέση, η πίεση p_0 είναι σταθερή και οι άλλοι δύο όροι σχετικά μικροί, οπότε αμελούνται ($\rho_\infty g z = 0$, $\tilde{p} = 0$). Έτσι, για ροές μικρού αριθμού Mach μπορεί να υποθεθεί ότι η θερμοκρασία και η πυκνότητα είναι ποσά αντιστρόφως ανάλογα και συνδέονται μέσω της καταστατικής εξίσωσης:

$$p_0 = \rho T R / M \quad (2.1.9)$$

όπου $M = \sum \frac{M_i}{Y_i}$.

Επομένως, η υπόθεση ροής μικρού αριθμού Mach εξυπηρετεί δύο σκοπούς. Πρώτον, με αυτόν τον τρόπο γίνεται φιλτράρισμα των ακουστικών κυμάτων, που σημαίνει ότι το χρονικό βήμα στον αριθμητικό αλγόριθμο περιορίζεται μόνο από την ταχύτητα της ροής. Δεύτερον, η τροποποιημένη καταστατική εξίσωση οδηγεί σε μείωση κατά έναν του αριθμού των εξαρτημένων μεταβλητών στο σύστημα των εξισώσεων.

2.1.4. Μοντέλο καύσης

Αυτό το μοντέλο θα αναπτυχθεί εκτενέστερα από τα υπόλοιπα σε ξεχωριστό κεφάλαιο (2.2) διότι το ενδιαφέρον που παρουσιάζει είναι μεγάλο. Γενικά, στον κώδικα FDS χρησιμοποιείται το μοντέλο ‘κλάσματος μείγματος’ (mixture fraction model). Στο μοντέλο αυτό γίνεται η υπόθεση ότι η καύση είναι ελεγχόμενη από τα φαινόμενα ανάμειξης καυσίμου και οξειδωτικού και ότι η αντίδραση του καυσίμου με το οξειδωτικό γίνεται απείρως γρήγορα. Τα κλάσματα μάζας για όλα τα κύρια αντιδρώντα και προϊόντα υπολογίζονται από την τιμή του κλάσματος μείγματος μέσω των ‘σχέσεων κατάστασης’, δηλαδή εμπειρικών εκφράσεων που προκύπτουν από τον συνδυασμό πειραματικών μετρήσεων και απλοποιημένων αναλύσεων.

2.1.5. Γεωμετρία

Στον κώδικα FDS επιλύονται οι εξισώσεις χωρίζοντας τον υπολογιστικό χώρο σε ένα ή περισσότερα ορθογώνια πλέγματα. Ο χρήστης ορίζει ορθογωνικά αντικείμενα τα οποία τοποθετούνται σε συγκεκριμένες θέσεις, και τα οποία πρέπει να ενσωματώνονται αρμονικά στο υπολογιστικό πλέγμα.

2.1.6. Θερμικές οριακές συνθήκες

Σε όλες τις στερεές επιφάνειες ορίζονται θερμικές οριακές συνθήκες, ενώ είναι απαραίτητη η παροχή πληροφοριών για την συμπεριφορά του υλικού κατά την καύση του από τον χρήστη. Στον κώδικα FDS γίνεται διαχωρισμός των καυσίμων σε τρεις κατηγορίες που είναι οι εξής:

A) Θερμοπλαστικά Καύσιμα

Τα καύσιμα αυτά διαχωρίζονται με βάση το πάχος του καυσίμου. Εάν η επιφάνεια του υλικού θεωρηθεί ότι αντιστοιχεί σε υλικό ‘μεγάλου’ πάχους, τότε επιλύεται η μονοδιάστατη εξίσωση μετάδοσης θερμότητας στο εσωτερικό του στερεού υλικού

κατά την διεύθυνση του x με φορά προς το εσωτερικό του στερεού (δηλαδή, $x=0$ στην επιφάνεια του στερεού) που είναι η:

$$\rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) \quad (2.1.10)$$

$$-k_s \frac{\partial T_s}{\partial x}(0, t) = q_c'' + q_r'' - m'' \Delta H_v \quad (2.1.11)$$

όπου ρ_s, c_s, k_s είναι η πυκνότητα, η ειδική θερμοχωρητικότητα και η θερμική αγωγιμότητα του στερεού αντίστοιχα (όλες οι ιδιότητες εκφράζονται συναρτήσει της θερμοκρασίας), q_r'' η ροή θερμότητας λόγω ακτινοβολίας, q_c'' η ροή θερμότητας λόγω συναγωγής, m'' ο ρυθμός κατανάλωσης της μάζας του καυσίμου και ΔH_v η θερμότητα ατμοποίησής του.

Υποτίθεται ότι η πυρόλυση του καυσίμου γίνεται στην επιφάνεια του υλικού και ο ρυθμός πυρόλυσής του δίνεται από την έκφραση του Arrhenius:

$$m'' = A \rho_s e^{-E_a/RT} \quad (2.1.12)$$

όπου R είναι η παγκόσμια σταθερά των αερίων.

Εάν η επιφάνεια του υλικού θεωρηθεί ότι αντιστοιχεί σε υλικό 'μικρού' πάχους, τότε η θερμοκρασία θεωρείται ομοιόμορφη κατά το 'πάχος' του υλικού και υπολογίζεται μέσω ισολογισμού των θερμοροών λόγω συναγωγής, ακτινοβολίας και πυρόλυσης. Η σχέση που ισχύει σε αυτήν την περίπτωση είναι η:

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{q_c'' + q_r'' - m'' \Delta H_v}{\rho_s c_s \delta} \quad (2.1.13)$$

όπου δ είναι το 'πάχος' του υλικού.

B) Υγρά Καύσιμα

Για τον υπολογισμό της μετάδοσης θερμότητας στην περίπτωση υγρών καυσίμων θεωρείται ότι αυτά συμπεριφέρονται ως υλικά 'μεγάλου' πάχους. Στην περίπτωση αυτή, θεωρείται ότι συνθήκες ισορροπίας επιτυγχάνονται όταν η μερική πίεση στην

επιφάνεια του υγρού καυσίμου γίνει ίση με την πίεση κορεσμού, η οποία υπολογίζεται από την σχέση Clausius-Clapeyron:

$$p_{cc} = p_0 \exp\left[-\frac{h_v M_f}{R} \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_b}\right)\right] \quad (2.1.14)$$

όπου M_f είναι το μοριακό βάρος του καυσίμου, T_s η θερμοκρασία της επιφάνειας και T_b η θερμοκρασία βρασμού του καυσίμου.

Γ) Απανθρακωμένα Καύσιμα

Η μεταφορά θερμότητας και η πυρόλυση αυτών των υλικών περιγράφονται με τη χρήση ενός μονοδιάστατου μοντέλου. Η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας περιλαμβάνει την μετάδοση θερμότητας στο εσωτερικό του υλικού, την ατμοποίηση της περιεχόμενης υγρασίας και την μετατροπή του άκαυστου υλικού σε αέριο καύσιμο και απανθράκωμα και είναι η εξής:

$$\overline{\rho c} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} + [\Delta H_{pyr} - C(T - T_0)] + \frac{\partial \rho_m}{\partial t} [\Delta H_{ev} - D(T - T_0)] \quad (2.1.15)$$

όπου ρ_s είναι η ολική πυκνότητα του στερεού, ρ_m η πυκνότητα της υγρασίας, ΔH_{pyr} η θερμότητα πυρόλυσης και ΔH_{ev} η θερμότητα ατμοποίησης του νερού. Οι συντελεστές C και D δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$C = \frac{\overline{\rho_{s0} c_{p,s0}} - \overline{\rho_{char} c_{p,char}}}{\rho_{s0} - \rho_{char}} - \overline{c_{p,g}} \quad (2.1.16)$$

$$D = \overline{c_{p,m}} - \overline{c_{p,g}} \quad (2.1.17)$$

όπου οι δείκτες $s0$ και $char$ αναφέρονται στο άκαυστο υλικό και το απανθράκωμα αντίστοιχα, ενώ οι δείκτες m και g αναφέρονται στα αέρια προϊόντα της πυρόλυσης και την υγρασία, αντίστοιχα.

Ο ρυθμός πυρόλυσης δίνεται και σε αυτήν την περίπτωση από την πρώτη τάξης αντίδραση Arrhenius:

$$m'' = A(\rho_{s0} - \rho_{char}) e^{-E_A/RT} \quad (2.1.18)$$

Οι συντελεστές A και E_A επιλέγονται έτσι ώστε η πυρόλυση να λαμβάνει χώρα πολύ κοντά στην επιθυμητή θερμοκρασία πυρόλυσης.

2.1.7. Μοντέλο θερμικής ακτινοβολίας

Η μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας περιγράφεται μέσω της επίλυσης της εξίσωσης μεταφοράς ακτινοβολίας για ένα μη διαχέον φαιό αέριο (non-scattering gray gas). Σε έναν περιορισμένο αριθμό περιπτώσεων αντί του μοντέλου φαιού αερίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα μοντέλο ευρείας ζώνης (wide band model). Η εξίσωση της μεταφοράς ακτινοβολίας επιλύεται χρησιμοποιώντας μία τεχνική παρόμοια με τη μέθοδο πεπερασμένων όγκων για τη μεταφορά μέσω συναγωγής, επομένως το όνομα που δίνεται σε αυτή τη μέθοδο είναι 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. Οι σταγόνες νερού μπορούν, επίσης, να απορροφήσουν θερμική ακτινοβολία, άλλα το φαινόμενο αυτό είναι σημαντικό μόνο στις περιπτώσεις όπου υπάρχουν καταιονηστήρες.

Στον κώδικα FDS, η εξίσωση μεταφοράς ακτινοβολίας που χρησιμοποιείται για ένα απορροφόμενο/εκπεμπόμενο και σκεδαζόμενο μέσο είναι η εξής:

$$\vec{s} \cdot \nabla I_\lambda(\vec{x}, \vec{s}) = -[\kappa(\vec{x}, \lambda) + \sigma_s(\vec{x}, \lambda)]I_\lambda(\vec{x}, \vec{s}) + B(\vec{x}, \lambda) + \frac{\sigma_s(\vec{x}, \lambda)}{4\pi} \int_{4\pi} \Phi(s, s') I_\lambda(\vec{x}, s') d\Omega' \quad (2.1.19)$$

όπου $I_\lambda(\vec{x}, \vec{s})$ είναι η ένταση της ακτινοβολίας σε μήκος κύματος λ , \vec{s} είναι το διάνυσμα κατεύθυνσης της έντασης, $\kappa(\vec{x}, \lambda)$ και $\sigma_s(\vec{x}, \lambda)$ είναι οι συντελεστές απορρόφησης και διασποράς αντίστοιχα, $B(\vec{x}, \lambda)$ ο όρος της πηγής εκπομπής και $\Phi(s, s')$ μια μεταβλητή που δίνει την ένταση της σκέδασης για την κατεύθυνση από s σε s' .

Αν δεν γίνεται σκέδαση του μέσου, τότε η παραπάνω εξίσωση λαμβάνει την εξής μορφή:

$$\vec{s} \cdot \nabla I_\lambda(\vec{x}, \vec{s}) = \kappa(\vec{x}, \lambda) [I_b(\vec{x}) - I_\lambda(\vec{x}, \vec{s})] \quad (2.1.20)$$

όπου περιγράφει την μεταφορά ακτινοβολίας στην αέρια φάση. Σημειώνεται ότι σε αυτή την εξίσωση, με $I_b(\vec{x})$ συμβολίζεται η ένταση της ακτινοβολίας από μέλαν σώμα.

Επειδή στις πρακτικές εφαρμογές η εξίσωση (2.1.20) δεν μπορεί να επιλυθεί ακριβώς για ολόκληρο το φάσμα της ακτινοβολίας, γίνεται διαχωρισμός του φάσματος σε έναν αριθμό ζωνών και σε κάθε μια από αυτές εφαρμόζεται ξεχωριστά η εξίσωση μεταφοράς ακτινοβολίας, η οποία λαμβάνει την μορφή:

$$\vec{s} \cdot \nabla I_n(\vec{x}, \vec{s}) = \kappa_n(\vec{x}) [I_{b,n}(\vec{x}) - I_n(\vec{x}, \vec{s})], \quad n = 1 \dots N \quad (2.1.21)$$

όπου I_n είναι η ένταση ολοκληρούμενη στην ζώνη n και κ_n είναι ο μέσος συντελεστής απορρόφησης αυτής της ζώνης του φάσματος. Έχει βρεθεί ότι στα περισσότερα αριθμητικά πειράματα, αρκεί η χρήση έξι ζωνών ($N=6$) για να υπάρχει η επιθυμητή ακρίβεια στα αποτελέσματα. Τα όρια των ζωνών του φάσματος επιλέγονται με τέτοιο τρόπο, ώστε να απεικονίζονται ακριβώς οι πιο σημαντικές ζώνες ακτινοβολίας του διοξειδίου του άνθρακα και του νερού.

2.1.8. Αριθμητική μέθοδος

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η μέθοδος χρονικής και χωρικής διακριτοποίησης των εξισώσεων μεταφοράς. Όλες οι παράγωγοι ως προς το χρόνο και ως προς το χώρο προσεγγίζονται με πεπερασμένες διαφορές δευτέρης τάξης, ενώ στον κώδικα χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος πρόβλεψης-διόρθωσης.

Απλοποιημένες Εξισώσεις

Διατήρηση Μάζας

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \rho = -\rho \nabla \cdot \vec{u} \quad (2.1.22)$$

Διατήρηση των Συστατικών

$$\frac{\partial \rho Y_l}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \rho Y_l = -\rho Y_l \nabla \cdot \vec{u} + \nabla \cdot \rho D \nabla Y_l + m_l''' \quad (2.1.23)$$

Διατήρηση Ορμής

$$\frac{\partial}{\partial t} \vec{u} + \vec{u} \times \omega + \nabla H = \frac{1}{\rho} \left((\rho - \rho_\infty) \vec{g} + \vec{f} + \nabla \cdot \tau_{ij} \right) \quad (2.1.24)$$

Διάνυσμα Απόκλισης Ταχύτητας

$$\nabla \cdot \vec{u} = \frac{1}{\rho c_p T} \left(\nabla \cdot k \nabla T + \nabla \cdot \sum_l \int c_{p,l} dT \rho D_l \nabla Y_l - \nabla \cdot \vec{q}_r + q''' \right) + \left(\frac{1}{\rho c_p T} - \frac{1}{p_0} \right) \frac{dp_0}{dt} \quad (2.1.25)$$

Καταστατική Εξίσωση

$$p_0(t) = \rho RT \sum_l Y_l / M_l \quad (2.1.26)$$

Χρονική Διακριτοποίηση

Όλοι οι υπολογισμοί ξεκινούν θεωρώντας ως αρχικές συνθήκες τις συνθήκες περιβάλλοντος συνθήκες. Στην αρχή κάθε χρονικού βήματος είναι γνωστές οι ποσότητες $\rho^n, Y_i^n, \vec{u}_n, H^n, p_0^n$. Όλες οι υπόλοιπες ποσότητες μπορούν να υπολογιστούν από αυτές. Ο δείκτης n αναφέρεται στο χρονικό βήμα του υπολογισμού. Ακολουθώντας μια επαναληπτική διαδικασία υπολογίζονται όλες οι ποσότητες για κάθε χρονικό βήμα.

Χωρική Διακριτοποίηση

Ο υπολογιστικός χώρος είναι ένα ορθογωνικό ‘κουτί’ το οποίο χωρίζεται σε ορθογωνικά κελιά. Κάθε κελί περιγράφεται από τρεις συνιστώσες i, j και k που αντιπροσωπεύουν την θέση του κελιού στους άξονες x, y και z αντίστοιχα. Για παράδειγμα, η ποσότητα ρ_{ijk}^n είναι η πυκνότητα τη n -οστή χρονική στιγμή στο κέντρο του κελιού του οποίου οι δείκτες είναι οι i, j και k .

Λόγω της χρήσης της μεθόδου Προσομείωσης Μεγάλων Δινών, το δυναμικό ιξώδες ορίζεται στο κέντρο του κάθε κελιού ως εξής:

$$\mu_{ijk} = \rho_{ijk} (C_s \Delta)^2 |S| \quad (2.1.27)$$

όπου C_s είναι η σταθερά Smagorinsky, $\Delta = (\delta x \delta y \delta z)^{\frac{1}{3}}$ και

$$|S|^2 = 2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{u})^2 \quad (2.1.28)$$

Επίσης, η θερμική αγωγιμότητα και ο συντελεστής διάχυσης του υλικού δίνονται συναρτήσει του δυναμικού ιξώδους από τις σχέσεις:

$$k_{ijk} = \frac{c_{p,o} \mu_{ijk}}{Pr} \quad (2.1.29)$$

$$(\rho D)_{ijk} = \frac{\mu_{ijk}}{Sc} \quad (2.1.30)$$

όπου Pr είναι ο αριθμός Prandtl και Sc ο αριθμός Schmidt, οι οποίοι θεωρούνται σταθεροί και ίσοι με 0.5.

Θερμική Ακτινοβολία

Όπως έχει προαναφερθεί, η εξίσωση μεταφοράς ακτινοβολίας είναι η εξής:

$$\vec{s} \cdot \nabla I_n(\vec{x}, \vec{s}) = \kappa_n(\vec{x}) [I_{b,n}(\vec{x}) - I_n(\vec{x}, \vec{s})] \quad (2.1.31)$$

Η αντίστοιχη διακριτοποιημένη εξίσωση προκύπτει ολοκληρώνοντας την παραπάνω εξίσωση για ένα τυχαίο υπολογιστικό κελί με συντεταγμένες i, j και k ως προς τη γωνία ελέγχου $\delta\Omega^l$. Έτσι, προκύπτει:

$$\int_{\Omega^l V_{ijk}} \vec{s} \cdot \nabla I(\vec{x}, \vec{s}) dV d\Omega = \int_{\Omega^l V_{ijk}} \kappa(\vec{x}) [I_{b,n}(\vec{x}) - I_n(\vec{x}, \vec{s})] dV d\Omega \quad (2.1.32)$$

Οριακές Συνθήκες

Όσον αφορά τις θερμικές οριακές συνθήκες, υπάρχουν τέσσερις τύποι οριακών συνθηκών οι οποίες μπορούν να εφαρμοστούν στην επιφάνεια των στερεών.

- 1) Ο πρώτος τύπος, που είναι και ο πιο απλός, είναι η αδιαβατική οριακή συνθήκη στην οποία θεωρείται ότι η κλίση της θερμοκρασίας κάθετα στην επιφάνεια είναι μηδενική.
- 2) Ο δεύτερος τύπος οριακής συνθήκης αφορά την επιφάνεια του στερεού που έχει μια προκαθορισμένη θερμοκρασία (συνήθως δίνεται συνάρτησε του χρόνου).
- 3) Ο τρίτος τύπος υποθέτει ότι το στερεό έχει σχετικά 'λεπτό' πάχος. Η θερμοκρασία της επιφάνειας συναρτήσε του χρόνου υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$T_w^{n+1} = T_w^n + \delta t_s \frac{q_c'' + q_r''}{\rho_s c_s \delta} \quad (2.1.33)$$

όπου T_w είναι η θερμοκρασία του τοίχου, δt_s είναι το χρονικό βήμα και ρ_s, c_s, δ είναι η πυκνότητα, η ειδική θερμότητα και το πάχος του τοίχου αντίστοιχα, ενώ η τιμή του q_c'' δίνεται από την σχέση:

$$q_c'' = C |T_{gas} - T_w|^{\frac{1}{3}} (T_{gas} - T_w) \quad (2.1.34)$$

όπου το C είναι ένας εμπειρικός συντελεστής και T_{gas} η θερμοκρασία του αερίου στο κελί που συνορεύει με τον τοίχο.

- 4) Ο τέταρτος τύπος αναφέρεται σε στερεά με ‘μεγάλο’ πάχος. Οι θερμοκρασίες σε αυτήν την περίπτωση υπολογίζονται σύμφωνα με την σχέση:

$$\frac{T_{s,i}^{n+1} - T_{s,i}^n}{\delta t} = \frac{1}{2(\rho_s c_s)_i \delta x_i} \left(k_{s,i+\frac{1}{2}} \frac{T_{s,i+1}^n - T_{s,i}^n}{\delta x_{s,i+\frac{1}{2}}} - k_{s,i-\frac{1}{2}} \frac{T_{s,i}^n - T_{s,i-1}^n}{\delta x_{s,i-\frac{1}{2}}} + k_{s,i+\frac{1}{2}} \frac{T_{s,i+1}^{n+1} - T_{s,i}^{n+1}}{\delta x_{i+\frac{1}{2}}} - k_{s,i-\frac{1}{2}} \frac{T_{s,i}^{n+1} - T_{s,i-1}^{n+1}}{\delta x_{i-\frac{1}{2}}} \right) \quad (2.1.35)$$

2.1.9. Ευαισθησία του κώδικα FDS

Η πιο σημαντική αριθμητική παράμετρος στον κώδικα FDS είναι το μέγεθος του πλέγματος διότι αυτό καθορίζει τον βαθμό ακρίβειας ως προς το χώρο. Ο FDS χρησιμοποιεί δεύτερης τάξης ακρίβειας εξισώσεις όσον αφορά το χρόνο και το χώρο. Αυτό σημαίνει ότι εάν μειωθεί το μέγεθος ενός κελιού στο μισό, θα μειωθεί το σφάλμα διακριτοποίησης στις εξισώσεις (δια 4) αλλά ταυτόχρονα θα αυξηθεί ο απαιτούμενος χρόνος για την προσομείωση επί 16 ($=2^4$). Κατά συνέπεια, στον κώδικα FDS, ο οποίος βασίζεται στην μέθοδο της ‘προσομείωσης μεγάλης δίνης’, όσο πιο πυκνό είναι το πλέγμα, τόσο πιο πολύ αυξάνει η ακρίβεια της μεθόδου. Έχει αποδειχθεί ότι η ακρίβεια του μοντέλου είναι συνάρτηση της χαρακτηριστικής διαμέτρου της φωτιάς D^* , η εξίσωση της οποίας δίνεται στο επόμενο κεφάλαιο, διαιρεμένης με το μέγεθος του κελιού του πλέγματος που χρησιμοποιείται.

Η πιο σημαντική φυσική παράμετρος είναι ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας γιατί αποτελεί πρωταρχικό όρο στην εξίσωση ενέργειας. Οι υπόλοιπες ιδιότητες, όπως η πυκνότητα, η θερμική αγωγιμότητα και άλλες, πρέπει να εκτιμώνται ανάλογα με το πόσο επηρεάζουν τον ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας. Όταν προκαθορίζεται ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας, οι προλέξεις του κώδικα FDS ως προς την μεταφορά θερμότητας και καπνού είναι ακριβείς και μικρές αλλαγές στις ιδιότητες των υλικών δεν επηρεάζουν πολύ τα αποτελέσματα. Όταν, όμως, ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας δεν ορίζεται αλλά υπολογίζεται από τον ίδιο τον κώδικα με βάση τις φυσικές ιδιότητες του καυσίμου, τότε τα αποτελέσματα είναι ευαίσθητα ακόμα και σε πολύ μικρές αλλαγές αυτών των ιδιοτήτων.

Τέλος, όσον αφορά τις σταθερές C_s , Pr και Sc συνήθως χρησιμοποιούνται οι τιμές 0.2, 0.5 και 0.5 αντίστοιχα και η πιο ευαίσθητη από αυτές είναι η σταθερά του Smagorinsky C_s .

2.2. ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΑΥΣΗΣ ‘ΚΛΑΣΜΑΤΟΣ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ’

2.2.1. Εισαγωγή

Όπως προαναφέρθηκε, στον κώδικα FDS χρησιμοποιείται το μοντέλο καύσης ‘κλάσματος μείγματος’. Αυτό το μοντέλο βασίζεται στην υπόθεση ότι τα μεγάλης κλίμακας φαινόμενα μεταφοράς και ακτινοβολίας μπορούν να προσομοιωθούν άμεσα, ενώ οι φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα πολύ γρήγορα και σε μικρό χώρο απεικονίζονται κατά προσέγγιση. Στην πραγματικότητα στις περισσότερες περιπτώσεις φωτιάς σε εσωτερικούς χώρους οι χημικές διεργασίες που ελέγχουν την ενέργεια που απελευθερώνεται από την καύση δεν είναι πλήρως προσδιορισμένες. Ακόμα και στην περίπτωση που υπάρχουν διαθέσιμες αναλυτικές πληροφορίες, το υψηλό υπολογιστικό κόστος που απαιτείται καθιστά την λεπτομερή περιγραφή της διαδικασίας της καύσης ανέφικτη (FDS, Technical Reference Guide). Κατά συνέπεια, δεδομένου ότι η ακριβής επίλυση των εξισώσεων που περιγράφουν την μεταφορά του καυσίμου, του οξυγόνου και των προϊόντων της καύσης αυξάνει σε υπέρμετρο βαθμό τις υπολογιστικές απαιτήσεις, το μοντέλο καύσης ‘κλάσματος μείγματος’ βασίζεται στην παραδοχή ότι όλα τα στοιχεία που λαμβάνουν μέρος στις αντιδράσεις περιγράφονται με βάση μία μόνο ποσότητα, το κλάσμα μείγματος $z(\vec{x}, t)$. Οι σχέσεις μεταξύ του κλάσματος μάζας του κάθε στοιχείου και του κλάσματος μείγματος είναι γνωστές σαν ‘σχέσεις κατάστασης’ (state relations).

2.2.2. Ορισμός του κλάσματος μείγματος

Για το μοντέλο καύσης ‘κλάσματος μείγματος’ γίνεται χρήση της εξιδανικευμένης παραδοχής ‘τέλειας καύσης’. Τα υπολογιστικά αποτελέσματα που προκύπτουν με χρήση του μοντέλου αυτού προσεγγίζουν ποιοτικά την παρατηρούμενη συμπεριφορά των φλογών διάχυσης. Θεωρώντας μια χημική αντίδραση ενός βήματος ($M=1$) με N συστατικά:

$$\sum_{k=1}^N v_k' M_k \rightarrow \sum_{k=1}^N v_k'' M_k \quad (2.2.1)$$

όπου με M_k συμβολίζεται το χημικό σύμβολο του κάθε συστατικού, οι υποθέσεις που γίνονται για να αναλυθούν οι ιδανικές φλόγες διάχυσης είναι οι εξής (Poinsont και Veynante, 2001):

1. Η θερμοδυναμική πίεση είναι σταθερή και ο αριθμός Mach είναι πολύ μικρός.
2. Όλοι οι συντελεστές διάχυσης D_k των χημικών στοιχείων είναι ίσοι με D . Για τις ταχύτητες διάχυσης χρησιμοποιείται ο νόμος του Fick χωρίς διόρθωση της ταχύτητας.
3. Οι θερμοχωρητικότητες C_{pk} των χημικών συστατικών είναι ίσες και ανεξάρτητες από την θερμοκρασία, δηλαδή ισχύει $C_{pk}=C_p$.

Η γενική μορφή της αντίδρασης καύσης (FDS, Technical Reference Guide) είναι η ακόλουθη:



Στην παραπάνω εξίσωση οι αριθμοί v_i είναι οι στοιχειομετρικοί συντελεστές της γενικής εξίσωσης καύσης, στην οποία αντιδρά καύσιμο 'F' με οξειδωτικό 'O' και παράγουν έναν αριθμό προϊόντων 'P'.

Το κλάσμα μάζας Y_k του καθενός από τα συστατικά (καύσιμο, οξειδωτικό και προϊόν) υπολογίζεται μέσω της αντίστοιχης εξίσωσης διατήρησης που είναι η εξής (Poinsont και Veynante, 2001):

$$\frac{\partial \rho Y_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i Y_k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D \frac{\partial Y_k}{\partial x_i} \right) + \dot{\omega}_k \quad (2.2.3)$$

Οι ρυθμοί αντίδρασης των διαφόρων συστατικών $\dot{\omega}_k$ σχετίζονται με τον ρυθμό αντίδρασης \dot{Q} με την σχέση:

$$\dot{\omega}_k = W_k v_k \dot{Q} \Rightarrow \dot{m}_k = W_k v_k \dot{Q} \quad (2.2.4)$$

όπου W_k είναι το μοριακό βάρος του κάθε συστατικού και ν_k ο στοιχειομετρικός του συντελεστής.

Επομένως, προκύπτει ότι οι ρυθμοί κατανάλωσης μάζας για το καύσιμο και το οξειδωτικό συνδέονται με την παρακάτω σχέση:

$$\frac{\dot{m}_F}{\nu_F W_F} = \frac{\dot{m}_O}{\nu_O W_O} \quad (2.2.5)$$

όπου με W_F και W_O συμβολίζονται τα μοριακά βάρη του καυσίμου και του οξυγόνου αντίστοιχα, ή αλλιώς ότι ισχύει $\dot{\omega}_O = s \dot{\omega}_F$, όπου $s = \frac{\nu_O W_O}{\nu_F W_F}$ είναι ο στοιχειομετρικός λόγος μάζας.

Επίσης, ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας συνδέεται με τον ρυθμό αντίδρασης του καυσίμου με την σχέση:

$$\dot{\omega}_T = -\dot{Q} \dot{\omega}_F \quad (2.2.6)$$

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (2.2.4) – (2.2.6), οι εξισώσεις διατήρησης για την συγκέντρωση του καυσίμου, του οξειδωτικού και για την θερμοκρασία είναι οι εξής:

$$\frac{\partial \rho Y_F}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i Y_F) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D \frac{\partial Y_F}{\partial x_i} \right) + \dot{\omega}_F \quad (2.2.7)$$

$$\frac{\partial \rho Y_O}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i Y_O) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D \frac{\partial Y_O}{\partial x_i} \right) + \dot{\omega}_O \quad (2.2.8)$$

$$\frac{\partial \rho T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \dot{\omega}_T \quad (2.2.9)$$

Συνδυάζοντας ανά δύο τις τρεις παραπάνω εξισώσεις, προκύπτουν οι ποσότητες:

$$Z_1 = s Y_F - Y_O \quad (2.2.10)$$

$$Z_2 = \frac{C_p T}{\dot{Q}} + Y_F \quad (2.2.11)$$

$$Z_3 = s \frac{C_p T}{\dot{Q}} + Y_O \quad (2.2.12)$$

οι οποίες ακολουθούν την ίδια εξίσωση διατήρησης (2.2.13), αλλά έχουν διαφορετικές οριακές συνθήκες που φαίνονται στον πίνακα 2.2.1.

$$\frac{\partial \rho Z}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i Z) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D \frac{\partial Z}{\partial x_i} \right) \quad (2.2.13)$$

Πίνακας 2.2.1. Οριακές συνθήκες για τις τρεις μεταβλητές Z_1 , Z_2 και Z_3 .

Z	Τιμή καυσίμου (Z_i^F)	Τιμή οξειδωτικού (Z_i^O)
Z_1	$s Y_F^0$	$-Y_O^0$
Z_2	$\frac{C_p T_F^0}{\dot{Q}} + Y_F^0$	$\frac{C_p T_O^0}{\dot{Q}}$
Z_3	$s \frac{C_p T_F^0}{\dot{Q}}$	$s \frac{C_p T_O^0}{\dot{Q}} + Y_O^0$

Στον παραπάνω πίνακα με Y_F^0 και Y_O^0 συμβολίζονται το κλάσμα μάζας για το καύσιμο και το οξυγόνο όταν υπάρχει ροή μόνο καυσίμου και μόνο οξυγόνου αντίστοιχα. Με T_F^0 και T_O^0 συμβολίζονται οι αντίστοιχες θερμοκρασίες.

Οι ανηγμένες μεταβλητές z_j ορίζονται ως:

$$z_j = \frac{Z_j - Z_j^O}{Z_j^F - Z_j^O} \quad (2.2.14)$$

Όλες οι ανηγμένες μεταβλητές z_j ακολουθούν την ίδια εξίσωση διατήρησης:

$$\frac{\partial \rho z}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i z) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D \frac{\partial z}{\partial x_i} \right) \quad (2.2.15)$$

και έχουν τις ίδιες οριακές συνθήκες, δηλαδή $z_j=1$ στην είσοδο του καυσίμου και $z_j=0$ στην είσοδο του οξειδωτικού. Συνεπώς, όλες αυτές οι μεταβλητές είναι ίσες.

$$z_1 = z_2 = z_3 = z \quad (2.2.16)$$

Η μεταβλητή z ονομάζεται κλάσμα μείγματος και οι τιμές που μπορεί να λάβει κυμαίνονται από $z=1$, στην περίπτωση 'καθαρού' καυσίμου, έως $z=0$, στην περίπτωση 'καθαρού' οξειδωτικού. Εκφράζοντας το z χρησιμοποιώντας τις οριακές συνθήκες που δίνονται στον πίνακα 2, προκύπτει:

$$z = \frac{sY_F - (Y_O - Y_O^0)}{sY_F^I + Y_O^0} = \frac{\frac{C_p}{\dot{Q}}(T - T_O^0) + Y_F}{\frac{C_p}{\dot{Q}}(T_F^0 - T_O^0) + Y_F^0} = \frac{\frac{sC_p}{\dot{Q}}(T - T_O^0) + Y_O - Y_O^0}{\frac{sC_p}{\dot{Q}}(T_F^0 - T_O^0) - Y_O^0} \quad (2.2.17)$$

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να τροποποιηθεί και να πάρει την παρακάτω μορφή:

$$z = \frac{1}{\phi + 1} \left(\phi \frac{Y_F}{Y_F^0} - \frac{Y_O}{Y_O^0} + 1 \right) \quad (2.2.18)$$

όπου ο λόγος ισοδυναμίας ϕ είναι ίσος με:

$$\phi = s \frac{Y_F^0}{Y_O^0} \quad (2.2.19)$$

Αυτός ο λόγος ισοδυναμίας είναι μια σημαντική χημική παράμετρος στις φλόγες διάχυσης και αντιστοιχεί στον λόγο ισοδυναμίας που αποκτάται όταν υπάρχει προανάμειξη της ίδιας μάζας οξυγόνου και καυσίμου. Δεν αντιστοιχεί στο μέσο λόγο ισοδυναμίας μέσα σε έναν καυστήρα διότι αυτός εξαρτάται από το ϕ , αλλά και από τον ρυθμό εισαγωγής καυσίμου και οξειδωτικού.

2.2.3. Εξισώσεις φλογιδίων (flamelet)

Αν και το μοντέλο ‘flamelet’ δεν χρησιμοποιείται από τον κώδικα FDS, αξίζει να αναφερθούν κάποια πράγματα σχετικά με την θεωρία στην οποία βασίζεται. Η εισαγωγή του κλάσματος μείγματος z επιτρέπει την μείωση του αριθμού των μεταβλητών. Μέσω της εξίσωσης (2.2.14) η συγκέντρωση όλων των συστατικών μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει του κλάσματος μείγματος z και της θερμοκρασίας T :

$$Y_k = f(z, T) \quad \text{γιά } k=1, N \quad (2.2.20)$$

Αν και αυτό αποτελεί μια χρήσιμη απλοποίηση του αρχικού προβλήματος, γίνεται μια περαιτέρω υπόθεση, ότι η δομή της φλόγας διάχυσης εξαρτάται μόνο από το κλάσμα μείγματος z και από τον χρόνο t .

Έτσι, η θερμοκρασία και τα κλάσματα μάζας των διαφόρων συστατικών, όσον αφορά τη μονοδιάστατη δομή της φλόγας, μπορούν να υπολογιστούν ως εξής:

$$T = T(z, t) \quad \text{και} \quad Y_k = Y_k(z, t) \quad (2.2.21)$$

Σε μια πολυδιάστατη ροή, η υπόθεση αυτή απαιτεί η φλόγα σε σχέση με το υπόλοιπο πεδίο ροής να είναι λεπτή και έτσι, το κάθε στοιχείο στο μέτωπο της φλόγας μπορεί να θεωρηθεί σαν μια μικρή στρωτή φλόγα που ονομάζεται φλογίδιο (Williams, 1985). Ύστερα από αυτή την υπόθεση, η εξίσωση ισορροπίας του κλάσματος μάζας κάθε συστατικού μπορεί να ξαναγραφεί ως:

$$\rho \frac{\partial Y_k}{\partial t} + Y_k \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) \right] + \frac{\partial Y_k}{\partial z} \left[\rho \frac{\partial z}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial z}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D \frac{\partial z}{\partial x_i} \right) \right] - \rho D \left(\frac{\partial z}{\partial x_i} \frac{\partial z}{\partial x_i} \right) \frac{\partial^2 Y_k}{\partial z^2} = \dot{\omega}_k$$

$$(2.2.22)$$

Οι δύο όροι που βρίσκονται μέσα σε αγκύλες στο αριστερό μέρος της εξίσωσης μηδενίζονται λόγω των εξισώσεων διατήρησης της συνέχειας και του κλάσματος μείγματος και έτσι προκύπτει:

$$\rho \frac{\partial Y_k}{\partial t} = \dot{\omega}_k + \rho D \left(\frac{\partial z}{\partial x_i} \frac{\partial z}{\partial x_i} \right) \frac{\partial^2 Y_k}{\partial z^2} = \dot{\omega}_k + \frac{1}{2} \rho \chi \frac{\partial^2 Y_k}{\partial z^2} \quad (2.2.23)$$

όπου εισάγεται μια νέα μεταβλητή που ονομάζεται ρυθμός καταστροφής (dissipation rate) και δίνεται από την σχέση:

$$\chi = 2D \left(\frac{\partial z}{\partial x_i} \frac{\partial z}{\partial x_i} \right) \quad (2.2.24)$$

Αντίστοιχα, η εξίσωση της θερμοκρασίας γράφεται:

$$\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \dot{\omega}_T + \frac{1}{2} \rho \chi \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (2.2.25)$$

Οι εξισώσεις (2.2.19) και (2.2.21) ονομάζονται εξισώσεις φλογιδίων (flamelet). Αποτελούν χρήσιμες εξισώσεις για πολλές θεωρίες που αφορούν τις φλόγες διάχυσης, διότι ο μόνος όρος που εξαρτάται από χωρικές μεταβλητές είναι ο ρυθμός καταστροφής χ , ο οποίος ελέγχει την ανάμειξη. Αρκεί να προσδιορισθεί το χ και οι εξισώσεις φλογιδίων μπορούν να λυθούν πλήρως στο χώρο z , παρέχοντας έτσι την δομή της φλόγας.

Τέλος, εάν υποθεθεί ότι αυτή η δομή των φλογιδίων είναι μόνιμη, ακόμα και αν η ροή εξαρτάται από τον χρόνο, τότε ισχύει:

$$T = T(z) \quad \text{και} \quad Y_k = Y_k(z) \quad (2.2.26)$$

και οι εξισώσεις (2.2.19) και (2.2.21) παίρνουν την μορφή:

$$\dot{\omega}_k = -\frac{1}{2} \rho \chi \frac{\partial^2 Y_k}{\partial z^2} \quad (2.2.27)$$

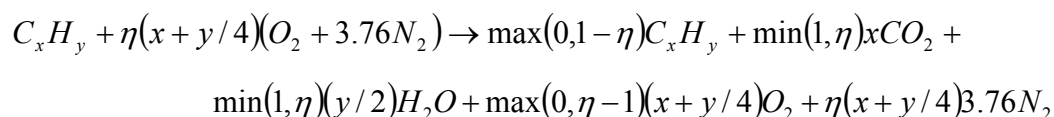
$$\dot{\omega}_T = -\frac{1}{2} \rho \chi \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (2.2.28)$$

απ' τις οποίες φαίνεται ότι οι ρυθμοί αντίδρασης και έκλυσης θερμότητας εξαρτώνται μόνο από τα z και χ .

2.2.4. Δομή της φλόγας για μη αντιστρεπτή και απείρως γρήγορη χημική αντίδραση

Δύο περαιτέρω υποθέσεις που χρησιμοποιούνται στον κώδικα FDS (FDS, Technical Reference Guide) είναι οι εξής:

1. Η χημική αντίδραση είναι ‘απείρως γρήγορη’, που σημαίνει ότι καύσιμο και οξειδωτικό αντιδρούν αμέσως μόλις αναμειχθεί, κατά συνέπεια δεν μπορούν να συνυπάρχουν ταυτόχρονα.
2. Η αντίδραση είναι μη αντιστρεπτή, δηλαδή πραγματοποιείται μόνο με φορά από τα αριστερά προς τα δεξιά. Αυτό φαίνεται και από την ‘ιδανική’ αντίδραση στην οποία βασίζεται ο κώδικας που είναι η:



Εδώ, η παράμετρος η λαμβάνει τιμές από 0 (μόνο καύσιμο και καθόλου οξυγόνο) έως 1 (μόνο οξυγόνο και καθόλου καύσιμο). Μία συσχέτιση της παραμέτρου η και του κλάσματος μείγματος z μπορεί να ληφθεί εάν εφαρμοστεί ο ορισμός του z (εξίσωση 2.2.17) στο αριστερό μέλος της παραπάνω αντίδρασης.

Σημαντικό είναι, επίσης, το γεγονός ότι για απείρως γρήγορη χημική αντίδραση ο ρυθμός αντίδρασης είναι ίσος με μηδέν, επομένως ισχύει (Poinsont και Veynante, 2001):

$$\dot{\omega}_k = 0 \Rightarrow \begin{cases} \frac{\partial^2 Y_k}{\partial z^2} = 0 \\ \eta \\ \chi = 0 \end{cases} \quad (2.2.29)$$

Από την στιγμή που η χημεία είναι μη αντιστρεπτή και απείρως γρήγορη, η λύση είναι $\partial^2 Y_k / \partial z^2 = 0$ και αντιστοιχεί σε μια απείρως λεπτή φλόγα, η οποία χωρίζει αντιδρώντα και προϊόντα αέρια. Και στις δύο πλευρές της φλόγας, η θερμοκρασία και τα κλάσματα μάζας των συστατικών αποτελούν γραμμική συνάρτηση του

κλάσματος μείγματος z , αλλά παρουσιάζουν ασυνέχεια στο μέτωπο της φλόγας. Ο ρυθμός αντίδρασης είναι παντού μηδέν, εκτός από το μέτωπο της φλόγας που τείνει το άπειρο.

2.2.5. Δομή της φλόγας σύμφωνα με τους Burke και Schumann

Οι Burke και Schumann (1928) χρησιμοποίησαν πρώτοι την υπόθεση ότι καύσιμο και οξειδωτικό δεν μπορούν να συνυπάρχουν ταυτόχρονα όταν συμβαίνει μια απείρως γρήγορη αντίδραση. Σε αυτή την περίπτωση, οι μεταβλητές της φλόγας και το κλάσμα μείγματος σχετίζονται θέτοντας απλά $Y_O=0$ (στην πλευρά του καυσίμου) και $Y_F=0$ (στην πλευρά του οξειδωτικού) ως εξής:

- Στην πλευρά του καυσίμου ($z > z_{st}$):

$$\begin{cases} Y_F(z) = zY_F^\infty + (z-1)\frac{Y_O}{s} = Y_F^\infty \frac{z-z_{st}}{1-z_{st}} \\ Y_O(z) = 0 \\ T(z) = zT_F^\infty + (1-z)T_O^\infty + \frac{\dot{Q}Y_F^\infty}{C_p} z_{st} \frac{1-z}{1-z_{st}} \end{cases} \quad (2.2.30)$$

- Στην πλευρά του οξειδωτικού ($z < z_{st}$):

$$\begin{cases} Y_F(z) = 0 \\ Y_O(z) = Y_O^\infty \left(1 - \frac{z}{z_{st}}\right) \\ T(z) = zT_F^\infty + (1-z)T_O^\infty + \frac{\dot{Q}Y_F^\infty}{C_p} z \end{cases} \quad (2.2.31)$$

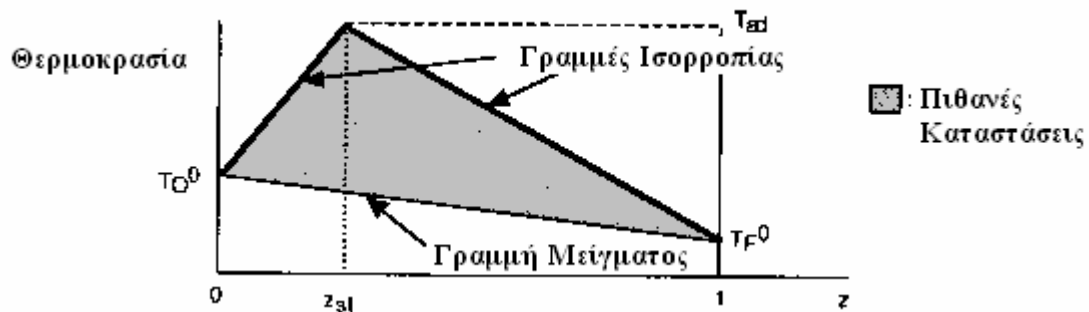
Ο ταυτόχρονος μηδενισμός της ποσότητας του καυσίμου και του οξειδωτικού ορίζει την επιφάνεια της φλόγας, z_{st} , όπου τα Y_F και Y_O είναι και τα δύο ίσα με μηδέν:

$$z_{st} = \frac{1}{1 + \frac{sY_F^\infty}{Y_O^\infty}} = \frac{1}{1 + \frac{\nu_O M_O Y_F^\infty}{\nu_F M_F Y_O^\infty}} = \frac{1}{1 + \phi} \quad (2.2.32)$$

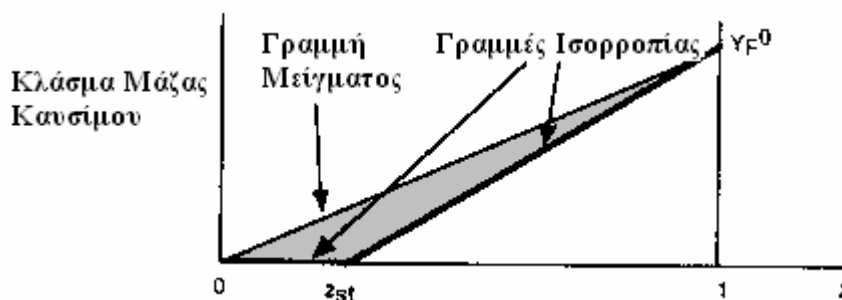
όπου το ϕ έχει ορισθεί νωρίτερα.

Όπως είναι λογικό, για μικρές τιμές του z_{st} η φλόγα βρίσκεται κοντά στην πλευρά του οξειδωτικού, ενώ για μεγάλες τιμές του z_{st} η φλόγα βρίσκεται κοντά στην πλευρά του καυσίμου.

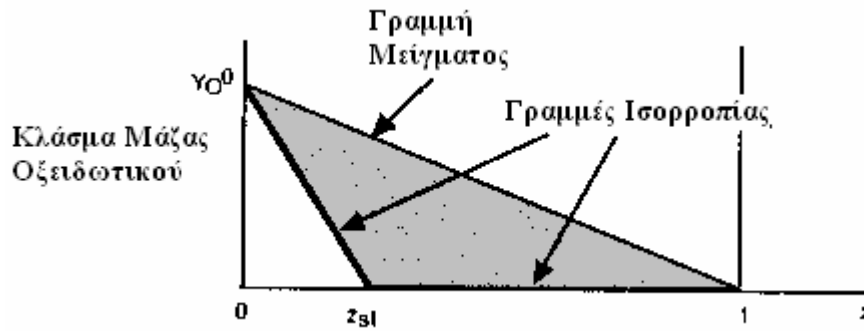
Η εξάρτηση της θερμοκρασίας, του κλάσματος μάζας του καυσίμου και του κλάσματος μάζας του οξειδωτικού από το κλάσμα μείγματος φαίνονται στα σχήματα 2.2.1, 2.2.2 και 2.2.3 αντίστοιχα (Burke και Schumann, 1928). Σε αυτά τα σχήματα φαίνονται επίσης και οι 'γραμμές ανάμειξης' (mixing lines), που αντιστοιχούν σε καταστάσεις όπου καύσιμο και οξειδωτικό αναμειγνύονται χωρίς να αντιδρούν.



Σχήμα 2.2.1. Εξάρτηση της θερμοκρασίας από το κλάσμα μείγματος.
(Burke και Schumann, 1928)



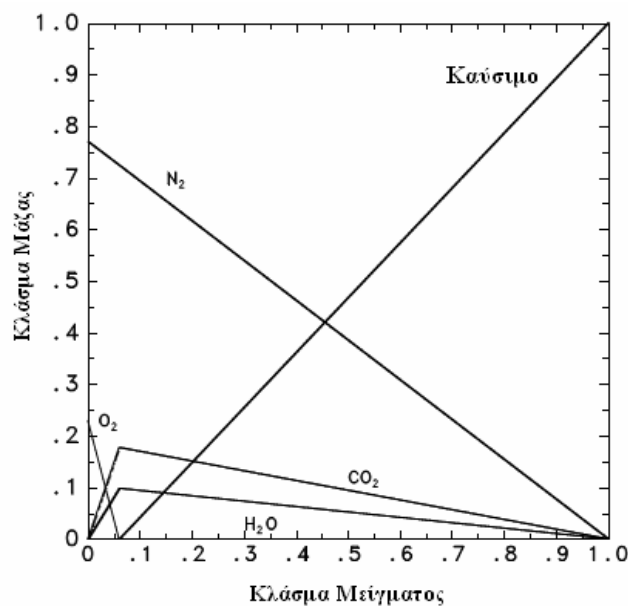
Σχήμα 2.2.2. Εξάρτηση του κλάσματος μάζας του καυσίμου από το κλάσμα μείγματος (Burke και Schumann, 1928).



Σχήμα 2.2.3. Εξάρτηση του κλάσματος μάζας του οξειδωτικού από το κλάσμα μείγματος (Burke και Schumann, 1928).

Για μια δεδομένη στρωτή ή τυρβώδη φλόγα διάχυσης, η απεικόνιση των ποσοτήτων T , Y_F και Y_O σε ένα z διάγραμμα, δίνει μια χρήσιμη εικόνα της φλόγας. Όλα τα σημεία βρίσκονται μεταξύ των ‘γραμμών μείγματος’ και των ‘γραμμών ισορροπίας’ (equilibrium lines), καθώς καμία άλλη κατάσταση δεν είναι δυνατή. Όταν τα περισσότερα σημεία βρίσκονται κοντά στην ‘γραμμή μείγματος’, η φλόγα είναι κοντά στο όριο έναυσης ή σβέσης. Αντιθέτως, σε ένα z διάγραμμα όπου τα σημεία βρίσκονται κοντά στην ‘γραμμή ισορροπίας’ η φλόγα έχει μεγάλη ένταση.

Στο σχήμα 2.2.4 απεικονίζονται ενδεικτικά οι ‘σχέσεις κατάστασης’ (γραμμές ισορροπίας) για το προπάνιο (C_3H_8).



Σχήμα 2.2.4. Σχέσεις κατάστασης για το προπάνιο.

2.2.6. Αριθμητικοί και φυσικοί περιορισμοί

Το μοντέλο κλάσματος μείγματος υπακούει σε κάποιους αριθμητικούς και φυσικούς περιορισμούς.

Οι αριθμητικοί περιορισμοί σχετίζονται με την ανάλυση του αριθμητικού πλέγματος. Αν, δηλαδή, το πλέγμα είναι αραιό, η ακρίβεια της διαδικασίας μεταφοράς της μάζας του καυσίμου και της καύσης του μειώνονται λόγω της εμφάνισης ισχυρής αριθμητικής διάχυσης. Μέτρο της ποιότητας περιγραφής των φαινομένων καύσης αποτελεί η έκφραση $D^*/\delta x$, όπου το D^* είναι η χαρακτηριστική διάμετρος της φωτιάς και δίνεται από την σχέση:

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (2.2.33)$$

ενώ δx είναι το μέγεθος ενός κελιού του πλέγματος.

Η ποσότητα $D^*/\delta x$ μπορεί να θεωρηθεί ως ο αριθμός των υπολογιστικών κελιών στα οποία χωρίζεται η χαρακτηριστική διάμετρος της φωτιάς. Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι σε όσα περισσότερα κελιά χωρίζεται η φωτιά, τόσο καλύτερη είναι η ποιότητα των προλέξεων. Για φωτιές όπου το D^* είναι μικρό σχετικά με τη φυσική διάμετρο της φωτιάς και/ή το πλέγμα είναι σχετικά αραιό, η στοιχειομετρική επιφάνεια $z=z_{st}$ υποεκτιμά το πραγματικό ύψος της φλόγας (Liang *et al.*, 2003).

Ο φυσικός περιορισμός του μοντέλου είναι η υπόθεση ότι το καύσιμο και το οξυγόνο καίγονται ταυτόχρονα όταν αναμειγνύονται. Για τις περιπτώσεις καλά αεριζόμενων φωτιών μεγάλης κλίμακας αυτό είναι μια καλή υπόθεση. Σε συνθήκες όμως όπου η συγκέντρωση του οξυγόνου είναι χαμηλή ή όταν εισάγεται κάποιο κατασβεστικό μέσο (για παράδειγμα νερό ή διοξείδιο του άνθρακα), τότε το καύσιμο και το οξυγόνο μπορεί να αναμειχθούν αλλά να μην καούν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

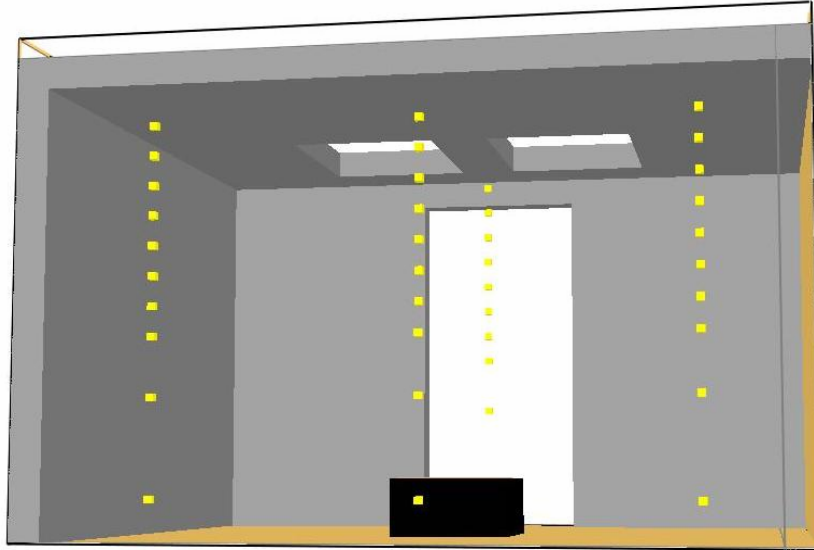
Με στόχο την πιστοποίηση του υπολογιστικού κώδικα FDS έγινε προσομοίωση μια σειράς πραγματικών πειραμάτων φωτιάς σε εσωτερικό χώρο (Merci και Vandeveld, 2006), αποσκοπώντας στη σύγκριση των προλέξεων με τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα. Το πείραμα εστιάζεται στην καταγραφή της θερμοκρασίας σε ένα τυπικό δωμάτιο, στο οποίο είναι τοποθετημένος ένας καυστήρας εξανίου, ενώ διαθέτει μια πόρτα και δύο ανοίγματα στην οροφή του. Βασικά χαρακτηριστικά των πραγματοποιηθέντων πειραμάτων είναι τα εξής:

- Η επιφάνεια του καυστήρα είναι σχετικά μεγάλη συγκρινόμενη με το άνοιγμα της πόρτας, τα ανοίγματα της οροφής και τις διαστάσεις του δωματίου,
- ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας ανά μονάδα επιφανείας του καυστήρα είναι σχετικά μεγάλος,
- τα ανοίγματα της οροφής, αρχικά είναι ίσα και τοποθετημένα συμμετρικά, αλλά, στην συνέχεια μειώνεται η επιφάνεια του ενός εκ των δύο.

Βασικός στόχος των πειραμάτων ήταν η μελέτη της επίδρασης μιας σειράς παραμέτρων (όπως η συνολική επιφάνεια των ανοιγμάτων της οροφής, η επιφάνεια του καυστήρα και ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας της φωτιάς) στον ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας σε ολόκληρο το δωμάτιο.

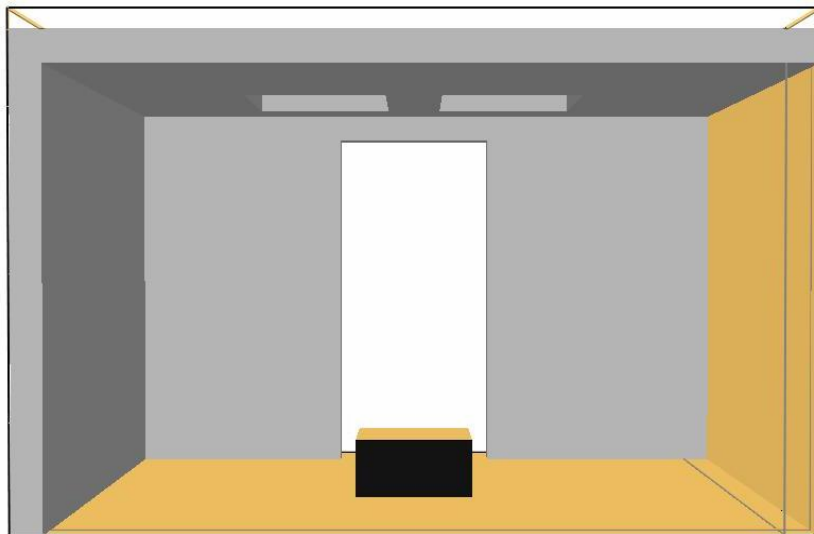
3.2. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Στην εικόνα 3.2.1 απεικονίζεται η γεωμετρία του δωματίου που χρησιμοποιήθηκε από τους Merci και Vandeveld (2006). Το δωμάτιο έχει μήκος 3.6m (άξονας-x), πλάτος 3.0m (άξονας -y) και ύψος 2.3m (άξονας -z). Το υπολογιστικό χωρίο που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του δωματίου είχε διαστάσεις 3.6×3.2×2.4m, δηλαδή ήταν μεγαλύτερο κατά 0.2m στον άξονα -y και κατά 0.1m στον άξονα -z.

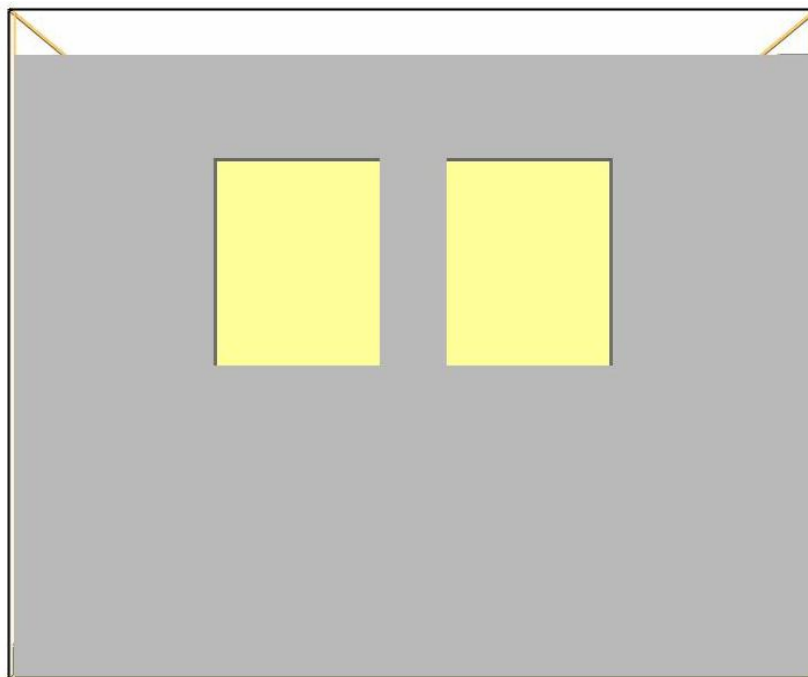


Εικόνα 3.2.1. Γεωμετρία του δωματίου.

Στην εικόνα 3.2.2 παρουσιάζεται η πίσω όψη του δωματίου, προκειμένου να γίνει σαφές το μέγεθος του καυστήρα, ενώ στην εικόνα 3.2.3 απεικονίζεται με σαφήνεια η συνολική επιφάνεια των ανοιγμάτων της οροφής.



Εικόνα 3.2.2. Πίσω όψη του δωματίου.



Εικόνα 3.2.3. Κάτοψη του δωματίου.

Το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από 221184 κελιά ($72 \times 64 \times 48$), καθένα από τα οποία ήταν ουσιαστικά ένας κύβος με ακμή 0.05m. Η μικρή αύξηση των διαστάσεων του χωρίου αντιστοιχούσε σε επιπλέον κενό χώρο έξω από το δωμάτιο. Ο λόγος για τον οποίο έγινε αυτό αφορά τον αριθμό των κελιών. Στον κώδικα FDS, οι διαστάσεις του πλέγματος πρέπει να είναι της μορφής $2^l 3^m 5^n$, όπου τα l, m και n είναι ακέραιοι αριθμοί (FDS, User's Guide). Οι αριθμοί 72, 64 και 48 ικανοποιούν αυτή τη συνθήκη, γεγονός το οποίο δεν θα ήταν εφικτό αν το πλέγμα είχε ακριβώς τις διαστάσεις του. Δεδομένου ότι στον κώδικα FDS, όπως και σε κάθε κώδικα Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής, οι ιδιότητες στο εσωτερικό ενός κελιού θεωρούνται σταθερές, ο αριθμός των κελιών πρέπει να είναι τέτοιος, ώστε κάθε κελί να περιέχει σε ολόκληρο τον όγκο του ένα και μόνο υλικό. Αυτός είναι ένας ακόμα περιορισμός που λήφθηκε υπ' όψιν κατά τη διαδικασία καθορισμού των διαστάσεων του πλέγματος.

Σημειώνεται, επίσης, ότι σύμφωνα με τους Merci και Van Maele (2007), η χαρακτηριστική διάμετρος της φωτιάς δίνεται από την σχέση:

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{amb} c_p T_{amb} \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (3.2.1)$$

όπου D^* είναι η χαρακτηριστική διάμετρος της φωτιάς, \dot{Q} ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας της φωτιάς, ρ_{amb} η πυκνότητα του περιβάλλοντα αέρα, c_p η ειδική θερμοχωρητικότητα, T_{amb} η θερμοκρασία περιβάλλοντος και g η σταθερά της βαρύτητας.

Στις περιπτώσεις που μελετήθηκαν, η τιμή της χαρακτηριστικής διαμέτρου ήταν ίση με 0.65m. Ένας επιπλέον περιορισμός για το πλέγμα ο οποίος ισχύει στον κώδικα FDS και αποτελεί κριτήριο για την ποιότητα του πλέγματος, είναι ότι το μέγεθος του κάθε κελιού πρέπει να είναι μικρότερο από $0.1 \times D^*$, δηλαδή 0.065m ή 6.5cm. Τα κελιά που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις είχαν σχήμα κύβου με ακμή 5cm, ικανοποιώντας και αυτή τη συνθήκη. Για τη μείωση του υπολογιστικού χρόνου το δωμάτιο χωρίστηκε σε τέσσερα χωρία ίδιων διαστάσεων και χρησιμοποιήθηκε η δυνατότητα παράλληλης επεξεργασίας του κώδικα FDS. Σε κάθε χωρίο χρησιμοποιήθηκε πλέγμα 55296 κελιών ($36 \times 64 \times 24$).

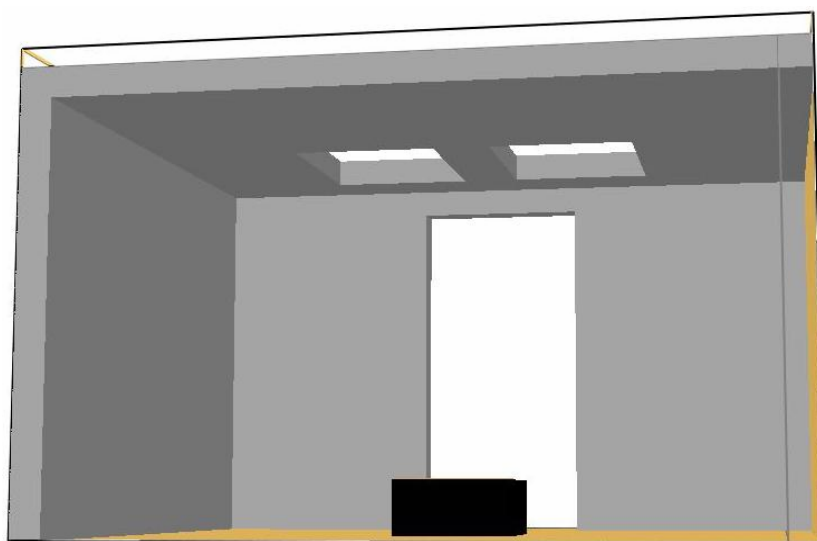
Οι τοίχοι του δωματίου και η οροφή είναι κατασκευασμένοι από τσιμέντο και έχουν πάχος 15cm. Για το τσιμέντο δίνονται η πυκνότητά του ($\rho=2200\text{kg/m}^3$), η ειδική του θερμοχωρητικότητα ($c_p=900\text{J/kg.K}$) και η θερμική του αγωγιμότητα ($k=0.2\text{W/m.K}$). Στον εμπρός τοίχο υπάρχει μια ανοιχτή πόρτα με διαστάσεις $0.9 \times 2.0\text{m}$. Στην οροφή υπάρχουν δύο ανοίγματα μεγέθους $0.75 \times 1\text{m}$ το καθένα, τα οποία απέχουν μεταξύ τους απόσταση ίση με 0.3m. Είναι κεντρικά τοποθετημένα εκατέρωθεν του $x=1.8\text{m}$ και το κέντρο του καθενός απέχει 1m από τον μπροστινό τοίχο. Στο κέντρο του δωματίου είναι τοποθετημένος ένας καυστήρας με διαστάσεις $0.6 \times 0.6 \times 0.3\text{m}$ (ύψος). Στην πάνω επιφάνεια του καυστήρα ($z=0.3\text{m}$) βρίσκεται η πηγή φωτιάς, η οποία τροφοδοτείται με εξάνιο (C_6H_{14}).

Τέλος, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.2.1, στο εσωτερικό του δωματίου βρίσκονται εγκατεστημένες τέσσερις σειρές θερμοστοιχείων, καθεμία εκ των οποίων αποτελείται από 10 θερμοστοιχεία. Τα θερμοστοιχεία αυτά χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της θερμοκρασίας σε διάφορες θέσεις μέσα στο δωμάτιο. Όπως φαίνεται, οι τρεις σειρές βρίσκονται πίσω από τον καυστήρα και σε απόσταση 0.45m από τον πίσω τοίχο, ενώ η τέταρτη βρίσκεται μπροστά από τον καυστήρα και σε απόσταση 0.5m από την πόρτα. Η θερμοκρασία σε κάθε ύψος προέκυψε ως ο μέσος όρος των θερμοκρασιών των τεσσάρων θερμοστοιχείων που βρίσκονται σε αυτό το ύψος.

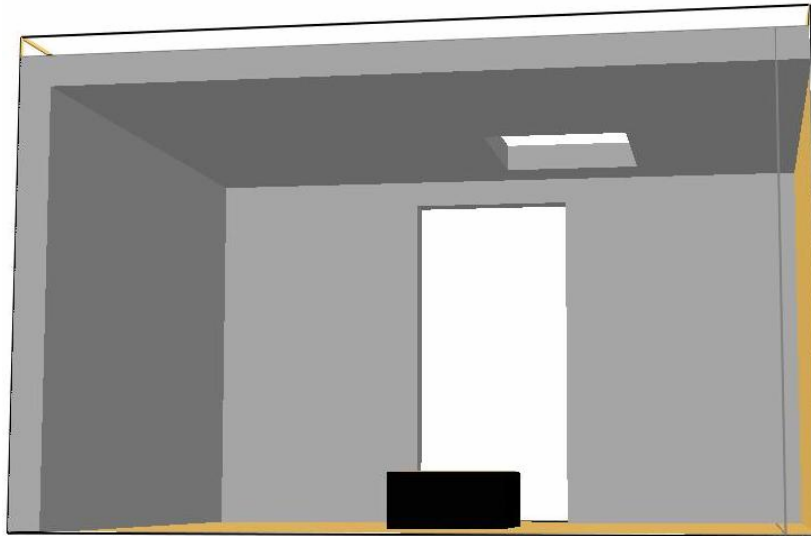
3.3. ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, οι τρεις παράμετροι των οποίων η επίδραση μελετήθηκε στα πειράματα ήταν η συνολική επιφάνεια των ανοιγμάτων της οροφής, η επιφάνεια του καυστήρα και ο ρυθμός έκλυσης της θερμότητας.

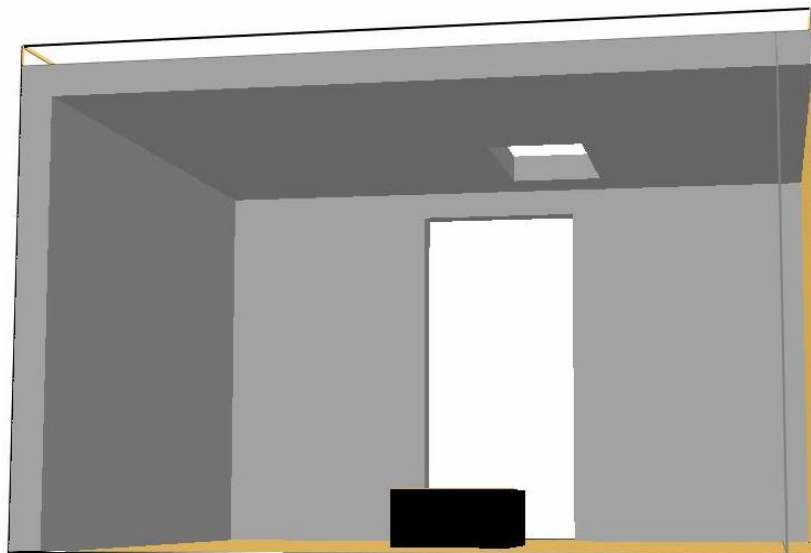
Όσον αφορά τη συνολική επιφάνεια των ανοιγμάτων οροφής (A_{roof}), στην πρώτη και τέταρτη σειρά πειραμάτων και τα δύο ανοίγματα ήταν τελείως ανοιχτά, επομένως η συνολική επιφάνεια ήταν ίση με $A_{\text{roof}} = 2 \times (0.75\text{m} \times 1\text{m}) = 1.5\text{m}^2$. Στη δεύτερη και πέμπτη σειρά, το αριστερό άνοιγμα καλύφθηκε πλήρως, επομένως η συνολική επιφάνεια των ανοιγμάτων μειώθηκε στο μισό και έγινε ίση με $A_{\text{roof}} = 1 \times (0.75\text{m} \times 1\text{m}) = 0.75\text{m}^2$. Τέλος, στην τρίτη και έκτη σειρά πειραμάτων, το δεξί άνοιγμα καλύφθηκε κατά 0.25m από την δεξιά πλευρά και η συνολική επιφάνεια των ανοιγμάτων έγινε $A_{\text{roof}} = 1 \times (0.75 - 0.25)\text{m} \times 1\text{m} = 0.5\text{m}^2$. Στις εικόνες 3.3.1, 3.3.2 και 3.3.3 παρατηρούνται οι τρεις διαφορετικές περιπτώσεις που αφορούν την συνολική επιφάνεια των ανοιγμάτων της οροφής. Σημειώνεται ότι για την δημιουργία όλων των εικόνων που εμφανίζονται σε αυτό το κεφάλαιο, όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο 2.1, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Smokeview.



Εικόνα 3.3.1. Συνολική επιφάνεια ανοιγμάτων οροφής ίση με $A_{\text{roof}} = 1.5\text{m}^2$
(σειρές πειραμάτων 1 και 4).

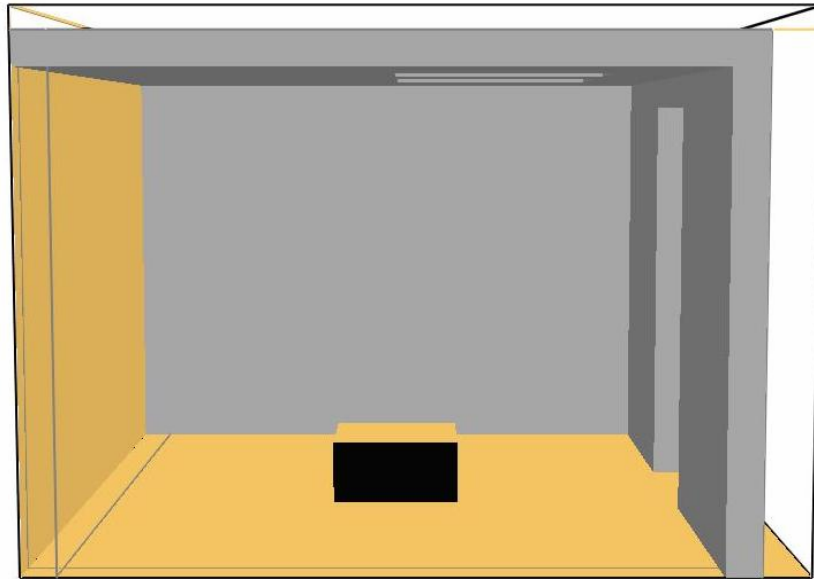


Εικόνα 3.3.2. Συνολική επιφάνεια ανοιγμάτων οροφής ίση με $A_{\text{roof}}=0.75\text{m}^2$
(σειρές πειραμάτων 2 και 5).

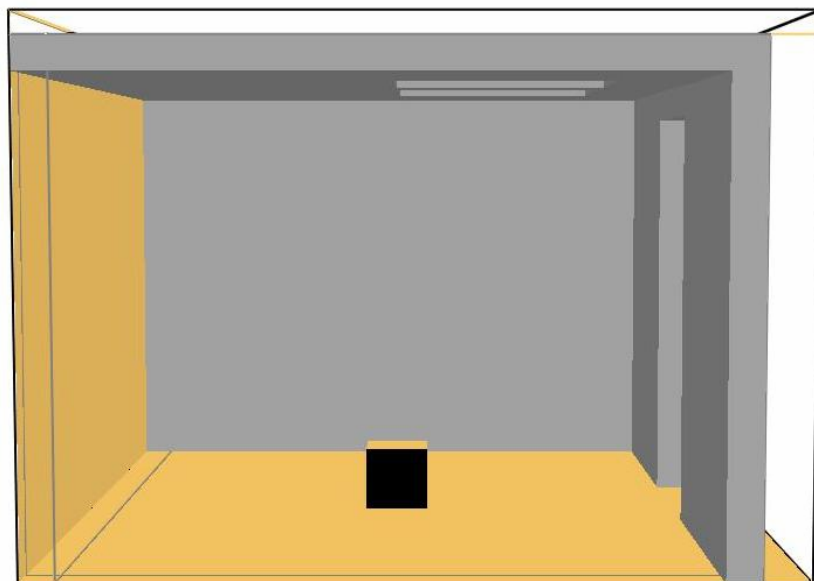


Εικόνα 3.3.3. Συνολική επιφάνεια ανοιγμάτων οροφής ίση με $A_{\text{roof}}=0.5\text{m}^2$
(σειρές πειραμάτων 3 και 6).

Σχετικά με την επιφάνεια της πηγής της φωτιάς (A_f), στις τρεις πρώτες σειρές πειραμάτων (σειρές 1,2,3) η επιφάνεια αυτή ήταν ίση με $A_f=0.6\text{m}\times 0.6\text{m}=0.36\text{m}^2$, ενώ στις τρεις επόμενες σειρές (σειρές 4,5,6) ήταν ίση με $A_f=0.3\text{m}\times 0.3\text{m}=0.09\text{m}^2$, δηλαδή μειώθηκε στο 1/4 της αρχικής επιφάνειας. Στις εικόνες 3.3.4 και 3.3.5 παρουσιάζονται οι δύο διαφορετικές επιφάνειες της φωτιάς. Σημειώνεται ότι και στις δύο εικόνες απεικονίζεται η πλάγια όψη του δωματίου.



Εικόνα 3.3.4. Επιφάνεια της πηγής της φωτιάς ίση με $A_f = 0.6\text{m} \times 0.6\text{m}$
(σειρές πειραμάτων 1, 2 και 3).



Εικόνα 3.3.5. Επιφάνεια της πηγής της φωτιάς ίση με $A_f = 0.3\text{m} \times 0.3\text{m}$
(σειρές πειραμάτων 4, 5 και 6).

Η τελευταία παράμετρος που μελετήθηκε ήταν η ισχύς της φωτιάς (Q). Σε κάθε σειρά πειραμάτων έγιναν πειράματα με τρεις διαφορετικές τιμές για την ισχύ της φωτιάς, οι οποίες ήταν ίσες με 330kW, 440kW και 550kW αντίστοιχα. Συνολικά μελετήθηκαν 18 διαφορετικές περιπτώσεις, οι οποίες φαίνονται αναλυτικά στον πίνακα 3.3.1.

Πίνακας 3.3.1. Αναλυτική παρουσίαση των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα που έγιναν.

Περίπτωση	Παράμετροι		
	A_{roof} (m ²)	A_f (m ²)	Q_f (kW)
1α	1.5	0.6×0.6	330
1β	1.5	0.6×0.6	440
1γ	1.5	0.6×0.6	550
2α	0.75	0.6×0.6	330
2β	0.75	0.6×0.6	440
2γ	0.75	0.6×0.6	550
3α	0.5	0.6×0.6	330
3β	0.5	0.6×0.6	440
3γ	0.5	0.6×0.6	550
4α	1.5	0.3×0.3	330
4β	1.5	0.3×0.3	440
4γ	1.5	0.3×0.3	550
5α	0.75	0.3×0.3	330
5β	0.75	0.3×0.3	440
5γ	0.75	0.3×0.3	550
6α	0.5	0.3×0.3	330
6β	0.5	0.3×0.3	440
6γ	0.5	0.3×0.3	550

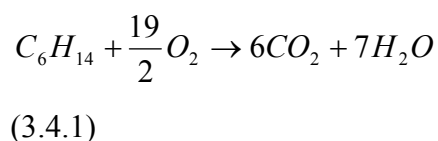
Η χρονική διάρκεια του κάθε πειράματος ήταν 30min. Επειδή, όμως, ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για την προσομοίωση των 30min είναι αρκετά μεγάλος (περίπου 8 ημέρες σε έναν σύγχρονο ηλεκτρονικό υπολογιστή) και αφού παρατηρήθηκε ότι μετά τα πρώτα 3-4min η φλόγα επιτυγχάνει μια σταθερή κατάσταση με πολύ μικρές διακυμάνσεις, οι υπολογισμοί που έγιναν με τον κώδικα FDS αντιστοιχούσαν σε φυσικό χρόνο ίσο με 5min. Έτσι, η προσομοίωση του κάθε πειράματος μειώθηκε στις 30 ώρες περίπου, χρόνος πολύ μικρότερος από αυτόν που θα χρειαζόταν για την πλήρη προσομοίωση των 30 λεπτών.

3.4. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Μετά την εισαγωγή όλων των παραμέτρων που προαναφέρθηκαν στον κώδικα FDS, πραγματοποιήθηκε παραμετρική μελέτη ορισμένων μεταβλητών με στόχο τον προσδιορισμό του συνδυασμού εκείνου ο οποίος παρέχει τα βέλτιστα υπολογιστικά αποτελέσματα σε σύγκριση με τις πειραματικές μετρήσεις. Οι τέσσερις αυτές παράμετροι είναι οι εξής:

1. Η σταθερά Smagorinsky.
2. Το κλάσμα ακτινοβολίας.
3. Το μοντέλο ακτινοβολίας.
4. Ο αριθμός των γωνιών ακτινοβολίας.

Σημειώνεται ότι η θερμοκρασία περιβάλλοντος σε όλες τις προσομοιώσεις θεωρήθηκε ίση με 30°C, ενώ λόγω της χρήσης το καύσιμου εξάνιου, η χημική αντίδραση της καύσης δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:



όπου η θερμότητα καύσης είναι $\Delta H_c=44\text{MJ/kg}$.

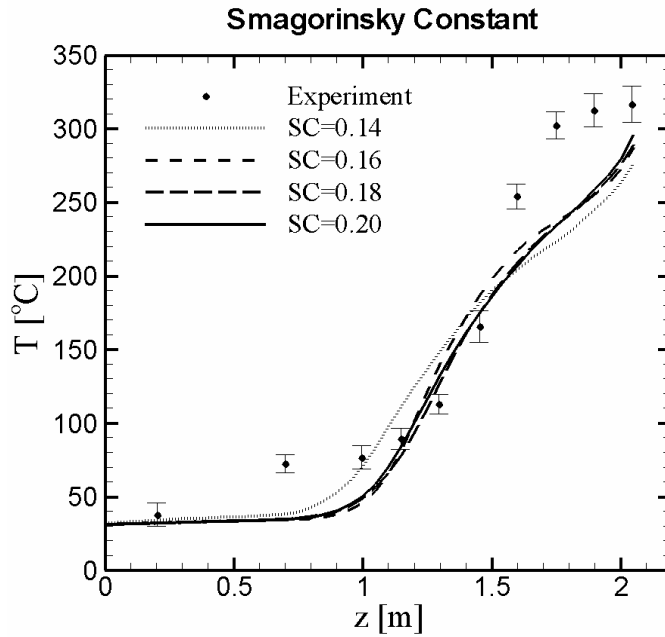
Στην συνέχεια περιγράφεται αναλυτικά η επίδραση της κάθε παραμέτρου στα υπολογιστικά αποτελέσματα.

3.4.1. Σταθερά Smagorinsky

Όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 2.1, στον κώδικα FDS τα τυρβώδη φαινόμενα περιγράφουν μέσω της επίλυσης της εξίσωσης Smagorinsky του μοντέλου LES (Smagorinsky, 1963). Η σχέση προσδιορισμού του δυναμικού ιξώδους (μ) είναι:

$$\mu_{LES} = \rho(C_s \Delta)^2 \left(2\overline{S_{ij}S_{ij}} - \frac{2}{3}(\nabla \cdot \vec{u})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.4.2)$$

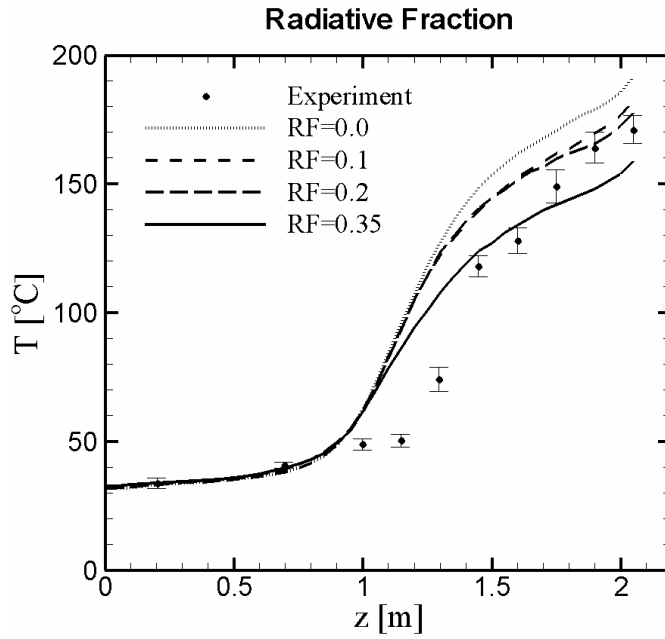
όπου C_s είναι η σταθερά Smagorinsky και Δ είναι ένα χαρακτηριστικό μήκος της τάξης των διαστάσεων ενός κελιού του πλέγματος. Η 'παύλα' πάνω από ορισμένες ποσότητες υποδηλώνει μεγέθη τα οποία φιλτράρονται, δηλαδή υπολογίζονται στο αριθμητικό πλέγμα. Αυτός ο μαθηματικός τύπος περιγράφει την απορρόφηση κινητικής ενέργειας από την ροή και την μετατροπή της σε θερμική ενέργεια. Η αρχική τιμή που χρησιμοποιείται στον κώδικα FDS για την σταθερά Smagorinsky είναι 0.20. Στην παραμετρική μελέτη διερευνήθηκαν οι εναλλακτικές τιμές 0.20, 0.18, 0.16 και 0.14 για τον συντελεστή C_s . Όπως φαίνεται από αυτό το σχήμα, η σταθερά Smagorinsky δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα υπολογιστικά αποτελέσματα. Και οι τέσσερις τιμές που δοκιμάστηκαν οδηγούν σε σχεδόν αμετάβλητα αποτελέσματα, με εξαίρεση μόνο την τιμή $C_s=0.14$ για την οποία παρατηρείται μεγαλύτερη απόκλιση των αποτελεσμάτων από τα πειραματικά δεδομένα σε σχέση με τις άλλες τρεις περιπτώσεις. Επίσης, καμία από τις τέσσερις τιμές που δοκιμάστηκαν δεν προκαλεί αριθμητική αστάθεια κατά τους υπολογισμούς, ενώ τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την τιμή $C_s=0.20$ βρίσκονται οριακά πιο κοντά στις πειραματικές μετρήσεις. Επομένως η τιμή που επιλέγεται για την προσομοίωση όλων των περιπτώσεων είναι η $C_s=0.20$, η οποία αποτελεί και την προεπιλεγμένη τιμή που προτείνεται για χρήση στον κώδικα FDS. Στο σχήμα 3.4.1 συγκρίνονται οι προλέξεις του κώδικα FDS με τα πειραματικά αποτελέσματα για τις τέσσερις τιμές της σταθεράς Smagorinsky που δοκιμάστηκαν στην περίπτωση 6γ (βλέπε πίνακα 3.3.1).



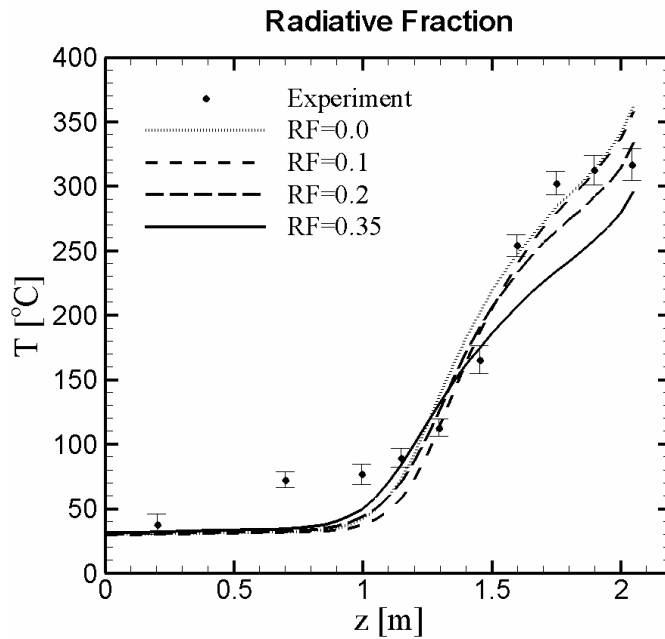
Σχήμα 3.4.1. Σύγκριση των προλέξεων της θερμοκρασίας με τα πειραματικά δεδομένα (Περίπτωση 6γ) για τέσσερις τιμές της σταθεράς Smagorinsky (SC).

3.4.2. Κλάσμα ακτινοβολίας

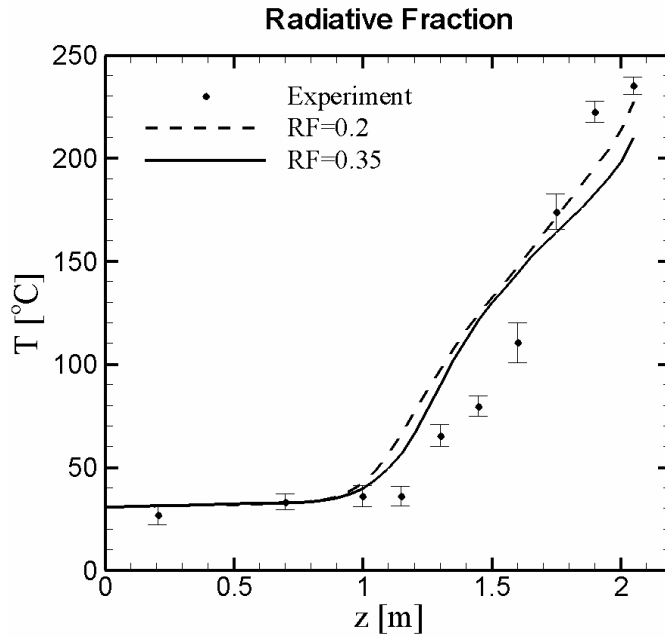
Στον κώδικα FDS ορίζεται ως κλάσμα ακτινοβολίας, το ποσοστό της συνολικής ενέργειας που εκλύεται από την φλόγα υπό τη μορφή θερμικής ακτινοβολίας (FDS, User's Guide). Η αρχική τιμή που χρησιμοποιείται στον κώδικα FDS για το κλάσμα ακτινοβολίας είναι 0.35. Στην παραμετρική μελέτη για το κλάσμα ακτινοβολίας διερευνήθηκαν οι τιμές 0.35, 0.20, 0.10 και 0.0. Επειδή εμφανίστηκαν αισθητές διαφορές στα υπολογιστικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την χρήση αυτών των τεσσάρων τιμών, η παραμετρική μελέτη έγινε για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις, τις 1α, 6α και 6γ, προκειμένου να προσδιοριστεί τελικά η τιμή για το κλάσμα ακτινοβολίας που θα χρησιμοποιηθεί σε όλες τις περιπτώσεις.



Σχήμα 3.4.2. Σύγκριση των προλέξεων της θερμοκρασίας με τα πειραματικά δεδομένα (Περίπτωση 1α) για τέσσερις τιμές του κλάσματος ακτινοβολίας (RF).



Σχήμα 3.4.3. Σύγκριση των προλέξεων της θερμοκρασίας με τα πειραματικά δεδομένα (Περίπτωση 6γ) για τέσσερις τιμές του κλάσματος ακτινοβολίας (RF).



Σχήμα 3.4.4. Σύγκριση των προλέξεων της θερμοκρασίας με τα πειραματικά δεδομένα (Περίπτωση 6α) για δύο τιμές του κλάσματος ακτινοβολίας (RF).

Παρατηρώντας το σχήμα 3.4.2, το οποίο αντιστοιχεί στην περίπτωση όπου η συνολική επιφάνεια των ανοιγμάτων οροφής είναι η μέγιστη (1.5m^2) και ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας ο μικρότερος (330kW σε επιφάνεια $0.6\text{m}\times 0.6\text{m}$, δηλαδή $916.67\text{kW}/\text{m}^2$), φαίνεται ότι σε ύψος μέχρι 1m περίπου, οι τέσσερις τιμές του κλάσματος ακτινοβολίας παρέχουν παραπλήσια αποτελέσματα, πράγμα λογικό αφού οι θερμοκρασίες είναι σχετικά χαμηλές. Υπενθυμίζεται ότι οι μετρήσεις αντιστοιχούν στη μέση θερμοκρασία στο εσωτερικό του δωματίου για κάθε ύψος. Αντίθετα, όσο μεγαλώνει το ύψος πάνω από το 1m , τα αποτελέσματα που προκύπτουν με βάση τις τέσσερις τιμές του κλάσματος ακτινοβολίας διαφέρουν όλο και περισσότερο μεταξύ τους. Παρατηρείται ότι στην περιοχή με ύψος πάνω από 1m περίπου, όσο αυξάνει η τιμή του κλάσματος ακτινοβολίας, τόσο μικρότερες γίνονται οι θερμοκρασίες. Το ίδιο ακριβώς συμπέρασμα εξάγεται παρατηρώντας και το σχήμα 3.4.4, το οποίο αναφέρεται στην περίπτωση συνολικής επιφάνειας ανοιγμάτων οροφής ίση με 0.5m^2 και ρυθμό έκλυσης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας $3666.67\text{ kW}/\text{m}^2$ (330kW σε επιφάνεια $0.3\text{m}\times 0.3\text{m}$). Αντίστοιχα, το σχήμα 3.4.3 αναφέρεται στην περίπτωση μικρής επιφάνειας ανοιγμάτων οροφής (0.5m^2), ενώ η ισχύς της φωτιάς είναι η μέγιστη (550kW) και η επιφάνεια της η μικρότερη ($0.3\text{m}\times 0.3\text{m}$), με αποτέλεσμα ο

ρυθμός έκλυσης θερμότητας να είναι ο μέγιστος (6111.11kW/m^2). Στην περίπτωση αυτή, δεδομένου ότι η ένταση της φωτιάς είναι μεγάλη και η επιφάνεια των ανοιγμάτων της οροφής μικρή, η ενέργεια που εκλύεται υπό μορφή ακτινοβολίας επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό τις θερμοκρασίες στα διάφορα σημεία του δωματίου απ' ό τι στις άλλες δύο περιπτώσεις. Έτσι, παρατηρείται ότι για ύψος μέχρι 1.3m περίπου όσο αυξάνεται η τιμή του κλάσματος ακτινοβολίας προκύπτουν και μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Από αυτό το ύψος και μετά συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο, δηλαδή όσο μεγαλύτερο είναι το κλάσμα ακτινοβολίας, προκύπτουν τόσο μικρότερες θερμοκρασίες.

Κατά συνέπεια, κάνοντας χρήση των συμπερασμάτων που εξήχθησαν μέσω των σχημάτων 3.4.2, 3.4.3 και 3.4.4, επιλέχθηκε η χρήση της τιμής 0.20 για το κλάσμα ακτινοβολίας σε όλες τις περιπτώσεις.

3.4.3. Μοντέλο ακτινοβολίας

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2.1, λόγω της αδυναμίας επίλυσης της εξίσωσης μεταφοράς της ακτινοβολίας σε ολόκληρο το φάσμα εκπομπής, στον κώδικα FDS το φάσμα, χωρίζεται σε έναν αριθμό ζωνών και σε κάθε μια από αυτές εφαρμόζεται ξεχωριστά η εξίσωση μεταφοράς ακτινοβολίας, η οποία είναι η:

$$\vec{s} \cdot \nabla I_n(\vec{x}, \vec{s}) = \kappa_n(\vec{x}) [I_{b,n}(\vec{x}) - I_n(\vec{x}, \vec{s})], \quad n = 1 \dots N \quad (3.4.3)$$

όπου I_n είναι η ένταση της ακτινοβολίας ολοκληρούμενη πάνω στην ζώνη n και κ_n είναι ο μέσος συντελεστής απορρόφησης αυτής της ζώνης (FDS, Technical Reference Guide). Όταν υπολογιστεί η ένταση της ακτινοβολίας που αντιστοιχεί σε κάθε ζώνη, η συνολική ένταση της ακτινοβολίας δίνεται από το άθροισμά τους, δηλαδή ισχύει:

$$I(\vec{x}, \vec{s}) = \sum_{n=1}^N I_n(\vec{x}, \vec{s}) \quad (3.4.4)$$

Έπειτα από μια σειρά αριθμητικών πειραμάτων έχει βρεθεί ότι έξι ζώνες είναι συνήθως αρκετές ($N=6$). Αυτό το μοντέλο χρησιμοποιείται και στον κώδικα FDS, το οποίο ονομάζεται μοντέλο φαιού αερίου (gray gas model). Εάν η απορρόφηση του καυσίμου όμως θεωρείται σημαντική, τότε χρησιμοποιούνται ξεχωριστές ζώνες γι' αυτό και έτσι, ο συνολικός αριθμός ζωνών αυξάνεται σε εννέα ($N=9$). Σε αυτή την περίπτωση, χρησιμοποιείται το μοντέλο ευρείας ζώνης (wide band model). Στους πίνακες 3.4.1 και 3.4.2 παρουσιάζονται τα όρια των ζωνών (συχνότητα, ν και μήκος κύματος, λ) για τα σημαντικότερα συστατικά όταν το καύσιμο είναι μεθάνιο (CH_4).

Πίνακας 3.4.1. Όρια φασματικών ζωνών για τα σημαντικότερα συστατικά για μοντέλο ακτινοβολίας 6 ζωνών (FDS, Technical Reference Guide).

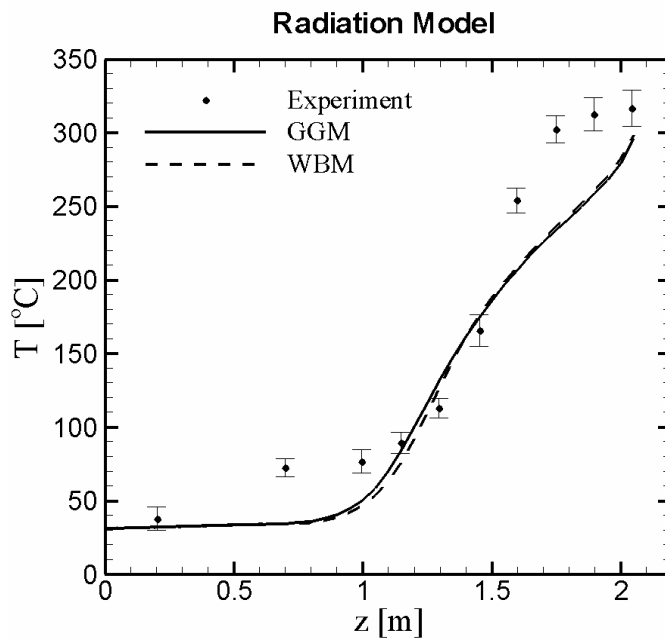
Αριθμός ζώνης	1	2	3	4	5	6
Σημαντικότερα συστατικά	Καπνός	CO ₂ , H ₂ O, Καπνός	CH ₄ , Καπνός	CO ₂ , Καπνός	H ₂ O, CH ₄ , Καπνός	Καπνός
ν (1/cm)	10000 - 3800	3800 - 3400	3400 - 2400	2400 - 2174	2174 - 1000	1000 - 50
λ (μ m)	1.00 – 2.63	2.63 – 2.94	2.94 – 4.17	4.17 – 4.70	4.70 – 10.0	10.0 - 200

Πίνακας 3.4.2. Όρια φασματικών ζωνών για τα σημαντικότερα συστατικά για μοντέλο ακτινοβολίας 9 ζωνών (FDS, Technical Reference Guide).

Αριθμός ζώνης	1	2	3	4	5	6
Σημαντικότερα συστατικά	Καπνός	CO ₂ , H ₂ O, Καπνός	CH ₄ , Καπνός	Καπνός	CO ₂ , Καπνός	H ₂ O, Καπνός
ν (1/cm)	10000 - 3800	3800 - 3400	3400 - 2800	2800 - 2400	2400 - 2174	2174 – 1429
λ (μ m)	1.00 – 2.63	2.63 – 2.94	2.94 – 3.57	3.57 – 4.17	4.17 – 4.70	4.70 – 7.00

Αριθμός ζώνης	7	8	9
Σημαντικότερα συστατικά	H ₂ O, CH ₄ , Καπνός	Καπνός	Καπνός
ν (1/cm)	1429 - 1160	1160 - 1000	1000 - 50
λ (μm)	7.00 - 8.62	8.62 - 10.0	10.0 - 200

Στην παραμετρική μελέτη χρησιμοποιήθηκαν και τα δύο μοντέλα ακτινοβολίας, gray gas model (GGM) και wide band model (WBM). Στο σχήμα 3.4.5 γίνεται η σύγκριση των αντίστοιχων προλέξεων της θερμοκρασίας του κώδικα FDS με τα πειραματικά δεδομένα για την περίπτωση 6γ. Αξίζει να σημειωθεί ότι η χρήση του μοντέλου ακτινοβολίας ευρείας ζώνης αύξησε κατά πολύ τον υπολογιστικό χρόνο της προσομοίωσης, ο οποίος ήταν σχεδόν διπλάσιος σε σχέση με αυτού του μοντέλου φαιού αερίου.

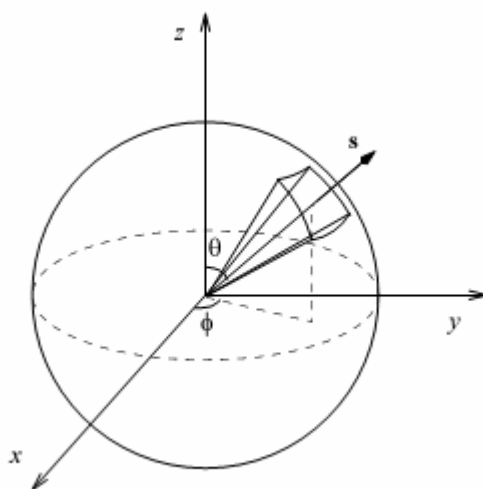


Σχήμα 3.4.5. Σύγκριση των προλέξεων της θερμοκρασίας με τα πειραματικά δεδομένα (Περίπτωση 6γ) με βάση τα δύο μοντέλα ακτινοβολίας (GGM: μοντέλο φαιού αερίου, WBM: μοντέλο ευρείας ζώνης).

Το παραπάνω σχήμα οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η χρήση και των δύο μοντέλων ακτινοβολίας οδηγεί σε ταυτόσημα υπολογιστικά αποτελέσματα. Επομένως, επιλέχθηκε το μοντέλο 6 ζωνών (μοντέλο φαιού αερίου) για όλες τις περιπτώσεις, δεδομένου ότι ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για κάθε προσομοίωση είναι κατά πολύ μικρότερος από εκείνον που απαιτείται με την χρήση του μοντέλου ακτινοβολίας 9 ζωνών (μοντέλο ευρείας ζώνης).

3.4.4. Αριθμός γωνιών ακτινοβολίας

Η τελευταία παράμετρος που εξετάστηκε με στόχο την βελτιστοποίηση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων είναι ο αριθμός των γωνιών ακτινοβολίας. Το σύστημα συντεταγμένων το οποίο χρησιμοποιείται για την χωρική διακριτοποίηση της στερεάς γωνίας φαίνεται στο σχήμα 3.4.6 (FDS, Technical Reference Guide).



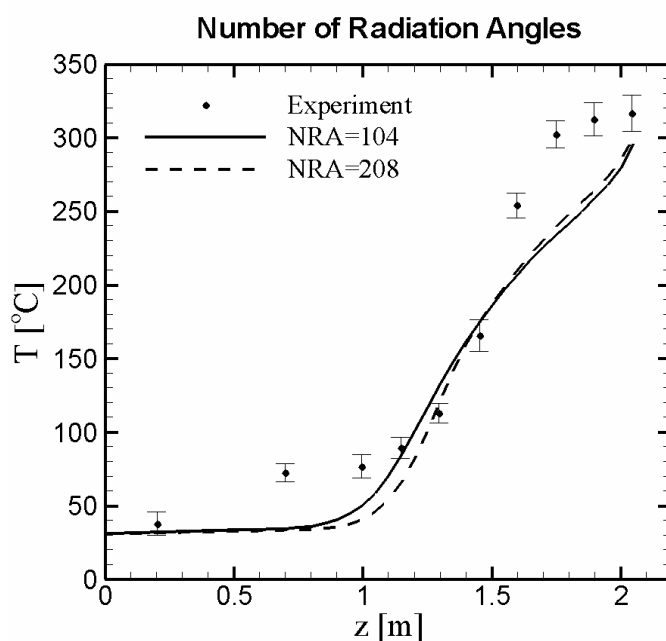
Σχήμα 3.4.6. Σύστημα συντεταγμένων της γωνιακής διακριτοποίησης (FDS Version 4, Technical Reference Guide).

Η χωρική διακριτοποίηση της στερεάς γωνίας γίνεται χωρίζοντας, αρχικά, την πολική γωνία θ σε N_θ ζώνες, όπου το N_θ είναι ένας άρτιος αριθμός. Στη συνέχεια, κάθε ζώνη χωρίζεται σε $N_\phi(\theta)$ μέρη κατά την αζιμούθιο κατεύθυνση. Σημειώνεται ότι το $N_\phi(\theta)$ πρέπει να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του 4. Οι αριθμοί N_θ και $N_\phi(\theta)$ επιλέγονται στον κώδικα FDS με τέτοιο τρόπο ώστε να προκύπτει ο συνολικός

αριθμός γωνιών ακτινοβολίας N_Ω όσο το δυνατόν πιο κοντά σε αυτόν που ορίζεται από τον χρήστη. Ο συνολικός αριθμός γωνιών ακτινοβολίας N_Ω υπολογίζεται από την σχέση:

$$N_\Omega = \sum_{i=1}^{N_\theta} N_\varphi(\theta_i) \quad (3.4.5)$$

Στον κώδικα FDS η αρχική τιμή που χρησιμοποιείται για τον συνολικό αριθμό γωνιών ακτινοβολίας N_Ω είναι 104. Κατά την παραμετρική μελέτη διπλασιάστηκε ο αριθμός των γωνιών ακτινοβολίας ($N_\Omega=208$) και τα υπολογιστικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δύο αυτές περιπτώσεις ($N_\Omega=104$ και $N_\Omega=208$) συγκρίθηκαν με τα πειραματικά δεδομένα. Στο σχήμα 3.4.7 γίνεται η σύγκριση των προλέξεων της θερμοκρασίας με τις αντίστοιχες μετρήσεις για την περίπτωση βγ.



Σχήμα 3.4.7. Σύγκριση των προλέξεων της θερμοκρασίας με τα πειραματικά δεδομένα (Περίπτωση βγ) για δύο διαφορετικούς αριθμούς γωνιών ακτινοβολίας (NRA)

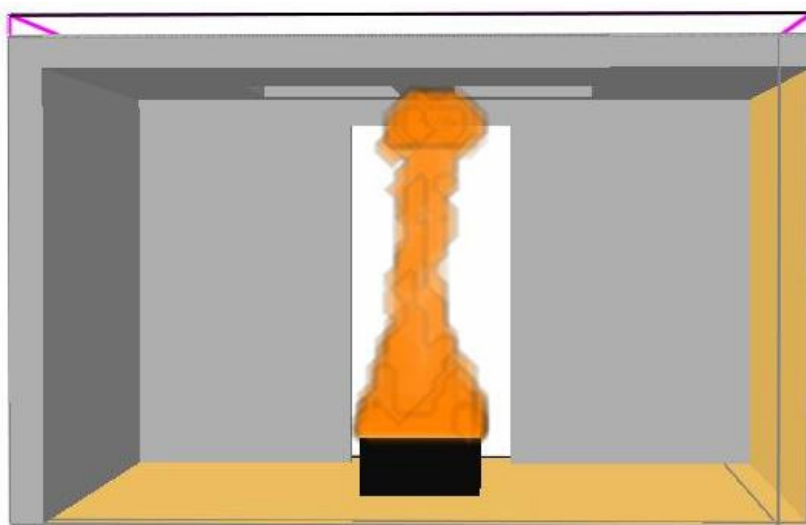
Από το παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι η αύξηση του συνολικού αριθμού γωνιών ακτινοβολίας δεν προκάλεσε κάποια σημαντική αλλαγή στα υπολογιστικά αποτελέσματα. Έτσι, για την προσομείωση όλων των περιπτώσεων επιλέχθηκε η

αρχική τιμή που χρησιμοποιείται στον κώδικα FDS, δηλαδή $N_{\sigma}=104$, δεδομένου ότι σε αυτή την περίπτωση απαιτείται μικρότερος υπολογιστικός χρόνος.

3.5. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

1^η Σειρά Πειραμάτων

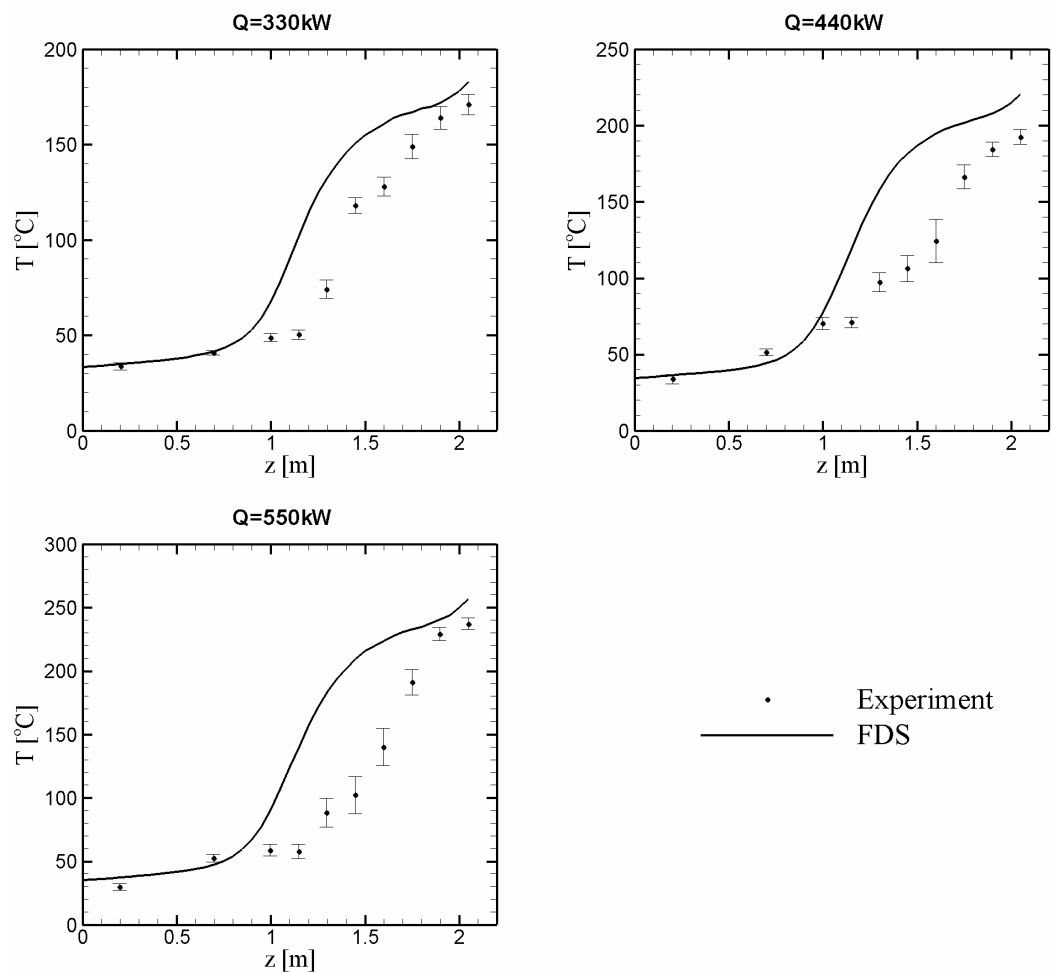
Στην πρώτη σειρά πειραμάτων η συνολική επιφάνεια των ανοιγμάτων της οροφής, όπως φαίνεται και στον πίνακα 3.3.1, είναι 1.5m^2 ενώ η επιφάνεια του καυστήρα φωτιάς είναι $0.6\text{m}\times 0.6\text{m}$. Οι τρεις περιπτώσεις που αφορούν αυτή τη σειρά πειραμάτων, όπως και όλες τις υπόλοιπες σειρές, αναφέρονται σε ισχύ φωτιάς 330kW, 440kW και 550kW. Η γεωμετρία του δωματίου και για τις τρεις περιπτώσεις φαίνεται στην εικόνα 3.5.1.



Εικόνα 3.5.1. Γεωμετρία του δωματίου για τις περιπτώσεις 1α, 1β και 1γ.

Στο σχήμα 3.5.1 γίνεται σύγκριση των προλέξεων της θερμοκρασίας με τα πειραματικά δεδομένα για τις τρεις αυτές περιπτώσεις. Σημειώνεται ότι τα πειραματικά δεδομένα συμβολίζονται με κουκίδες, ενώ τα υπολογιστικά αποτελέσματα συμβολίζονται με ενιαία γραμμή. Όπως φαίνεται και από τα τρία διαγράμματα, υπάρχει αρκετά καλή συμφωνία των υπολογιστικών αποτελεσμάτων με τις μετρήσεις θερμοκρασίας για ύψος μέχρι 1m περίπου, ενώ για μεγαλύτερα ύψη

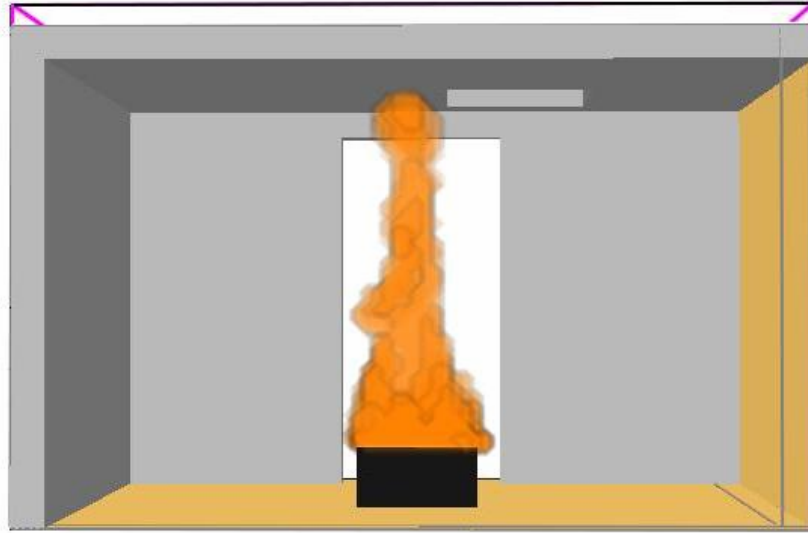
παρατηρείται μια υπερεκτίμηση των θερμοκρασιών. Η υπερεκτίμηση αυτή είναι λιγότερο αισθητή στα μεγαλύτερα ύψη, δηλαδή κοντά στην οροφή, ενώ είναι περισσότερο αισθητή στα ύψη από 1m μέχρι 1.8m περίπου. Το γεγονός αυτό, οφείλεται κατά κύριο λόγο στην υποεκτίμηση των θερμικών απωλειών λόγω ακτινοβολίας στην περιοχή ύψους μεταξύ 1m και 1.8m, η οποία στην πραγματικότητα επηρεάζεται περισσότερο από τον ‘φρέσκο’ αέρα χαμηλής θερμοκρασίας που εισάγεται από την πόρτα. Δεδομένου ότι δεν υπήρχαν διαθέσιμα ποσοτικά στοιχεία για την ‘παρασιτική’ ροή αέρα, αυτή δε λήφθηκε υπόψη κατά τη διάρκεια των υπολογιστικών προσομοιώσεων.



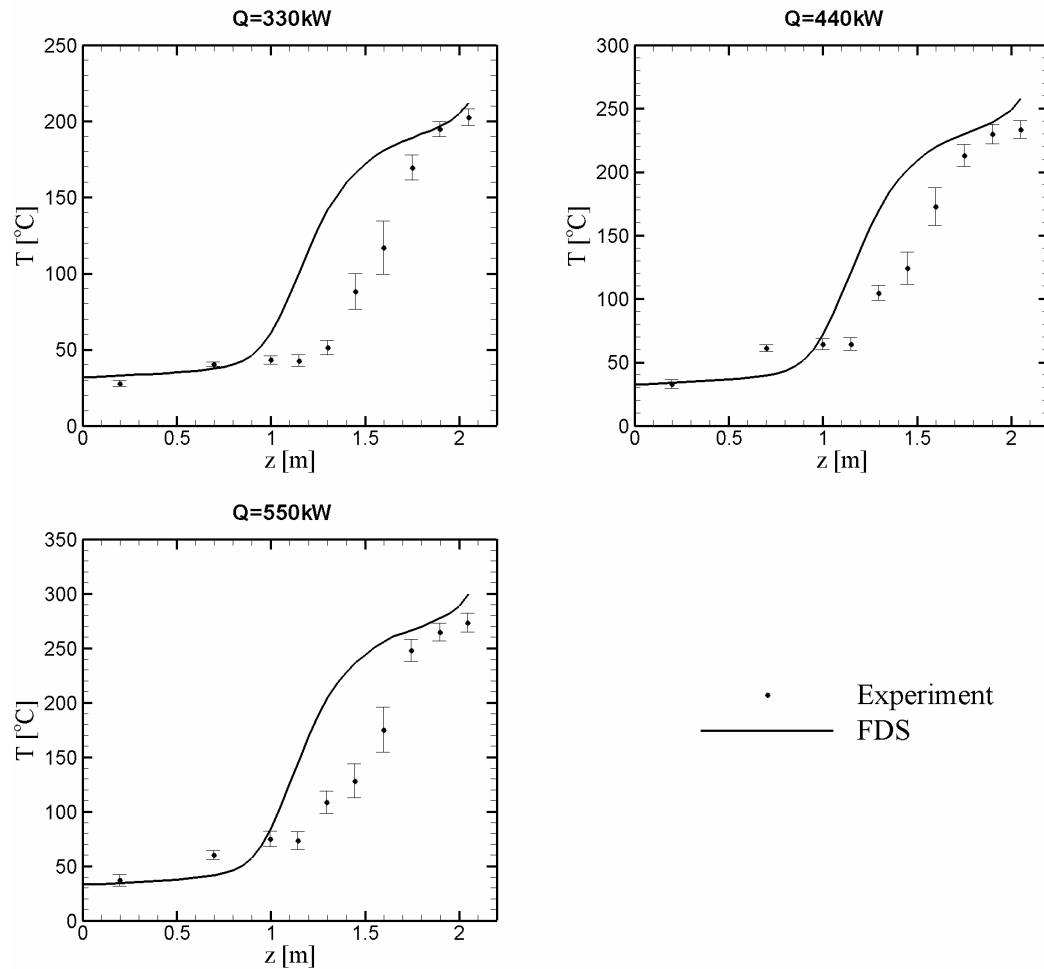
Σχήμα 3.5.1. Σύγκριση των προλέξεων της θερμοκρασίας με τα πειραματικά δεδομένα για τις περιπτώσεις 1α, 1β και 1γ.

2^η Σειρά Πειραμάτων

Στη δεύτερη σειρά πειραμάτων η συνολική επιφάνεια των ανοιγμάτων οροφής, όπως φαίνεται και στον πίνακα 3.3.1, είναι 0.75m^2 , ενώ η επιφάνεια του καυστήρα είναι $0.6\text{m}\times 0.6\text{m}$. Η γεωμετρία του δωματίου και για τις τρεις περιπτώσεις αυτής της σειράς πειραμάτων (2α, 2β και 2γ) φαίνεται στην εικόνα 3.5.2.



Εικόνα 3.5.2. Γεωμετρία του δωματίου για τις περιπτώσεις 2α, 2β και 2γ.



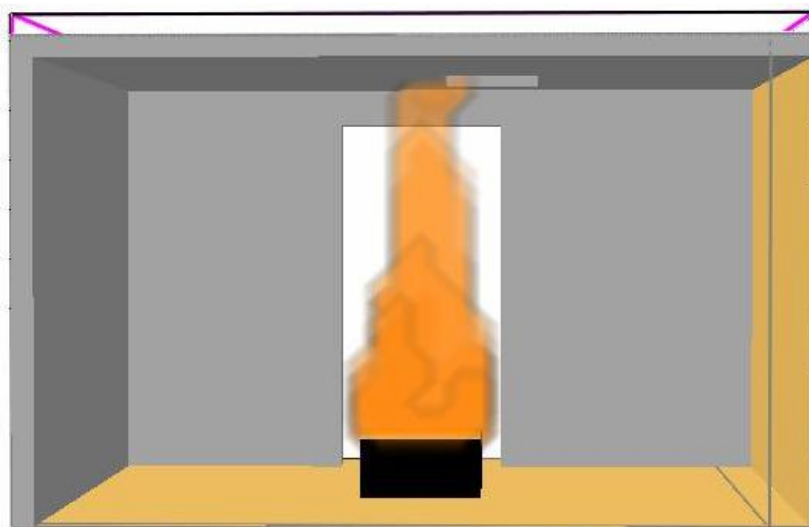
Σχήμα 3.5.2. Σύγκριση των προλέξεων της θερμοκρασίας με τα πειραματικά δεδομένα για τις περιπτώσεις 2α, 2β και 2γ.

Στο σχήμα 3.5.2 γίνεται σύγκριση των προλέξεων της θερμοκρασίας με τα πειραματικά δεδομένα για τις περιπτώσεις 2α, 2β και 2γ, όπου, επίσης, παρατηρείται μια υπερεκτίμηση των θερμοκρασιών στις περιοχές με ύψος 1m και 1.8m. Στην συγκεκριμένη περίπτωση το ποσοστό υπερεκτίμησης των θερμοκρασιών είναι μικρότερο από την 1^η σειρά πειραμάτων. Αυτό το γεγονός οφείλεται στην μείωση της συνολικής επιφάνειας των ανοιγμάτων οροφής, η οποία οδηγεί σε περιορισμό των απωλειών λόγω ακτινοβολίας. Επίσης, αυτό που προκύπτει από τα τρία διαγράμματα του σχήματος 3.5.2 είναι ότι οι παρατηρούμενες θερμοκρασίες είναι υψηλότερες σε σχέση με την 1^η σειρά πειραμάτων, γεγονός αναμενόμενο δεδομένου ότι υπάρχει μικρότερο άνοιγμα στην οροφή, με αποτέλεσμα να διαφεύγει λιγότερη θερμότητα προς τα έξω και ένα μεγαλύτερο ποσοστό της να ‘αποθηκεύεται’ στο δωμάτιο.

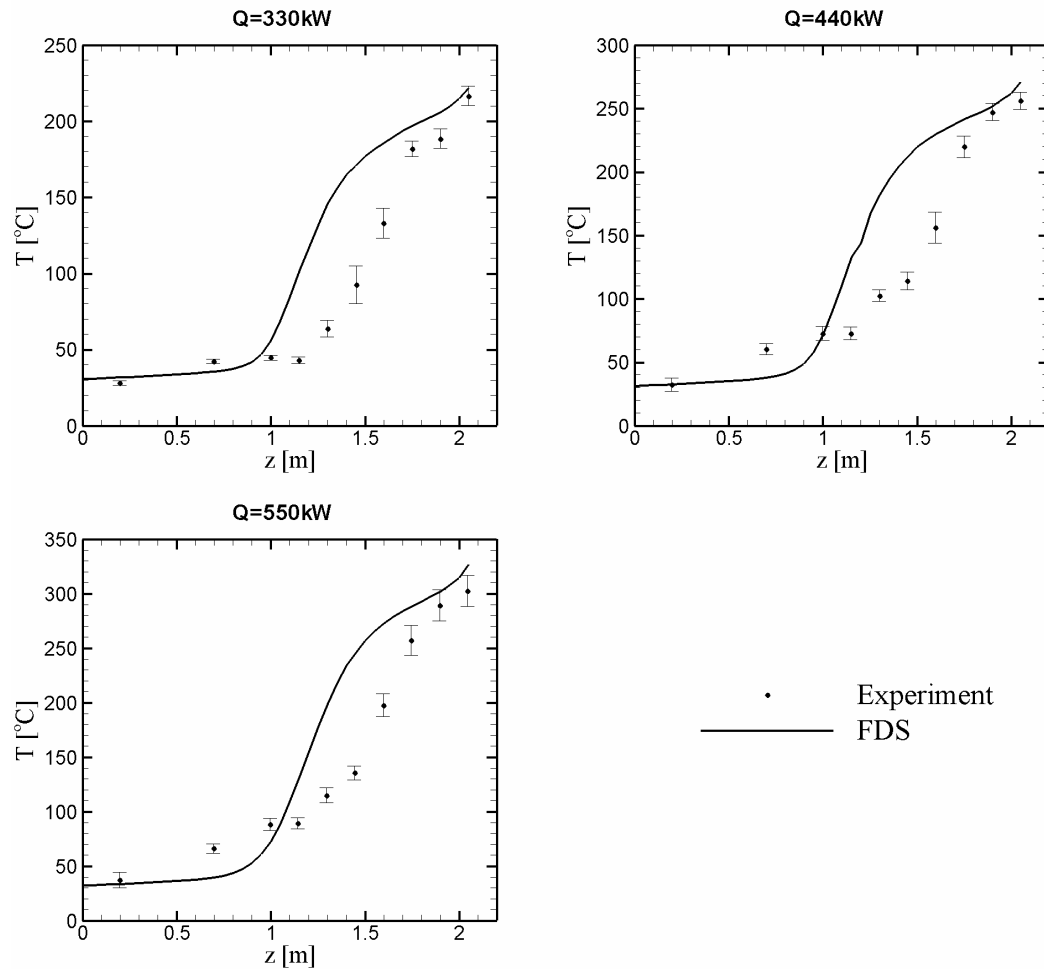
3^η Σειρά Πειραμάτων

Στην τρίτη σειρά πειραμάτων η συνολική επιφάνεια των ανοιγμάτων οροφής, όπως φαίνεται και στον πίνακα 3.3.1 μειώνεται ακόμα περισσότερο και γίνεται 0.5m^2 ενώ η επιφάνεια του καυστήρα παραμένει $0.6\text{m}\times 0.6\text{m}$. Η γεωμετρία του δωματίου για αυτή τη σειρά πειραμάτων (3α, 3β και 3γ) φαίνεται στην εικόνα 3.5.3.

Σε αυτή τη σειρά πειραμάτων, οι θερμοκρασίες που προκύπτουν είναι ακόμα πιο υψηλές από πριν, γεγονός αναμενόμενο, δεδομένου ότι το άνοιγμα της οροφής μικραίνει ακόμα περισσότερο. Επομένως, το ποσοστό της θερμότητας που αποθηκεύεται στο δωμάτιο είναι ακόμα μεγαλύτερο σε σχέση με τις δύο προηγούμενες σειρές. Στο σχήμα 3.5.3 γίνεται σύγκριση των προλέξεων της θερμοκρασίας με τα πειραματικά δεδομένα για τις περιπτώσεις 3α, 3β και 3γ. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, η παρατηρούμενη συμπεριφορά έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με τις δύο προηγούμενες σειρές, δηλαδή υπάρχει πάλι μια μικρή υπερεκτίμηση των θερμοκρασιών στην περιοχή με ύψος από 1m έως 1.8m.



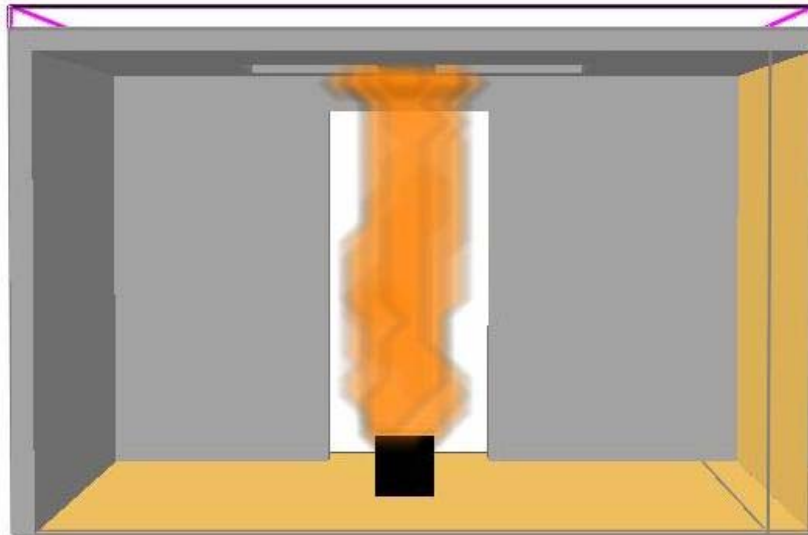
Εικόνα 3.5.3. Γεωμετρία του δωματίου για τις περιπτώσεις 3α, 3β και 3γ.



Σχήμα 3.5.3. Σύγκριση των προλέξεων της θερμοκρασίας με τα πειραματικά δεδομένα για τις περιπτώσεις 3α, 3β και 3γ.

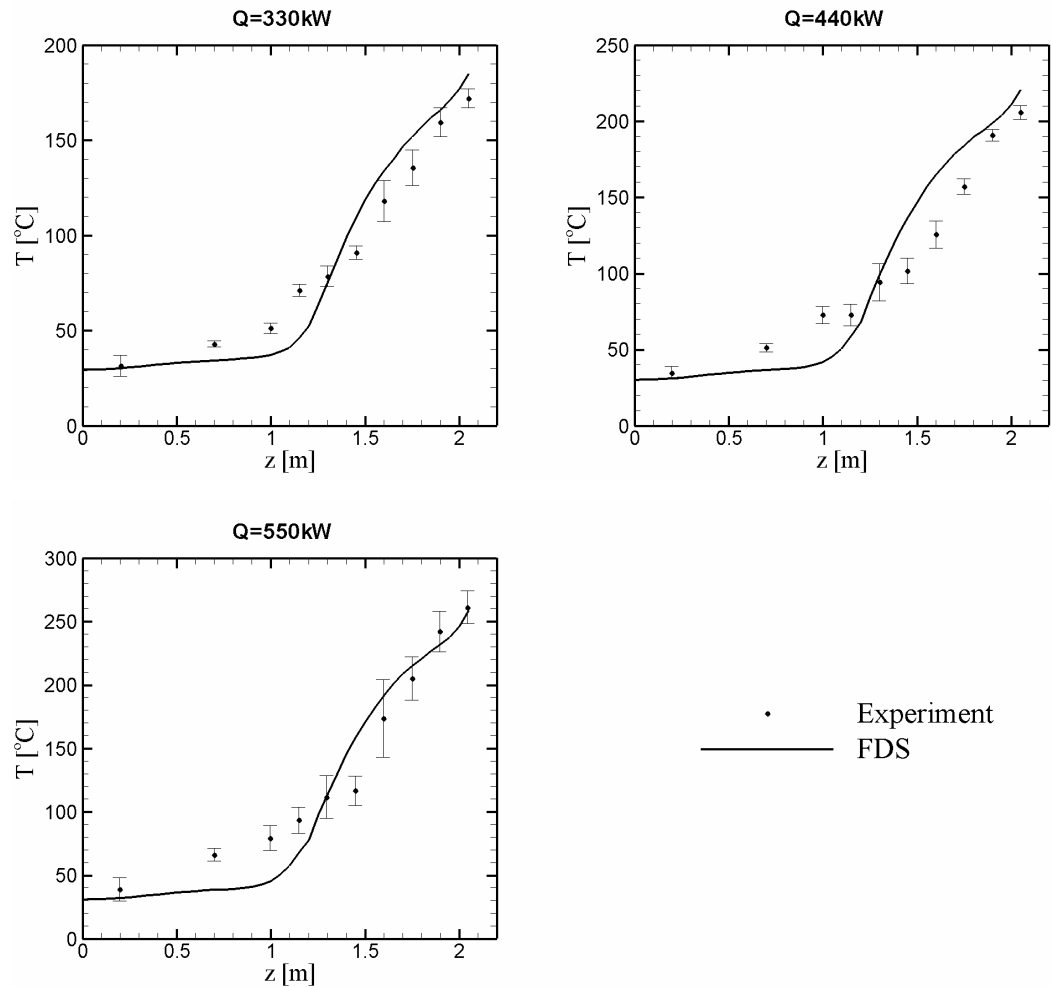
4^η Σειρά Πειραμάτων

Στην τέταρτη σειρά πειραμάτων η συνολική επιφάνεια των ανοιγμάτων οροφής, είναι ίδια με αυτή της πρώτης σειράς πειραμάτων, δηλαδή ίση με 1.5m^2 . Αντίθετα, η επιφάνεια του καυστήρα μειώνεται και γίνεται ίση με $0.3\text{m}\times 0.3\text{m}$, αντιστοιχώντας στο ένα τέταρτο της επιφάνειας που χρησιμοποιήθηκε στις τρεις προηγούμενες σειρές. Η γεωμετρία του δωματίου για αυτή τη σειρά πειραμάτων (4α, 4β και 4γ) φαίνεται στην εικόνα 3.5.4.



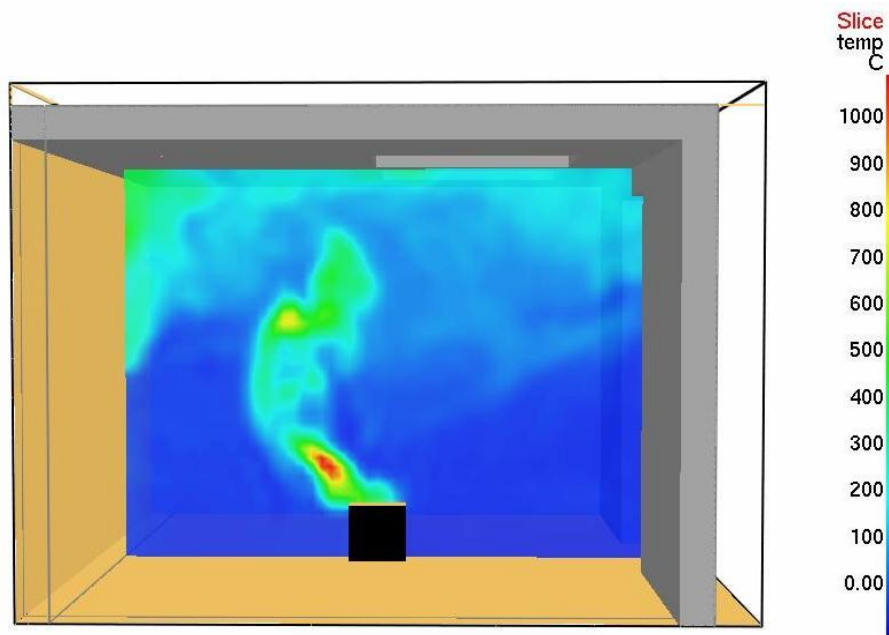
Εικόνα 3.5.4. Γεωμετρία του δωματίου για τις περιπτώσεις 4α, 4β και 4γ.

Στο σχήμα 3.5.4 γίνεται σύγκριση των προλέξεων της θερμοκρασίας με τα πειραματικά δεδομένα για τις περιπτώσεις 4α, 4β και 4γ. Παρατηρείται ότι οι θερμοκρασίες είναι ελάχιστα υψηλότερες σε σχέση με αυτές της πρώτης σειράς πειραμάτων, όπου για το ίδιο άνοιγμα οροφής, η επιφάνεια της πηγής της φωτιάς ήταν τετραπλάσια. Για αυτή την περίπτωση όμως παρατηρείται πολύ καλύτερη συμφωνία των υπολογιστικών αποτελεσμάτων με τα πειραματικά δεδομένα, σε σχέση με την πρώτη περίπτωση. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι σε αυτήν την περίπτωση, η συνολική επιφάνεια που καταλαμβάνει η φλόγα είναι μικρότερη απ' ό,τι στην πρώτη περίπτωση, επομένως, τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό της φλόγας, επιλύονται τώρα σε έναν μικρότερο αριθμό κελιών. Έτσι, τα όποια σφάλματα που προκύπτουν από την επίλυση των εξισώσεων που περιγράφουν την φωτιά και αφορούν τις προλέξεις θερμοκρασίας είναι, τώρα, μικρότερα σε σχέση με πριν. Για τις περιπτώσεις 4α και 4β, μέχρι περίπου 1.3m ύψος, υπάρχει μια μικρή υποεκτίμηση των θερμοκρασιών, ενώ για μεγαλύτερα ύψη μια μικρή υπερεκτίμηση. Αντίθετα, στην περίπτωση 4γ, ενώ για ύψη μέχρι 1.3m υπάρχει η ίδια περίπου υποεκτίμηση των αποτελεσμάτων, πάνω από αυτό το ύψος, τα αποτελέσματα που προκύπτουν υπολογιστικά συμπίπτουν με τα πειραματικά.

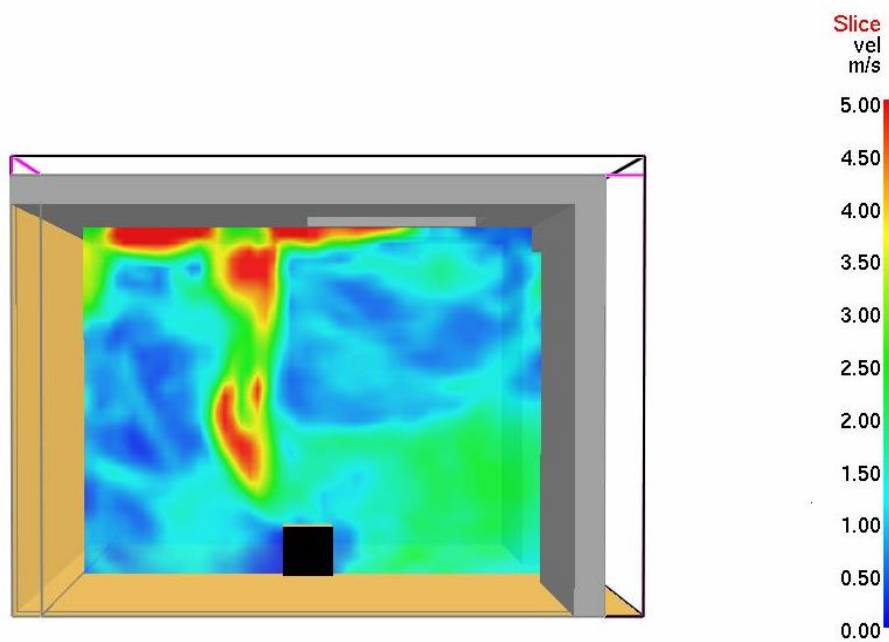


Σχήμα 3.5.4. Σύγκριση των προλέξεων της θερμοκρασίας με τα πειραματικά δεδομένα για τις περιπτώσεις 4α, 4β και 4γ.

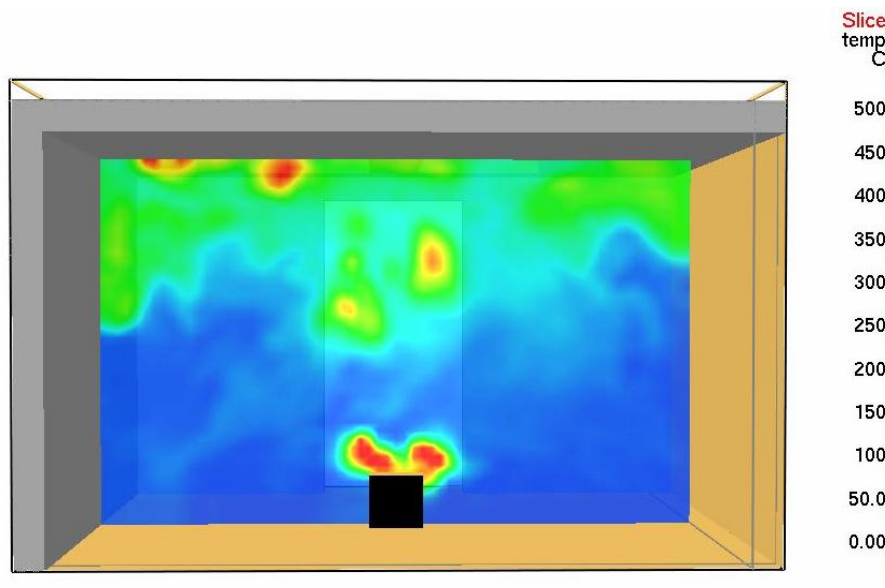
Στις εικόνες 3.5.5 και 3.5.7 απεικονίζονται στιγμιότυπα του θερμοκρασιακού πεδίου στο δωμάτιο (περίπτωση 4γ), στα τελευταία δευτερόλεπτα της προσομοίωσης, στα κάθετα επίπεδα $x=1.8\text{m}$ και $y=1.5\text{m}$, αντίστοιχα. Επίσης, στην εικόνα 3.5.6 απεικονίζεται η κατανομή του μέτρου της ταχύτητας στο επίπεδο $x=1.8\text{m}$. Όπως φαίνεται στις εικόνες 3.5.5 και 3.5.6, είναι φανερό ότι ο ‘κρύος’ αέρας που εισέρχεται από το άνοιγμα της πόρτας δίνει μια ώθηση στην φωτιά προς τα πίσω, με αποτέλεσμα οι μέγιστες θερμοκρασίες να εμφανίζονται στην πίσω πλευρά του καυστήρα (προς τον πίσω τοίχο). Αντίθετα, στην εικόνα 3.5.7 φαίνεται η, σχεδόν απόλυτα, συμμετρική κατανομή των θερμοκρασιών ως προς το κέντρο του δωματίου, γεγονός που οφείλεται στην συμμετρική τοποθέτηση των ανοιγμάτων κατά το επίπεδο y .



Εικόνα 3.5.5. Ισοσταθμικές καμπύλες της θερμοκρασίας στο επίπεδο $x=1.8\text{m}$.

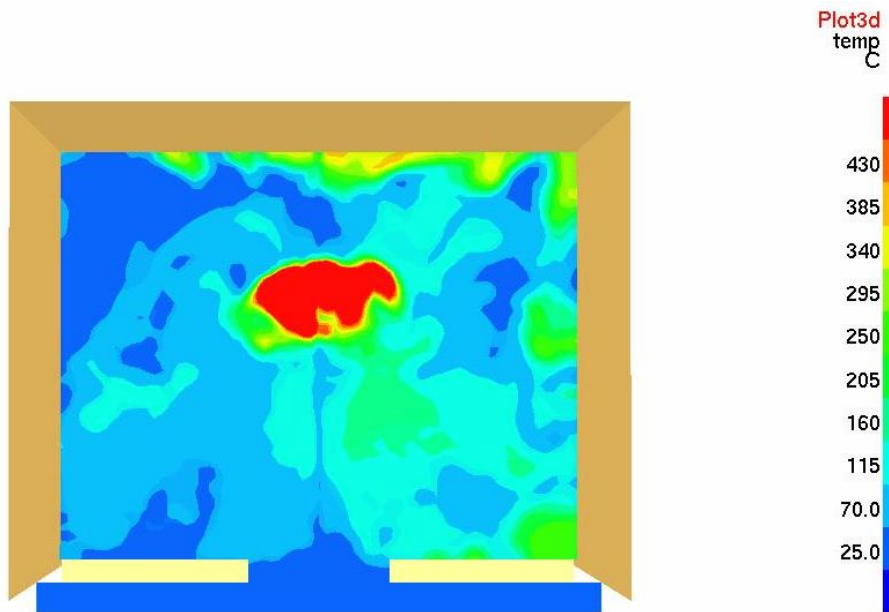


Εικόνα 3.5.6. Κατανομή μέτρου της ταχύτητας στο επίπεδο $x=1.8\text{m}$.

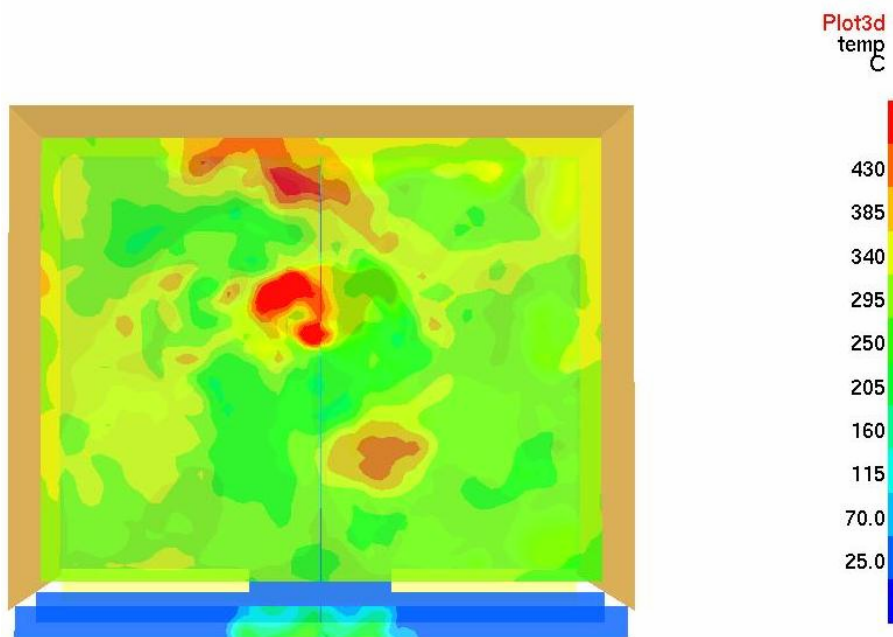


Εικόνα 3.5.7. Ισοσταθμικές καμπύλες της θερμοκρασίας στο επίπεδο $y=1.5\text{m}$.

Τέλος, στις εικόνες 3.5.8 και 3.5.9 απεικονίζονται στιγμιότυπα του θερμοκρασιακού πεδίου στα οριζόντια επίπεδα $z=1.0\text{m}$ και $z=1.5\text{m}$, αντίστοιχα. Από τις δύο αυτές εικόνες, είναι προφανές ότι οι θερμοκρασίες είναι υψηλότερες στο επίπεδο που βρίσκεται πιο κοντά στην οροφή του δωματίου. Η παρατήρηση αυτή είναι αναμενόμενη, δεδομένου ότι οι θερμές μάζες οδηγούνται προς την οροφή λόγω των ανωστικών δυνάμεων, ενώ γίνεται εισαγωγή ‘φρέσκου’ αέρα από το άνοιγμα της πόρτας, με αποτέλεσμα να προκαλείται πτώση της θερμοκρασίας στα χαμηλότερα επίπεδα. Αυτό γίνεται κατανοητό, επίσης, στο σχήμα 3.5.4γ όπου φαίνεται η διαφορά των θερμοκρασιών για αυτά τα δύο ύψη.



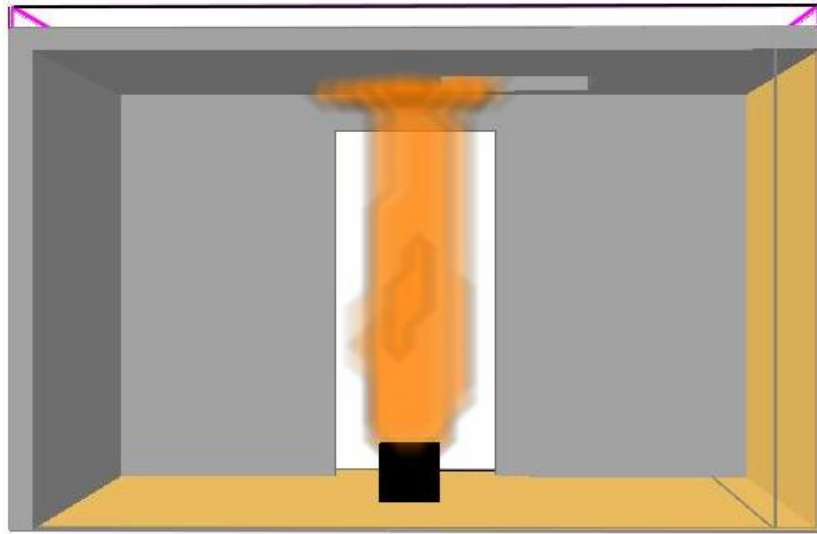
Εικόνα 3.5.8. Ισοσταθμικές καμπύλες της θερμοκρασίας στο επίπεδο $z=1.0\text{m}$.



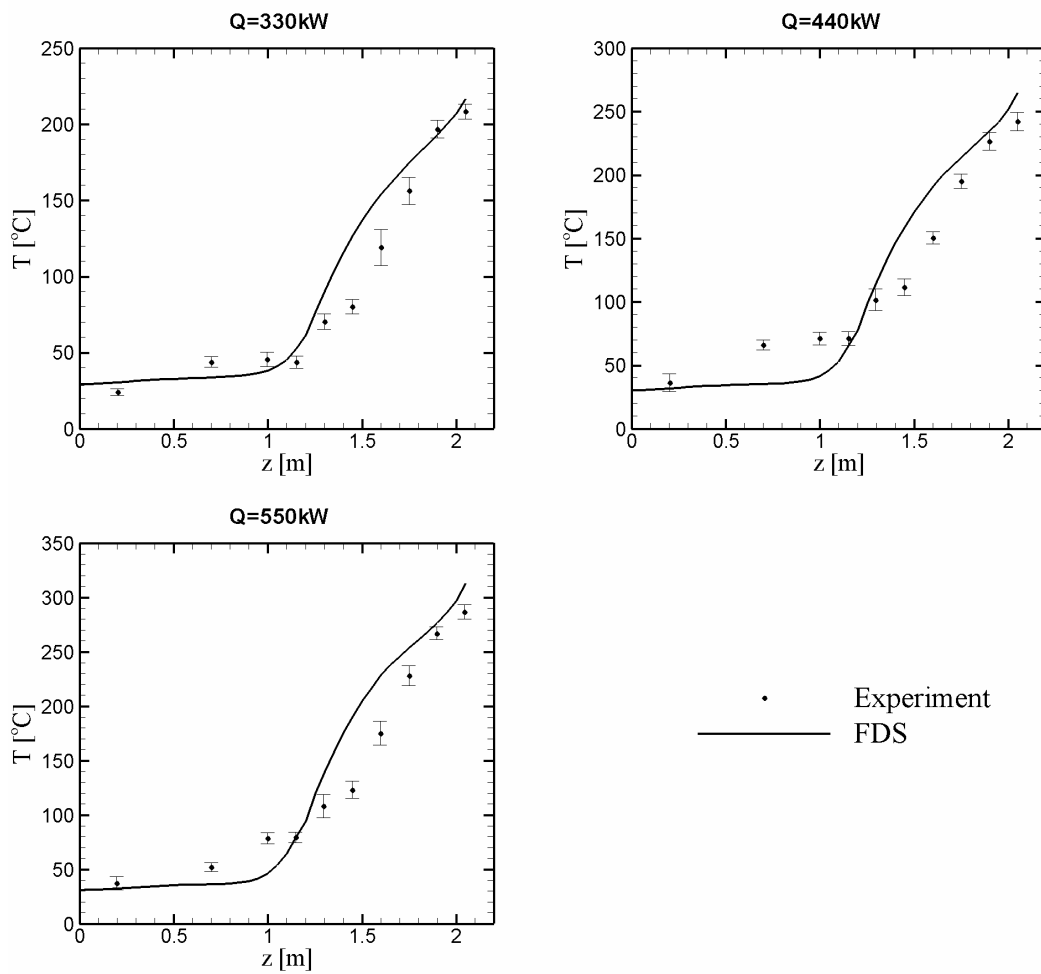
Εικόνα 3.5.9. Ισοσταθμικές καμπύλες της θερμοκρασίας στο επίπεδο $z=1.5\text{m}$.

5^η Σειρά Πειραμάτων

Για την πέμπτη σειρά πειραμάτων η συνολική επιφάνεια των ανοιγμάτων της οροφής, είναι 0.75m^2 ενώ η επιφάνεια του καυστήρα είναι $0.3\text{m}\times 0.3\text{m}$. Η γεωμετρία του δωματίου και για τις τρεις περιπτώσεις αυτής της σειράς πειραμάτων (5α, 5β και 5γ) απεικονίζεται στην εικόνα 3.5.10.



Εικόνα 3.5.10. Γεωμετρία του δωματίου για τις περιπτώσεις 5α, 5β και 5γ.

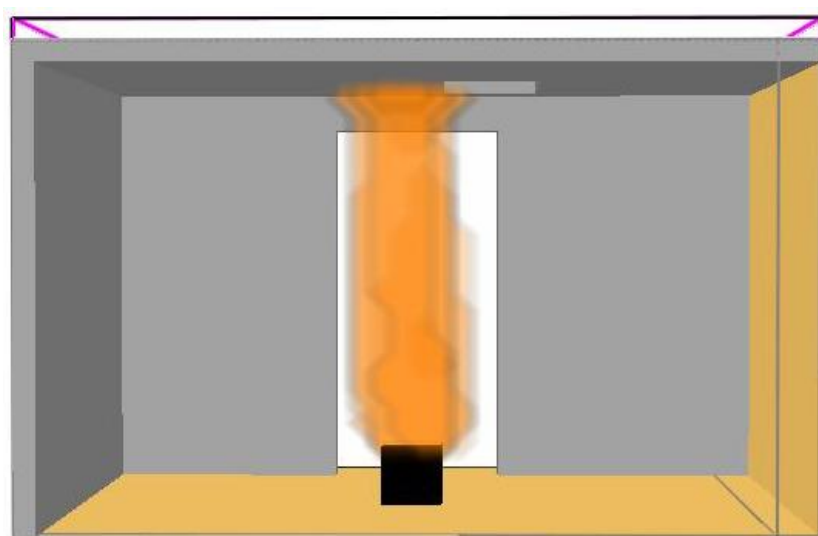


Σχήμα 3.5.5. Σύγκριση των προλέξεων της θερμοκρασίας με τα πειραματικά δεδομένα για τις περιπτώσεις 5α, 5β και 5γ.

Στο σχήμα 3.5.5 παρατίθενται οι προλέξεις του κώδικα FDS και συγκρίνονται με τα πειραματικά δεδομένα για τις περιπτώσεις 5α, 5β και 5γ αντίστοιχα. Όπως φαίνεται στο σχήμα, η παρατηρούμενη συμφωνία μεταξύ των προλέξεων και των μετρήσεων είναι παρόμοια με αυτή που προέκυψε στην τέταρτη σειρά πειραμάτων. Έτσι, εμφανίζεται υποεκτίμηση των θερμοκρασιών για ύψη μέχρι 1.3m περίπου και υπερεκτίμηση των θερμοκρασιών για μεγαλύτερα ύψη. Επίσης, από το παραπάνω σχήμα προκύπτει ότι οι θερμοκρασίες είναι υψηλότερες σε σχέση με αυτές που υπολογίστηκαν για την τέταρτη σειρά πειραμάτων, η οποία αναφέρεται σε δωμάτιο με διπλάσια επιφάνεια ανοιγμάτων οροφής και ίδια επιφάνεια της πηγής της φωτιάς. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο, διότι υπάρχει μικρότερο άνοιγμα στην οροφή, με αποτέλεσμα να διαφεύγουν μικρότερα ποσά θερμότητας προς το εξωτερικό περιβάλλον.

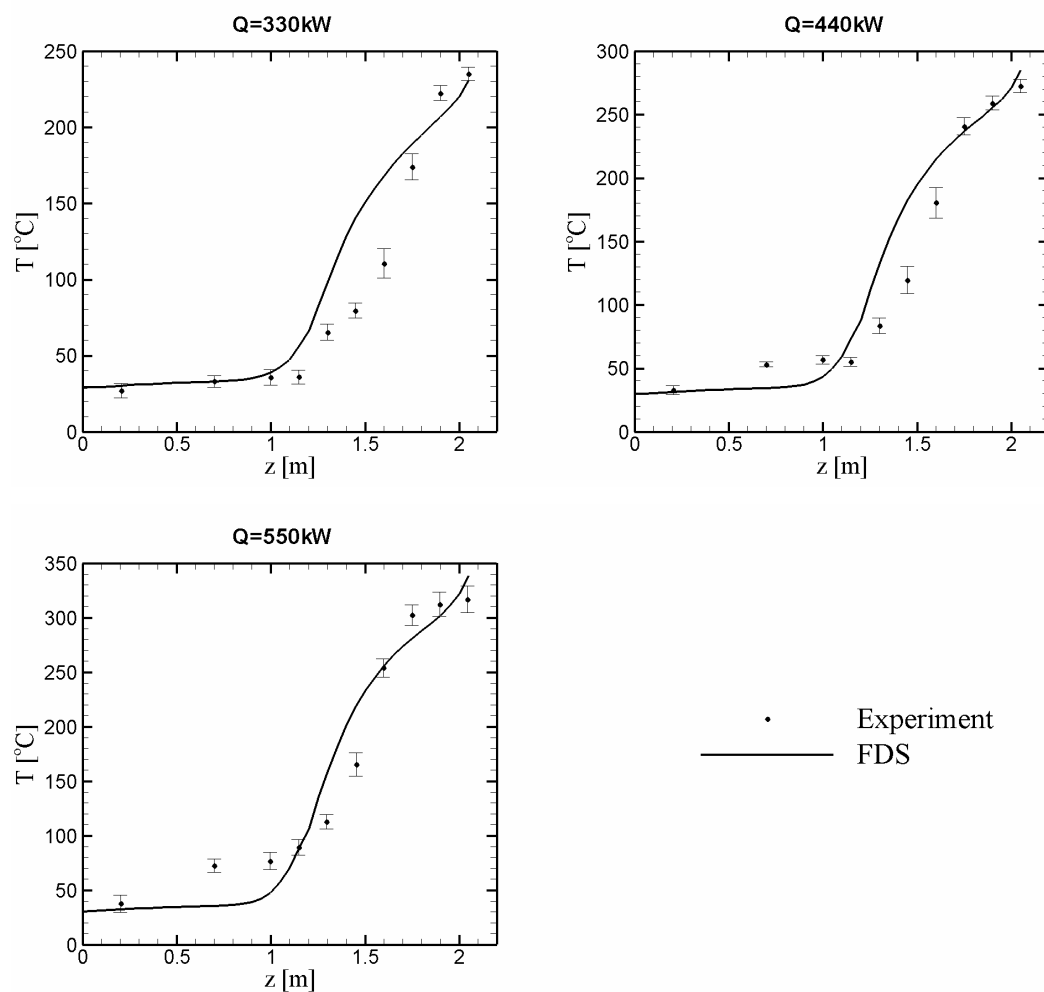
6^η Σειρά Πειραμάτων

Στην έκτη σειρά πειραμάτων η συνολική επιφάνεια των ανοιγμάτων της οροφής, είναι ίδια με αυτή της τρίτης σειράς πειραμάτων, δηλαδή 0.5m^2 , ενώ η επιφάνεια του καυστήρα είναι $0.3\text{m}\times 0.3\text{m}$. Η γεωμετρία του δωματίου που αφορά και τις τρεις περιπτώσεις αυτής της σειράς πειραμάτων (6α, 6β και 6γ) φαίνεται στην εικόνα 3.5.11.



Εικόνα 3.5.11. Γεωμετρία του δωματίου για τις περιπτώσεις 6α, 6β και 6γ.

Στο σχήμα 3.5.6 γίνεται σύγκριση των προλέξεων της θερμοκρασίας με τα πειραματικά δεδομένα για τις περιπτώσεις 6α, 6β και 6γ. Σε αυτή την τελευταία σειρά πειραμάτων, οι θερμοκρασίες που προκύπτουν είναι υψηλότερες συγκρινόμενες με αυτές που προέκυψαν σε όλες τις προηγούμενες σειρές. Όσον αφορά την απόκλιση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα, κυμαίνονται στα ίδια, σχεδόν, επίπεδα με τις υπόλοιπες σειρές. Αρχικά υπάρχει πάλι μια μικρή υποεκτίμηση για ύψη μέχρι 1m περίπου, ενώ για ύψη από 1m μέχρι 1.7m περίπου, υπάρχει μια σχετική υπερεκτίμηση. Για ύψη μεγαλύτερα από 1.7m παρατηρείται πολύ καλή συμφωνία προλέξεων και μετρήσεων.

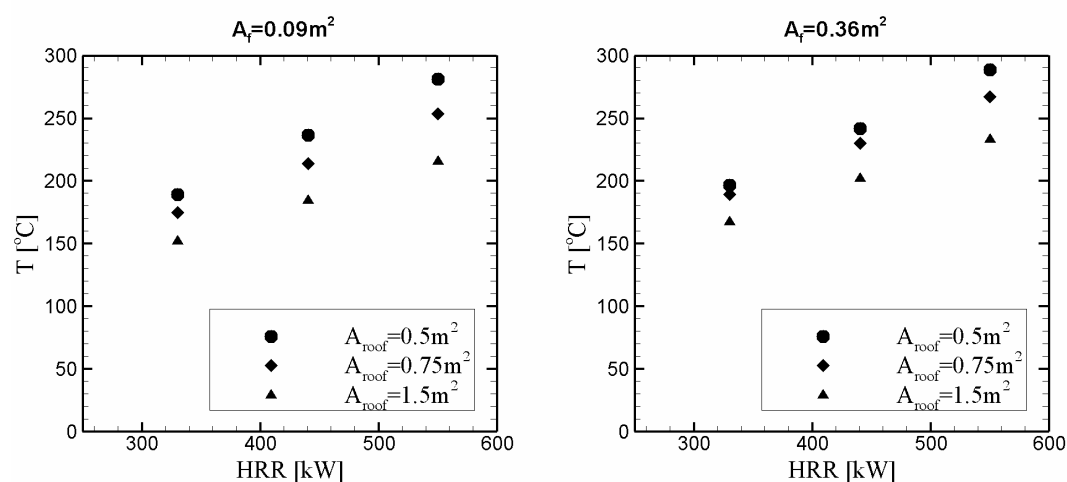


Σχήμα 3.5.6. Σύγκριση των προλέξεων της θερμοκρασίας με τα πειραματικά δεδομένα για τις περιπτώσεις 6α, 6β και 6γ.

3.6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

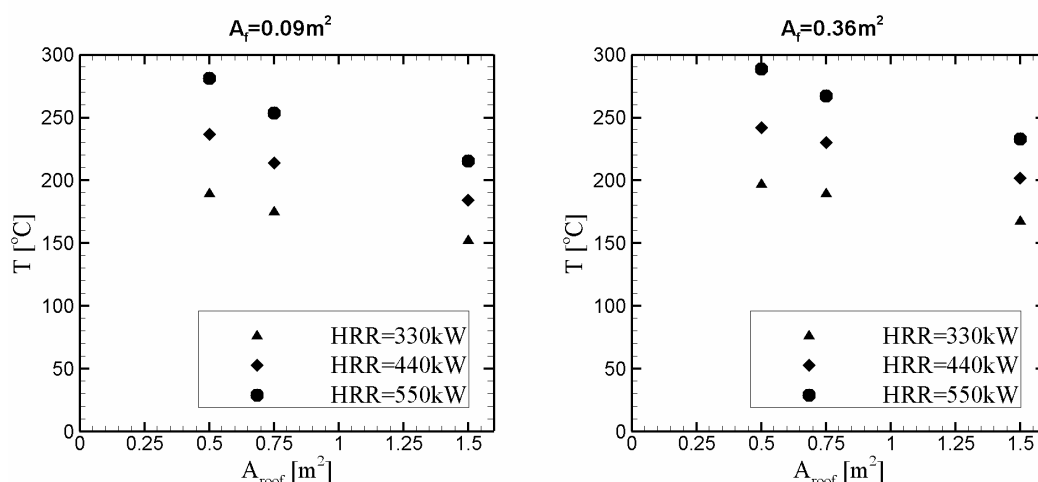
Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, στόχος των πειραμάτων των Merci και Vandeveldel (2006) ήταν η μελέτη της επίδρασης μιας σειράς παραμέτρων στον ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας σε ολόκληρο το δωμάτιο. Τα σχήματα 3.6.1 και 3.6.2 δημιουργήθηκαν με στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με το πώς επηρεάζουν οι τρεις παράμετροι που εξετάζονται την θερμοκρασία στα διάφορα σημεία του δωματίου. Έτσι, για κάθεμία από τις παραμέτρους που εξετάστηκαν, ισχύουν τα εξής:

1. Παρατηρείται μια γραμμική σχεδόν αύξηση της θερμοκρασίας ως συνάρτηση της ισχύος της φωτιάς και για τις τρεις τιμές της συνολικής επιφάνειας των ανοιγμάτων της οροφής. Το γεγονός αυτό απεικονίζεται στο σχήμα 3.6.1, στο οποίο παρουσιάζεται η θερμοκρασία του δωματίου σε ύψος 1.75m συναρτήσει της ισχύος της φωτιάς (Heat Release Rate – HRR) και για τις δύο τιμές του καυστήρα (A_f). Παράμετρο σε αυτό το γράφημα αποτελεί η συνολική επιφάνεια των ανοιγμάτων της οροφής (A_{roof}), η οποία λαμβάνει τις τιμές $1.5m^2$, $0.75m^2$ και $0.5m^2$, ενώ σημειώνεται ότι η θερμοκρασία σε αυτό το ύψος υπολογίζεται ως ο μέσος όρος των θερμοκρασιών των τεσσάρων θερμοστοιχείων που βρίσκονται σε αυτό το ύψος.



Σχήμα 3.6.1. Η θερμοκρασία σε ύψος 1.75m συναρτήσει του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας της φωτιάς, με παράμετρο τη συνολική επιφάνεια των ανοιγμάτων της οροφής.

2. Οι τιμές της θερμοκρασίας στο δωμάτιο μειώνονται όσο αυξάνεται η συνολική επιφάνεια των ανοιγμάτων οροφής (A_{roof}). Το συμπέρασμα αυτό συνάγεται από το σχήμα 3.6.2, στο οποίο απεικονίζονται οι τιμές της θερμοκρασίας σε ύψος 1.75m συναρτήσει της συνολικής επιφάνειας των ανοιγμάτων της οροφής. Οι θερμοκρασίες αυτές υπολογίζονται ως ο μέσος όρος των θερμοκρασιών που μετρήθηκαν στα τέσσερα θερμοστοιχεία που βρίσκονται σε αυτό το ύψος. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι παράμετρο και για τις δύο περιπτώσεις που φαίνονται σε αυτό το σχήμα (επιφάνεια του καυστήρα ίση με 0.09m^2 και 0.36m^2 , αντίστοιχα) αποτελεί η ισχύς της φωτιάς, η οποία παίρνει τις τιμές 330kW , 440kW και 550kW .



Σχήμα 3.6.2. Η θερμοκρασία σε ύψος 1.75m συναρτήσει της συνολικής επιφάνειας των ανοιγμάτων της οροφής, με παράμετρο την ισχύ της φωτιάς.

3. Οι θερμοκρασίες παραμένουν σχεδόν ανεπηρέαστες από την μεταβολή της επιφάνειας του καυστήρα (A_f). Ουσιαστικά, όταν αυξάνεται η επιφάνεια της πηγής της φωτιάς, παρατηρείται μια πολύ μικρή μείωση των θερμοκρασιών σε ολόκληρο το δωμάτιο. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όταν αυξάνεται η επιφάνεια του καυστήρα, η αντίδραση λαμβάνει χώρα πιο κοντά στον καυστήρα, με αποτέλεσμα, το καύσιμο να καταναλώνεται πιο κοντά στην πηγή έναυσης και επομένως, οι θερμοκρασίες στα διάφορα σημεία του δωματίου σε αυτή την περίπτωση να είναι λίγο χαμηλότερες. Σημειώνεται ότι αυτή η μείωση της θερμοκρασίας είναι περισσότερο αισθητή για την υψηλότερη τιμή της ισχύος της φωτιάς (550kW).

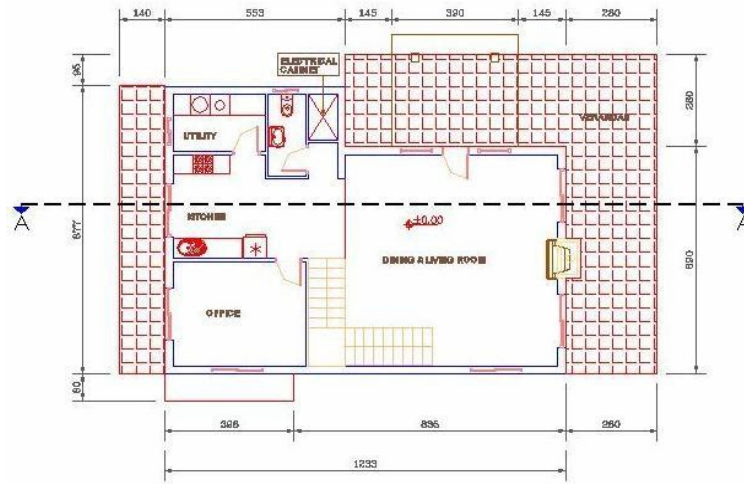
Όσον αφορά την σύγκριση των προλέξεων του κώδικα FDS με τα πειραματικά δεδομένα, παρατηρείται μια μικρή απόκλιση μεταξύ τους, αλλά όχι καθ' όλο το ύψος του δωματίου. Πιο συγκεκριμένα, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων υπάρχει απόλυτη ταύτιση των αποτελεσμάτων στα μικρότερα και στα μεγαλύτερα ύψη, ενώ στο ενδιάμεσο παρατηρείται μια μικρή υπερεκτίμηση των θερμοκρασιών από τον κώδικα FDS. Μια εξήγηση για το γεγονός αυτό είναι η τιμή του κλάσματος ακτινοβολίας που επιλέχθηκε, με βάση την πραγματοποιηθείσα παραμετρική μελέτη (βλ. ενότητα 3.4.2), η οποία μας οδηγεί στην πρόλεξη μικρότερων απωλειών λόγω ακτινοβολίας από αυτές που παρατηρήθηκαν κατά την εκτέλεση των πειραμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

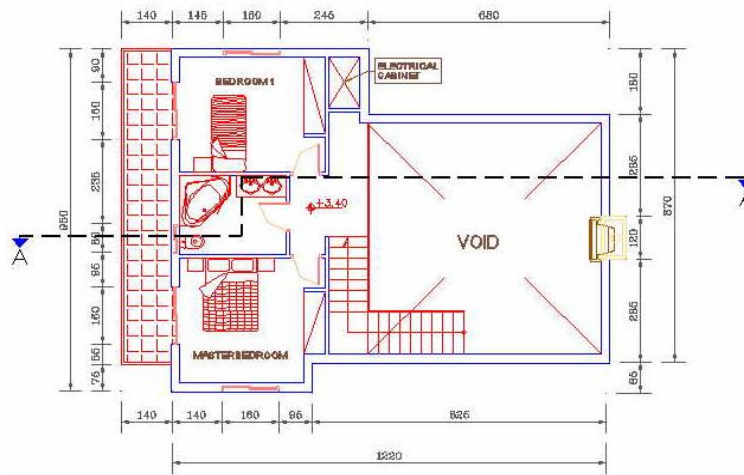
4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η υπολογιστική προσομοίωση φωτιάς σε ένα πραγματικό κτίριο με την χρήση του κώδικα FDS. Βασικός στόχος είναι η μελέτη της συμπεριφοράς της γυψοσανίδας κατά την διάρκεια μιας φωτιάς και η σύγκριση με τη συμπεριφορά άλλων συμβατικών δομικών υλικών, όπως στο τούβλο.

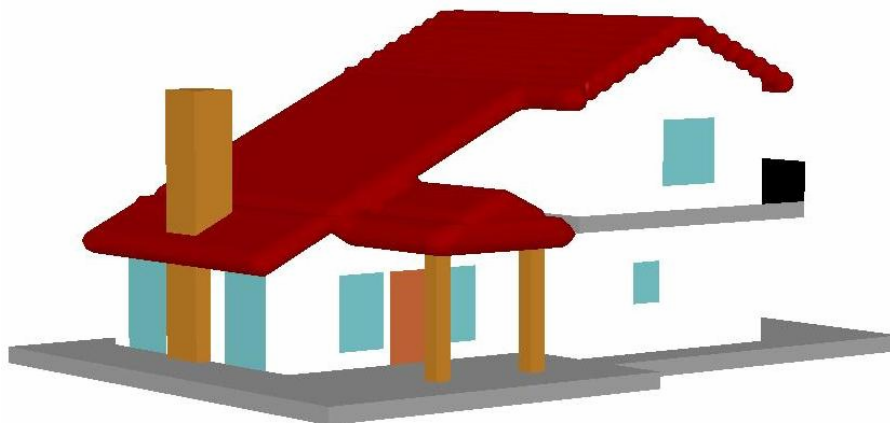
Το κτίριο το οποίο αφορά η παρούσα μελέτη είναι μια μονοκατοικία η οποία πρόκειται να κατασκευαστεί στην περιοχή της Αμφιλοχίας, στα πλαίσια του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος ISSB. Κατά την υπολογιστική προσομοίωση του κτιρίου χρησιμοποιήθηκαν οι πραγματικές του διαστάσεις, ενώ προστέθηκαν μερικά έπιπλα στο εσωτερικό του και πιο συγκεκριμένα στο σαλόνι και στο δωμάτιο που βρίσκεται το γραφείο. Κατά την προσομοίωση της φωτιάς, η μονοκατοικία χωρίστηκε σε τέσσερα υπολογιστικά χωρία και έγινε χρήση της δυνατότητας παράλληλης επεξεργασίας του κώδικα FDS, με αποτέλεσμα την μείωση του υπολογιστικού χρόνου για κάθε προσομοίωση. Τα δύο χωρία είχαν διαστάσεις $9\text{m}\times 12\text{m}\times 5\text{m}$ και το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε για το καθένα αποτελείτο από 270000 κελιά ($90\times 120\times 25$). Ουσιαστικά, το κάθε κελί είχε διαστάσεις $0.1\text{m}\times 0.1\text{m}\times 0.2\text{m}$. Τα άλλα δύο χωρία είχαν διαστάσεις $9\text{m}\times 12.80\text{m}\times 4\text{m}$ και το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε στο καθένα από αυτά ήταν πολύ πιο αραιό από τα προηγούμενα και αποτελείτο από 57600 κελιά, το καθένα εκ των οποίων ήταν, ουσιαστικά, ένας κύβος με ακμή 0.2m . Στα σχήματα 4.1.1 και 4.1.2 απεικονίζονται οι κατόψεις των δύο ορόφων της μονοκατοικίας με τις κυριότερες διαστάσεις, ενώ στα σχήμα 4.1.3 και 4.1.4 απεικονίζονται δύο εξωτερικές όψεις της μονοκατοικίας, όπως αυτή χρησιμοποιήθηκε για την υπολογιστική προσομοίωση.



Σχήμα 4.1.1. Κάτοψη του ισογείου της μονοκατοικίας.



Σχήμα 4.1.2. Κάτοψη του πρώτου ορόφου της μονοκατοικίας.



Σχήμα 4.1.3. Εξωτερική όψη της μονοκατοικίας όπως αυτή χρησιμοποιήθηκε για την υπολογιστική προσομοίωση.



Σχήμα 4.1.4. Εξωτερική όψη της μονοκατοικίας όπως αυτή χρησιμοποιήθηκε για την υπολογιστική προσομοίωση.

4.2. ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΑΥΣΗΣ

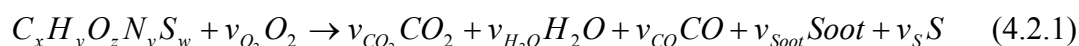
Κατά την προσομοίωση των δύο περιπτώσεων του παρόντος κεφαλαίου, θεωρήθηκε ότι η αντίδραση που χρησιμοποιείται για την καύση των αντικειμένων είναι η αντίδραση της καύσης του ξύλου. Για το χημικό τύπο του ξύλου χρησιμοποιήθηκε η γενικευμένη μορφή $C_xH_yO_zN_wS_w$.

Σύμφωνα με τον Anon (1972), η χημική σύσταση, δηλαδή η κατά μάζα σύσταση του κάθε στοιχείου, ενός τυπικού ξύλου που προέρχεται από πεύκο (pine bark), δίνεται στον πίνακα 4.2.1.

Πίνακας 4.2.1. Κατά μάζα σύσταση του ξύλου που προέρχεται από πεύκο (Anon, 1972).

Στοιχείο, i	Κατά μάζα σύσταση, μ_i (%)
C	54.9
H	5.8
O	39.0
N	0.2
S	0.1

Επομένως, η χημική αντίδραση της καύσης δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:



Όπως είναι γνωστό, τα ατομικά βάρη των παραπάνω στοιχείων είναι τα εξής (πίνακας 4.2.2):

Πίνακας 4.2.2. Ατομικά βάρη των στοιχείων.

Στοιχείο	Ατομικό βάρος
C	12
H	1
O	16
N	14
S	32

Επίσης, η πυκνότητα του ξύλου που προέρχεται από πεύκο είναι ίση με $\rho=181\text{kg/m}^3$ (Ragland *et al.*, 1991). Θεωρώντας συνολικό όγκο ίσο με $V_{tot}=1\text{m}^3$, και γνωρίζοντας ότι ισχύει η σχέση $\rho = \frac{m_{tot}}{V_{tot}}$, προκύπτει ότι $m_{tot}=181\text{kg}$.

Επομένως, οι συντελεστές του χημικού τύπου του ξύλου, μπορούν να υπολογιστούν από τις εξής σχέσεις (User's Guide του FDS):

$$\mu_C = \frac{m_C}{m_{tot}} \Rightarrow \mu_C = \frac{12x}{m_{tot}} \Rightarrow x = \frac{\mu_C \cdot m_{tot}}{12} \quad (4.2.2)$$

$$\mu_H = \frac{m_H}{m_{tot}} \Rightarrow \mu_H = \frac{y}{m_{tot}} \Rightarrow y = \mu_H \cdot m_{tot} \quad (4.2.3)$$

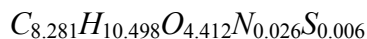
$$\mu_O = \frac{m_O}{m_{tot}} \Rightarrow \mu_O = \frac{16z}{m_{tot}} \Rightarrow z = \frac{\mu_O \cdot m_{tot}}{16} \quad (4.2.4)$$

$$\mu_N = \frac{m_N}{m_{tot}} \Rightarrow \mu_N = \frac{14v}{m_{tot}} \Rightarrow v = \frac{\mu_N \cdot m_{tot}}{14}$$

(4.2.5)

$$\mu_S = \frac{m_S}{m_{tot}} \Rightarrow \mu_S = \frac{32w}{m_{tot}} \Rightarrow w = \frac{\mu_S \cdot m_{tot}}{32} \quad (4.2.6)$$

Από τις σχέσεις 4.2.2 – 4.2.6, προκύπτει $x=8.281$, $y=10.498$, $z=4.412$, $v=0.026$ και $w=0.006$. Άρα, ο γενικευμένος χημικός τύπος του ξύλου είναι ο εξής:



Σύμφωνα με τους Ragland *et al.* (1991), κατά την πυρόλυση του ξύλου προκύπτουν δύο ειδών προϊόντα, αέρια και στερεά. Τα αέρια προϊόντα είναι υδρατμός (H_2O), μονοξείδιο του άνθρακα (CO), διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), υδρογόνο (H_2) και ελαφροί υδρογονάνθρακες (CH_4). Τα στερεά προϊόντα είναι τέφρα (*char*) και πίσσα (*tar*). Το κλάσμα μάζας καθενός από τα παραπάνω προϊόντα, παρουσιάζεται στον πίνακα 4.2.3 (Bowersox *et al.*, 1979).

Πίνακας 4.2.3. Τιμές κλάσματος μάζας των προϊόντων της καύσης του ξύλου (Bowersox *et al.*, 1979).

Προϊόν	Κλάσμα μάζας
H_2O	0.25
CO	0.183
CO_2	0.115
H_2	0.005
Ελαφροί υδρογονάνθρακες	0.047
Πίσσα	0.20
Τέφρα	0.20

Αυτό που πρέπει να σημειωθεί είναι ότι εκτός από τα προϊόντα που αναφέρθηκαν παραπάνω, κατά την καύση του ξύλου παράγεται και καπνός (αιθάλη) σε ποσοστό 2% (Larson και Koenig, 1993). Επομένως, προσθέτοντας και τον καπνό στα παραπάνω προϊόντα προκύπτουν οι ‘ολικές’ τιμές των κλασμάτων μάζας, οι οποίες παρουσιάζονται στον πίνακα 4.2.4.

Πίνακας 4.2.4. Τιμές κλάσματος μάζας των προϊόντων της καύσης του ξύλου, συμπεριλαμβανομένου και του καπνού.

Προϊόν	Κλάσμα μάζας
H ₂ O	0.245
CO	0.179
CO ₂	0.113
H ₂	0.005
Ελαφροί υδρογονάνθρακες	0.046
Πίσσα	0.196
Τέφρα	0.196
Καπνός	0.02

Από τον πίνακα 4.2.4, διαπιστώνεται ότι τα στερεά προϊόντα (πίσσα και τέφρα) αποτελούν το 39.2% των συνολικών προϊόντων. Το υπόλοιπο 60.8% είναι τα αέρια προϊόντα, τα οποία, ουσιαστικά, αποτελούν ένα αέριο μείγμα. Η κατά μάζα σύσταση αυτού του αερίου μείγματος παρουσιάζεται στον πίνακα 4.2.5.

Πίνακας 4.2.5. Κατά μάζα σύσταση του αερίου μείγματος προϊόντων καύσης.

Προϊόν, <i>i</i>	Κλάσμα μάζας, <i>y_i</i> (kg/kg _{μείγματος})
H ₂ O	0.403
CO	0.294
CO ₂	0.186
H ₂	0.008
Ελαφροί υδρογονάνθρακες	0.076

Όμως, επειδή στον κώδικα FDS δεν είναι δυνατή η εισαγωγή της τιμής του κλάσματος μάζας των ελαφρών υδρογονανθράκων, θεωρήθηκε ότι αυτοί προστίθενται στο ποσοστό του μονοξειδίου του άνθρακα. Επομένως, η τελική συγκέντρωση του CO θεωρήθηκε ίση με $y_{CO}=0.294+0.076=0.370\text{kg/kg}_{\text{μείγματος}}$.

Με βάση κατάλληλες υπολογισμούς (FDS User's Guide), είναι δυνατόν να προσδιοριστούν οι στοιχειομετρικοί συντελεστές των αντιδρώντων και των προϊόντων της καύσης του ξύλου. Οι σχέσεις, αυτές, είναι οι εξής:

$$v_{O_2} = v_{CO_2} + \frac{v_{CO}}{2} + \frac{v_{H_2O}}{2} - \frac{z}{2} \quad (4.2.7)$$

$$v_{CO_2} = x - v_{CO} - (1 - H_{frac}) \cdot v_{soot} \quad (4.2.8)$$

$$v_{H_2O} = \frac{y}{2} - v_{H_2} - \frac{H_{frac}}{2} \cdot v_{soot}$$

(4.2.9)

$$v_{CO} = \frac{W_f}{W_{CO}} \cdot y_{CO}$$

(4.2.10)

$$v_{H_2} = \frac{W_f}{W_{H_2}} \cdot y_{H_2} \quad (4.2.11)$$

$$v_{soot} = \frac{W_f}{W_s} \cdot y_s$$

(4.2.12)

$$v_{N_2} = \frac{v}{2}$$

(4.2.13)

$$v_S = w \quad (4.2.14)$$

Σημειώνεται, ότι στις παραπάνω σχέσεις, με W_f συμβολίζεται το μοριακό βάρος του ξύλου, το οποίο δίνεται από την σχέση:

$$\begin{aligned} W_f &= 12 \cdot x + 1 \cdot y + 16 \cdot z + 14 \cdot v + 32 \cdot w \\ &= 12 \cdot 8.281 + 1 \cdot 10.498 + 16 \cdot 4.412 + 14 \cdot 0.026 + 32 \cdot 0.006 \\ &= 181.018 \text{ kg / mol} \end{aligned} \quad (4.2.15)$$

Με H_{frac} συμβολίζεται το ποσοστό των ατόμων του καπνού που αντιστοιχούν σε υδρογόνο και σε αυτό το μέγεθος δόθηκε η τιμή $H_{frac}=0.1$, η οποία αποτελεί την προεπιλεγμένη τιμή στον κώδικα FDS. Επομένως, το μοριακό βάρος του καπνού, W_s , προσδιορίζεται από την σχέση:

$$W_s = H_{frac} \cdot W_H + (1 - H_{frac}) \cdot W_C = 0.1 \cdot 2 + 0.9 \cdot 12 = 11 \quad (4.2.16)$$

Έτσι, από τις σχέσεις 4.2.7 – 4.2.14, προκύπτουν οι στοιχειομετρικοί συντελεστές των αντιδρώντων και των προϊόντων της καύσης του ξύλου, οι οποίοι παρουσιάζονται στους πίνακες 4.2.6 και 4.2.7, αντίστοιχα.

Πίνακας 4.2.6. Στοιχειομετρικοί συντελεστές των αντιδρώντων της χημικής αντίδρασης της καύσης του ξύλου.

Αντιδρών	Στοιχειομετρικός συντελεστής
$C_{8.281}H_{10.498}O_{4.412}N_{0.026}S_{0.006}$	1
O_2	6.639

Πίνακας 4.2.7. Στοιχειομετρικοί συντελεστές των προϊόντων της χημικής αντίδρασης της καύσης του ξύλου.

Προϊόν	Στοιχειομετρικός συντελεστής
CO_2	5.4
H_2O	4.498
CO	2.392
Soot	0.543
N_2	0.013
S	0.006
H_2	0.724

Το τελευταίο δεδομένο, του οποίου η τιμή πρέπει να προσδιορισθεί είναι η θερμότητα της καύσης (ΔH), δηλαδή το ποσό της ενέργειας που απελευθερώνεται ανά μονάδα μάζας καυσίμου που καταναλώνεται. Μια μέση τιμή της θερμότητας καύσης του ξύλου είναι 20MJ/kg (Ragland *et al.*, 1991). Η εισαγωγή αυτής της πληροφορίας μπορεί να γίνει άμεσα είτε έμμεσα μέσω της εισαγωγής στον κώδικα FDS ενός παραπλήσιου μεγέθους, που εκφράζει το ποσό της ενέργειας που απελευθερώνεται ανά μονάδα μάζας οξυγόνου που καταναλώνεται και συμβολίζεται με *EPUMO2*. Η σχέση που συνδέει τα δύο παραπάνω μεγέθη είναι η εξής:

$$\Delta H(kJ/kg) = \frac{v_{O_2} W_{O_2}}{v_f W_f} EPUMO2(kJ/kg) \quad (4.2.17)$$

Κάνοντας τις κατάλληλες αντικαταστάσεις στην παραπάνω σχέση, και έχοντας ως μοναδικό άγνωστο το μέγεθος $EPUMO_2$, προκύπτει ότι $EPUMO_2=17.041\text{MJ/kg}$.

Τελικά, η αντίδραση που εκφράζει την καύση του ξύλου εισήχθη στο αρχείο εισόδου του κώδικα FDS με την παρακάτω μορφή:

```
&REAC ID='WOOD'  
FYI='C_8.281 H_10.498 O_4.412 N_0.026 S_0.006'  
C      = 8.281  
H      = 10.498  
O      = 4.412  
N      = 0.0026  
OTHER = 0.006  
MW_OTHER = 32.  
SOOT_YIELD = 0.033  
CO_YIELD   = 0.370  
H2_YIELD   = 0.008  
HEAT_OF_COMBUSTION = 20000. /
```

4.3. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ

Για την προσομοίωση της φωτιάς στη συγκεκριμένη μονοκατοικία χρησιμοποιήθηκε μια πληθώρα υλικών. Πηγή για την εύρεση των ιδιοτήτων αυτών των υλικών αποτέλεσε η βάση δεδομένων του κώδικα FDS. Φυσικά, για κάποια υλικά έγιναν ορισμένες τροποποιήσεις στις ιδιότητές τους με στόχο την καλύτερη προσομείωση της συμπεριφοράς τους κατά την διάρκεια της φωτιάς. Από όλες τις ιδιότητες που αναφέρονται στη βάση δεδομένων, οι σημαντικότερες είναι η πυκνότητα (ρ), η ειδική θερμοχωρητικότητα (c_p) και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (k_s) του υλικού.

Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 4.1, το υλικό το οποίο παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον σε αυτή την μελέτη είναι η γυψοσανίδα, η οποία αποτελεί το υλικό για όλους τους τοίχους (εξωτερικούς και εσωτερικούς) και τις οροφές. Στο κεφάλαιο 1.2 έγινε αναλυτική παρουσίαση όλων των ιδιοτήτων της γυψοσανίδας. Τα αποτελέσματα των Wakili *et al.* (2007), αποτέλεσαν βάση για τις τιμές που δόθηκαν στις διάφορες ιδιότητες της γυψοσανίδας κατά την προσομείωση της φωτιάς στην μονοκατοικία. Η πυκνότητα (ρ), η ειδική θερμοχωρητικότητα (c_p) και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (k_s) αποτελούν μεγέθη, οι τιμές των οποίων μεταβάλλονται συναρτήσει της θερμοκρασίας. Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στον κώδικα FDS για

αυτά τα τρία μεγέθη απεικονίζονται στα σχήματα 1.2.1, 1.2.6 και 1.2.4, αντίστοιχα. Αξίζει να αναφερθεί ότι στον κώδικα FDS δεν δίνεται η δυνατότητα ορισμού μεταβλητής τιμής για το μέγεθος της πυκνότητας. Έτσι, στην πυκνότητα δόθηκε η αρχική τιμή που προτείνεται από τους Wakili *et al.* (2007), δηλαδή $\rho=810\text{kg/m}^3$. Επομένως, τα τρία αυτά μεγέθη, αφού έγινε η κατάλληλη μετατροπή των μονάδων τους ώστε να είναι αυτές που χρησιμοποιεί ο FDS, εισήχθηκαν στον κώδικα ως εξής:

- Πυκνότητα:

```
DENSITY = 810.
```

- Ειδική θερμοχωρητικότητα:

```
SPECIFIC_HEAT_RAMP = 'CP'
&RAMP ID = 'CP', T = 0., F = 1.0 /
&RAMP ID = 'CP', T = 100., F = 1.0 /
&RAMP ID = 'CP', T = 150., F = 10.0 /
&RAMP ID = 'CP', T = 250., F = 1.0 /
&RAMP ID = 'CP', T = 500., F = 1.0 /
```

- Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας:

```
CONDUCTIVITY_RAMP = 'KS'
&RAMP ID = 'KS', T = 0., F = 0.28 /
&RAMP ID = 'KS', T = 150., F = 0.28 /
&RAMP ID = 'KS', T = 210., F = 0.14 /
&RAMP ID = 'KS', T = 500., F = 0.14 /
```

Επίσης, ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στις ιδιότητες του τούβλου, λόγω του γεγονότος ότι αποτελεί το υλικό που συγκρίνεται με την γυψοσανίδα, αλλά και του ξύλου, διότι αποτελεί το υλικό του πάγκου της κουζίνας στον οποίο γίνεται η έναυση της φωτιάς. Όσον αφορά το τούβλο, σύμφωνα με την ιστοσελίδα www.engineeringtoolbox.com, η πυκνότητά του είναι ίση με $\rho=1750\text{kg/m}^3$, ενώ η ειδική του θερμοχωρητικότητα και ο συντελεστής της θερμικής του αγωγιμότητας είναι ίσοι με $c_p=0.9\text{kJ/kg/K}$ και $k_s=0.69\text{W/m/K}$, αντίστοιχα.

Σχετικά με το ξύλο, χρησιμοποιήθηκαν οι ιδιότητες του πεύκου, οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά στην εργασία των Shen *et al.* (2007). Έτσι, η πυκνότητά του θεωρήθηκε ίση με $\rho=740\text{kg/m}^3$, η ειδική θερμοχωρητικότητα ίση με $c_p=1.95\text{kJ/kg/K}$ και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ίσος με $k_s=0.166\text{W/m/K}$. Όταν γίνεται η πυρόλυση του ξύλου λαμβάνουν χώρα δύο αντιδράσεις, κατά τις

οποίες το ξύλο μετατρέπεται σε τέφρα και αέριο. Επίσης, η υγρασία που περιέχεται στο ξύλο, που στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι ίση με 14.6%, υπόκειται στην διαδικασία της ξήρανσης, κατά την οποία μετατρέπεται σε ατμό. Οι ρυθμός πυρόλυσης των παραπάνω αντιδράσεων περιγράφεται με βάση το νόμο του Arrhenius από την σχέση (Shen *et al.*, 2007):

$$k = A \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \quad (4.3.1)$$

όπου οι προτεινόμενες τιμές για τους συντελεστές A και E , όσον αφορά την μετατροπή του ξύλου σε τέφρα και αέριο, είναι $A=7.38 \times 10^5 \text{s}^{-1}$ και $E=106.5 \text{kJ/mol}$ για την μετατροπή σε τέφρα, και $A=1.44 \times 10^4 \text{s}^{-1}$ και $E=88.6 \text{kJ/mol}$ για την μετατροπή σε αέριο.

Όμως, ο κώδικας FDS, για τα στερεά καύσιμα, χρησιμοποιεί την σχέση (User's Guide του FDS):

$$k = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right) A \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \quad (4.3.2)$$

όπου με ρ_2 συμβολίζεται η πυκνότητα του προϊόντος που προκύπτει από την πυρόλυση, ενώ με ρ_1 η πυκνότητα του υλικού που αντιδρά. Έτσι, με τις κατάλληλες μετατροπές, δόθηκαν οι τιμές $A=4.92 \times 10^6 \text{s}^{-1}$ και $E=106500 \text{kJ/kmol}$ (για την μετατροπή σε τέφρα) και $A=1.065 \times 10^7 \text{s}^{-1}$ και $E=106500 \text{kJ/kmol}$ (για την μετατροπή σε αέριο) στο αρχείο εισόδου του κώδικα FDS. Τέλος, ενώ δίνεται η τιμή της πυκνότητας του ξύλου που προέρχεται από πεύκο και είναι ίση με $\rho_{wood}=740 \text{kg/m}^3$, για την τέφρα θεωρήθηκε η πυκνότητά της ίση με 15% της πυκνότητας του ξύλου, δηλαδή $\rho_{char}=111 \text{kg/m}^3$ (Ragland *et al.*, 1991).

Για την εύρεση των ιδιοτήτων όλων των υπόλοιπων υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της μονοκατοικίας, όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, χρησιμοποιήθηκε η βάση δεδομένων του κώδικα FDS και διάφορες πηγές από το διαδίκτυο. Μερικά από αυτά τα υλικά, για τα οποία δεν έγινε εκτενέστερη αναζήτηση των ιδιοτήτων τους, λόγω του ότι δεν συνδέονται άμεσα με την εξάπλωση της

φωτιάς, είναι το τσιμέντο, το πλαστικό, το μέταλλο, το κεραμίδι, το μάρμαρο, το γυαλί και το ακρυλικό ύφασμα. Στον πίνακα 4.3.1 φαίνεται το υλικό κατασκευής του κάθε αντικειμένου του σπιτιού.

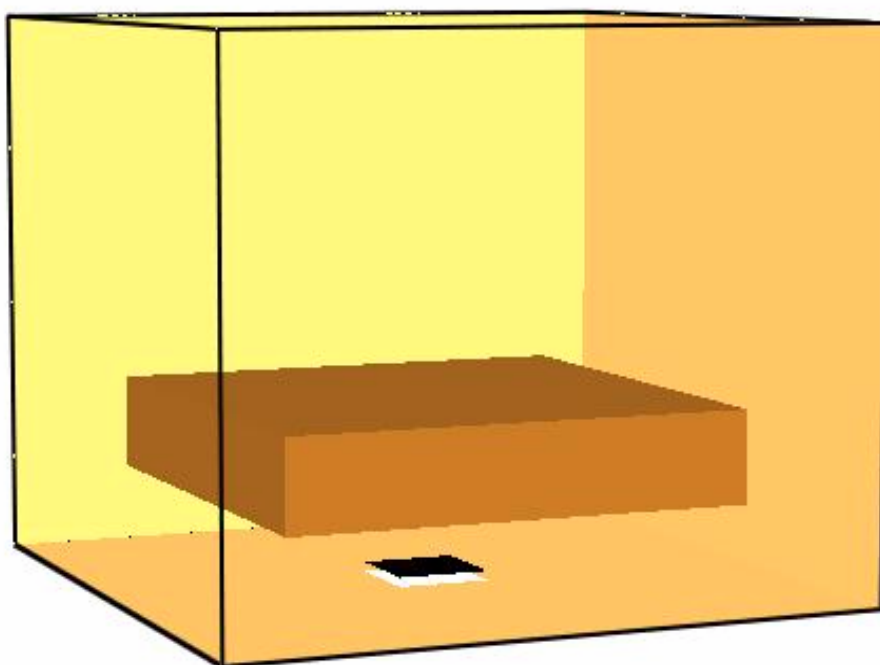
Πίνακας 4.3.1. Υλικά κατασκευής των αντικειμένων του σπιτιού.

Υλικό	Αντικείμενο
Τούβλο	Τοίχοι (εσωτερικοί και εξωτερικοί) και οροφές – στηρίγματα εισόδου, καμινάδα
Γυψοσανίδα	Τοίχοι (εσωτερικοί και εξωτερικοί) και οροφές
Ξύλο (από πεύκο)	Πάγκοι κουζίνας, γραφείο, βιβλιοθήκη, καρέκλα γραφείου, κρεβάτια, κομοδίνα, ντουλάπες, , τραπέζι σαλονιού, σκάλα, πόρτα εισόδου
Τσιμέντο	Δάπεδο
Πλαστικό	Τηλεόραση, Υπολογιστής
Μέταλλο	Ψυγείο, Κάγκελα στο μπαλκόνι
Κεραμύδι	Οροφή, Στέγαστρο εισόδου
Μάρμαρο	Είδη υγειϊνής (μπανιέρα, νιπτήρας, τουαλέτα)
Γυαλί	Παράθυρα
Ακρυλικό ύφασμα	Στρώματα κρεβατιών, καναπές, πολυθρόνες

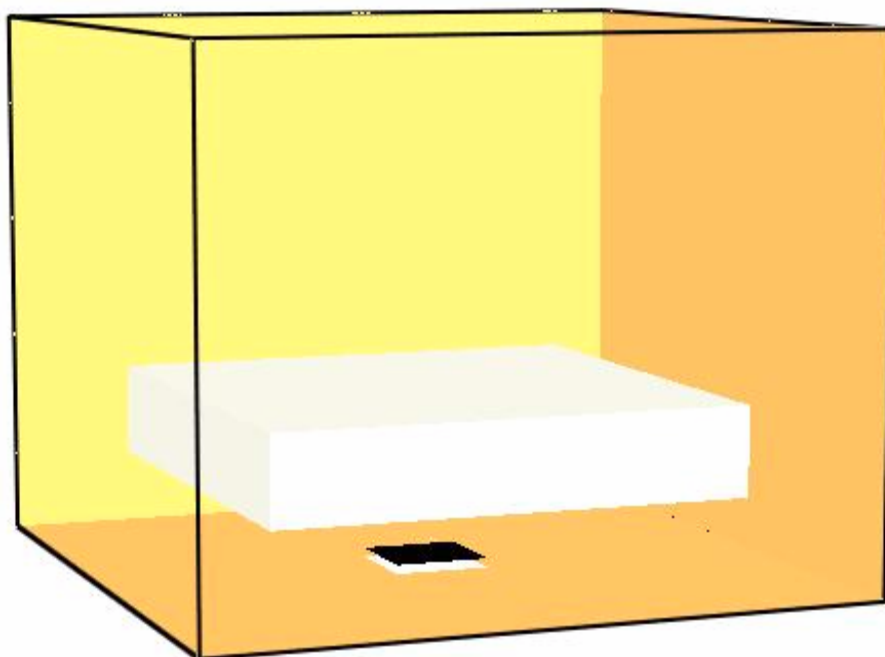
4.4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥΒΛΟΥ ΚΑΙ ΓΥΨΟΣΑΝΙΔΑΣ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΦΩΤΙΑΣ

Αρχικά, πριν γίνει η προσομείωση της φωτιάς σε ολόκληρη την μονοκατοικία, έγιναν δύο σειρές αριθμητικών πειραμάτων, με στόχο την μελέτη της συμπεριφοράς της γυψοσανίδας και του τούβλου σε συνθήκες φωτιάς.

Στην πρώτη σειρά πειραμάτων, χρησιμοποιήθηκε μια πλάκα πάχους 10cm με υλικό κατασκευής, πρώτα, το τούβλο και μετά την γυψοσανίδα (εικόνες 4.4.1 και 4.4.2, αντίστοιχα). Σημειώνεται ότι για τα δύο υλικά χρησιμοποιήθηκαν οι ιδιότητες που παρατίθενται στο κεφάλαιο 4.3. Κάτω από την πλάκα και σε απόσταση 10cm από αυτή, τοποθετήθηκε μια πηγή φωτιάς με ισχύ 480kW, η οποία επιλέχθηκε έτσι ώστε, να εμφανίζεται σχετικά γρήγορα μια αισθητή αύξηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της πλάκας. Μέσα στην πλάκα, τοποθετήθηκαν 6 θερμοστοιχεία, τα οποία απείχαν μεταξύ τους απόσταση ίση με 2cm. Δηλαδή, το πρώτο βρισκόταν στην κάτω επιφάνεια της πλάκας, και στον άξονα που περνά από το κέντρο της, ενώ τα επόμενα τοποθετήθηκαν στον ίδιο κατακόρυφο άξονα ανά 2cm.

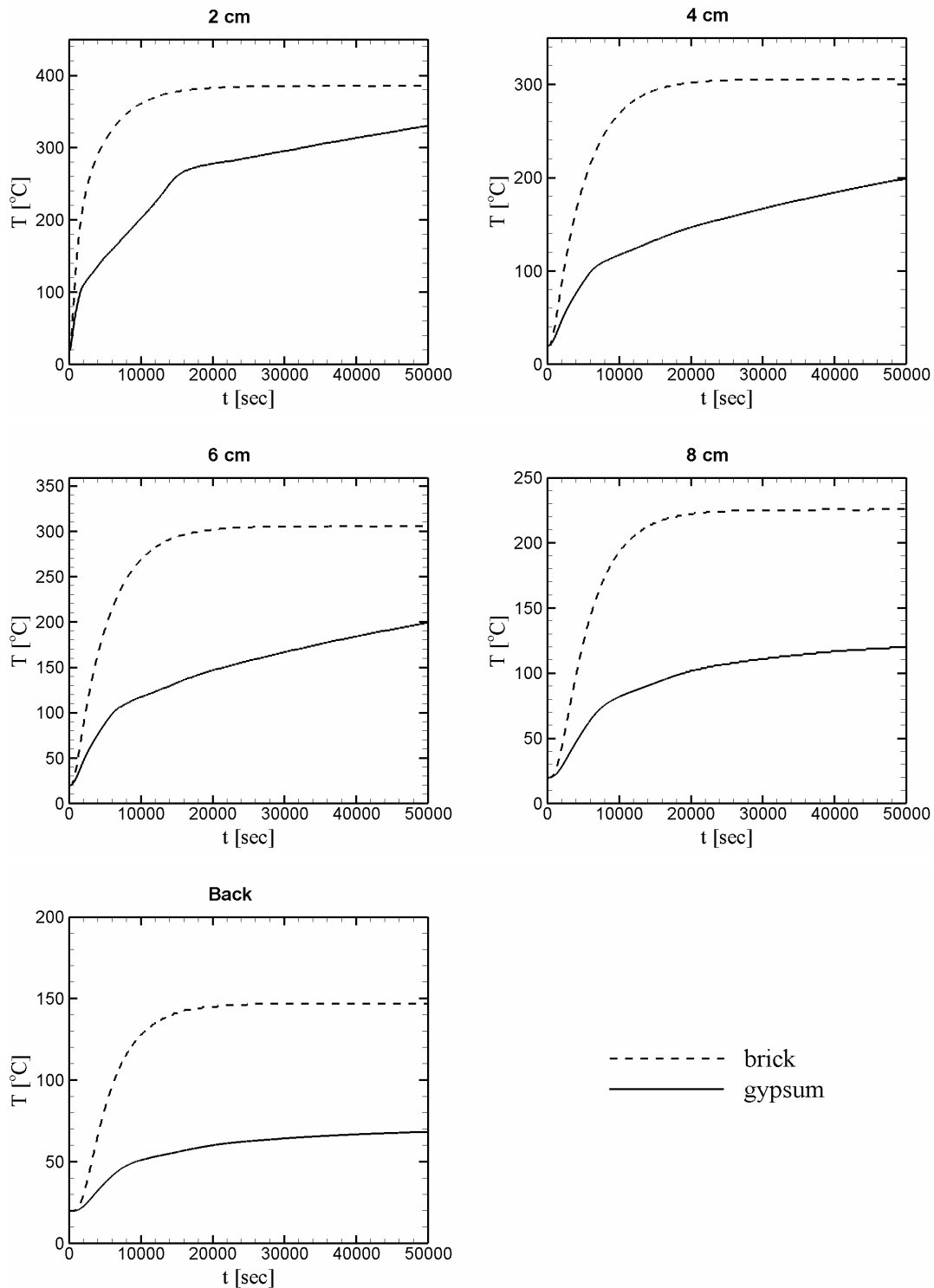


Εικόνα 4.4.1. Πλάκα με υλικό κατασκευής το τούβλο.



Εικόνα 4.4.2. Πλάκα με υλικό κατασκευής τη γυψοσανίδα.

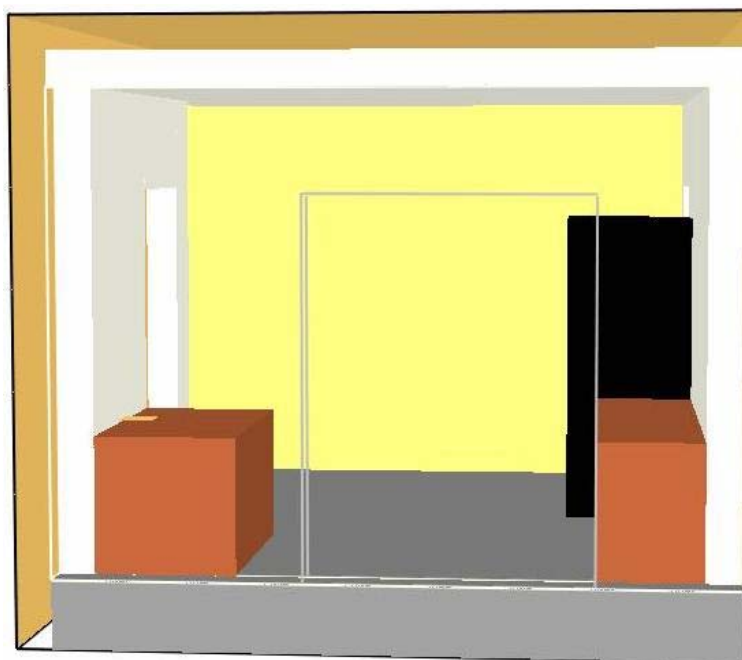
Η προσομοίωση του καθενός από τα δύο πειράματα αυτής της σειράς πειραμάτων είχε διάρκεια 50000s, με αποτέλεσμα να είναι εμφανέστατη η διαφορά της θερμοκρασίας στο εσωτερικό των δύο υλικών. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη σύγκριση των θερμοκρασιών που προήλθαν από τα πέντε θερμοστοιχεία, εκτός από αυτό που βρίσκεται στο κάτω μέρος της πλάκας, απεικονίζονται στο σχήμα 4.4.1. Η θερμοκρασία σε όλα τα σημεία στο εσωτερικό του τούβλου ανεβαίνει απότομα και σταθεροποιείται γρήγορα. Αντίθετα, η θερμοκρασία στο εσωτερικό της γυψοσανίδας ανεβαίνει πιο αργά και παρατηρούνται οι δύο ξαφνικές αλλαγές στην κλίση της στα σημεία που λαμβάνουν χώρα οι δύο αντιδράσεις αποσύνθεσης, δηλαδή στους 100°C και στους 260°C περίπου.



Σχήμα 4.4.1. Σύγκριση της θερμοκρασίας σε πέντε σημεία στο εσωτερικό του τούβλου και της γυψοσανίδας. (πρώτη σειρά πειραμάτων)

Στη δεύτερη σειρά αριθμητικών πειραμάτων, έγινε προσομοίωση μιας φωτιάς σε ένα δωμάτιο της μονοκατοικίας. Το δωμάτιο που χρησιμοποιήθηκε ήταν η κουζίνα, στο εσωτερικό της οποίας υπήρχαν δύο ξύλινοι πάγκοι και ένα ψυγείο. Οι διαστάσεις

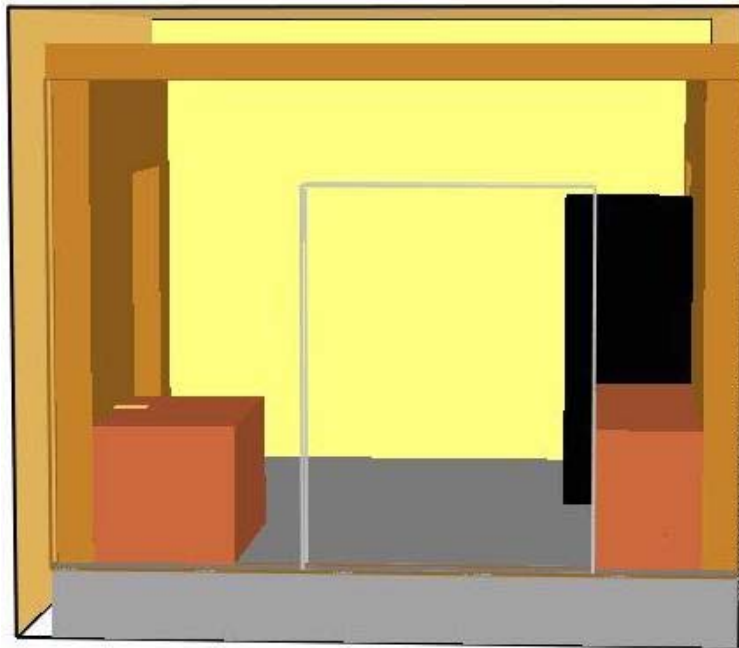
του δωματίου ήταν $4.8\text{m}\times 4.0\text{m}\times 3.6\text{m}$, ενώ το υπολογιστικό πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε περιείχε 8640 κελιά καθένα από τα οποία ήταν ένας κύβος με ακμή ίση με 0.2m. Θεωρήθηκε ότι η φωτιά ξεκίνησε πάνω στον πάγκο που βρίσκεται απέναντι από το ψυγείο και η έντασή της ήταν ίση με 480kW. Όπως και στην προηγούμενη σειρά πειραμάτων, η ένταση της φωτιάς ήταν αρκετά μεγαλύτερη από μια παραγματική φωτιά που θα μπορούσε να προκληθεί σε μία κουζίνα, για παράδειγμα από ένα μαγειρικό σκεύος, γεγονός το οποίο αποσκοπούσε στην έντονη αύξηση των θερμοκρασιών στο εσωτερικό των τοίχων. Στις εικόνες 4.4.3 και 4.4.4 απεικονίζεται το εσωτερικό του δωματίου που χρησιμοποιήθηκε για τα δύο πειράματα με υλικό κατασκευής την γυψοσανίδα και το τούβλο, αντίστοιχα.



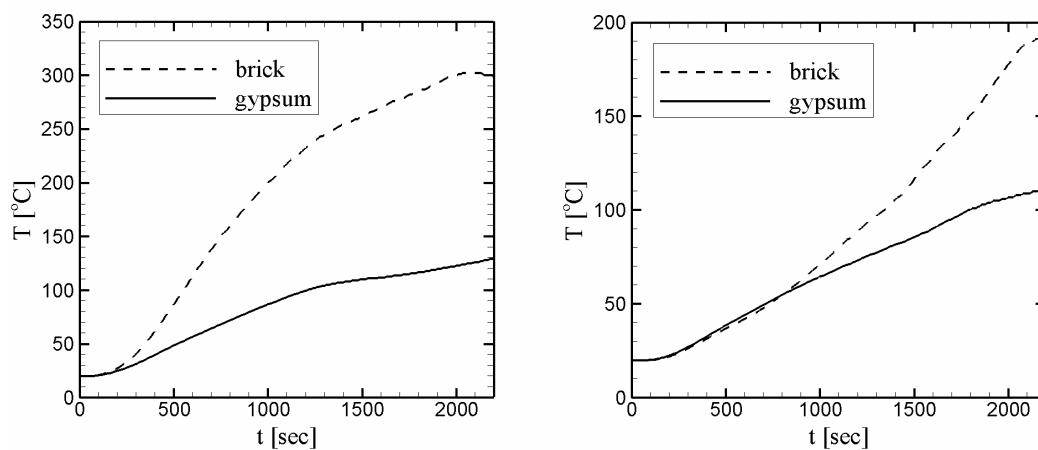
Εικόνα 4.4.3. Δωμάτιο με χρήση γυψοσανίδας ως υλικό κατασκευής των τοίχων.

Για την σύγκριση της συμπεριφοράς της γυψοσανίδας και του τούβλου τοποθετήθηκαν δύο θερμοστοιχεία στο εσωτερικό των τοίχων. Το ένα από αυτά τοποθετήθηκε στον τοίχο όπου βρίσκεται η μπαλκονόπορτα και από την μεριά του πάγκου όπου ξεκίνησε η φωτιά, ενώ το άλλο στον τοίχο πίσω από το ψυγείο. Και τα δύο θερμοστοιχεία βρίσκονταν σε ύψος 1.7m από το έδαφος σε βάθος 2cm. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την σύγκριση των θερμοκρασιών για την δεύτερη

σειρά πειραμάτων απεικονίζονται στο σχήμα 4.4.2. Σημειώνεται ότι το κάθε αριθμητικό πείραμα είχε διάρκεια 2200s.



Εικόνα 4.4.4. Δωμάτιο με χρήση τούβλου ως υλικό κατασκευής των τοίχων.



Σχήμα 4.4.2. Σύγκριση της θερμοκρασίας σε δύο σημεία στο εσωτερικό του τούβλου και της γυψοσανίδας. (δεύτερη σειρά πειραμάτων)

Όπως παρατηρείται από τα σχήματα 4.4.1 και 4.4.2, η θερμοκρασία στο εσωτερικό της γυψοσανίδας είναι αρχικά χαμηλότερη από αυτή του τούβλου και την ξεπερνά μετά από 4000s περίπου. Αυτό φαίνεται ξεκάθαρα από τις τιμές της θερμοκρασίας που προκύπτουν από όλα τα θερμοστοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν και για τις δύο

σειρές. Η συμπεριφορά της γυψοσανίδας οφείλεται στη μεταβολή με τη θερμοκρασία των φυσικών ιδιοτήτων της, όπως η ειδική θερμοχωρητικότητα και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας.

Όπως είναι γνωστό, με τον όρο ‘ειδική θερμοχωρητικότητα’ ενός υλικού ορίζεται η ποσότητα θερμότητας ανά μονάδα μάζας που απαιτείται για να αυξηθεί η θερμοκρασία του υλικού κατά έναν βαθμό Κελσίου. Η ειδική θερμοχωρητικότητα της γυψοσανίδας είναι ίση με $c_p=1.0\text{kJ/kg/K}$ μέχρι τους 100°C , ενώ από τους 100°C μέχρι και τους 150°C αυξάνεται γραμμικά συναρτήσει της θερμοκρασίας ως την τιμή $c_p=10.0\text{kJ/kg/K}$. Στη συνέχεια, για θερμοκρασίες από τους 150°C , όπου παρουσιάζει την υψηλότερη τιμή της, μέχρι τους 250°C , μειώνεται γραμμικά συναρτήσει της θερμοκρασίας μέχρι την τιμή $c_p=1.0\text{kJ/kg/K}$. Τέλος, από τους 250°C μέχρι τους 500°C (η μέγιστη θερμοκρασία που παρατηρείται στο εσωτερικό της γυψοσανίδας είναι 320°C περίπου), η ειδική θερμοχωρητικότητα της γυψοσανίδας παραμένει σταθερή και ίση με $c_p=1.0\text{kJ/kg/K}$. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα να παρατηρούνται δύο έντονες αλλαγές της κλίσης της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της γυψοσανίδας που εντοπίζονται στους 100°C και 260°C περίπου. Αυτές οι δύο αλλαγές της κλίσης της καμπύλης της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας οδηγούν στον περιορισμό του ρυθμού θέρμανσης της γυψοσανίδας. Έτσι, η θερμοκρασία δεν αυξάνεται με τον ίδιο ρυθμό που θα αυξανόταν εάν η ειδική θερμοχωρητικότητα είχε μια σταθερή τιμή. Αντίθετα, η ειδική θερμοχωρητικότητα του τούβλου είναι σταθερή και ίση με $c_p=0.9\text{kJ/kg/K}$, με αποτέλεσμα οι θερμοκρασίες που προκύπτουν στο εσωτερικό του να είναι μεγαλύτερες από αυτές που προκύπτουν στο εσωτερικό της γυψοσανίδας.

Η τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του τούβλου είναι πολύ μεγαλύτερος από αυτόν της γυψοσανίδας. Για τη γυψοσανίδα, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας είναι σταθερός και ίσος με $k_s=0.28\text{W/m/K}$ μέχρι τους 150°C , ενώ μετά τους 150°C μειώνεται γραμμικά συναρτήσει της θερμοκρασίας μέχρι τους 210°C , όπου γίνεται ίσος με $k_s=0.14\text{W/m/K}$. Από τους 210°C μέχρι τους 500°C παραμένει σταθερός και ίσος με $k_s=0.14\text{W/m/K}$. Αντίθετα, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του τούβλου είναι πολύ μεγαλύτερος από αυτόν της γυψοσανίδας και ίσος με $k_s=0.69\text{W/m/K}$. Ως γνωστόν, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ενός υλικού ορίζεται ως το ποσό της θερμικής ενέργειας ανά μονάδα χρόνου το οποίο διαπερνά ένα μέτρο πάχους του υλικού όταν η θερμοκρασιακή διαφορά είναι 1K (ή 1°C). Ουσιαστικά, εκφράζει το πόσο εύκολα διαπερνά η θερμότητα το υλικό αυτό και

μάλιστα, όσο χαμηλότερος είναι ο συντελεστής, τόσο μεγαλύτερη είναι η θερμομονωτική ικανότητα του υλικού. Επομένως, αφού ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας της γυψοσανίδας είναι μικρότερος από αυτόν του τούβλου, η θερμομονωτική της ικανότητα είναι μεγαλύτερη, με αποτέλεσμα οι θερμοκρασίες στο εσωτερικό της να είναι μικρότερες.

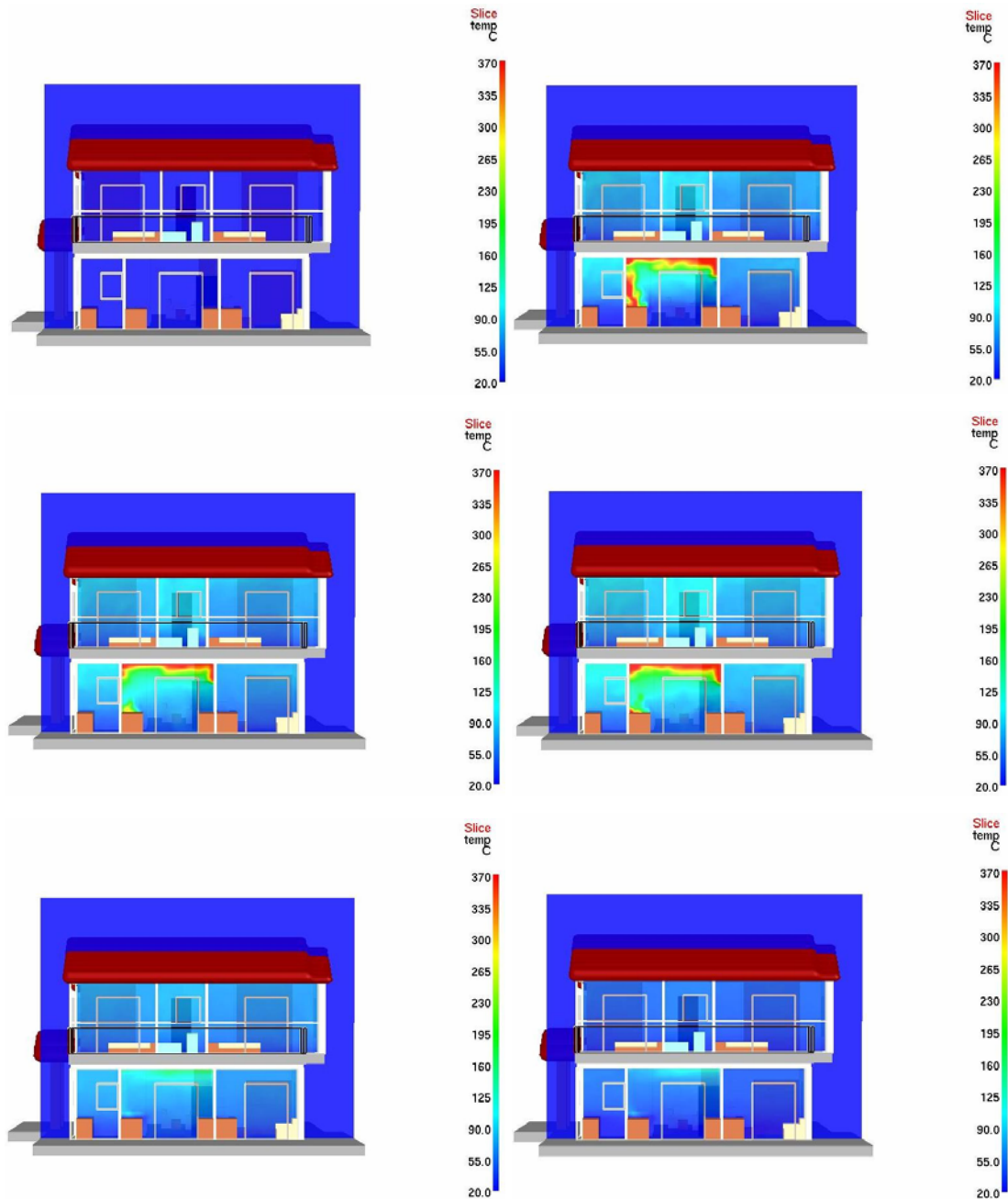
4.5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΦΩΤΙΑΣ ΣΤΗ ΜΟΝΟΚΑΤΟΙΚΙΑ

Σε αυτή την προσομοίωση θεωρήθηκε, όπως και στην προσομοίωση της φωτιάς σε κουζίνα, ότι η πηγή έναυσης της φωτιάς βρίσκεται στον ξύλινο πάγκο της κουζίνας.

4.5.1. Θερμοκρασία

Στο σχήμα 4.5.1 απεικονίζονται οι προλέξεις της θερμοκρασίας σε ένα κάθετο επίπεδο για έξι διαφορετικές χρονικές στιγμές (0min, 4min, 8min, 12min, 16min και 20min).

Αρχικά, η θερμοκρασία σε όλα τα σημεία στο εσωτερικό της μονοκατοικίας είναι ίση με αυτή του περιβάλλοντος (20°C). Στη συνέχεια, λαμβάνει τις υψηλότερες τιμές της πάνω ακριβώς από την επιφάνεια της φωτιάς και κάτω από την οροφή της κουζίνας. Επίσης, φαίνεται ξεκάθαρα ότι η θερμοκρασία παίρνει την μέγιστη τιμή της (περίπου 370°C) 4min μετά την έναυσή της, ενώ περνά από μια μόνιμη κατάσταση (8min και 12min) πριν αρχίσει η περίοδος εξασθένησής της (16min και 20min). Βέβαια, όπως παρατηρείται, δεν παρουσιάζεται κάποια αισθητή αύξηση της θερμοκρασίας (έκλαμψη) σε κάποια χρονική στιγμή και το γεγονός αυτό οφείλεται στην ύπαρξη μεγάλων εσωτερικών ανοιγμάτων (ανοιχτές εσωτερικές πόρτες) τα οποία επιτρέπουν την διαρκή εισαγωγή φρέσκου αέρα. Έτσι, οι μεγάλες ποσότητες αέρα που εισάγονται συνεχώς στο δωμάτιο εμποδίζουν την σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας και την διατηρούν σε χαμηλότερα επίπεδα. Τέλος, η θερμοκρασία στον πάνω όροφο διατηρείται καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης σε χαμηλά επίπεδα, χωρίς να υπερβαίνει ποτέ τους 100°C.

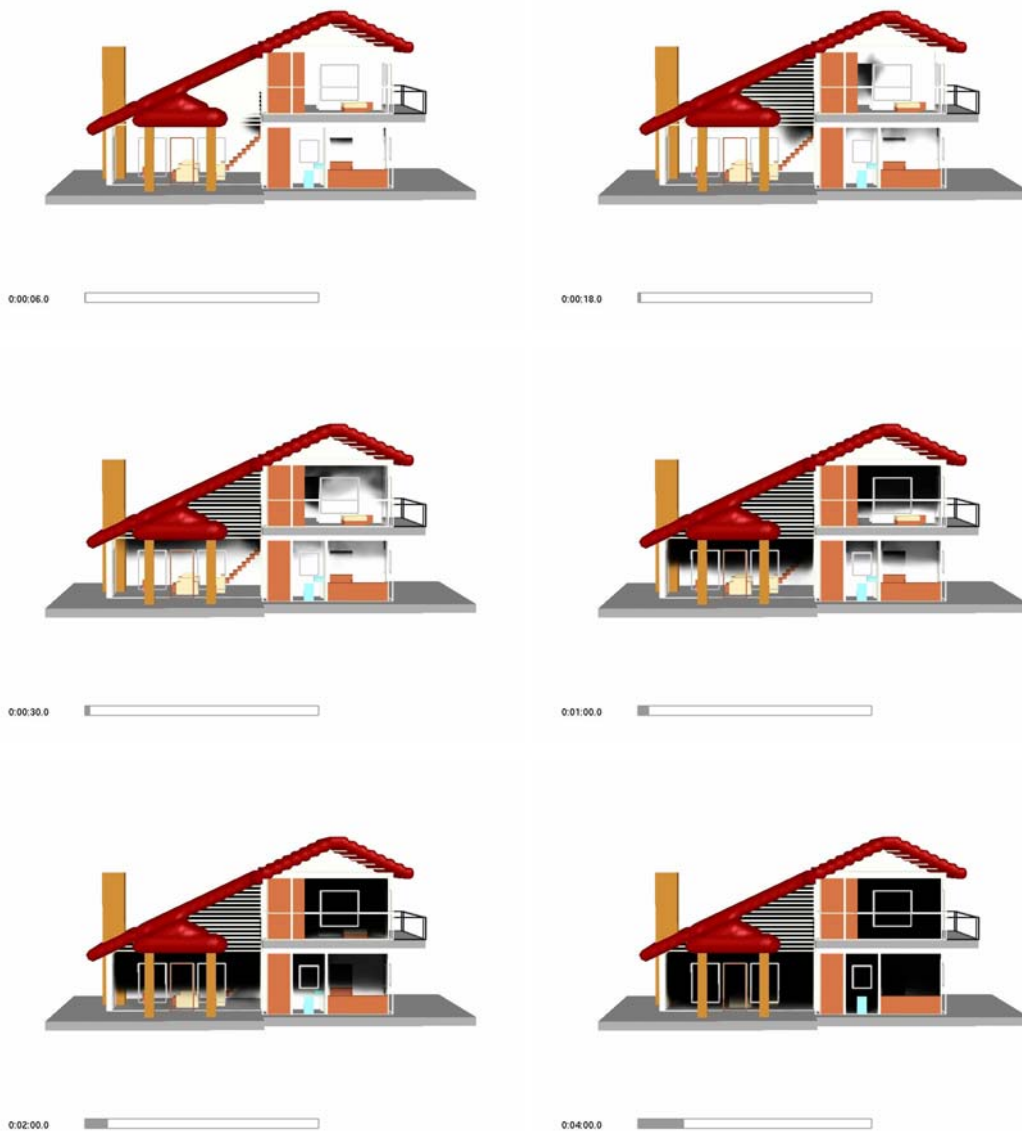


Σχήμα 4.5.1. Προλέξεις της θερμοκρασίας σε ένα κάθετο επίπεδο (πλάγια όψη). Χρονική εξέλιξη (από πάνω αριστερά: 0min, 4min, 8min, 12min, 16min και 20min).

4.5.2. Καπνός

Στα σχήματα 4.5.2 και 4.5.3 απεικονίζεται η κατανομή του καπνού όπως αυτή φαίνεται από δύο διαφορετικές. Όπως προαναφέρθηκε, ο καπνός που παράγεται από μια φωτιά, κινείται προς τα πάνω μέχρι να συναντήσει την οροφή του δωματίου. Έπειτα, κινείται οριζόντια ώσπου να συναντήσει κάποιο άνοιγμα και να συνεχίσει

την ανοδική του πορεία ή ώσπου να συναντήσει κάποιο εμπόδιο (π.χ. κάποιον τοίχο) το οποίο θα εμποδίσει την πορεία του. Στη συγκεκριμένη μονοκατοικία, η κουζίνα (όπου βρίσκεται η φωτιά) είναι άμεσα συνδεδεμένη με το σαλόνι. Έτσι, ο καπνός, πολύ γρήγορα (σε λιγότερο από 18s) εξέρχεται από την κουζίνα και φτάνει στον πρώτο όροφο. Αρχικά ‘γεμίζει’ τα ανώτερα στρώματα ενός δωματίου και μετά αρχίζει να καταλαμβάνει τα κατώτερα στρώματα του ίδιου δωματίου. Ο ρυθμός με τον οποίο γεμίζει τον υπολογιστικό χώρο είναι πολύ γρήγορος και είναι εμφανές ότι σε 4min μόνο προλαβαίνει να γεμίσει πλήρως ολόκληρη την μονοκατοικία.



Σχήμα 4.5.2. Προλέξεις της κίνησης του καπνού (εμπρός όψη).
Χρονική εξέλιξη (από πάνω αριστερά: 6s, 18s, 30s, 60s, 120s και 240s).



Σχήμα 4.5.3. Προλέξεις της κίνησης του καπνού (πλάγια όψη).
Χρονική εξέλιξη (από πάνω αριστερά: 6s, 18s, 30s, 60s, 120s και 240s).

4.5.3. Ορατότητα

Ένα ακόμα μέγεθος που μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με την βοήθεια του κώδικα FDS είναι η ορατότητα σε έναν χώρο. Συγκεκριμένα, για τον υπολογισμό της ορατότητας λόγω της ύπαρξης καπνού χρησιμοποιείται η εξής σχέση (FDS User's Guide):

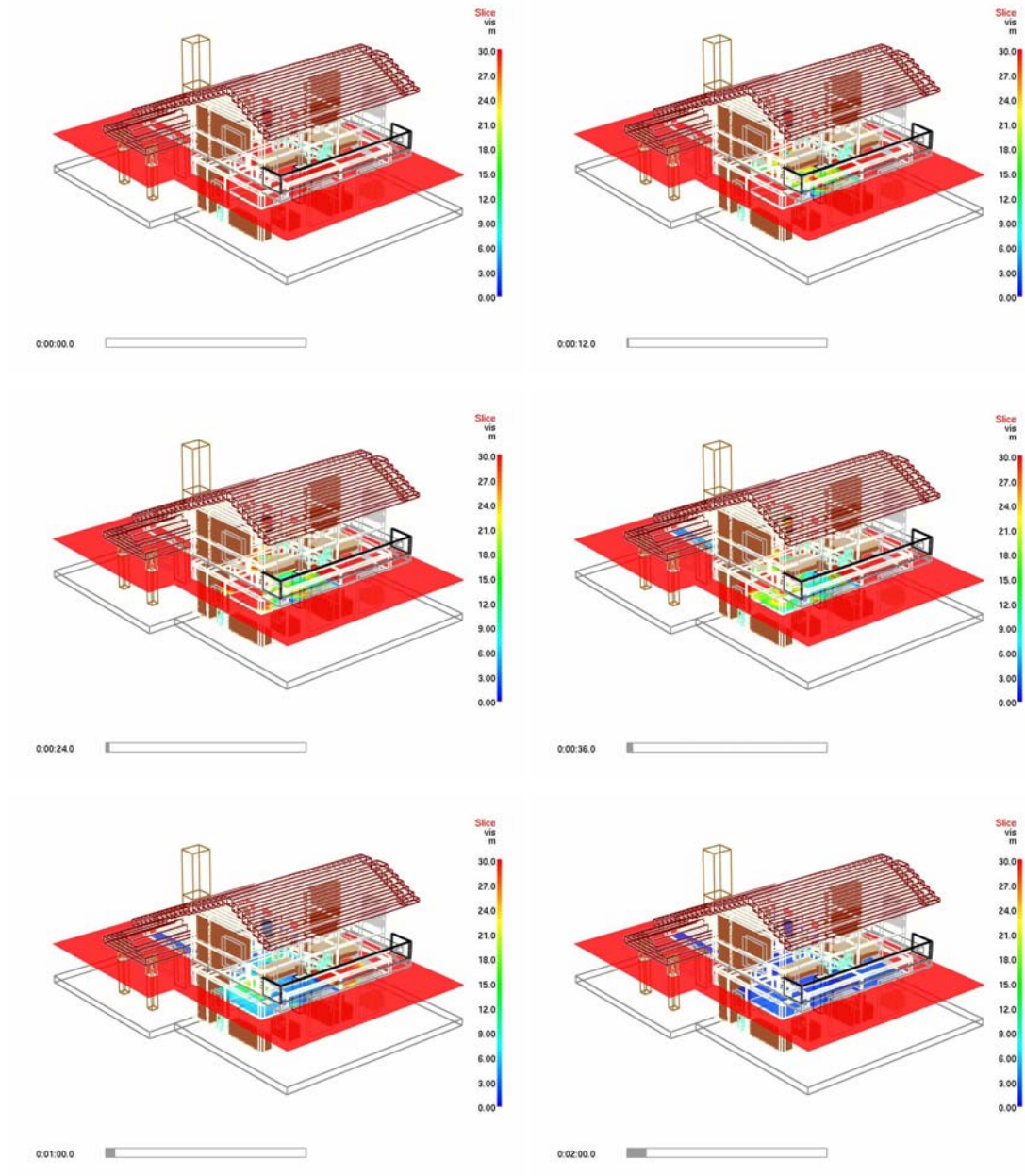
$$S = C / K \quad (4.5.1)$$

όπου C είναι μια αδιάστατη σταθερά, χαρακτηριστική του τύπου του αντικείμενου που γίνεται ορατό μέσα από τον καπνό. Για παράδειγμα, $C=8$ για ένα αντικείμενο που εκπέμπει φως, ενώ $C=3$ για ένα αντικείμενο που ανακλά φως. Στην ίδια εξίσωση ο συντελεστής K προσδιορίζεται από την σχέση:

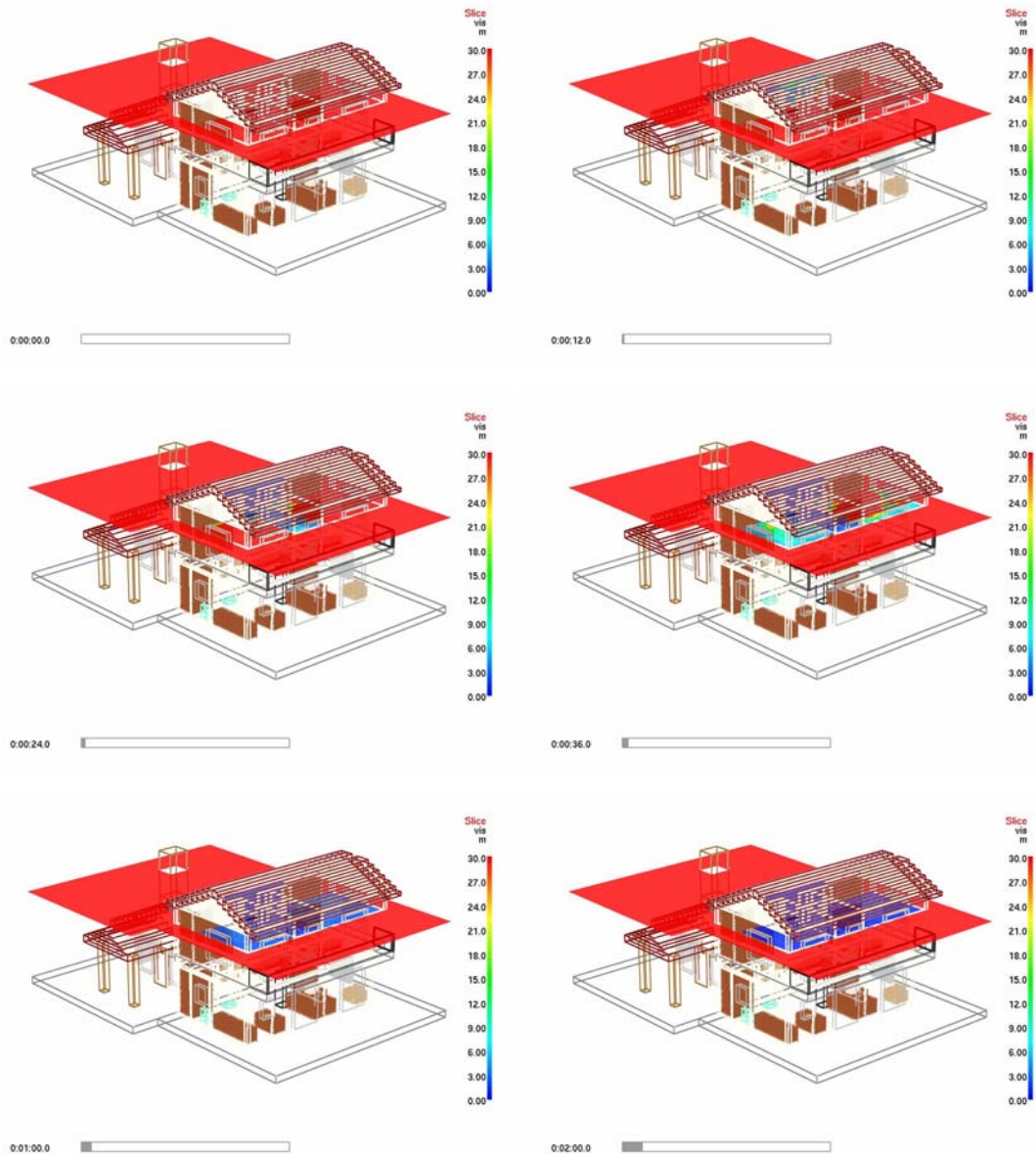
$$K = K_m \rho Y_s \quad (4.5.2)$$

όπου K_m είναι ο συντελεστής έκλειψης μάζας, με προεπιλεγμένη τιμή στον κώδικα FDS για την καύση ξύλου και πλαστικού την $K_m=7600\text{m}^2/\text{kg}$, ρ η πυκνότητα του καπνού και Y_s το κλάσμα όγκου του καπνού στον αέρα. Επομένως, από την στιγμή που ο συντελεστής K ποικίλει από σημείο σε σημείο μέσα στον υπολογιστικό χώρο, αντίστοιχα μεταβάλλεται και το μέγεθος της ορατότητας.

Στον κώδικα FDS, ως αρχική εκτίμηση για το μέγεθος της ορατότητας λαμβάνεται η τιμή 30m η οποία αφορά την περίπτωση ενός ανοιχτού χώρου στον οποίο επικρατούν συνθήκες περιβάλλοντος και δεν υπάρχουν καθόλου καυσαέρια στην ατμόσφαιρα. Στα σχήματα 4.5.4 και 4.5.5 απεικονίζονται οι προλέξεις της ορατότητας σε δύο διαφορετικά ύψη. Στο σχήμα 4.5.4 το επίπεδο που εξετάζεται βρίσκεται σε ύψος 1.8m από το έδαφος, ενώ στο σχήμα 4.5.5 το επίπεδο όπου μελετάται η ορατότητα βρίσκεται σε ύψος 1.8m από το δάπεδο του πρώτου ορόφου. Όπως φαίνεται από το σχήμα 4.5.4, περίπου 2min μετά την έναυση της φωτιάς, η ορατότητα στην κουζίνα και σε όλο το ισόγειο γίνεται σχεδόν μηδενική (λιγότερη από 1m), γεγονός που οφείλεται στην γρήγορη μεταφορά του καπνού. Επίσης, λόγω της πολύ γρήγορης ανοδικής πορείας που ακολουθεί ο καπνός, αφού δεν συναντά κάποιο εμπόδιο καθώς κινείται προς τον πάνω όροφο, η ορατότητα μειώνεται πολύ γρήγορα και στον πρώτο όροφο (σε περίπου 2min υπάρχει και εκεί σχεδόν μηδενική ορατότητα).



Σχήμα 4.5.4. Προλέξεις της ορατότητας στο ισόγειο.
Χρονική εξέλιξη (από πάνω αριστερά: 0s, 12s, 24s, 36s, 60s και 120s).

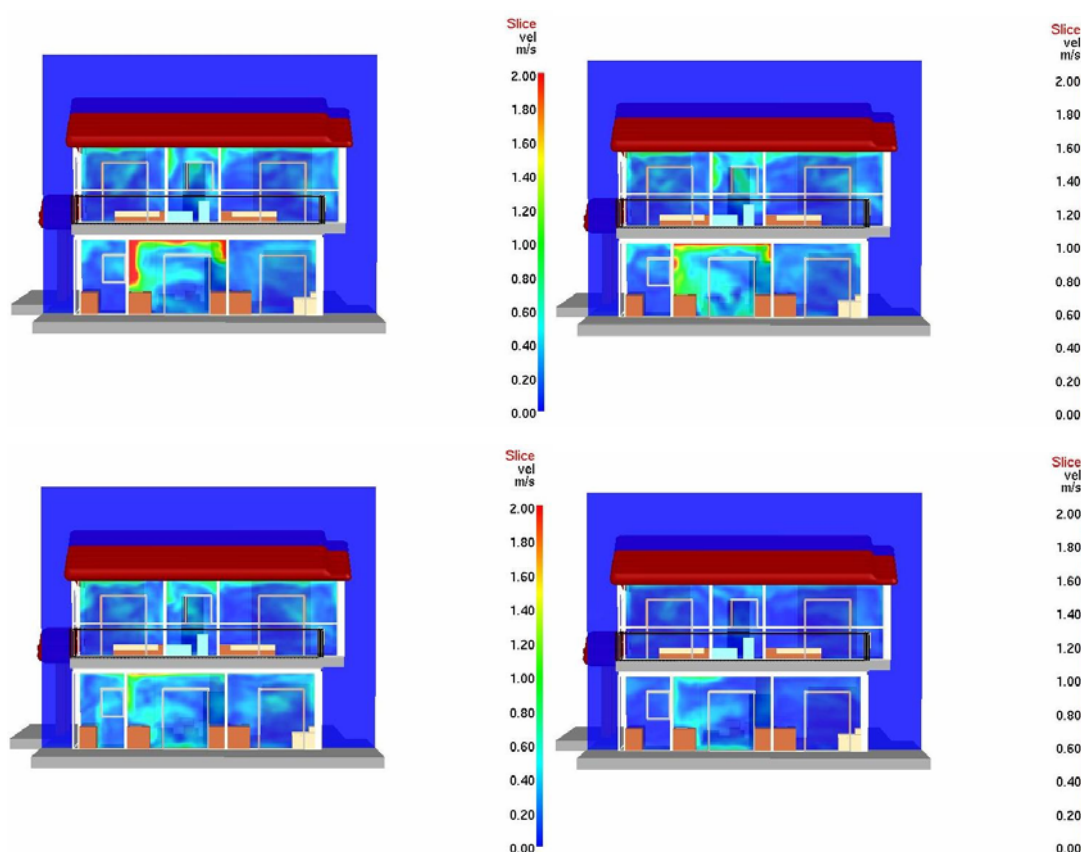


Σχήμα 4.5.5. Προλέξεις της ορατότητας στον πάνω όροφο.
Χρονική εξέλιξη (από πάνω αριστερά: 0s, 12s, 24s, 36s, 60s και 120s).

4.5.4. Ταχύτητα

Στο σχήμα 4.5.6 απεικονίζεται η κατανομή του μέτρου της ταχύτητας σε ένα κάθετο επίπεδο. Οι μεγαλύτερες τιμές της ταχύτητας (περίπου 2m/s) εμφανίζονται ακριβώς επάνω από την επιφάνεια της φωτιάς. Λόγω του φαινομένου της άνωσης, οι θερμές αέριες μάζες κινούνται προς τα πάνω με αποτέλεσμα οι ταχύτητες κοντά στην οροφή του κάθε δωματίου να είναι υψηλότερες σε σχέση με τα χαμηλότερα ύψη.

Επίσης, λόγω του ότι η ανοδική κίνηση των θερμών αερίων δεν συναντά κάποιο εμπόδιο ώστε να περιοριστεί στον χώρο του ισογείου, αυτά κατευθύνονται και στον όροφο. Έτσι, σε όλα τα δωμάτια (ισογείου και ορόφου), στο ύψος της οροφής τους συναντώνται ταχύτητες ίσες με 1m/s περίπου, ενώ ο φρέσκος κρύος αέρας που εισάγεται καταλαμβάνει τα κατώτερα στρώματα συμβάλλοντας έτσι στον περιορισμό της ταχύτητας των θερμών αερίων μαζών στα χαμηλότερα ύψη.



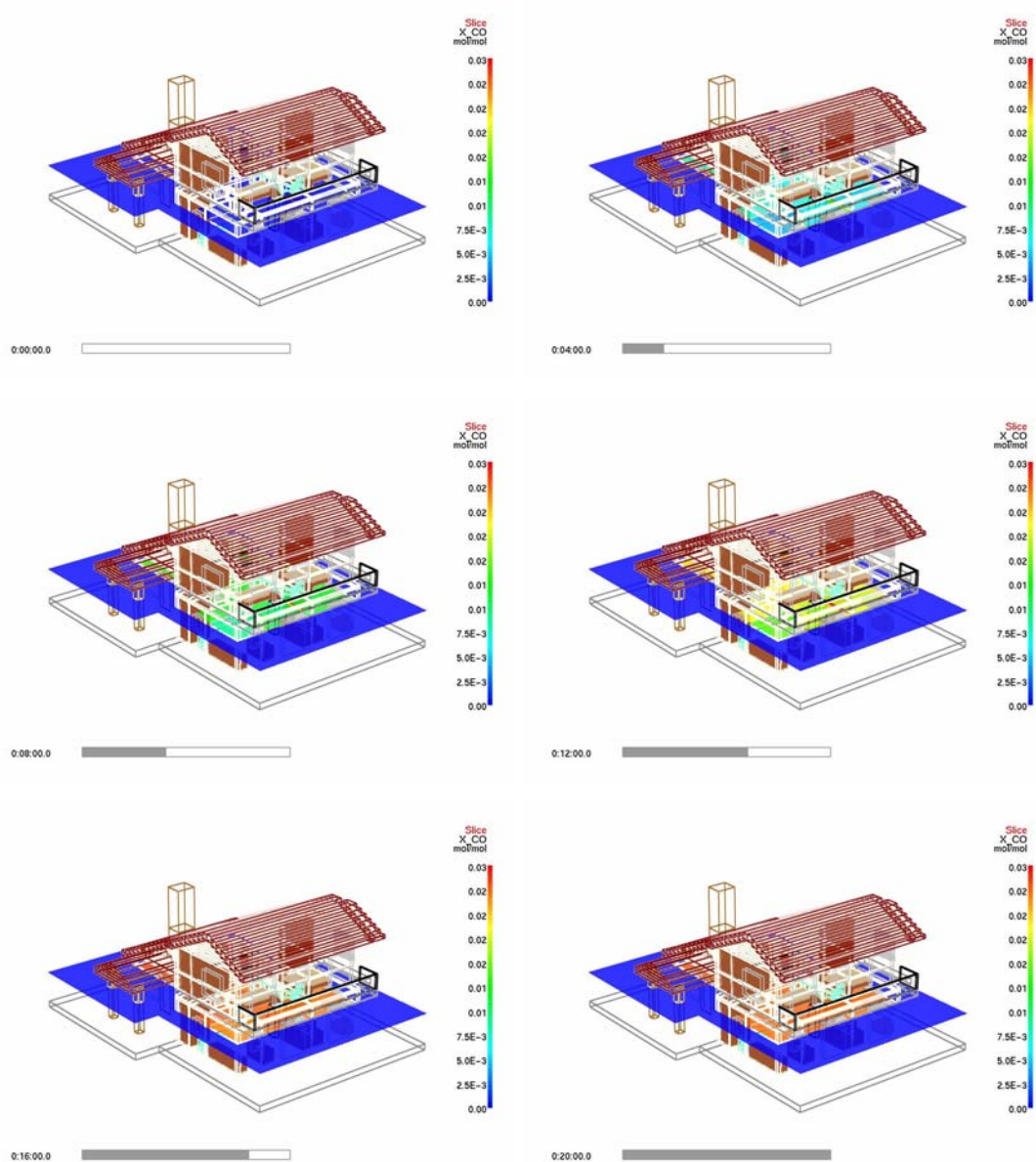
Σχήμα 4.5.6. Κατανομή του μέτρου της ταχύτητας σε ένα κάθετο επίπεδο (πλάγια όψη).

Χρονική εξέλιξη (από πάνω αριστερά: 5min, 10min, 15min, 20min).

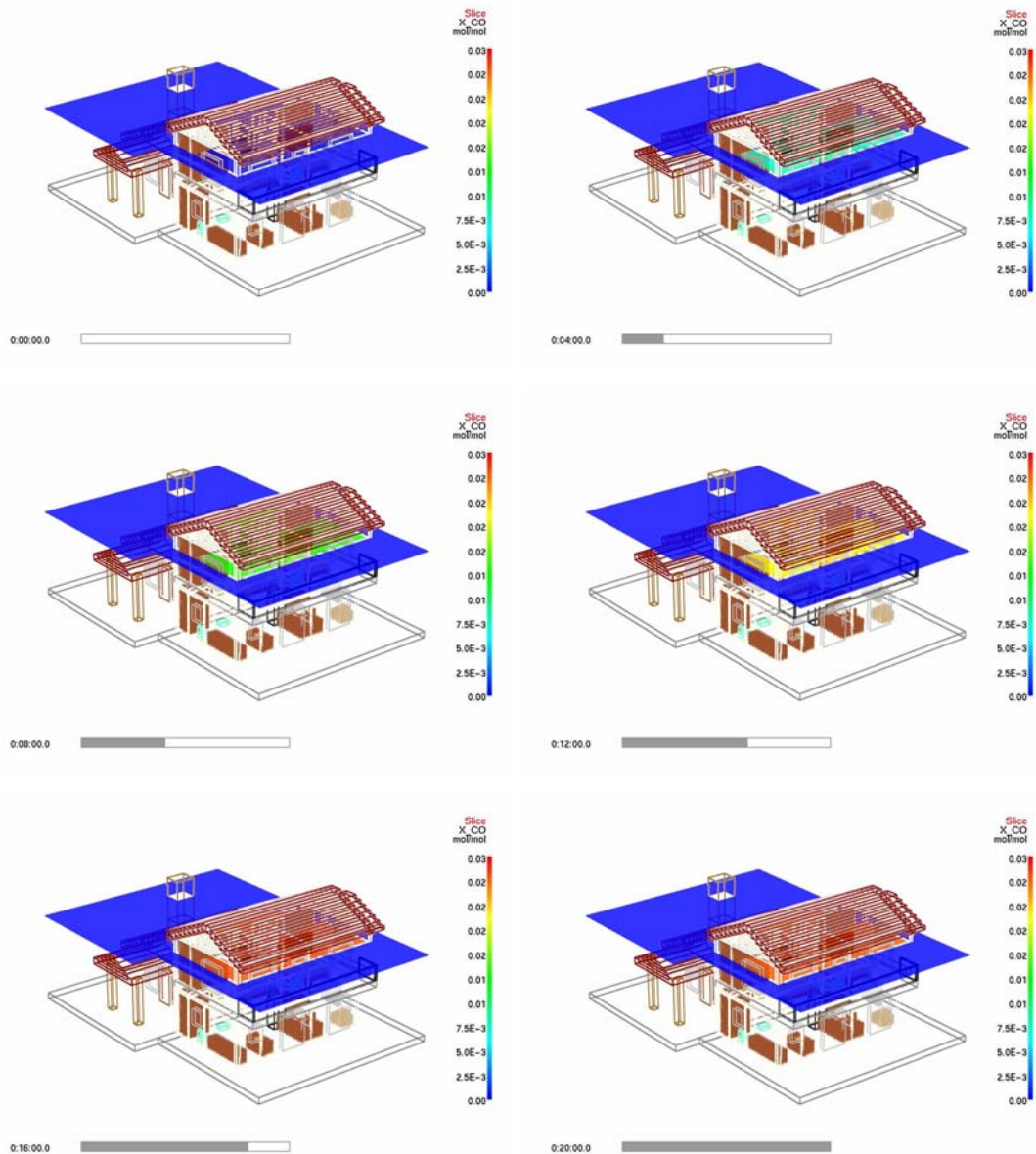
4.5.5. Συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα

Όπως είναι γνωστό, το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) είναι ένα τοξικό αέριο που παράγεται από την ατελή καύση ενός υλικού. Η συγκέντρωση του CO αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα για την επιβίωση των ανθρώπων που βρίσκονται σε ένα

χώρο, στον οποίο υπάρχει φωτιά. Στα σχήματα 4.5.7 και 4.5.8 απεικονίζονται οι προλέξεις του κώδικα FDS για την συγκέντρωση του CO σε δύο επίπεδα, τα οποία βρίσκονται σε ύψος 1.8m από το πάτωμα του κάθε ορόφου.



Σχήμα 4.5.7. Προλέξεις της συγκέντρωσης του CO (σε mol/mol) στο ισόγειο. Χρονική εξέλιξη (από πάνω αριστερά: 0min, 4min, 8min, 12min, 16min και 20min).



Σχήμα 4.5.8. Προλέξεις της συγκέντρωσης του CO (σε mol/mol) στον όροφο. Χρονική εξέλιξη (από πάνω αριστερά: 0min, 4min, 8min, 12min, 16min και 20min).

Όπως φαίνεται από τα δύο παραπάνω σχήματα, αρχικά, η συγκέντρωση του CO αποκτά την μέγιστη τιμή της μόνο στην περιοχή πάνω ακριβώς από την φωτιά (περίπου 0.03mol/mol στα 4min) ενώ στο υπόλοιπο σπίτι είναι σχεδόν μηδενική. Έπειτα, λόγω του ότι δεν υπάρχει κάποιο άνοιγμα προς το περιβάλλον η συγκέντρωση του CO αυξάνεται και στα υπόλοιπα δωμάτια, φτάνοντας την μέγιστη τιμή της (0.03mol/mol) σε όλα τα δωμάτια του ισογείου έπειτα από 16min, περίπου. Τέλος, λόγω του φαινομένου της άνωσης, το CO που παράγεται κατά την καύση

μεταφέρεται και στον πρώτο όροφο, με αποτέλεσμα στα 16min περίπου η συγκέντρωση του CO γίνεται μέγιστη σε όλα τα σημεία της μονοκατοικίας.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ένα από τα βασικά συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ότι, αν και τα φαινόμενα της φωτιάς είναι εξαιρετικά σύνθετο, καθώς σε αυτήν εμπλέκονται διάφορα φαινόμενα, όπως για παράδειγμα η καύση, η χημική κινητική και η ακτινοβολία, η υπολογιστική προσομοίωσή της με αρκετά καλή ακρίβεια είναι πλέον εφικτή. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει από τη σύγκριση των προλέξεων του κώδικα FDS με πειραματικές μετρήσεις που παρουσιάζονται στο τρίτο κεφάλαιο.

Μεταξύ άλλων, διαπιστώθηκε το μέγεθος το οποίο παίζει κυρίαρχο ρόλο στην μετάδοση της ακτινοβολίας και, ουσιαστικά, καθορίζει το ποσοστό της θερμικής ακτινοβολίας που εκλύεται από μια φλόγα είναι το κλάσμα ακτινοβολίας (Radiative Fraction). Η εύρεση της κατάλληλης τιμής για αυτό το μέγεθος είναι δυσχερής και μπορεί να γίνει μόνο με δοκιμές για κάθε περίπτωση που μελετάται. Αντιθέτως, η προσομοίωση της μετάδοσης θερμότητας λόγω αγωγής και συναγωγής δεν παρουσιάζει κάποιο πρόβλημα.

Επίσης, για την προσομοίωση μιας φωτιάς σε έναν συγκεκριμένο χώρο είναι σημαντικός ο σωστός ορισμός του υπολογιστικού πλέγματος που χρησιμοποιείται. Στον κώδικα FDS, όταν ένα αντικείμενο αποτελεί μείγμα δύο ή περισσότερων υλικών, με τις κατάλληλες εντολές, μπορούν να συμπεριληφθούν όλα τα υλικά που αποτελούν το αντικείμενο αυτό σε ένα υπολογιστικό κελί. Όσον αφορά τις διαστάσεις του υπολογιστικού χώρου, είναι πολύ δύσκολο να περιγραφούν με απόλυτη ακρίβεια όλα τα αντικείμενα, διότι σε αυτήν την περίπτωση, το πλέγμα θα πρέπει να γίνει πολύ πυκνό, με αποτέλεσμα την υπερβολική αύξηση του υπολογιστικού χρόνου.

Η σημαντικότερη παράμετρος κατά την προσομοίωση μιας φωτιάς είναι ο σωστός ορισμός των φυσικών ιδιοτήτων των αντικειμένων που βρίσκονται στον χώρο. Σε ιδιότητες, όπως για παράδειγμα η πυκνότητα, η ειδική θερμοχωρητικότητα και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, πρέπει να δίνονται τιμές που να πλησιάζουν όσο το δυνατόν περισσότερο τις πραγματικές τους τιμές, ώστε η εξάπλωση της φωτιάς να προσομοιωθεί με τον καλύτερο δυνατό τρόπο.

Το γενικό συμπέρασμα που προκύπτει από αυτή τη διπλωματική εργασία είναι ότι η φωτιά είναι ένα σύνθετο φαινόμενο με πολλές παραμέτρους και για να προσομοιωθεί σωστά η συμπεριφορά της θα πρέπει να ληφθούν υπόψη όλοι οι

παράγοντες που την επηρεάζουν. Όσον αφορά τον κώδικα FDS, αυτός αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο ‘εργαλείο’ για την προσομοίωση μιας φωτιάς, ενώ μπορεί να βοηθήσει και στη λήψη μέτρων για την βελτίωση της πυρασφάλειας ενός χώρου. Βέβαια, μπορούν να γίνουν ακόμα πολλές βελτιώσεις, όπως για παράδειγμα, η δυνατότητα ορισμού της πυκνότητας ενός υλικού σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας, ώστε να αυξηθεί η ακρίβεια των προσομοιώσεων.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Anderson D.A., Tannehill J.C. & Pletcher R.H., “Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer”. Hemisphere Publishing Corporation, Philadelphia, Pennsylvania (1984)
2. Anderson L. & Jansson B., “Analytical Fire Design with Gypsum – A Theoretical and Experimental Study”. Fire Safety Journal, Malmö, Sweden (1987)
3. Ang C.N. & Wang Y.C., “The effect of water movement on specific heat of gypsum plasterboard in heat transfer analysis under natural fire exposure”. Construction and Building Materials 18 (2004)
4. Anon, “Steam Generation and Use”. The Babcock and Wilcox Co., New York (1972)
5. Axenenko O. & Thorpe G., “The modeling of dehydration and stress analysis of gypsum plasterboards exposed to fire”. Computational Material Science 6 (1996)
6. Babrauskas V., “Full scale burning behaviour of upholstered chairs”. National Bureau of Standards, NBS Technical Note, No. 1103 (1982)
7. Belmiloudi A. & Le Meur G., “Mathematical and numerical analysis of dehydration of gypsum plasterboards exposed to fire”. Applied Mathematics and Computation 163 (2005)
8. Bowersox T.W., Blankenhorn P.R. & Murphey W.K., “Heat of combustion, ash content, nutrient content and chemical content of Populus hybrids”. Wood Science 11 (1979)
9. Bullen M.L., “The ventilation required to permit growth of a room fire”. Building Research Establishment (1978)
10. Burke S.P. & Schumann T.E., “Diffusion flames”. Industrial and Engineering Chemistry, 20 (1928)
11. Drysdale D., “An Introduction to Fire Dynamics”, John Wiley & Sons Ltd., Sussex, England (1999)
12. Friedman R., “Ignition and burning of solids”. Fire Standards and Safety, ASTM STP 614, American Society for Testing and Materials, Philadelphia (1977)
13. Ghazi Wakili K., Hugi E., Willschleger L. & Frank Th., “Gypsum Board in Fire – Modelling and Experimental Validation”. Journal of Fire Sciences, Vol. 25 (2007)
14. Harmathy T.Z., “The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering”. Society of Fire Protection Engineers/National Fire Protection Association, Boston (1988)

15. Heselden A.J.M. & Melinek S.J., "The early stages of fire growth in a compartment. A co-operative research programme of the CIB (Commission W14). First Phase". Fire Research Note, No 1029 (1975)
16. Hinkley P.L., Wraight H.G.H. & Theobald C.R., "The contribution of flames under ceilings to fire spread in compartments. Part 1: Incombustible ceilings". Fire Research Note 712 (1968)
17. Jones W.W., "A Review of Compartment Fire Models". National Bureau of Standards, Gaithersburg, Maryland (1983)
18. Larson T.V. & Koenig J.Q., "A Summary of the Emissions Characterization and Noncancer Respiratory Effects of Wood Smoke". Environmental Protection Agency (1993)
19. Liang K.M., Ma T., Quintiere J.G. & Rouson D., "Application of CFD Modeling to Room Fire Growth on Walls". National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland (2003)
20. Magee R.S., McAlevy R.F., "The mechanism of flame spread", J. Fire and Flammability 2 (1971)
21. Markstein G.H., de Ris J.N., "Upward fire spread over textiles", 14th Symposium (International) on Combustion, Pittsburgh (1972)
22. McGrattan K., "Fire Dynamics Simulator (Version 4) Technical Reference Guide", NIST Special Publication 1018 (2006)
23. McGrattan K. & Forney G., "Fire Dynamics Simulator (Version 4) User's Guide", NIST Special Publication 1019 (2006)
24. McGrattan K. & Forney G., "User's Guide for Smokeview Version 4 – A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data", NIST Special Publication 1017 (2006)
25. Mehaffey J.R., Cuerrier P. & Carisse G., "A Model for Predicting Heat Transfer through Gypsum-Board/Wood-Stud Walls Exposed to Fire". Fire and Materials, Vol. 18 (1994)
26. Merci B. & Van Maele, "Discussion of RANS and LES Simulations of Single Side Well-Ventilated Fires in a Small Compartment". Third European Combustion Meeting (2007)
27. Merci B. & Vandeveld P., "Experimental study of natural roof ventilation in full-scale enclosure fire tests in a small compartment". Fire Safety Journal (2007)

28. National Fire Protection Association, "Fire Hazards in oxygen enriched atmospheres". NFPA, No 53 (1994)
29. Pettersson O., Magnuson S.E., Thor J., "Fire engineering design of structures", Swedish Institute of Steel Construction, Publication 50 (1976)
30. Poinson T. & Veynante D., "Theoretical and Numerical Combustion". R.T. Edwards, Philadelphia, USA (2001)
31. Purser D.A., "Toxicity assessment of production products". SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd Edition, Society of Fire Protection Engineers, Boston (1995)
32. Quintiere J.G., "Growth of fire in building compartments". Fire Standards and Safety, American Society for Testing and Materials, STP 614 (1976)
33. Ragland K.W., Aerts D.J. & Baker A.J., "Properties of Wood for Combustion Analysis". Bioresource Technology 37 (1991)
34. Royal J.H., "The influence of fuel bed thickness on flame spreading rate". Honours Report, Stevens Institute of Technology (1970)
35. Ryan J.V., "Study of Gypsum Plasters Exposed to Fire". Journal of Research of the National Bureau of Standards, C. Engineering and Instrumentation (1962)
36. Shen D.K, Fang M.X, Luo Z.Y. & Cen K.F., "Modeling Pyrolysis of Wet Wood under External Heat Flux". Fire Safety Journal 42 (2007)
37. Suzuki M., Dobashi R., Hirano T., "Behaviour of fire spreading downward over thick paper", 25th Symposium (International) on Combustion, Pittsburgh (1994)
38. Smagorinsky J., "General Circulation Experiments with the Primitive Equations I. The Basic Experiment". Monthly Weather Review, 91 (1963)
39. Thomas G., "Thermal Properties of Gypsum Plasterboard at High Temperatures". Fire and Materials, Vol. 26 (2002)
40. Thomas P.H., "Testing products and materials for their contribution to flashover in rooms". Fire and Materials, 5 (1981)
41. Williams F.A., "Combustion theory". Benjamin Cummings (1985)
42. Wilson M.A., Hoff W.D. & Hall C., "Water movement in porous building materials – XIII. Absorption into a two-layer composite". Build Environ, 30 (1995)
43. Φούντη Μ., "Θεωρία Καύσης και Συστήματα Καύσης". Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα (2005)
44. <http://www.engineeringtoolbox.com>