ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΤΕΡΟΓΕΝΩΝ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΥΣΗΣ

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: Κα. ΜΑΡΙΑ ΦΟΥΝΤΗ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΞΥΛΙΝΟΥ ΠΥΡΟΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΦΩΤΙΑΣ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΣΠΕΝΤΖΟΣ

ΑΘΗΝΑ

ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2013

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την καθηγήτρια μου, κυρία Μαρία Φούντη για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας και την ενθάρρυνση της. Επίσης, ευχαριστώ την Ελένη-Μαρίνα Ασημακοπούλου, υποψήφια διδάκτορα, για την πολύτιμη βοήθειά της, τις χρήσιμες συμβουλές της, το χρόνο που μου αφιέρωσε αλλά και τις διορθώσεις της κατά την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Ακόμη, ευχαριστώ τους διδάκτορες Χρήστο Κεραμιώτη για τη διάθεση των αεροπορικών καυσίμων και τον Διονύση Κολαΐτη για τις συμβουλές του και τις διορθώσεις του. Τέλος, ευχαριστώ τους φίλους, συμφοιτητές και μη, που με βοήθησαν κατά τη συγγραφή της εργασίας καθώς και τους γονείς μου για τη στήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Πρόλογος

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η πειραματική και η υπολογιστική διερεύνηση της συμπεριφοράς ξύλινου πυροθερμικού φορτίου σε συνθήκες φωτιάς. Συγκεκριμένα, με τη χρήση θερμιδόμετρου, στο εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης, μετράται πειραματικά η θερμογόνος ικανότητα διάφορων τύπων ξύλου. Στη συνέχεια, με τη χρήση λογισμικού υπολογιστικής ρευστομηχανικής γίνεται προσομοίωση της καύσης ξύλινου πυροθερμικού φορτίου σε δωμάτιο που επικρατούν συνθήκες μη επαρκούς αερισμού.

Στο πρώτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται το θερμιδόμετρο που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις θερμογόνου ικανότητας και αναλύεται εκτενώς η θεωρία που διέπει τη λειτουργία του. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι πειραματικές μετρήσεις που έγιναν τόσο σε στερεά όσο και σε υγρά καύσιμα. Τα στερεά καύσιμα αποτελούνται από ξύλα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν κατά τη πειραματική διερεύνηση της συμπεριφοράς έναντι φωτιάς σύγχρονων τεχνικών δόμησης με χρήση ξύλου [Κολαίτης et al., 2011]. Τα υγρά καύσιμα αποτελούνται από το επτάνιο και δύο αεροπορικά καύσιμα (JET A-1 και Aromatic+Napthene Blend) που ήταν διαθέσιμα στο εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης [Keramiotis et al., 2013]. Και στις δύο περιπτώσεις, γίνεται υπολογισμός κατώτερης θερμογόνου ικανότητας και σχολιασμός των αποτελεσμάτων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται μία ιστορική αναδρομή της χρησιμοποίησης σωρών ορθογωνικά διατεταγμένων ξύλινων ράβδων (WCR) ως πυροθερμικό φορτίο σε πειράματα φωτιάς, που ξεκινάει από τη δεκαετία του 1930. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται για την ανάφλεξη των WCR σε διάφορα πειράματα φωτιάς. Ακόμη, παρουσιάζονται διαθέσιμα πειράματα μικρής και πραγματικής κλίμακας στα οποία έγινε χρήση WCR ως πυροθερμικό φορτίο. Τέλος, αναλύονται διάφορες μελέτες που έγιναν και αφορούν την προσομοίωση του WCR σε υπολογιστικά μοντέλα καθώς και ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιήθηκε κάθε φορά η καύση του.

Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται ο κώδικας υπολογιστικής ρευστομηχανικής FDS ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση πειραματικής διάταξης διερεύνησης φωτιάς σε διαμέρισμα υπό συνθήκες μη επαρκούς αερισμού [Perricone, 2005]. Αναφέρονται, αναλυτικά, οι εξισώσεις που επιλύονται καθώς και τα διάφορα μοντέλα που χρησιμοποιούνται. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στο μοντέλο πυρόλυσης που χρησιμοποιείται στον κώδικα FDS καθώς και στις μεθόδους με τις οποίες περιγράφεται η πυρόλυση στερεών καυσίμων. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην περιγραφή της χημικής κινητικής των αντιδράσεων των ξύλων που αποτελούν το WCR με χρήση της εξίσωσης Arrhenius.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, γίνεται προσομοίωση της φωτιάς σε ένα δωμάτιο υπό κλίμακα στο οποίο επικρατούν συνθήκες μη επαρκούς αερισμού [Perricone, 2005]. Στη συνέχεια, αναλύονται και αξιολογούνται οι τρόποι με τους οποίους μπορεί να γίνει η προσομοίωση της καύσης του WCR χρησιμοποιώντας τον κώδικα FDS. Ακόμη, αφού επιλεχθεί ο βέλτιστος τρόπος προσομοίωσης της καύσης του WCR, γίνεται σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με τις προλέξεις θερμοκρασίας. Με αυτόν τον τρόπο μελετήθηκε σε ποιο βαθμό ο κώδικας FDS μπορεί να προσεγγίσει τις πραγματικές συνθήκες καύσης του WCR σε συνθήκες μη επαρκούς αερισμού. Τέλος, πραγματοποιούνται δύο παραμετρικές μελέτες που αφορούν την επίδραση του ανοίγματος στο δωμάτιο καθώς και της συγκέντρωσης οξυγόνου.

Τέλος, στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά όλα τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, τα οποία αφορούν τον κώδικα FDS και την προσομοίωση πειραμάτων φωτιάς σε συνθήκες μη επαρκούς αερισμού. Επιπροσθέτως, παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από το πειραματικό μέρος.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος **iv**

1. Πειραματικό Μέρος **1**

1.1. Αδιαβατικό Θερμιδόμετρο Τύπου Οβίδας Οξυγόνου 1

1.1.1. Εισαγωγή 1

1.1.2. Βασικές έννοιες 3

1.1.2.1. Εσωτερική ενέργεια της καύσης 3

1.1.2.2. Ενθαλπία της καύσης 4

1.1.3.Πειραματική διάταξη θερμιδόμετρου 6

1.1.4.Διαδικασία πειραματικών μετρήσεων 7

1.2. Υγρασιόμετρο 11

1.3. Πειραματικές Μετρήσεις 12

1.3.1. Στερεά καύσιμα – Ξύλο 12

1.3.1.1. Εισαγωγή 12

1.3.1.2. Επεξεργασία των μετρήσεων 13

1.3.1.3. Παρουσίαση των αποτελεσμάτων 13

1.3.1.3.1. Απλή σανίδα (wood crib) 15

1.3.1.3.2. Ινόπλακα μέσης πυκνότητας (MDF) 18

1.3.1.3.3. Σανίδα δοκών 19

1.3.1.3.4. Μοριοσανίδα 20

1.3.1.3.5. Ξύλινο πλαίσιο (Timber Frame) 22

1.3.1.3.6. Κόντρα πλακέ (Plywood) 23

1.3.1.4. Γενικός σχολιασμός αποτελεσμάτων 24

1.3.2. Υγρά καύσιμα 26

1.3.2.1. Επεξεργασία των μετρήσεων 26

1.3.2.2. Παρουσίαση των αποτελεσμάτων 27

1.3.2.2.1. Επτάνιο 27

1.3.2.2.2. JET A-1 29

1.3.2.2.3. Aromatic+Napthene Blend 31

1.3.2.3. Γενικός σχολιασμός αποτελεσμάτων 33

2. Σωροί ορθογωνικά διατεταγμένων ξύλινων ράβδων (wood crib) 35

2.1. Εισαγωγή 35

2.2. Γενική περιγραφή 35

2.3. Καύσιμα που χρησιμοποιούνται για την ανάφλεξη των WCR 42

2.4. Συντελεστές κλίμακας και αδιαστατοποίηση 44

2.5. Διαθέσιμα πειράματα 46

2.5.1. Πειράματα μικρής κλίμακας (small-scale experiments) 46

2.5.2. Πειράματα πραγματικής κλίμακας (full-scale experiments) 47

2.6. Υπολογιστικοί κώδικες Ρευστομηχανικής (Computational Fluid Dynamics-CFD) και μοντελοποίηση καύσης 50

2.6.1. Εισαγωγή 50

2.6.2. Διαθέσιμες μελέτες 50

2.7. Επίλογος 53

3. Κώδικας Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής FDS 54

3.1. Εισαγωγή 54

3.2. Θεμελιώδεις εξισώσεις 55

3.2.1. Εξίσωση διατήρησης μάζας 55

3.2.2. Εξίσωση διατήρησης ορμής 56

3.2.3. Εξίσωση διατήρησης ενέργειας 56

3.3. Μέθοδος προσομοίωσης μεγάλων δινών (Large Eddy Simulation-LES) 57

3.4. Η εξίσωση θερμότητας στο στερεό 58

3.4.1. Θερμικές ιδιότητες δομικών υλικών 58

3.4.2. Ροή θερμότητας στο στερεό λόγω ακτινοβολίας 59

3.5. Μοντέλο πυρόλυσης 60

3.5.1. Περίπτωση προκαθορισμένου ρυθμού έκλυσης θερμότητας 62

3.5.2. Περίπτωση μη προκαθορισμένου ρυθμού έκλυσης θερμότητας 62

3.5.2.1. Στερεά καύσιμα 62

3.5.2.2. Υγρά καύσιμα 64

3.6. Μοντέλο κλάσματος μείγματος 64

3.7. Ρυθμός αντίδρασης 65

3.8. Διαδικασία επίλυσης 68

3.8.1. Στάδιο διόρθωσης 69

4. Υπολογιστικό Μέρος 71

4.1. Εισαγωγή 71

4.2. Περιγραφή γεωμετρίας δωματίου πειραματικής διάταξης 71

4.3. Υπολογιστικό πλέγμα 74

4.4. Αρχικές και οριακές συνθήκες 75

4.5. Προσομοίωση WCR με χρήση του κώδικα FDS 76

4.6. Αποτελέσματα υπολογιστικής προσομοίωσης 84

4.6.1. Σύγκριση με τα διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα 89

4.7. Παραμετρική μελέτη επίδρασης ανοίγματος 96

4.7.1. Εισαγωγή 96

4.7.2. Αποτελέσματα υπολογιστικής προσομοίωσης 97

4.7.3. Σύγκριση με τα διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα 104

4.8. Παραμετρική μελέτη επίδρασης της συγκέντρωσης οξυγόνου 108

4.8.1. Εισαγωγή 108

4.8.2. Αποτελέσματα υπολογιστικής προσομοίωσης 110

4.8.3. Σύγκριση με τα διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα 116

5. Γενικά Συμπεράσματα 120

1. Πειραματικό Μέρος

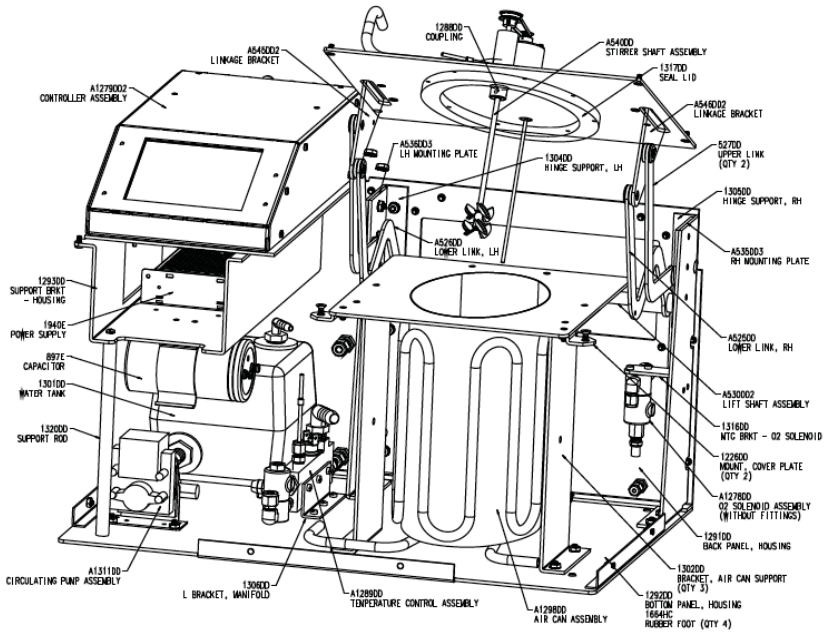
1.1. Αδιαβατικό Θερμιδόμετρο Τύπου Οβίδας Οξυγόνου

1.1.1. Εισαγωγή

Η θερμογόνος δύναμη ενός καυσίμου είναι η ενέργεια που εκλύεται κατά τη πλήρη και τέλεια καύση με οξυγόνο, με τα προϊόντα και τα αντιδρώντα να βρίσκονται στους 25°C. Η θερμογόνος δύναμη σχετίζεται άρρηκτα με σημαντικά μεγέθη όπως η εσωτερική ενέργεια και η ενθαλπίας μιας χημικής αντίδρασης. Η θερμογόνος δύναμη ή ικανότητα εκφράζεται σε μονάδες ενέργειας ανά μονάδα μάζας (KJ/kg, Kcal/kg, BTU/lb). Η θερμογόνος δύναμη διακρίνεται σε ανώτερη (HHV- Higher Heating Value), όταν στα προϊόντα καύσης το νερό βρίσκεται σε υγρή κατάσταση, και κατώτερη (LHV- Lower Heating Value), όταν στα προϊόντα καύσης το νερό βρίσκεται σε αέρια κατάσταση (υδρατμός). Η θερμότητα που απελευθερώνεται σε μία χημική αντίδραση μπορεί να μετρηθεί πειραματικά με τη χρήση ενός αδιαβατικού θερμιδόμετρου τύπου οβίδας οξυγόνου (‘βόμβα’). Θα πρέπει η αντίδραση να πραγματοποιηθεί χωρίς να γίνονται παράπλευρες αντιδράσεις και επαρκώς γρήγορα έτσι ώστε η ανταλλαγή θερμότητας με τα τοιχώματα να είναι αμελητέα. Η αρχή λειτουργίας του θερμιδόμετρου βασίζεται στη μέτρηση της εκλυόμενης θερμότητας από την πλήρη καύση ενός καυσίμου σε περιβάλλον περίσσειας οξυγόνου. Σε ένα τέτοιο θερμιδόμετρο, η αντίδραση της καύσης πραγματοποιείται σε ένα κλειστό δοχείο υπό σταθερό όγκο. Η οβίδα βυθίζεται σε μία σταθμισμένη ποσότητα νερού και περιβάλλεται από ένα αδιαβατικό περίβλημα που χρησιμοποιείται ως μονωτής θερμότητας. Υπάρχει συνεχής ανάδευση του νερού που εξασφαλίζει ότι η θερμότητα διαχέεται ομοιόμορφα γύρω από την οβίδα.

Γενικά, υπάρχουν τρεις τύποι θερμιδόμετρων: τα αδιαβατικά – στα οποία δεν υπάρχει μεταφορά θερμότητας μεταξύ του συστήματος μέτρησης και του περιβάλλοντος, τα ισοπεριβολικά – στα οποία επιτρέπεται ελεγχόμενη μετάδοση θερμότητας, και ισόθερμα – στα οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιπλέον θερμότητα για να διατηρηθεί σταθερή η θερμοκρασία μέσα στο σύστημα μέτρησης. Η θερμογόνος δύναμη που προσδιορίζεται με τη χρήση θερμιδόμετρου τύπου οβίδας αντιστοιχεί στην ανώτερη θερμογόνο δύναμη. Το θερμιδόμετρο που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν είναι το μοντέλο 6200 της εταιρείας Parr Instrument Company και είναι προτυποποιημένο με ταμπλέτες βενζοϊκού οξέος και παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.1. Στο Σχήμα 1.2 παρουσιάζεται η εσωτερική διάταξη των επιμέρους στοιχείων του συγκεκριμένου θερμιδόμετρου.

Σχήμα 1.1 Θερμιδόμετρο 6200 της Parr Instrument Company.



Σχήμα 1.2 Εσωτερική διάταξη των επιμέρους στοιχείων που αποτελούν το θερμιδόμετρο οβίδας οξυγόνου.

1.1.2. <u>Βασικές έννοιες</u>

1.1.2.1. <u>Εσωτερική ενέργεια της καύσης</u>

Σύμφωνα με τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο, μία μεταβολή στην εσωτερική ενέργεια εξαρτάται από τη μεταφορά θερμότητας, μεταξύ του συστήματος και των τοιχωμάτων ($q_{συστηματος} < 0$ και $q_{τοιχωμάτων} > 0$), και του έργου που παράγεται από/στο σύστημα (w):

$$\Delta U = q_{συστηματος} + w \tag{1.1}$$

Να σημειωθεί ότι τόσο στη θερμότητα q όσο και στο έργο w τα μεγέθη υποδηλώνουν μεταβολή αν και δεν υπάρχει δείκτης Δ. Αν γίνει η υπόθεση ότι παράγεται μόνο έργο λόγω πίεσης ($P_{εξωτ}$) και ότι ο όγκος του συστήματος είναι σταθερός ($\Delta V = 0$), τότε ισχύει:

$$w = -P_{εξωτ}\Delta V = 0 \tag{1.2}$$

Η $P_{εξωτ}$ υποδηλώνει την εξωτερική πίεση στην οποία αντιτίθεται το σύστημα και παράγει έργο. Αν η διαδικασία είναι αντιστρέψιμη, τότε η εσωτερική πίεση $\left(P_{εσωτ}\right)$ και η $\left(P_{εξωτ}\right)$ ταυτίζονται. Η Εξίσωση 1.1 για σταθερό όγκο γίνεται:

$$\Delta U = q_{συστηματος} \tag{1.3}$$

Σε ένα πείραμα με ένα αδιαβατικό θερμιδόμετρο τύπου οβίδας οξυγόνου, μετρούνται οι μεταβολές θερμοκρασίας στο δοχείο νερού που περιβάλλει την οβίδα που λαμβάνει χώρα η καύση. Αν η συνολική θερμοχωρητικότητα του θερμιδόμετρου ($c_{θερμιδόμετρου}$) είναι γνωστή, το ποσό θερμότητας που απελευθερώνεται από την οβίδα είναι ίσο με:

$$-q_{\sigma\upsilon\sigma\tau\eta\mu\alpha\tau o\varsigma} = q_{\tau o\iota\chi\omega\mu\acute{\alpha}\tau\omega\nu} = c_{\theta\varepsilon\rho\mu\iota\delta\acute{o}\mu\varepsilon\tau\rho o\upsilon}\Delta \mathrm{T}_{\tau o\iota\chi\omega\mu\acute{\alpha}\tau\omega\nu} \tag{1.4}$$

Έτσι, σε ένα αδιαβατικό θερμιδόμετρο τύπου οβίδας οξυγόνου η εσωτερική ενέργεια καθορίζεται μέσω της μέτρησης της θερμότητας που αποβάλλεται μέσα από τα τοιχώματα της οβίδας στο νερό που την περιβάλλει, $q_{\tau o\iota\chi\omega\mu\acute{\alpha}\tau\omega\nu}$.

1.1.2.2. <u>Ενθαλπία της καύσης</u>

Η ενθαλπία, που στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι η ενθαλπία της καύσης, ορίζεται ως εξής:

$$H = U + \Delta V \tag{1.5}$$

Αντίστοιχα, για τη μεταβολή της ενθαλπίας ισχύει:

$$\Delta H = \Delta U + \Delta(\mathrm{P}V) = \Delta U + \underbrace{\mathrm{P}\Delta V}_{=0} + V\Delta \mathrm{P} = \Delta U + \underbrace{V\Delta \mathrm{P}}_{\neq 0} \neq \Delta U \tag{1.6}$$

Από την Εξίσωση 1.6, παρατηρούμε ότι τα μεγέθη ΔU και ΔH θα είναι παρόμοια μόνο αν η πίεση στην οβίδα παραμένει σταθερή. Αν θεωρηθεί ότι η ποσότητα των αερίων μέσα στην οβίδα παραμένει σταθερή, η πίεση P θα παραμείνει μηδέν και θα ισχύει, $\Delta U = \Delta H$. Παρόλα αυτά, στις περισσότερες αντιδράσεις καύσης, το μοριακά μεγέθη των αερίων μεταβάλλονται και για αυτό το λόγο απαιτείται η χρήση της Εξίσωσης 1.6 για τον υπολογισμό του όρου $\Delta(\mathrm{P}V)$. Αν υποθέσουμε ότι τα αέρια συστατικά μέσα στην οβίδα συμπεριφέρονται σύμφωνα με το νόμο των τέλειων αερίων, μπορούμε να γράψουμε:

$$\Delta(\mathrm{P}V) = R\Delta\left(n_{\alpha\varepsilon\rho\acute{\iota}o\upsilon}\mathrm{T}\right) = R\mathrm{T}\Delta n_{\alpha\varepsilon\rho\acute{\iota}o\upsilon} + \underbrace{Rn_{\alpha\varepsilon\rho\acute{\iota}o\upsilon}\Delta \mathrm{T}}_{\text{'}\mu\iota\kappa\rho\acute{o}\varsigma\text{'}} \approx R\mathrm{T}\Delta n_{\alpha\varepsilon\rho\acute{\iota}o\upsilon} \tag{1.7}$$

όπου R είναι η σταθερά των αερίων (8,31 J mol^{-1} K^{-1}). Ο όρος που έχει χαρακτηριστεί ως μικρός μπορεί να παραλειφθεί όταν οι μεταβολές στη θερμοκρασία είναι μικρές (2 βαθμούς Κελσίου). Ας σημειωθεί ότι το μέγεθος $n_{\alpha\varepsilon\rho\acute{\iota}o\upsilon}$ μπορεί να είναι είτε θετικό (ο αριθμός των αέριων συστατικών αυξάνεται) είτε αρνητικό (ο αριθμός των αέριων συστατικών μειώνεται).

<u>Παράδειγμα</u>

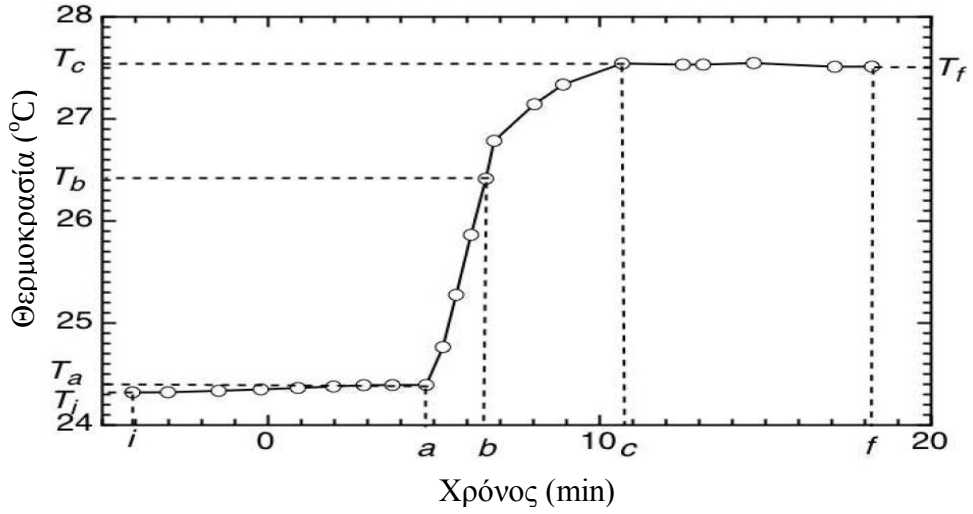
Η αντίδραση καύσης του βενζοϊκού οξέος στους 25 ^{o}C μπορεί να γραφεί:

$$C_6H_5COOH(s) + 7.5O_2(g) \rightarrow 7CO_2(g) + 3H_2O(l) \tag{1.8}$$

Σε αυτή τη περίπτωση, για ένα mole βενζοϊκού οξέος, $\Delta n_{\alpha\varepsilon\rho\acute{\iota}o\upsilon} = 7 - 7,5 = -0,5mol$. Ως εκ τούτου, για τη καύση ενός mole βενζοϊκού οξέος έχουμε:

$$\Delta H = \Delta U + \left(-\frac{1}{2}mol\right) \times \left(8,31\frac{J}{molK}\right) \times (298K) = \Delta U - 1240J$$

Η τυπική μορφή της χρονικής μεταβολής κατά τη διάρκεια ενός τυπικού πειράματος προσδιορισμού της θερμογόνου δύναμης μέσω του θερμιδόμετρου οβίδας οξυγόνου έχει τη μορφή που απεικονίζεται στο Σχήμα 1.3.



Σχήμα 1.3 Τυπική μορφή θερμοκρασιακής διακύμανσης για την υπόδειξη εύρεσης των χαρακτηριστικών θερμοκασιών T_i, T_a, T_b, T_c και T_f .

Τα διάφορα σημεία που διακρίνονται στο Σχήμα 1.2 αντιστοιχούν στα εξής φαινόμενα:

“a”: η χρονική στιγμή έναυσης καύσης

“b”: η θέση στην οποία η θερμοκρασία έχει φτάσει στο 60% της συνολικής μεταβολής της

“c”: η χρονική στιγμή εμφάνισης της μέγιστης θερμοκρασίας (ολοκλήρωση αντίδρασης)

“i”: αρχή μέτρησης

“f”: τέλος μέτρησης

Μία προσέγγιση για τον προσδιορισμό της αύξησης της θερμοκρασίας θα μπορούσε να συμπεριλαμβάνει μόνο την αρχική και τελική θερμοκρασία του νερού ($\Delta T=T_c-T_a$). Όμως, εάν η θερμοκρασία δεν παραμένει σταθερή στην αρχική ($i<t<a$) και τελική ($f>t>c$) περίοδο του πειράματος, πρέπει να εφαρμοστεί μια διορθωτικού τύπου διαδικασία. Χρησιμοποιώντας λοιπόν τις παραμέτρους r_1 και r_2 όπως φαίνεται στην Εξίσωση (1.9):

$$r_1 \cong \frac{T_a - T_i}{a - i}, r_2 \cong \frac{T_f - T_c}{f - c} \tag{1.9}$$

μπορεί να υπολογιστεί με πιο ακριβή τρόπο η θερμοκρασιακή διακύμανση βάση της Εξίσωσης (1.10):

$$\Delta T = \left(T_c - r_2\left(c - b\right)\right) - \left(T_a - r_1\left(b - a\right)\right) \tag{1.10}$$

1.1.3. <u>Πειραματική διάταξη θερμιδόμετρου</u>

Η πειραματική διάταξη μέτρησης του θερμιδόμετρου τύπου οβίδας (Σχήμα 1.4) αποτελείται πρωταρχικά από την οβίδα (7) που είναι κατασκευασμένη από χάλυβα υψηλής θερμικής αγωγιμότητας. Στην διάταξη που έγιναν οι μετρήσεις, το μοντέλο της οβίδας που χρησιμοποιήθηκε ήταν το 1108P της εταιρείας Parr Instrument Company χωρητικότητας 350 mL και είναι κατασκευασμένη από χάλυβα υψηλής θερμικής αγωγιμότητας (Σχήμα 1.5). Στο εσωτερικό της οβίδας λαμβάνει χώρα η καύση μέσα σε ένα κυάθιο, την κάψα, η οποία στηρίζεται σε μία μεταλλική στεφάνη. Για την έναυση χρησιμοποιείται σύρμα (Ni) του οποίου τα δύο άκρα συνδέονται με πηγή συνεχούς ρεύματος ενώ τα άλλα δύο βρίσκονται βυθισμένα στο καύσιμο. Η οβίδα ασφαλίζει με ένα καπάκι-περικόχλιο (2) στο οποίο είναι προσαρμοσμένη μια ανεπίστροφη βαλβίδα.

1. Αναδευτήρας

2. Καπάκι οβίδας

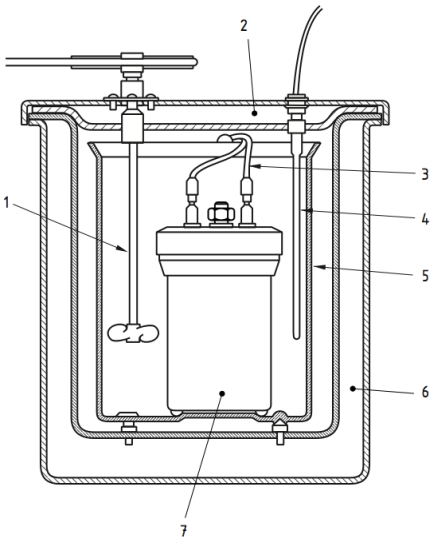
3. Ηλεκτρόδια έναυσης

4. Θερμόμετρο

5. Μεταλλικό δοχείο θερμομέτρου (Bucket)

6. Εξωτερικό περίβλημα (Jacket)

7. Θερμιδομετρική οβίδα



Σχήμα 1.4 Βασική πειραματική διάταξη.

Σχήμα 1.5 Οβίδα οξυγόνου 1108P της εταιρείας Parr Instrument Company

Η οβίδα είναι εμβαπτισμένη σε μεταλλικό δοχείο (5) το οποίο είναι πληρωμένο με απιονισμένο νερό με σκοπό τον περιορισμό στο ελάχιστο της ανταλλαγής θερμότητας με το περιβάλλον εξαιτίας της μεγάλης θερμοχωρητικότητας του. Το μεταλλικό δοχείο είναι τοποθετημένο με την σειρά του σε εξωτερικό περίβλημα (6) που έχει διπλά αδιαβατικά τοιχώματα ανάμεσα στα οποία κυκλοφορεί νερό σταθερής θερμοκρασίας με σκοπό την περαιτέρω ελαχιστοποίηση ανταλλαγής θερμότητας με το περιβάλλον.

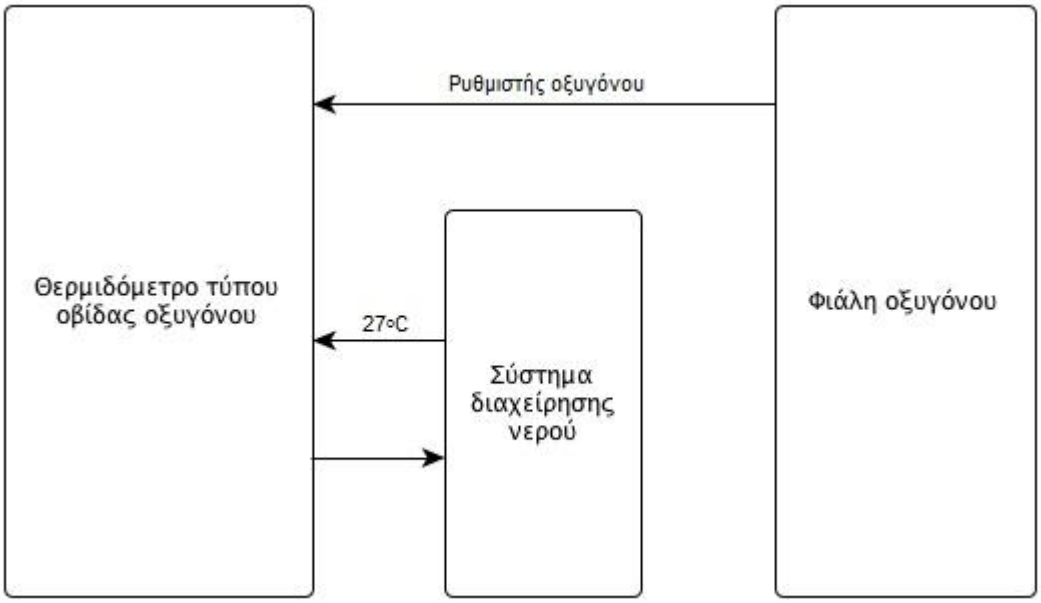
Τέλος, στη διάταξη μέτρησης χρησιμοποιείται ένας αναδευτήρας (1) που παίρνει κίνηση από ένα ηλεκτροκινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος, εκτελεί παλινδρομικές κινήσεις με στόχο την ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας του νερού εξωτερικά της οβίδας. Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας αυτής χρησιμοποιείται θερμόμετρο (4) ακρίβειας τέταρτου δεκαδικού ψηφίου. Όλη η διάταξη μέτρησης ασφαλίζει με ένα καπάκι στο οποίο είναι στερεωμένος τόσο ο αναδευτήρας όσο και το θερμόμετρο.

1.1.4. Διαδικασία πειραματικών μετρήσεων

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν βάση της μεθόδου του προτύπου ISO 1716. Τρία δείγματα από το ίδιο υλικό θα πρέπει να μετρούνται κάθε φορά και να υπολογίζεται ο μέσος όρος της θερμογόνου δύναμης που προσδιορίστηκε πειραματικά. Σε περίπτωση μεγάλης απόκλισης θα πρέπει να μετρηθούν δύο ακόμα δείγματα. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η εξής:

1. Άνοιγμα της φιάλης οξυγόνου καθαρότητας 99.5% και ρύθμισή της στα 450 psi (περίπου 30 bar). Στο σύστημα δεν πρέπει να υπερβαίνονται τα 600 psi (περίπου 40 bar). Σε περίπτωση που συμβεί αυτό, ανοίγεται η παροχή οξυγόνου από το λογισμικό του θερμιδόμετρου για να εκτονωθεί το σύστημα.

2. Άνοιγμα της ψυκτικής εγκατάστασης και αναμονή μέχρι η θερμοκρασία που αναγράφεται στην οθόνη ελέγχου να φτάσει τους 27°C. Όλη η πειραματική διάταξη στο εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.6.



Σχήμα 1.6 Διάταξη πειραματικής διάταξης στο εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης.

3. Άνοιγμα του θερμιδόμετρου. Σε περίπτωση που γίνεται προτυποποίηση θα πρέπει να τίθεται στην ανάλογη λειτουργία (Operation mode\standardization). Ας σημειωθεί ότι προτυποποίηση γίνεται κάθε φορά μετά από 10 μετρήσεις. Ανάλογα με την οβίδα που θα χρησιμοποιείται θα πρέπει να ρυθμίζεται και ο τύπος της στο λογισμικό του θερμιδόμετρου (Bomb 1: non halogen resistant bomb - default).

4. Προετοιμασία του προς μελέτη δείγματος (ζύγισμα και προσδιορισμός υγρασίας του). Το υγρασιόμετρο που χρησιμοποιήθηκε είναι το μοντέλο MJ33 της Mettler Toledo και η αρχή λειτουργίας του περιγράφεται στην επόμενη ενότητα του κεφαλαίου. Η συνήθης ποσότητα καυσίμου που μετριέται στο θερμιδόμετρο είναι 0.6 – 1.0 gr (μέγιστο 1,2 gr). Σε περίπτωση εντελώς άγνωστου δείγματος η συνιστώμενη ποσότητα είναι 0.2 gr. Η μέγιστη ενέργεια που επιτρέπεται να εκλυθεί είναι 8000 cal (33494.4 Joules), όποτε πρέπει να δίνεται προσοχή στην ποσότητα δείγματος που τοποθετείται μέσα στη κάψουλα. Εάν πρόκειται για στερεό καύσιμο, το δείγμα τοποθετείται στην πρέσα (Σχήμα 1.7) και δημιουργείται το δισκίο (pellet). Το δείγμα καλό είναι να μην τοποθετείται σε μορφή σκόνης καθώς κατά της έναυσή του δημιουργούνται υπολείμματα τα οποία δεν καίγονται.

Σχήμα 1.7 Πρέσα 2811 της εταιρείας Parr Instrument Company για τη δημιουργία δισκίων όταν έχουμε στερεά καύσιμα.

5. Σε περίπτωση που θα τοποθετηθεί κάποια επιπλέον ουσία για διευκόλυνση της έναυσης της καύσης θα πρέπει να οριστεί και στο λογισμικό (Use spiking). Τέτοιες ουσίες μπορεί να είναι βενζοϊκό οξύ, αιθανογλυκόλη κ.α.

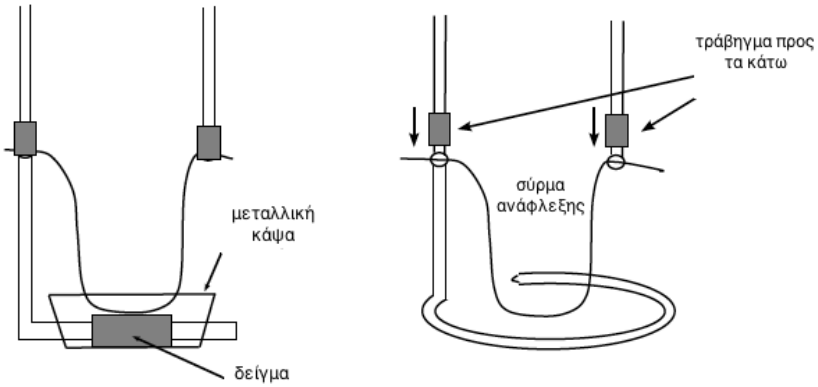
6. Προετοιμασία οβίδας (καθαρισμός της με αποσταγμένο νερό για τυχόν υπολείμματα από προηγούμενες μετρήσεις). Η οβίδα πρέπει να έχει σε κατά την διάρκεια όλων των μετρήσεων το ίδιο περίπου ποσοστό υγρασίας.

7. Προσθήκη 2 L αποσταγμένου νερού στο μεταλλικό δοχείο όπου τοποθετείται η οβίδα. Η ποσότητα αυτή μετράται επακριβώς χρησιμοποιώντας την ειδική μετρητική διάταξη (Σχήμα 1.8) που είναι τοποθετημένη πλάγια της ψυκτικής εγκατάστασης (automatic pipet).

Σχήμα 1.8 Σύστημα τροφοδότησης νερού 6510 της εταιρείας Parr Instrument Company.

8. Τοποθέτηση του δείγματος στην ειδική μεταλλική κάψα (steel crucible) και τοποθέτηση της σε μεταλλική στεφάνη στο καπάκι τη οβίδας.

9. Κόψιμο σύρματος ανάφλεξης, μέτρηση του και τοποθέτησή του στους ειδικούς υποδοχείς των ηλεκτροδίων στο καπάκι της οβίδας. Η τοποθέτηση του σύρματος πρέπει να γίνεται έτσι ώστε να κάνει μια «κοιλιά» πάνω στο δείγμα (crucible method), όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.9. Αν το δείγμα είναι σε μορφή δισκίου, τότε το σύρμα πρέπει ελαφρώς να ακουμπάει το δισκίο. Αν το δείγμα είναι σε μορφή σκόνης, τότε το σύρμα θα πρέπει να απέχει λίγα χιλιοστά από το δείγμα. Το σύρμα θα πρέπει να μετρηθεί και μετά το τέλος του πειράματος.



Σχήμα 1.9 Ορθή τοποθέτηση σύρματος ανάφλεξης.

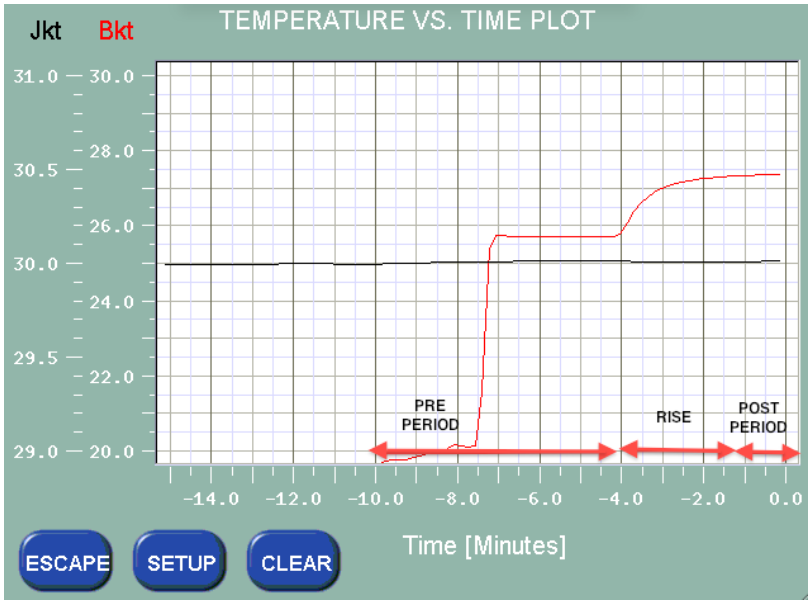
10. Κλείσιμο της οβίδας, ασφάλιση και πλήρωση με οξυγόνο πίεσης 30 bar (δίνεται εντολή από το λογισμικό και η διαδικασία διαρκεί για περίπου 60 s). Η ασφαλιστική βαλβίδα στο καπάκι της οβίδας πρέπει να είναι κλειστή. Κατά το κλείσιμο θα πρέπει να ελεγχθεί αν ο αναδευτήρας κινείται ελεύθερα.

11. Τοποθέτηση της οβίδας μέσα στο γεμισμένο με αποσταγμένο νερό μεταλλικό δοχείο, σύμφωνα με τους ειδικούς υποδοχείς που υπάρχουν στην βάση του δοχείου. Η μεταφορά της οβίδας γίνεται με την ειδική μεταλλική μέγγενη συγκράτησης.

12. Εισαγωγή των ηλεκτροδίων στην κορυφή της οβίδας και έλεγχος για τυχόν διαρροές (μη παρουσία φυσαλίδων).

13. Αφού έχει ελεγχθεί το αν θα είναι πείραμα προτυποποίησης ή όχι (OPERATION MODE), πιέζεται το κουμπί έναυσης (START) και καθορίζεται το όνομα του δείγματος, το βάρος του και το βάρος του σύρματος.

14. Έναρξη πειράματος. Μέχρι να επέλθει η αρχική ισορροπία στο δείγμα αναγράφεται ότι η συσκευή είναι σε κατάσταση αναμονής (PREPERIOD) και λίγο πριν γίνει η έναυση του δείγματος ακούγεται ένας προειδοποιητικός ήχος προκειμένου να απομακρυνθεί ο χρήστης από το θερμιδόμετρο (RISE PERIOD). Μετά την έναυση υπάρχει μια περίοδος μέχρι την σταθεροποίηση της θερμοκρασίας του νερού (POSTPERIOD). Η διάρκεια του πειράματος είναι περίπου 5 – 8 min. το διάγραμμα που προκύπτει φαίνεται στο Σχήμα 1.10.



Σχήμα 1.8 Παρουσίαση των τριών χαρακτηριστικών περιόδων κατά τη διάρκεια μιας μέτρησης.

15. Μετά το τέλος της μέτρησης ανοίγεται το καπάκι και αφαιρείται η οβίδα. Αφού τοποθετηθεί στην σταθερή βάση ανοίγεται η βαλβίδα εξαέρωσης με προσοχή μέχρι να αποσυμπιεστεί η οβίδα.

16. Στη συνέχεια ξεβιδώνεται το ασφαλιστικό περικόχλιο και πραγματοποιείται καθαρισμός του εσωτερικού της οβίδας με απιονισμένο νερό και μέτρησης του τμήματος του σύρματος ανάφλεξης που δεν κάηκε, ώστε να συμπεριληφθεί στους υπολογισμούς. Συλλογή της ποσότητας του νερού πλύσης.

1.2. Υγρασιόμετρο

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως το υγρασιόμετρο που χρησιμοποιήθηκε στη πειραματική μας διάταξη είναι το μοντέλο MJ33 της Mettler Toledo (Σχήμα 1.11). Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στη θέρμανση του δείγματος με σκοπό την εξάτμιση της υγρασίας και τον υπολογισμό αυτής μέσω της Εξίσωσης 1.10. Κατά τη διάρκεια της αφύγρανσης, το δείγμα ζυγίζεται συνεχώς προκειμένου να υπολογίζεται η μείωση της υγρασίας του δείγματος. Σημαντικός παράγοντας είναι ο ρυθμός θέρμανσης καθώς και η ομοιόμορφη θέρμανση στην επιφάνεια του δείγματος. Η ομοιόμορφη θέρμανση εξασφαλίζει την επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων. Πριν γίνει η αφύγρανση, ο χρήστης ορίζει τη θερμοκρασία ξηρότητας του δείγματος (στα δείγματα του ξύλου είχε ρυθμιστεί στους 105°C).

Η υγρασία που περιέχεται σε ένα δείγμα αναγράφεται ως το ποσοστό της μάζας του αρχικού δείγματος πριν τη διαδικασία της αφύγρανσης (%**MC** – Moisture Content) και ο αριθμός που προκύπτει είναι αρνητικός.

$$MC(\%) = -\frac{m_{\text{αρχικού δείγματος}} - m_{\text{ξηρού δείγματος}}}{m_{\text{αρχικού δείγματος}}} \cdot 100\% \qquad (1.10)$$

Σχήμα 1.11 Το υγρασιόμετρο MJ33 της Mettler Toledo.

1.3.Πειραματικές Μετρήσεις

1.3.1. Στερεά καύσιμα – Ξύλο

1.3.1.1. Εισαγωγή

Το ξύλο βρίσκεται στην υπηρεσία του ανθρώπου από τότε που αυτός εμφανίσθηκε στη Γη. Έχει βοηθήσει σημαντικά στην επιβίωση του ανθρώπου από την παλαιολιθική εποχή, ενώ έχει συντελέσει αποφασιστικά στην ανάπτυξη του πολιτισμού. Οι βασικές ανάγκες του πρωτόγονου ανθρώπου (καύσιμη ύλη, θέρμανση) καλύφθηκαν από τη καύση του ξύλου, καθώς και οι μετέπειτα ανάγκες του για στέγαση. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, ο αριθμός των προϊόντων που παράγονται από το ξύλο με απλή μηχανική ή σύνθετη θερμοχημική μεταποίηση αυξάνεται ραγδαία.

Τα κυριότερα προϊόντα που σήμερα παράγονται από το ξύλο είναι: καύσιμο ξύλο, ξυλάνθρακες, πριστή ξυλεία, μοριοπλάκες, ινοπλάκες (MDF), σύνθετη ξυλεία, χαρτί, ρητίνη (ρετσίνι), δεψικά εκχυλίσματα, αιθυλική αλκοόλη, τεχνητές και συνθετικές ίνες (τεχνητό μετάξι), φωτογραφικά φίλμ, πλαστικά, τανίνες, τερεβινθέλαιο, μεθανόλη, οξικό οξύ, συνθετικό πετρέλαιο, πυρολυτικό λάδι, ξυλαέριο, πίσσα, πισσέλαιο και πολλά άλλα. Ωστόσο, σε πολλές φτωχές χώρες του κόσμου, το ξύλο κατά μεγάλο ποσοστό (85-90%) εξακολουθεί και σήμερα να αποτελεί την κύρια θερμαντική ύλη και χρησιμοποιείται κατά το πλείστον ως *καυσόξυλο*. Περισσότερο από το 50% της παγκόσμιας παραγωγής ξύλου χρησιμοποιείται σήμερα ως καύσιμη ύλη. Στην Ελλάδα καλύπτει το 17% του εδάφους και η ετήσια παραγωγή φτάνει τα 2.5-3.000.000 m^3. Τα ¾ της ετήσιας παραγωγής χρησιμοποιούνται ως πηγή ενέργειας [Μαντάνης, 2003].

Το ξύλο αποτελείται κατά βάση από τρία φυσικά πολυμερή: την κυτταρίνη (40-44%), τη λιγνίνη (18-25%) και την ημικυτταρίνη (23-40%). Μερικές φορές, υπάρχει και ένα μικρό ποσοστό (μικρότερο από 10%) ξένων υλικών που περιλαμβάνονται στη μοριακή δομή του. Η ποικιλία στα χαρακτηριστικά και στις αναλογίες αυτών των συστατικών καθώς και οι διαφορές στη μοριακή δομή καθορίζουν το βάρος του ξύλου, τη σκληρότητά του και τη στιβαρότητά του. Οι ιδιότητες ενός είδους ξύλου είναι σχετικά σταθερές και έτσι η επιλογή ενός ξύλου με βάση το είδος του κάποιες φορές είναι επαρκής. Όμως, για την πλήρη αξιοποίηση του κάθε ξύλου σε εφαρμογές στη Μηχανική θα πρέπει να έχουν ληφθεί υπόψη συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ή φυσικές ιδιότητες [Wood Handbook, 2010].

Ο καθορισμός της θερμογόνου δύναμης του ξύλου είναι σημαντική γιατί ανάλογα με αυτή επιλέγεται και η χρήση του κάθε ξύλου. Για παράδειγμα ένα ξύλο με υψηλή θερμογόνο δύναμη θα χρησιμοποιηθεί ως θερμαντική ύλη ενώ ένα ξύλο με χαμηλή θερμογόνο δύναμη θα χρησιμοποιηθεί ως οικοδομικό υλικό για λόγους πυρασφάλειας. Η θερμογόνος δύναμη ενός είδους ξύλου μπορεί να διαφέρει από δείγμα σε δείγμα ανάλογα με το περιβάλλον και τις συνθήκες στις οποίες βρισκόταν το ξύλο. Για αυτό το λόγο, σημαντικό ρόλο σε δείγματα του ίδιου είδους παίζει η υγρασία του κάθε δείγματος. Τα δείγματα ξύλου στα οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις μας προέρχονται από την Ελλάδα.

1.3.1.2. Επεξεργασία των μετρήσεων

- Υπολογισμός κατώτερης θερμογόνου δύναμης

Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$HHV = LHV + \mu_{H_2O} r_{H_2O} \tag{1.11}$$

όπου μ_{H_2O} είναι η μάζα του υδρατμού που παράγεται ανά μονάδα μάζας καιγόμενου καυσίμου και r_{H_2O} είναι η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης του υδρατμού.

$$r_{H_2O} = 2260 \, {}^{kJ}\!/_{kg} = 540{,}153 \, {}^{cal}\!/_{g} \tag{1.12}$$

- Στατιστική ανάλυση μετρήσεων

Σε αυτή τη περίπτωση, μία απλή ανάλυση σφάλματος είναι αρκετή. Μπορεί να υπολογιστεί η μέση τιμή καθώς και η τυπική απόκλιση των μετρήσεων από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\overline{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{n} x_i \tag{1.13}$$

$$\text{Τ}\upsilon\pi\iota\kappa\acute{\eta} \text{ απόκλιση του x} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1} N\left(x_i - \{x\}\right)^2}{N\left(N-1\right)}} \tag{1.14}$$

όπου x_i είναι οι μετρούμενες τιμές και N ο αριθμός των τιμών. Ας σημειωθεί ότι ο αριθμός των σημείων είναι σχετικά μικρός και έτσι η εκτίμηση του σφάλματος μπορεί να μην είναι ακριβής.

1.3.1.3. Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Τα ξύλα που χρησιμοποιήθηκαν για τον καθορισμό της θερμογόνου δύναμης τους είναι τα ξύλα που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη πειραματική διερεύνηση της συμπεριφοράς έναντι φωτιάς σύγχρονων τεχνικών δόμησης με χρήση ξύλου [Κολαΐτης et al., 2011]. Τα συγκεκριμένα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στην Αθήνα το 2011 στην Πυροσβεστική Ακαδημία. Η διάταξη του πειραματικού οικίσκου που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.12. Στο Σχήμα 1.13 παρουσιάζεται ένα ενδεικτικό στιγμιότυπο κατά την εξέλιξη του πειράματος.

Σχήμα 1.12 Διάταξη οικίσκου που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα [Κολαΐτης et al., 2011].

Σχήμα 1.12 Στιγμιότυπο κατά τη διάρκεια του πειράματος [Κολαΐτης et al., 2011].

Τα είδη ξύλου που χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση της ανώτερης θερμογόνου δύναμής τους ήταν τα εξής: απλή σανίδα (Wood Crib), ινόπλακα μέσης πυκνότητας (Medium-Density Fibreboard - MDF), μοριοσανίδα, σανίδα δοκών, ξύλινο πλαίσιο (Timber Frame) και κόντρα πλακέ (Plywood). Σε αυτό το σημείο, αξίζει να σημειωθεί ότι τα δείγματα αμέσως μετά την αφύγρανσή τους στο υγρασιόμετρο τοποθετούνταν στο ζυγό ακριβείας για να καθοριστεί το βάρος τους το οποίο χρησιμοποιείται ως δεδομένο εισόδου στο θερμιδόμετρο. Εκεί παρατηρήθηκε ότι το βάρος αυξανόταν συνεχώς και αυτό οφείλεται στην υγρασία που απορροφά το δείγμα από το περιβάλλον κατά τη διάρκεια ζύγισής του. Έτσι, ποσοστό σφάλματος στον ορισμό του βάρους του αφυγραμένου δείγματος κατά τη διάρκεια προετοιμασίας του δείγματος. Ο ρυθμός με τον οποίο αυξανόταν το βάρος διέφερε από είδος σε είδος. Ενδεικτικά, ο ρυθμός αύξησης κάθε ξύλου παρατίθεται στον παρακάτω Πίνακα 1.1:

Είδος Ξύλου	**Ρυθμός αύξησης (mg/s)**
Απλή σανίδα	0,0783
Ινόπλακα μέσης πυκνότητας (MDF)	0,0235
Μοριοσανίδα	0,0142
Σανίδα δοκών	0,01
Ξύλινο πλαίσιο (Timber frame)	0,0107
Κόντρα πλακέ	0,0103

Πίνακας 1.1 Ρυθμός αύξησης βάρους ξύλων λόγω υγρασίας.

1.3.1.3.1. <u>Απλή σανίδα (wood crib)</u>

Συνολικά, έγιναν 7 μετρήσεις σε δείγματα σε μορφή δισκίου και σύμφωνα με το πρότυπο **ISO-1716**, που αφορά μετρήσεις σε στερεά δείγματα, επιλέγουμε τις 3 μετρήσεις του Πίνακα 1.2. Στον Πίνακα 1.3 παρουσιάζονται 3 μετρήσεις σε δείγματα σε μορφή σκόνης στις οποίες δεν ακολουθήθηκε το πρότυπο **ISO-1716**, κάτι που εξηγεί την απόκλιση που υπάρχει στις 3 μετρήσεις. Στον Πίνακα 1.4 παρουσιάζεται μία μέτρηση σε δείγμα σε μορφή σκόνης στο οποίο δεν αφυγράνθηκε πριν τη μέτρηση.

	Απλή σανίδα	**1η Μέτρηση (FL8)**	**2η Μέτρηση (FL9)**	**3η Μέτρηση (FL11)**
Υγρασιόμετρο	Βάρος Δείγματος (πριν την αφύγρανση)	3,420 g	3,723 g	3,412 g
	Βάρος τοποθετούμενου δίσκου	2,572 g	2,576 g	2,580 g
	Υγρασία	6,29 %MC	5,48 %MC	3,85 %MC
Προετοιμασία για τοποθέτηση δείγματος στην βόμβα	Βάρος κάψουλας	13,48237 g	13,48523 g	13,48820 g
	Βάρος αφυγραμένου δείγματος	0,87014 g	0,87677 g	0,85463 g
	Μήκος αρχικού *σύρματος ανάφλεξης* (fuse)	15 cal	16 cal	15 cal
	Μορφή δείγματος	Δισκίο - Pellet	Δισκίο - Pellet	Δισκίο - Pellet
	Χρόνος παραμονής στο περιβάλλον μέχρι την τοποθέτηση	5,5 min	7,5 min	5,5 min
Τελικά αποτελέσματα	Μήκος εναπομείναντος *σύρματος ανάφλεξης* (final fuse)	2 cal	2 cal	2 cal
	Ανώτερη θερμογόνος ικανότητα (HHV) [cal/g]	4765,9444	4784,3858	4773,1974

Πίνακας 1.2 Πειραματικές μετρήσεις απλής σανίδας σε μορφή δισκίου.

	Απλή σανίδα	4η Μέτρηση (FL3)	5η Μέτρηση (FL4)	6η Μέτρηση (FL6)
Υγρασιόμετρο	Βάρος Δείγματος (πριν την αφύγρανση)	3,566 g	3,428 g	3,499 g
	Βάρος τοποθετούμενου δίσκου	2,576 g	2,576 g	2,573 g
	Υγρασία	3,99 %MC	4,46 %MC	5,09 %MC
Προετοιμασία για τοποθέτηση δείγματος στην βόμβα	Βάρος κάψουλας	13,36601 g	13,35726 g	13,52149 g
	Βάρος αφυγραμένου δείγματος	0,84646 g	0,85908 g	0,85222 g
	Μήκος αρχικού *σύρματος ανάφλεξης* (fuse)	15 cal	15 cal	15 cal
	Μορφή δείγματος	Σκόνη	Σκόνη	Σκόνη
	Χρόνος παραμονής στο περιβάλλον μέχρι την τοποθέτηση	5 min	5,5 min	8 min
Τελικά αποτελέσματα	Μήκος εναπομείναντος *σύρματος ανάφλεξης* (final fuse)	1,2 cal	2 cal	2 cal
	Ανώτερη θερμογόνος ικανότητα (HHV) [cal/g]	4639,9539	4918,9057	5073,5070

Πίνακας 1.3 Πειραματικές μετρήσεις απλής σανίδας σε μορφή σκόνης.

	Απλή σανίδα	7η Μέτρηση (FL5)
Προετοιμασία για τοποθέτηση δείγματος στην βόμβα	Βάρος κάψουλας	13,35594 g
	Βάρος αφυγραμένου δείγματος	0,86523 g
	Μήκος αρχικού *σύρματος ανάφλεξης* (fuse)	13 cal
	Μορφή δείγματος	Σκόνη
	Χρόνος παραμονής στο περιβάλλον μέχρι την τοποθέτηση	-
Τελικά αποτελέσματα	Μήκος εναπομείναντος *σύρματος ανάφλεξης* (final fuse)	1 cal
	Ανώτερη θερμογόνος ικανότητα (HHV) [cal/g]	4508,1981

Πίνακας 1.4 Πειραματικές μετρήσεις απλής σανίδας σε μορφή σκόνης χωρίς αφύγρανση.

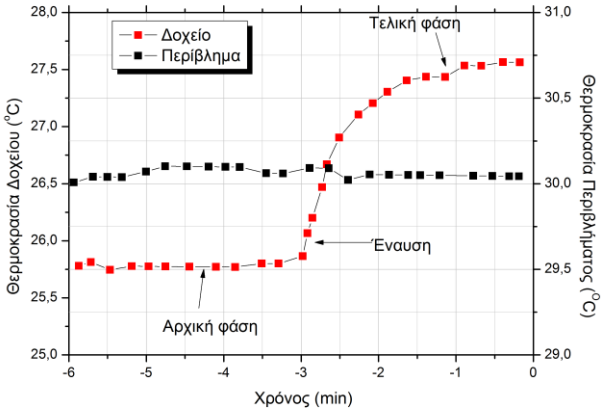
<u>Παρατηρήσεις:</u>

- Η έβδομη μέτρηση έγινε χωρίς να αφαιρεθεί η υγρασία από το αρχικό δείγμα προκειμένου να δούμε αν επηρεάζει τα τελικά μας αποτελέσματα. Παρατηρούμε ότι έχουμε μείωση της θερμογόνου ικανότητας, η οποία κατά μέσο όρο είναι της τάξης των 200 cal/g περίπου.

- Στο Σχήμα 1.14 παρουσιάζεται το διάγραμμα όπως προέκυψε για τη μέτρηση FL6. Οι διαφορές στα διαγράμματα που προκύπτουν δεν είναι μεγάλες στα δείγματα με διαφορετική μορφή. Στο συγκεκριμένο διάγραμμα, στην περίοδο της αρχικής φάσης η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή περίπου στους 25,8^{o}C. Η περίοδος της έναυσης ξεκινάει 3 min πριν ολοκληρωθεί η μέτρηση και παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας κατά 1,8^{o}C. Η περίοδος της έναυσης και της αύξησης της θερμοκρασίας (RISE PERIOD) διαρκεί περίπου 1,2 min.

- Αξίζει να σημειωθεί ότι το πρότυπο ISO 1716 δεν ακολουθήθηκε στις μετρήσεις όπου το δείγμα ήταν σε μορφή σκόνης γιατί, με την πραγματοποίηση κάθε μέτρησης,

καταστρεφόταν το λάστιχο (ring) που ασφάλιζε τη βόμβα οξυγόνου. Έτσι μπορεί να δικαιολογηθεί και η μεγάλη τυπική απόκλιση σε σχέση με αυτή των δειγμάτων σε μορφή δισκίου. Ακόμη, κατά το άνοιγμα της οβίδας παρατηρήθηκαν μικρά κομμάτια ξύλου που δεν είχαν καεί.



Σχήμα 1.14 Διάγραμμα για την απλή σανίδα (Μέτρηση FL6).

Οι τιμές που προκύπτουν, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 1716, για την ανώτερη και τη κατώτερη θερμογόνο δύναμη καθώς οι μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις αυτών παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.5:

		Δείγματα σε μορφή δισκίου (pellet)	**Δείγματα σε μορφή σκόνης**
Μέση τιμή	LHV (cal/g)	4746,385	4853,077
	HHV (cal/g)	4774,509	4877,456
Τυπική απόκλιση	LHV (cal/g)	12,542	216,84
	HHV (cal/g)	9,29	219,729

Πίνακας 1.5 Αποτελέσματα θερμογόνου δύναμης για την απλή σανίδα.

Με βάση τον παραπάνω πίνακα, προκύπτει ότι τα δείγματα σε μορφή σκόνης παρουσιάζουν μεγαλύτερη ανώτερη θερμογόνο δύναμη από τα δείγματα σε μορφή δισκίου. Οι αποκλίσεις στα δείγματα σε μορφή σκόνη είναι περίπου 200% μεγαλύτερες από τις αποκλίσεις στα δείγματα σε μορφή δισκίου. Αυτό οφείλεται στο ότι για τις συγκεκριμένες μετρήσεις δεν ακολουθήθηκε το πρότυπο ISO 1716. Ας σημειωθεί ότι η μέση τιμή υγρασίας για τα δείγματα σε μορφή δισκίου (pellet) ήταν 5,21% ενώ για τα δείγματα σε μορφή σκόνης ήταν 4,51%.

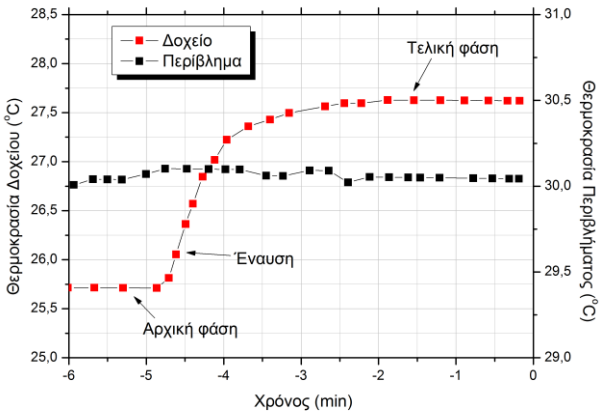
1.3.1.3.2. Ινόπλακα μέσης πυκνότητας (MDF)

Συνολικά, έγιναν 5 μετρήσεις σε δείγματα ινόπλακας μέσης πυκνότητας σε μορφή δισκίου (pellet) και σύμφωνα με το πρότυπο ISO 1716 και επιλέχθηκαν οι 3 μετρήσεις του Πίνακα 1.6:

	Ινόπλακα μέσης πυκνότητας (MDF)	1η Μέτρηση (MDF8)	2η Μέτρηση (MDF9)	3η Μέτρηση (MDF7)
Υγρασιόμετρο	Βάρος Δείγματος (πριν την αφύγρανση)	3,405 g	3,732 g	3,352 g
	Βάρος τοποθετούμενου δίσκου	2,577 g	2,577 g	2,578 g
	Υγρασία	4,99 %MC	4,39 %MC	3,76 %MC
Προετοιμασία για τοποθέτηση δείγματος στην βόμβα	Βάρος κάψουλας	13,50319 g	13,48812 g	13,51906 g
	Βάρος αφυγραμένου δείγματος	1,04088 g	1,04218 g	1,03694 g
	Μήκος αρχικού *σύρματος ανάφλεξης* (fuse)	15 cal	15 cal	14 cal
	Μορφή δείγματος	Δισκίο - Pellet	Δισκίο - Pellet	Δισκίο - Pellet
	Χρόνος παραμονής στο περιβάλλον μέχρι την τοποθέτηση	10 min	5 min	6,5 min
Τελικά αποτελέσματα	Μήκος εναπομείναντος *σύρματος ανάφλεξης* (final fuse)	4 cal	6 cal	4 cal
	Ανώτερη θερμογόνος ικανότητα (HHV) [cal/g]	4362,6709	4315,3828	4317,3955

Πίνακας 1.6 Πειραματικές μετρήσεις ινόπλακας μέσης πυκνότητας σε μορφή δισκίου.

Στο Σχήμα 1.15 παρουσιάζεται το διάγραμμα όπως προέκυψε για τη μέτρηση MDF6. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, στην περίοδο της αρχικής φάσης η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή περίπου στους 25,77°C. Η περίοδος της έναυσης ξεκινάει περίπου 5 min πριν ολοκληρωθεί η μέτρηση και παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας κατά 1,8°C. Η περίοδος της έναυσης και της αύξησης της θερμοκρασίας (RISE PERIOD) διαρκεί περίπου 1,8 min.



Σχήμα 1.15 Διάγραμμα για την ινόπλακα μέσης πυκνότητας (Μέτρηση MDF6).

Οι τιμές που προκύπτουν, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 1716, για την ανώτερη και τη κατώτερη θερμογόνο δύναμη καθώς οι μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις αυτών παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.7. Ακόμη παρουσιάζεται και η μέση υγρασία των 3 δειγμάτων.

	HHV (cal/g)	LHV (cal/g)	Υγρασία (%)
Μέση τιμή	4331,816	4308,158	4,38
Τυπική απόκλιση	26,74	24,02	-

Πίνακας 1.7 Αποτελέσματα θερμογόνου δύναμης για την ινόπλακα μέσης πυκνότητας.

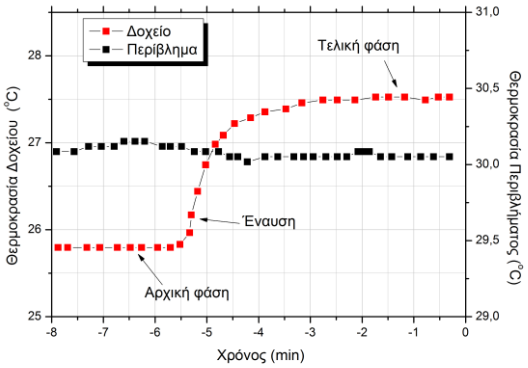
1.3.1.3.3. Σανίδα δοκών

Συνολικά, έγιναν 5 μετρήσεις σε δείγματα σανίδας δοκών σε μορφή δισκίου (pellet) και σύμφωνα με το πρότυπο ISO 1716 και επιλέχθηκαν οι 3 μετρήσεις του Πίνακα 1.8:

	Σανίδα δοκών	1η Μέτρηση (SD4)	2η Μέτρηση (SD5)	3η Μέτρηση (SD3)
Υγρασιόμετρο	Βάρος Δείγματος (πριν την αφύγρανση)	3,370 g	3,379 g	3,479 g
	Βάρος τοποθετούμενου δίσκου	2,573 g	2,577 g	2,575 g
	Υγρασία	5,25 %MC	5,45 %MC	5,78 %MC
Προετοιμασία για τοποθέτηση δείγματος στην βόμβα	Βάρος κάψουλας	13,50763 g	13,51038 g	13,52556 g
	Βάρος αφυγραμένου δείγματος	0,88798 g	0,86298 g	0,86883 g
	Μήκος αρχικού *σύρματος ανάφλεξης* (fuse)	16 cal	15 cal	15 cal
	Μορφή δείγματος	Δισκίο - Pellet	Δισκίο - Pellet	Δισκίο - Pellet
	Χρόνος παραμονής στο περιβάλλον μέχρι την τοποθέτηση	7 min	7 min	5,5 min
Τελικά αποτελέσματα	Μήκος εναπομείναντος *σύρματος ανάφλεξης* (final fuse)	4 cal	2 cal	2 cal
	Ανώτερη θερμογόνος ικανότητα (HHV) [cal/g]	4702,9380	4696,2203	4667,0361

Πίνακας 1.8 Πειραματικές μετρήσεις σανίδας δοκών σε μορφή δισκίου.

Στο Σχήμα 1.16 παρουσιάζεται το διάγραμμα όπως προέκυψε για τη μέτρηση SD3. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, στην περίοδο της αρχικής φάσης η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή περίπου στους 25,65°C. Η περίοδος της έναυσης ξεκινάει περίπου 5,5 min πριν ολοκληρωθεί η μέτρηση και παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας κατά 1,7°C. Η περίοδος της έναυσης και της αύξησης της θερμοκρασίας (RISE PERIOD) διαρκεί περίπου 2,5 min.



Σχήμα 1.16 Διάγραμμα για τη σανίδα δοκών (Μέτρηση SD3).

Οι τιμές που προκύπτουν, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 1716, για την ανώτερη και τη κατώτερη θερμογόνο δύναμη καθώς οι μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις αυτών παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.9. Ακόμη παρουσιάζεται και η μέση υγρασία των 3 δειγμάτων.

	HHV (cal/g)	LHV (cal/g)	Υγρασία (%)
Μέση τιμή	4688,731	4659,059	5,49
Τυπική απόκλιση	19,09	20,504	-

Πίνακας 1.9 Αποτελέσματα θερμογόνου δύναμης για τη σανίδα δοκών.

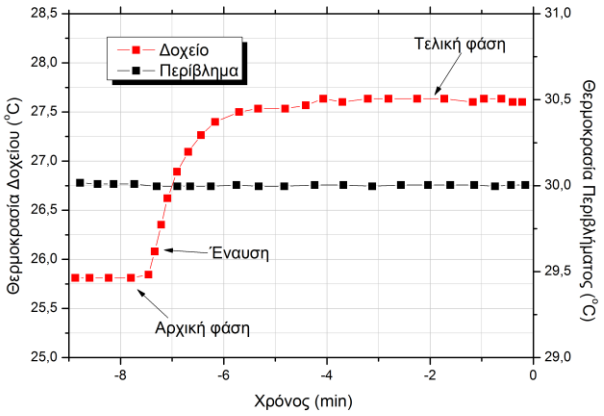
1.3.1.3.4. Μοριοσανίδα

Συνολικά, έγιναν 7 μετρήσεις σε δείγματα μοριοσανίδας σε μορφή δισκίου (pellet) και σύμφωνα με το πρότυπο ISO 1716 και επιλέχθηκαν οι 3 μετρήσεις του Πίνακα 1.10:

	Μοριοσανίδα	1η Μέτρηση (PB6)	2η Μέτρηση (PB8)	3η Μέτρηση (PB4)
Υγρασιόμετρο	Βάρος Δείγματος (πριν την αφύγρανση)	3,544 g	3,699 g	3,439 g
	Βάρος τοποθετούμενου δίσκου	2,579 g	2,575 g	2,576 g
	Υγρασία	4,07 %MC	4,95 %MC	4,16 %MC
Προετοιμασία για τοποθέτηση δείγματος στην βόμβα	Βάρος κάψουλας	13,51717 g	13,50398 g	13,52861 g
	Βάρος αφυγραμένου δείγματος	0,87301 g	0,85263 g	1,00889 g
	Μήκος αρχικού *σύρματος ανάφλεξης* (fuse)	15 cal	16 cal	15 cal
	Μορφή δείγματος	Δισκίο - Pellet	Δισκίο - Pellet	Δισκίο - Pellet
	Χρόνος παραμονής στο περιβάλλον μέχρι την τοποθέτηση	5,5 min	7,5 min	7 min
Τελικά αποτελέσματα	Μήκος εναπομείναντος *σύρματος ανάφλεξης* (final fuse)	4 cal	7 cal	3 cal
	Ανώτερη θερμογόνος ικανότητα (HHV) [cal/g]	4235,4256	4226,0425	4221,4949

Πίνακας 1.10 Πειραματικές μετρήσεις μοριοσανίδας σε μορφή δισκίου.

Στο Σχήμα 1.17 παρουσιάζεται το διάγραμμα όπως προέκυψε για τη μέτρηση PB4. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, στην περίοδο της αρχικής φάσης η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή περίπου στους 25,79^{o}C. Η περίοδος της έναυσης ξεκινάει περίπου 7,5 min πριν ολοκληρωθεί η μέτρηση και παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας κατά 1,78^{o}C. Η περίοδος της έναυσης και της αύξησης της θερμοκρασίας (RISE PERIOD) διαρκεί περίπου 2,5 min.



Σχήμα 1.17 Διάγραμμα για τη μοριοσανίδα (Μέτρηση PB4).

Οι τιμές που προκύπτουν, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 1716, για την ανώτερη και τη κατώτερη θερμογόνο δύναμη καθώς οι μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις αυτών παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.11. Ακόμη παρουσιάζεται και η μέση υγρασία των 3 δειγμάτων.

	HHV (cal/g)	**LHV (cal/g)**	**Υγρασία (%)**
Μέση τιμή	4227,654	4203,924	4,39
Τυπική απόκλιση	7,104	8,244	-

Πίνακας 1.11 Αποτελέσματα θερμογόνου δύναμης για τη σανίδα δοκών.

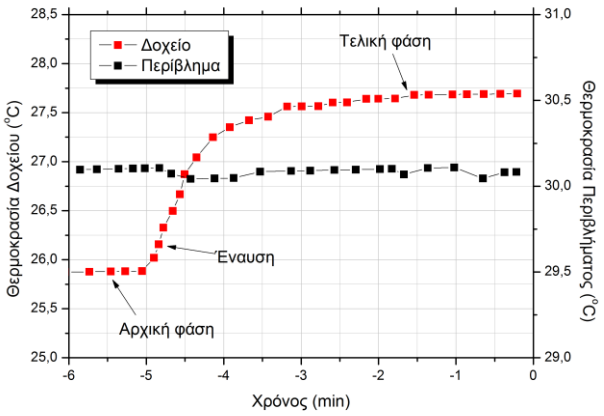
1.3.1.3.5. Ξύλινο πλαίσιο (Timber Frame)

Συνολικά, έγιναν 7 μετρήσεις σε δείγματα ξύλινου πλαισίου σε μορφή δισκίου (pellet) και σύμφωνα με το πρότυπο ISO 1716 και επιλέχθηκαν οι 3 μετρήσεις του Πίνακα 1.12:

	Ξύλινο πλαίσιο (Timber Frame)	1η Μέτρηση (TF7)	2η Μέτρηση (TF8)	3η Μέτρηση (TF9)
Υγρασιόμετρο	Βάρος Δείγματος (πριν την αφύγρανση)	3,352 g	3,677 g	3,230 g
	Βάρος τοποθετούμενου δίσκου	2,576 g	2,577 g	2,573 g
	Υγρασία	5,24 %MC	5,03 %MC	4,52 %MC
Προετοιμασία για τοποθέτηση δείγματος στην βόμβα	Βάρος κάψουλας	13,51567 g	13,51608 g	13,51664 g
	Βάρος αφυγραμένου δείγματος	0,88031 g	0,89573 g	0,89678 g
	Μήκος αρχικού *σύρματος ανάφλεξης* (fuse)	15 cal	15 cal	15 cal
	Μορφή δείγματος	Δισκίο - Pellet	Δισκίο - Pellet	Δισκίο - Pellet
	Χρόνος παραμονής στο περιβάλλον μέχρι την τοποθέτηση	5 min	5,5 min	6,5 min
Τελικά αποτελέσματα	Μήκος εναπομείναντος *σύρματος ανάφλεξης* (final fuse)	1 cal	3 cal	4 cal
	Ανώτερη θερμογόνος ικανότητα (HHV) [cal/g]	4709,5587	4711,3128	4720,3684

Πίνακας 1.12 Πειραματικές μετρήσεις ξύλινου πλαισίου σε μορφή δισκίου.

Στο Σχήμα 1.18 παρουσιάζεται το διάγραμμα όπως προέκυψε για τη μέτρηση TF9. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, στην περίοδο της αρχικής φάσης η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή περίπου στους 25,73°C. Η περίοδος της έναυσης ξεκινάει περίπου 5 min πριν ολοκληρωθεί η μέτρηση και παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας κατά 1,77°C. Η περίοδος της έναυσης και της αύξησης της θερμοκρασίας (RISE PERIOD) διαρκεί περίπου 2 min.



Σχήμα 1.18 Διάγραμμα για το ξύλινο πλαίσιο (Μέτρηση TF9).

Οι τιμές που προκύπτουν, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 1716, για την ανώτερη και τη κατώτερη θερμογόνο δύναμη καθώς οι μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις αυτών παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.13. Ακόμη παρουσιάζεται και η μέση υγρασία των 3 δειγμάτων.

	HHV (cal/g)	LHV (cal/g)	Υγρασία (%)
Μέση τιμή	4713,747	4687,117	4,93
Τυπική απόκλιση	5,802	7,788	-

Πίνακας 1.13 Αποτελέσματα θερμογόνου δύναμης για το ξύλινο πλαίσιο.

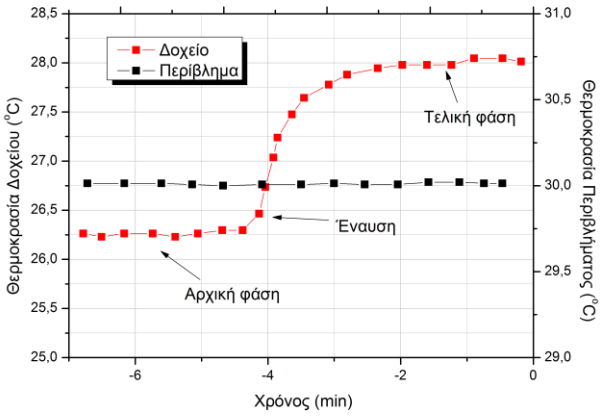
1.3.1.3.6. <u>Κόντρα πλακέ (Plywood)</u>

Συνολικά, έγιναν 3 μετρήσεις και αφού ικανοποιείται το πρότυπο ISO 1716, που αφορά μετρήσεις σε στερεά δείγματα, επιλέχθηκαν οι 3 αυτές μετρήσεις που παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.14:

	Κόντρα πλακέ (Plywood)	**1η Μέτρηση (PLY1)**	**2η Μέτρηση (PLY2)**	**3η Μέτρηση (PLY3)**
Υγρασιόμετρο	Βάρος Δείγματος (πριν την αφύγρανση)	3,425 g	3,442 g	3,347 g
	Βάρος τοποθετούμενου δίσκου	2,577 g	2,573 g	2,572 g
	Υγρασία	7,33 %MC	5,58 %MC	5,59 %MC
Προετοιμασία για τοποθέτηση δείγματος στην βόμβα	Βάρος κάψουλας	13,49421 g	13,34854 g	13,49463 g
	Βάρος αφυγραμένου δείγματος	0,88442 g	0,90824 g	0,90694 g
	Μήκος αρχικού *σύρματος ανάφλεξης* (fuse)	15 cal	15 cal	15 cal
	Μορφή δείγματος	Δισκίο - Pellet	Δισκίο - Pellet	Δισκίο – Pellet
	Χρόνος παραμονής στο περιβάλλον μέχρι την τοποθέτηση	6,5 min	8,5 min	5,5 min
Τελικά αποτελέσματα	Μήκος εναπομείναντος *σύρματος ανάφλεξης* (final fuse)	3 cal	4 cal	2 cal
	Ανώτερη θερμογόνος ικανότητα (HHV) [cal/g]	4606,7814	4597,5732	4595,4939

Πίνακας 1.14 Πειραματικές μετρήσεις κόντρα πλακέ σε μορφή δισκίου.

Στο Σχήμα 1.19 παρουσιάζεται το διάγραμμα όπως προέκυψε για τη μέτρηση PLY2. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, στην περίοδο της αρχικής φάσης η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή περίπου στους 26,24^{o}C. Η περίοδος της έναυσης ξεκινάει περίπου 4,2 min πριν ολοκληρωθεί η μέτρηση και παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας κατά 1,75^{o}C. Η περίοδος της έναυσης και της αύξησης της θερμοκρασίας (RISE PERIOD) διαρκεί περίπου 2,2 min.



Σχήμα 1.19 Διάγραμμα για το κόντρα πλακέ (Μέτρηση PLY2).

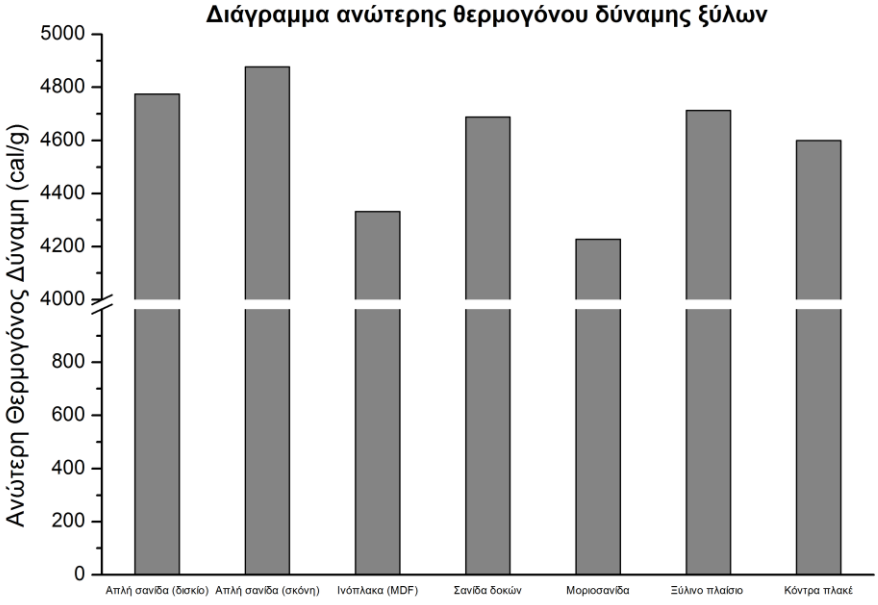
Οι τιμές που προκύπτουν, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 1716, για την ανώτερη και τη κατώτερη θερμογόνο δύναμη καθώς οι μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις αυτών παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.15. Ακόμη παρουσιάζεται και η μέση υγρασία των 3 δειγμάτων.

	HHV (cal/g)	LHV (cal/g)	Υγρασία (%)
Μέση τιμή	4599,949	4566,64	6,17
Τυπική απόκλιση	6,007	1,167	-

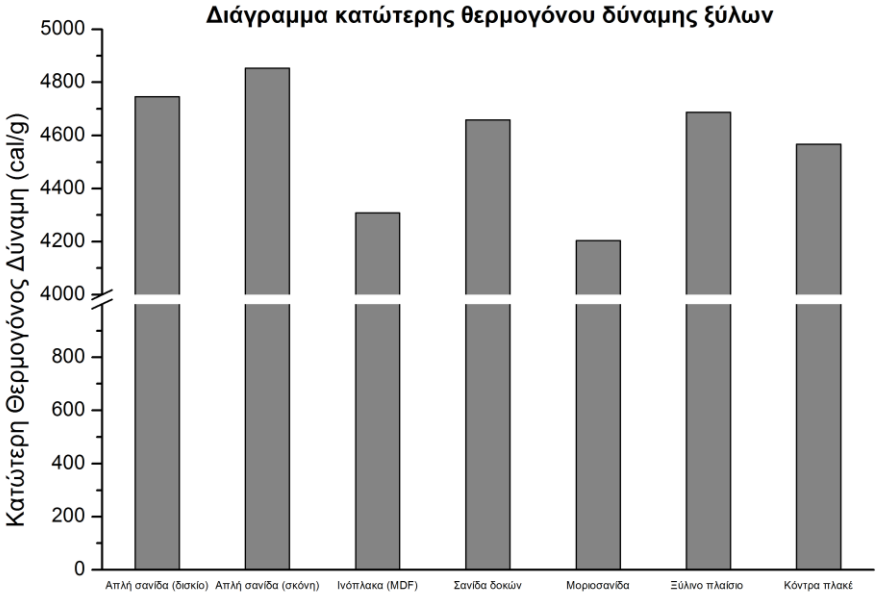
Πίνακας 1.15 Αποτελέσματα θερμογόνου δύναμης για το κόντρα πλακέ.

1.3.1.4. <u>Γενικός σχολιασμός αποτελεσμάτων</u>

Στα Σχήματα 1.18 και 1.19 παρουσιάζονται τα διαγράμματα με τις πειραματικές μετρήσεις των ξύλων για την ανώτερη και την κατώτερη θερμογόνο δύναμη αντίστοιχα. Γενικά η θερμογόνος ικανότητα για τα συγκριμένα είδη ξύλου κυμαίνεται από 4000 cal/g έως 5000 cal/g, που δείχνει ότι οι ξύλινες κατασκευές μέσα σε ένα διαμέρισμα αποτελούν σημαντικό πυροθερμικό φορτίο και πρέπει αυτό να λαμβάνεται υπόψη σε θέματα πυρασφάλειας. Όπως φαίνεται στα διαγράμματα, η υψηλότερη τιμή για τη θερμογόνο δύναμη τόσο στην ανώτερη όσο και στην ανώτερη παρουσιάζεται στα δείγματα της απλής σανίδας σε μορφή σκόνης. Όμως ας σημειωθεί ότι στο συγκεκριμένο δείγμα δεν ακολουθήθηκε το πρότυπο ISO 1716 όπως έγινε στις υπόλοιπες μετρήσεις. Παρόλα αυτά, στα δείγματα σε μορφή δισκίου (pellet) πάλι η απλή σανίδα έχει τις μεγαλύτερες τιμές στην ανώτερη (4746,385 cal/g) και στην κατώτερη (4774,509 cal/g) θερμογόνο δύναμη. Πολύ κοντά σε αυτή τη τιμή βρίσκεται το ξύλινο πλαίσιο (Timber frame). Τη χαμηλότερη τιμή παρουσιάζει η μοριοσανίδα τόσο στην ανώτερη (4227,654 cal/g) όσο και στην κατώτερη (4203,924 cal/g) θερμογόνο δύναμη.



Σχήμα 1.20 Διάγραμμα για την ανώτερη θερμογόνο δύναμη των ξύλων.



Σχήμα 1.21 Διάγραμμα για την κατώτερη θερμογόνο δύναμη των ξύλων.

1.3.2. Υγρά καύσιμα

Τα υγρά καύσιμα χρησιμοποιούνται κυρίως για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ιδιαίτερα σε απομονωμένα νησιά ή σημεία που βρίσκονται μακριά από το δίκτυο της ηλεκτρικής ενέργειας. Η χρησιμοποίησή τους σηματοδότησε την έναρξη της βιομηχανικής ανάπτυξης τον 20° αιώνα. Κύριος εκπρόσωπος των υγρών καυσίμων είναι το πετρέλαιο. Τα υγρά καύσιμα έχουν σαν βάση τα βαριά κατάλοιπα του φυσικού πετρελαίου που απομένουν μετά την παραλαβή του υγραερίου, βενζίνης και καυσίμου Diesel με τη διαδικασία της κλασματικής απόσταξης. Τα κατάλοιπα σε μικρές ποσότητες ελαφρότερων αποσταγμάτων ή ακόμα και του φυσικού πετρελαίου αποτελούν το βασικό υγρό καύσιμο ως γνωστό με το όνομα 'μαζούτ'. Σε μικρές ποσότητες χρησιμοποιούνται ως καύσιμα, πίσσες και πετρελαιοειδή, που προέρχονται από την εξαέρωση φαιανθράκων ή λιθανθράκων καθώς επίσης και από κατάλοιπα κατεργασίας χαρτιού ή κυτταρίνης [Καλογράνης, 2008].

1.3.2.1. Επεξεργασία των μετρήσεων

- Υπολογισμός κατώτερης θερμογόνου δύναμης

Σύμφωνα με το πρότυπο **D240–09** της ASTM, που αφορά τον υπολογισμό της θερμογόνου ικανότητας καυσίμων υγρών υδρογονανθράκων χρησιμοποιώντας θερμιδόμετρο τύπου οβίδας οξυγόνου. Αν δεν είναι γνωστό το ποσοστό υδρογόνου στα υγρά καύσιμα τότε για τον υπολογισμό της κατώτερης θερμογόνου ικανότητας χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση:

$$(LHV) = 10,025 + 0,7195(HHV) \tag{1.15}$$

όπου τα μεγέθη (LHV) και (HHV) σε μονάδες MJ/kg.

Για το θεωρητικό υπολογισμό της κατώτερης θερμογόνου ικανότητας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η Εξίσωση (1.11) θεωρώντας ως υγρασία τη διαφορά βάρους στην οβίδα πριν και μετά τη μέτρηση. Για να πραγματοποιηθεί αυτό, ακολουθήθηκε την εξής διαδικασία:

1. Με τη χρήση αέρα αποβλήθηκε τυχόν ποσότητα νερού που μπορεί να είχε παραμείνει από προγενέστερες μετρήσεις τόσο στο εξωτερικό όσο και στο εσωτερικό της οβίδας.

2. Αφού έγινε αυτό, η οβίδα ζυγίσθηκε στο ζυγό για τη μέτρηση του αρχικού βάρους της.

3. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας μια σύριγγα προστέθηκε 1 ml απιονισμένου νερού στο εσωτερικό της οβίδας.

4. Μετά τη διεξαγωγή του πειράματος, με τη χρήση αέρα αποβλήθηκε ποσότητα νερού που είχε συγκεντρωθεί στην εξωτερική επιφάνεια της οβίδας.

5. Επανατοποθετήσαμε την οβίδα στο ζυγό και η διαφορά που υπήρχε στο βάρος της οφειλόταν στο νερό που παράχθηκε κατά τη καύση.

Η παραπάνω παραδοχή για τον υπολογισμό της υγρασίας επαληθεύεται για το επτάνιο, όπου ο μοριακός του τύπος είναι C_7H_{16}, ως εξής:

Το μοριακός βάρος του επτανίου είναι 100,2.

Για τη στοιχειομετρική αντίδραση ισχύει:

$$C_7H_{16} + 11O_2 \rightarrow 7CO_2 + 8H_2O$$
$$\Rightarrow 1 \text{ kgmol } C_7H_{16} \cdot \frac{100,2kg}{\text{kgmol } C_7H_{16}} + 11 \text{ kgmol O}_2 \frac{32kg}{\text{kgmol } O_2} \rightarrow$$
$$\rightarrow 7 \text{ kgmol CO}_2 \frac{44kg}{\text{kgmol CO}_2} + 8 \text{ kgmol H}_2O \frac{18kg}{\text{kgmol H}_2O}$$
$$\Rightarrow 100,2kg + 35,2kg \rightarrow 308kg + 144kg$$
$$\Rightarrow 452,2kg \square 452kg$$

Επομένως αν χρησιμοποιήσουμε ποσότητα επτανίου 0,69 g προκύπτει ότι, αφού για τα 100,2 kg επτανίου παράγονται 144 kg νερού, θα παραχθούν 0,9916 g νερού. Όπως παρουσιάζεται και στα αποτελέσματα παρακάτω, η τιμή αυτή είναι κοντά στη διαφορά βάρους της οβίδας πριν και μετά τη διεξαγωγή του πειράματος. Τα παραπάνω συμπεράσματα επαληθεύονται τόσο για το 'Aromatic+Naphthene blend' όσο και για το 'JET A-1'. Επιγραμματικά, για το καύσιμο αεριωθούμενων JET A-1:

Από τη στοιχειομετρική αντίδραση έχουμε τη δυνατότητα να υπολογίσουμε τη ποσότητα νερού που θα παραχθεί:

$C_{11,5}H_{21,5} + (16,875)O_2 \rightarrow (11,5)CO_2 + (10,75)H_20 \Rightarrow m_{H_2O} = 0,843g$,για 0,69g καυσίμου, που είναι περίπου οι ποσότητες που έχουν τα δείγματα μας με το συγκεκριμένο καύσιμο.

- <u>Επαναληψιμότητα μετρήσεων</u>

Σύμφωνα με το πρότυπο D240–09 της ASTM, η διαφορά μεταξύ μετρήσεων που έχουν γίνει με επιτυχία και πραγματοποιούνται από το ίδιο άτομο υπό σταθερές συνθήκες λειτουργίας θα πρέπει να είναι μικρότερη από 0,13 MJ/kg, δηλαδή **31,05 cal/g**.

1.3.2.2. <u>Παρουσίαση των αποτελεσμάτων</u>

Τα υγρά καύσιμα που χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση της ανώτερης θερμογόνου δύναμής τους ήταν τα εξής: το επτάνιο με χημικό τύπο C_7H_{16}, και τα αεροπορικά καύσιμα 'JET A-1' με χημικό τύπο $C_{11,5}H_{21,5}$ και 'Aromatic+Naphthene blend' με χημικό τύπο $C_{11,48}H_{22,18}$. Ας σημειωθεί ότι για τη στατιστική ανάλυση των δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν οι Εξισώσεις (1.13) και (1.14).

1.3.2.2.1. <u>Επτάνιο</u>

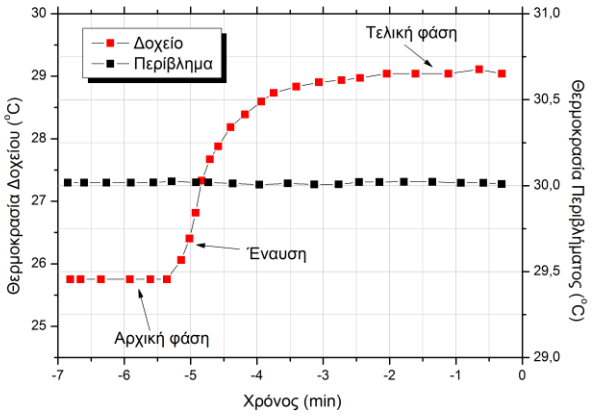
Το επτάνιο είναι ένα αλκάνιο, δηλαδή άκυκλος κορεσμένος υδρογονάνθρακας με χημικό τύπο C_7H_{16}. Το επτάνιο έχει εξ' ορισμού βαθμό οκτανίου ίσο με μηδέν. Η ονομασία 'επτάνιο' προέρχεται από την ονοματολογία κατά IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry). Συγκεκριμένα, το πρόθεμα 'επτ-' δηλώνει την παρουσία επτά ατόμων άνθρακα ανά μόριο της ένωσης, το ενδιάμεσο '-αν-' δείχνει τη παρουσία μόνο απλών δεσμών μεταξύ ατόμων άνθρακα στο μόριο και η κατάληξη '-ιο' υποδηλώνει ότι δεν περιέχει χαρακτηριστικές ομάδες, δηλαδή ότι είναι υδρογονάθρακας.

Επειδή το επτάνιο, σε σχέση με τα υπόλοιπα υγρά καύσιμα, εξατμιζόταν με μεγάλο ρυθμό αποφασίστηκε να μετρηθεί ο χρόνος από τη στιγμή της μέτρησης βάρους του δείγματος μέχρι και το κλείσιμο της οβίδας οξυγόνου και έχοντας μετρήσει το ρυθμό εξάτμισης γίνεται διόρθωση στη τελική μάζα του δείγματος. Ο χρόνος που χρειάστηκε για να γίνει αυτό στα 3 πειράματα ήταν περίπου 2 λεπτά. Ο ρυθμός εξάτμισης του επτανίου ήταν 0,06944 mg/s. Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D240–09, επιλέχθηκαν 3 μετρήσεις και παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.16:

	Επτάνιο	1η Μέτρηση (HEP9)	2η Μέτρηση (HEP10)	3η Μέτρηση (HEP12)
Προετοιμασία για τοποθέτηση δείγματος στην βόμβα	Βάρος βόμβας χωρίς υγρασία	1978,53 g	1978,55 g	1978,54 g
	Βάρος βόμβας με υγρασία	1979,55 g	1979,56 g	1979,55 g
	Βάρος κάψουλας	13,47817 g	13,47786 g	13,47741 g
	Βάρος τελικού δείγματος	0,71452 g	0,70083 g	0,69952 g
	Μήκος αρχικού *σύρματος ανάφλεξης* (fuse)	20 cal	20 cal	20 cal
Τελικά αποτελέσματα	Μήκος εναπομείναντος *σύρματος ανάφλεξης (final fuse)*	2 cal	1 cal	2 cal
	Διαφορά θερμοκρασίας στο δοχείο	3,361 ^{o}C	3,293 ^{o}C	3,287 ^{o}C
	Τελικό βάρος βόμβας	1980,58 g	1980,39 g	1980,43 g
	Ανώτερη θερμογόνος ικανότητα (HHV)	11247,532 cal/g	11232,146 cal/g	11235,228 cal/g
	Κατώτερη θερμογόνος ικανότητα (LHV) [ASTM D240]	10488,38 cal/g	10477,31 cal/g	10479,527 cal/g
	Κατώτερη θερμογόνος ικανότητα (LHV) [Θεωρητική]	10431,16 cal/g	10574,293 cal/g	10537,745 cal/g

Πίνακας 1.16 Πειραματικές μετρήσεις επτανίου.

Στο Σχήμα 1.22 παρουσιάζεται το διάγραμμα όπως προέκυψε για τη μέτρηση HEP12. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, στην περίοδο της αρχικής φάσης η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή περίπου στους 25,78^{o}C. Η περίοδος της έναυσης ξεκινάει περίπου 5,5 min πριν ολοκληρωθεί η μέτρηση και παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας κατά 3,287^{o}C. Η περίοδος της έναυσης και της αύξησης της θερμοκρασίας (RISE PERIOD) διαρκεί περίπου 3 min.



Σχήμα 1.22 Διάγραμμα για το επτάνιο (Μέτρηση HEP12).

Οι μέσες τιμές που προκύπτουν για την θερμογόνο δύναμη του επτανίου καθώς και οι τυπικές αποκλίσεις αυτών παρουσιάζονται στο Πίνακα 1.17. Ακόμη, παρουσιάζονται οι βιβλιογραφικές τιμές τόσο για την ανώτερη τόσο και για την κατώτερη θερμογόνο δύναμη [SFPE Handbook of fire protection engineering].

	Ανώτερη θερμογόνος ικανότητα (HHV) [cal/g]	**Κατώτερη θερμογόνος ικανότητα (LHV) [ASTM D240] [cal/g]**	**Κατώτερη θερμογόνος ικανότητα (LHV) [Θεωρητική] [cal/g]**
Μέση τιμή – Τυπική απόκλιση	11238,302±8,141	10481,739±5,857	10514,399±74,367
% Τυπικής απόκλισης	0,072	0,056	0,707
Βιβλιογραφική τιμή	10755	10659,4	10659,4

Πίνακας 1.17 Αποτελέσματα θερμογόνου δύναμης για το επτάνιο.

1.3.2.2.2. <u>JET A-1</u>

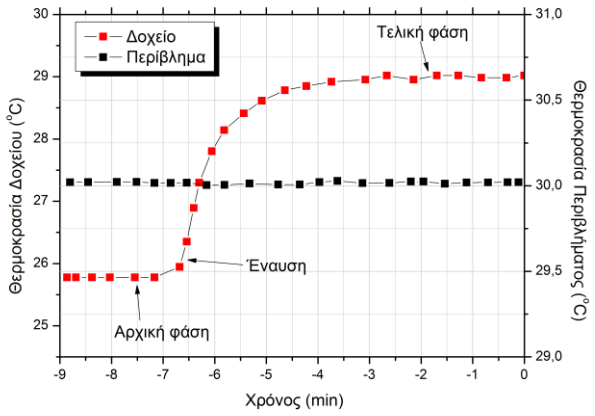
Τα καύσιμα τύπου Jet είναι αεροπορικό καύσιμο υγρής μορφής και χρησιμοποιείται στα αεροπλάνα με μηχανές αεριοστρόβιλου. Τα πιο συνηθισμένα καύσιμα για την πολιτική αεροπορία είναι τα ‘Jet A’ και ‘Jet A-1’ που παράγονται με διεθνείς τυποποιημένες προδιαγραφές. Ο χαρακτηρισμός υγρών καυσίμων τύπου ‘Jet A’ χρησιμοποιήθηκε στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής από τη δεκαετία του 1950 ενώ το καύσιμο ‘Jet A-1’ είναι το πρότυπο καύσιμο τυποποίησης που χρησιμοποιείται διεθνώς. Το καύσιμο ‘Jet A-1’ έχει σημείο ανάφλεξης κοντά στους 38 ^{o}C ενώ η θερμοκρασία αυτανάφλεξης του είναι 210 ^{o}C.

Συνολικά, έγιναν 3 μετρήσεις για το υγρό καύσιμο ‘Jet A-1’ που ικανοποιούν το πρότυπο ASTM D240–09 που αφορά υγρά καύσιμα και παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.18:

	JET A-1	**1η Μέτρηση (JET-1)**	**2η Μέτρηση (JET-2)**	**3η Μέτρηση (JET-3)**
Προετοιμασία για τοποθέτηση δείγματος στην βόμβα	Βάρος βόμβας χωρίς υγρασία	1978,58 g	1978,56 g	1978,58 g
	Βάρος βόμβας με υγρασία	1979,59 g	1979,57 g	1979,58 g
	Βάρος κάψουλας	13,50526 g	13,50510 g	13,50553 g
	Βάρος τελικού δείγματος	0,69213 g	0,69765 g	0,70236 g
	Μήκος αρχικού *σύρματος ανάφλεξης* (fuse)	20 cal	20 cal	20 cal
Τελικά αποτελέσματα	Μήκος εναπομείναντος *σύρματος ανάφλεξης (final fuse)*	8 cal	1 cal	1 cal
	Διαφορά θερμοκρασίας στο δοχείο	3,162 ^{o}C	3,188 ^{o}C	3,208 ^{o}C
	Τελικό βάρος βόμβας	1980,31 g	1980,31 g	1980,29 g
	Ανώτερη θερμογόνος ικανότητα (HHV)	10930,648 cal/g	10925,819 cal/g	10919,565 cal/g
	Κατώτερη θερμογόνος ικανότητα (LHV) [ASTM D240]	10260,387 cal/g	10256,913 cal/g	10252,413 cal/g
	Κατώτερη θερμογόνος ικανότητα (LHV) [Θεωρητική]	10359,980 cal/g	10339,299 cal/g	10356,823 cal/g

Πίνακας 1.18 Πειραματικές μετρήσεις για το JET A-1.

Στο Σχήμα 1.23 παρουσιάζεται το διάγραμμα όπως προέκυψε για τη μέτρηση JET-1. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, στην περίοδο της αρχικής φάσης η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή περίπου στους 25,76^{o}C. Η περίοδος της έναυσης ξεκινάει περίπου 6,5 min πριν ολοκληρωθεί η μέτρηση και παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας κατά 3,16^{o}C. Η περίοδος της έναυσης και της αύξησης της θερμοκρασίας (RISE PERIOD) διαρκεί περίπου 3,5 min.



Σχήμα 1.23 Διάγραμμα για το JET A-1 (Μέτρηση JET-1).

Οι μέσες τιμές που προκύπτουν για την θερμογόνο δύναμη του JET A-1 καθώς και οι τυπικές αποκλίσεις αυτών παρουσιάζονται στο Πίνακα 1.19. Ακόμη, παρουσιάζονται οι βιβλιογραφικές τιμές τόσο για την ανώτερη τόσο και για την κατώτερη θερμογόνο δύναμη [Keramiotis et al., 2013].

	Ανώτερη θερμογόνος ικανότητα (HHV) [cal/g]	**Κατώτερη θερμογόνος ικανότητα (LHV) [ASTM D240] [cal/g]**	**Κατώτερη θερμογόνος ικανότητα (LHV) [Θεωρητική] [cal/g]**
Μέση τιμή – Τυπική απόκλιση	10925,344±5,557	10256,571±3,998	10352,034±11,141
% Τυπικής απόκλισης	0,051	0,039	0,108
Βιβλιογραφική τιμή	10896,01	10207,69	10207,69

Πίνακας 1.19 Αποτελέσματα θερμογόνου δύναμης για το JET A-1.

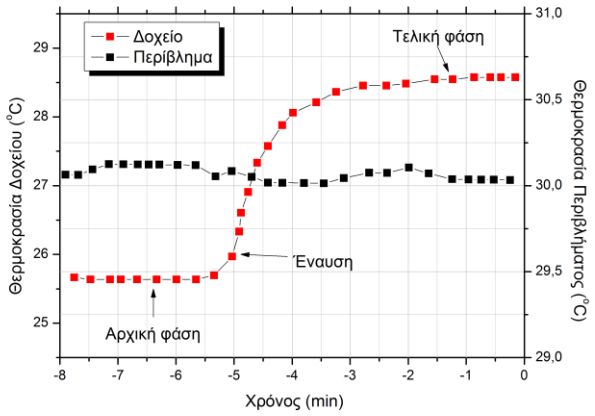
1.3.2.2.3. <u>Aromatic+Napthene Blend</u>

Όπως αναφέρεται και στην ονομασία του, το υγρό καύσιμο ‘Aromatic+Naphthene blend’ είναι ένα μείγμα αρωματικών και κυκλοαλκανικών ενώσεων. Συγκεκριμένα, πρόκειται για ένα εναλλακτικό καύσιμο συνθετικής κηροζίνης που παράγεται μέσω διεργασίας Fischer- Tropsch. Συνολικά, έγιναν 3 μετρήσεις με το υγρό καύσιμο Aromatic+Naphthene blend στις οποίες ικανοποιείται το πρότυπο ASTM D240–09 και παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.20:

	Aromatic+Napthene Blend	1η Μέτρηση (BNR1)	2η Μέτρηση (BNR2)	3η Μέτρηση (BNR3)
Προετοιμασία για τοποθέτηση δείγματος στην βόμβα	Βάρος βόμβας χωρίς υγρασία	1978,55 g	1978,56 g	1978,56 g
	Βάρος βόμβας με υγρασία	1979,56 g	1979,56 g	1979,58 g
	Βάρος κάψουλας	13,50556 g	13,50529 g	13,50526 g
	Βάρος τελικού δείγματος	0,69647 g	0,70379 g	0,70158 g
	Μήκος αρχικού *σύρματος ανάφλεξης* (fuse)	20 cal	20 cal	20 cal
Τελικά αποτελέσματα	Μήκος εναπομείναντος *σύρματος ανάφλεξης (final fuse)*	3 cal	-	3 cal
	Διαφορά θερμοκρασίας στο δοχείο	3,205 ^{o}C	3,239 ^{o}C	3,229 ^{o}C
	Τελικό βάρος βόμβας	1980,31 g	1980,29 g	1980,30 g
	Ανώτερη θερμογόνος ικανότητα (HHV)	11005,574 cal/g	11002,967 cal/g	11006,320 cal/g
	Κατώτερη θερμογόνος ικανότητα (LHV) [ASTM D240]	10314,295 cal/g	10312,419 cal/g	10314,832 cal/g
	Κατώτερη θερμογόνος ικανότητα (LHV) [Θεωρητική]	10411,128 cal/g	10424,373 cal/g	10435,652 cal/g

Πίνακας 1.20 Πειραματικές μετρήσεις για το Aromatic+Naphthene blend.

Στο Σχήμα 1.24 παρουσιάζεται το διάγραμμα όπως προέκυψε για τη μέτρηση BNR2. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, στην περίοδο της αρχικής φάσης η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή περίπου στους 25,62^{o}C. Η περίοδος της έναυσης ξεκινάει περίπου 5,3 min πριν ολοκληρωθεί η μέτρηση και παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας κατά 3,24^{o}C. Η περίοδος της έναυσης και της αύξησης της θερμοκρασίας (RISE PERIOD) διαρκεί περίπου 2,5 min.



Σχήμα 1.24 Διάγραμμα για το Aromatic+Naphthene blend (Μέτρηση BNR2).

Οι μέσες τιμές που προκύπτουν για την θερμογόνο δύναμη του Aromatic+Naphthene blend καθώς και οι τυπικές αποκλίσεις αυτών παρουσιάζονται στο Πίνακα 1.21. Ακόμη, παρουσιάζονται οι βιβλιογραφικές τιμές τόσο για την ανώτερη τόσο και για την κατώτερη θερμογόνο δύναμη [Keramiotis et al., 2013].

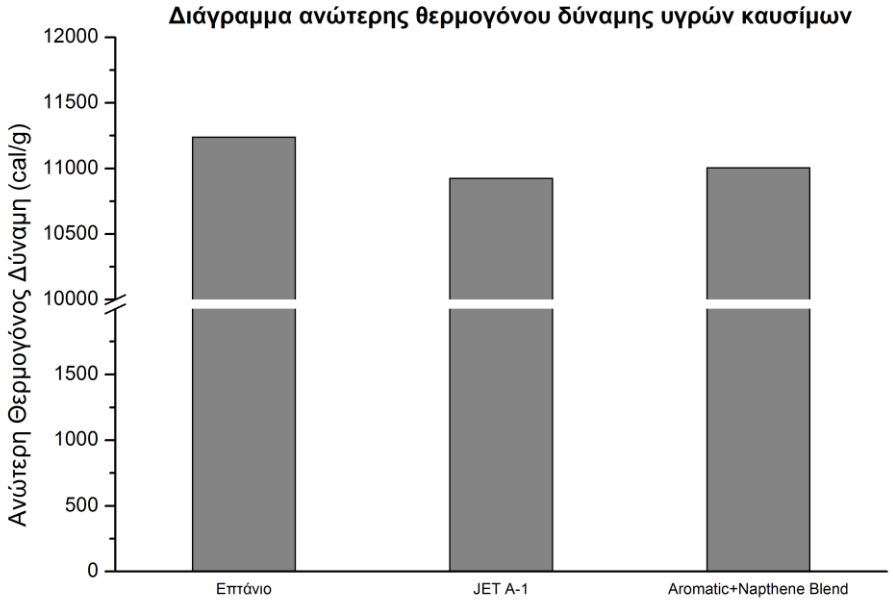
	Ανώτερη θερμογόνος ικανότητα (HHV) [cal/g]	**Κατώτερη θερμογόνος ικανότητα (LHV) [ASTM D240] [cal/g]**	**Κατώτερη θερμογόνος ικανότητα (LHV) [Θεωρητική] [cal/g]**
Μέση τιμή – Τυπική απόκλιση	11004,954±1,760	10313,849±1,266	10423,718±12,275
% Τυπικής απόκλισης	0,016	0,012	0,118
Βιβλιογραφική τιμή	10970,192	10275,151	10275,151

Πίνακας 1.21 Αποτελέσματα θερμογόνου δύναμης για το Aromatic+Naphthene blend.

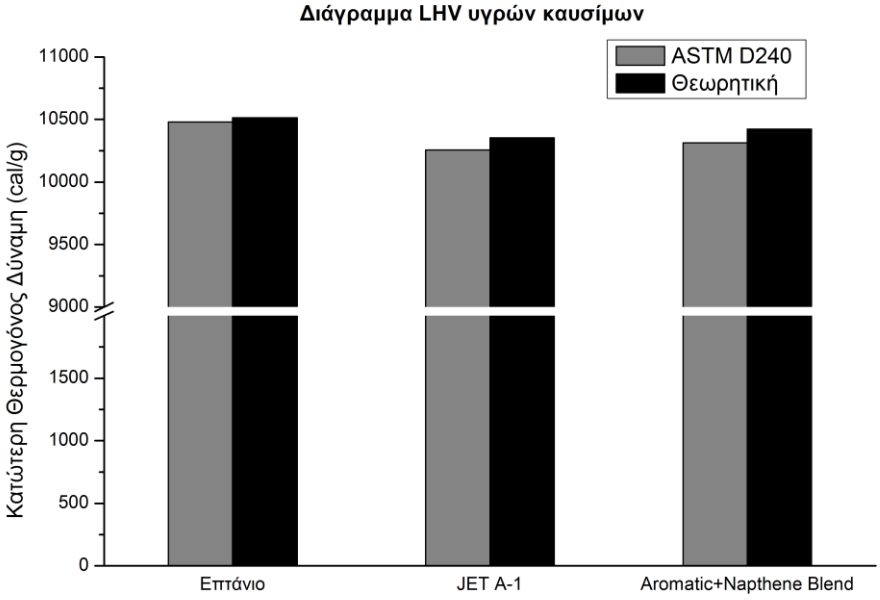
1.3.2.3. <u>Γενικός σχολιασμός αποτελεσμάτων</u>

Γενικά οι πειραματικές μετρήσεις προσέγγισαν σε ικανοποιητικό βαθμό τις βιβλιογραφικές τιμές. Συγκεκριμένα, στα αεροπορικά καύσιμα η διαφορά στη τιμή δεν ξεπερνούσε τα 50 cal/g. Στο επτάνιο η πειραματική τιμή της ανώτερης θερμογόνου δύναμης είναι 500 cal/g μεγαλύτερη από τη βιβλιογραφική ενώ μεγαλυτέρη είναι και η πειραματική τιμή της κατώτερης θερμογόνου δύναμης κατά 200 cal/g περίπου σε σχέση με αυτές που υπολογίστηκαν. Στα Σχήματα 1.25 και 1.26 παρουσιάζονται τα διαγράμματα με τις πειραματικές μετρήσεις των υγρών καυσίμων τόσο για την ανώτερη (Σχήμα 1.25) όσο και για την κατώτερη (Σχήμα 1.26) θερμογόνο δύναμη. Στα συγκεκριμένα τρία υγρά

καύσιμα, η ανώτερη θερμογόνος δύναμη τους είναι κοντά στα 11000 cal/g ενώ η κατώτερη κοντά στα 10500 cal/g. Και στα τρία διαγράμματα, το υγρό καύσιμο με τη μεγαλύτερη θερμογόνο δύναμη είναι το επτάνιο ενώ αυτό με τη μικρότερη είναι το JET A-1. Στο Σχήμα 1.26 παρατηρείται ότι οι τιμές που προκύπτουν για την κατώτερη θερμογόνο δύναμη θεωρητικά είναι μεγαλύτερες από αυτές που προκύπτουν χρησιμοποιώντας το πρότυπο ASTM D240.



Σχήμα 1.25 Διάγραμμα για την ανώτερη θερμογόνο δύναμη των υγρών καυσίμων.



Σχήμα 1.26 Διάγραμμα για την κατώτερη θερμογόνο δύναμη των υγρών καυσίμων.

2. Σωροί ορθογωνικά διατεταγμένων ξύλινων ράβδων (wood crib)

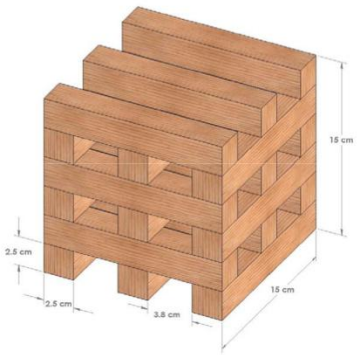
2.1. Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετηθούν διεξοδικά οι σωροί ορθογωνικά διατεταγμένων ράβδων (wood crib - WCR) που χρησιμοποιούνται ως πυροθερμικό φορτίο σε αρκετά πειράματα φωτιάς μεσαίας ή μεγάλης κλίμακας. Όπως θα αναλυθεί και παρακάτω, η δομή και η σύσταση των υλικών είναι οι πιο σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν το ρυθμό καύσης του WCR. Επίσης, σημαντικό ρόλο παίζουν το μέγεθος του WCR, το υλικό από το οποίο αποτελείται το WCR (είδος ξύλου, υγρασία του ξύλου κ.α.) καθώς και η γεωμετρική διάταξη των ράβδων. Με τον όρο γεωμετρική διάταξη εννοούμε τον τρόπο με τον οποίο είναι διατεταγμένες οι ξύλινες ράβδοι που αποτελούν το WCR, το διάκενο μεταξύ τους και το πάχος των ξύλινων ράβδων. Στην συνέχεια του κεφαλαίου, πραγματοποιείται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση για να διερευνηθεί η σκοπιμότητα της χρήσης των WCR ως πυροθερμικό φορτίο σε πειράματα φωτιάς από τη δεκαετία του 1930, όπου και ξεκίνησε η βασική έρευνα σε θέματα πυρασφάλειας, μέχρι και σήμερα.

2.2. Γενική περιγραφή

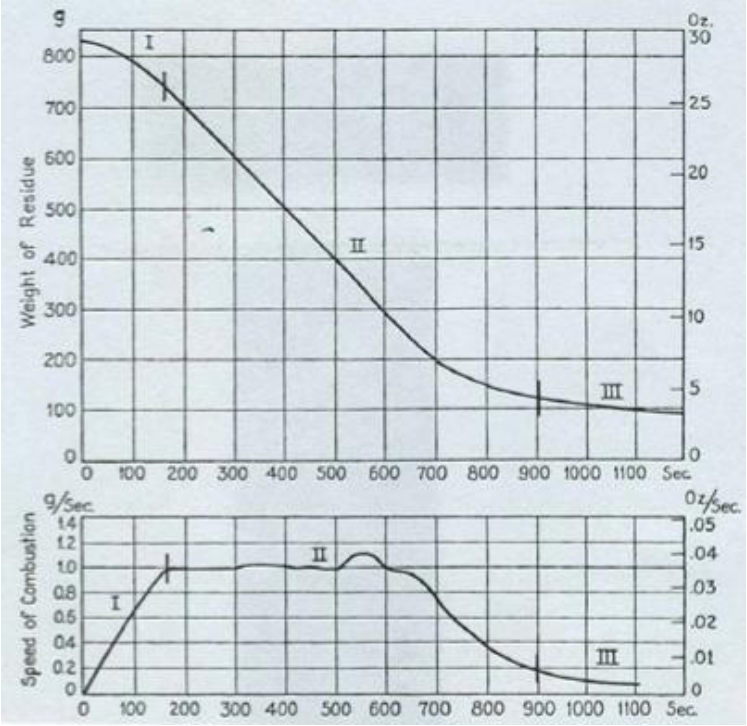
Μία από τις πρώτες έρευνες που επικεντρώθηκε στη καύση ξύλινων ράβδων πραγματοποιήθηκε στη Δανία το 1931 από τον F. Folk [Folk, 1931]. Εκείνος αναγνώρισε ότι, παρόλο που το μεγαλύτερο βάρος μέχρι τότε είχε δοθεί στη αντοχή υλικών και κατασκευών σε περίπτωση φωτιάς, δεν είχαν γίνει αρκετές μελέτες που εστίαζαν σε τρόπους κατάσβεσης φωτιάς. Έχοντας αυτό στο μυαλό, σχεδίασε μια σειρά πειραμάτων που αφορούσαν τη κατάσβεση της ίδιας της φωτιάς του βασικού πυροθερμικού φορτίου, WCR μέσα σε κτίριο.

Η έρευνα στόχευε στη ποσοτικοποίηση της αποτελεσματικότητας διαφόρων μέσων κατάσβεσης. Σαν αποτέλεσμα, η προσπάθεια αυτή απαιτούσε μία εστία φωτιάς η οποία θα μπορούσε να αναπαράγεται σταθερά και με ευκολία. Ο Folk κατέληξε στο σωρό αφυγραμένων ξύλινων ράβδων που θα αναφλέγονταν με τη χρήση βενζίνης τοποθετημένης σε ένα μεταλλικό δοχείο κάτω από τις ράβδους. Όλες οι ξύλινες ράβδοι είχαν τις ίδιες διαστάσεις και την ίδια απόσταση μεταξύ τους. Αφού πραγματοποιήθηκαν αρκετά προκαταρκτικά πειράματα στα οποία μεταβαλλόταν ο αριθμός των ράβδων καθώς και ο προσανατολισμός τους, τρία βασικά θέματα αναγνωρίστηκαν. Πρώτα, προκειμένου να εξασφαλιστεί ο σταθερός προσανατολισμός των ξύλινων ράβδων καθώς και η εύκολη πρόσβαση του μέσου κατάσβεσης στο μεταλλικό δοχείο που περιείχε το καύσιμο, αποφασίστηκε ότι οι διαδοχικές σειρές ξύλινων ράβδων θα τοποθετούνταν κάθετα μεταξύ τους. Επιπρόσθετα, για να εξασφαλιστεί ο επιθυμητός βαθμός επαναληψιμότητας, οι ξύλινες ράβδοι θα έπρεπε να είχαν την ίδια πυκνότητα καθώς και το ίδιο ποσοστό υγρασίας. Με το πέρασμα του χρόνου, οι ξύλινες ράβδοι που χρησιμοποιούσε ο Folk στα πειράματά του ονομάστηκαν σωροί ορθογωνικά διατεταγμένων ράβδων. Η τελική μορφή των WCR που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα κατάσβεσης που πραγματοποίησε ο Folk παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 Τελική μορφή των WCR που χρησιμοποίησε ο Folk [Folk, 1931].

Πριν πραγματοποιήσει τα πειράματα κατάσβεσης, ο Folk σύλλεξε τα δεδομένα από την καύση των WCR. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν καταγράφονταν οπτικά από ένα μονωμένο ζυγό που είχε τοποθετηθεί κάτω από τα WCR. Αυτά τα πειράματα έδωσαν δεδομένα για τη μάζα των WCR σε όλη τη διάρκεια των πειραμάτων, από τα οποία καθοριζόταν ο ρυθμός απώλειας μάζας. Οι καμπύλες αυτές παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2 Ρυθμός απώλειας μάζας όπως καταγράφηκε στα πειράματα του Folk [Folk, 1931].

Η αλλαγή στη κλίση της καμπύλης της μάζας σε σχέση με το χρόνο στα διαγράμματα του Σχήματος 2.2 καθώς και η οπτική παρατήρηση των πειραμάτων έδωσαν στον Folk τη δυνατότητα να αναγνωρίσει 3 στάδια της καύσης των WCR. Η ανάφλεξη αναγνωρίστηκε ως η αρχική περίοδος διάδοσης της φωτιάς που οδηγούσε σε αέρια καύση. Η αέρια καύση, δηλαδή το 2° στάδιο, αναφέρεται σε αυτό που είναι γνωστό σήμερα ως καύση σταθερής κατάστασης κατά τη διάρκεια της οποίας ο ρυθμός μεταβολής της μάζας του καυσίμου σε σχέση με το χρόνο είναι σχετικά σταθερή. Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης ο Folk παρατήρησε την επίδραση της κατευθυνόμενης προς το πάνω μέρος του WCR ροής διαμέσου των κενών μεταξύ των ξύλινων ράβδων. Το τρίτο και τελευταίο στάδιο της πύρωσης είναι το στάδιο που σήμερα αναφέρεται ως καύση δίχως φλόγα (smoldering combustion). Στο Σχήμα 2.2, η κορυφή που παρατηρείται στο δεύτερο στάδιο αναγνωρίζεται από τον Folk ως το σημείο στο οποίο επιτυγχάνεται το ιδανικό μίγμα αέρα και καυσίμου που απαιτείται για την καύση.

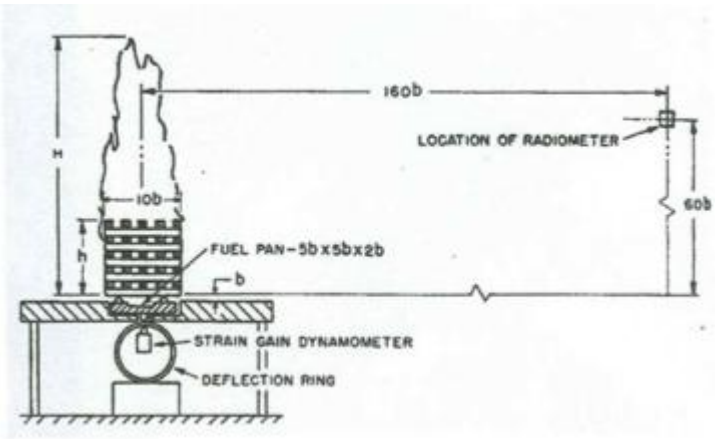
Στη συνέχεια, το 1962, ο Gross [Gross,1962] αναγνώρισε την ανάγκη για τη θεμελιώδη κατανόηση του περιβάλλοντος που περικλείει τη φωτιά προκειμένου να αξιολογηθεί η αντοχή στη φωτιά διάφορων δομικών υλικών. Έτσι συνέχισε την έρευνα που είχε πραγματοποιήσει ο Folk ενώ παράλληλα συνειδητοποίησε δύο πράγματα για τα μέχρι στιγμής μεγάλης κλίμακας πειράματα: ότι το κόστος για μεγάλης κλίμακας πειράματα (full-scale testing) ήταν απαγορευτικό καθώς και ότι πραγματοποιούνταν σε ανοιχτό χώρο με μη ελεγχόμενες συνθήκες. Σαν αποτέλεσμα, επικεντρώθηκε στην αξιολόγηση του μηχανισμού της εξάπλωσης της φωτιάς στα WCR πραγματοποιώντας πειράματα υπό κλίμακα. Ακόμη, ο Gross προσπάθησε να προσδιορίσει το μέγιστο ρυθμό καύσης (ρυθμό απώλειας βάρους) και ανέλυσε τη συσχέτιση του ρυθμού καύσης με μία εμπειρική παράμετρο Φ (porosity-factor)

που σχετιζόταν με τον αερισμό των ξύλινων ράβδων και την εκτιθέμενη στη φωτιά επιφάνεια της κάθε ράβδου.

Κατά το σχεδιασμό και την προετοιμασία της πηγής καυσίμου στα πειράματά του, ο Gross χρησιμοποίησε τη δομή και την ανάλυση που είχε κάνει ο Folk. Χρησιμοποίησε τον ίδιο τύπο ξύλου (*Douglas fir*) για κάθε ξύλινη ράβδο του WCR προκειμένου να διατηρήσει την πυκνότητα του ξύλου όσο πιο ομοιόμορφη γινόταν. Η ανάφλεξη των ξύλινων ράβδων πραγματοποιήθηκε με επτάνιο, η ποσότητα του οποίου ήταν 8% σε σχέση με τη μάζα των ξύλων. Το περιβάλλον στο οποίο διεξήχθησαν τα πειράματα του Gross ήταν ένας μεγάλος χώρος με σχετικά μεγάλο ύψος και ερμητικά κλειστός προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση του αέρα περιβάλλοντος. Ο Gross χρησιμοποίησε ξύλινες ράβδους με τετραγωνική διατομή μήκους *b* και το μήκος των ξύλινων ράβδων ήταν 10 φορές μεγαλύτερο από το μήκος *b*. Ως εκ τούτου, δημιούργησε μια σειρά ξύλινων ράβδων υπό γεωμετρική κλίμακα. Ο Gross όρισε μια ονοματολογία για τις βασικές σχεδιαστικές παραμέτρους των WCR, όπου αυτές χρησιμοποιούνται και σε μεταγενέστερες έρευνες:

- b = μήκος τετραγωνικής διατομής μιας ξύλινης ράβδου
- L = μήκος μιας ξύλινης ράβδου
- n = αριθμός ράβδων σε κάθε επίπεδο, ο οποίος είναι ίδιος για κάθε επίπεδο
- N = συνολικός αριθμός επιπέδων

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποίησε ο Gross παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3. Αυτό που αξίζει να δοθεί έμφαση είναι το μεταλλικό δοχείο στο οποίο τοποθετείται το καύσιμο κάτω από το WCR καθώς και τον τρόπο ανύψωσης του WCR πάνω από το μεταλλικό δοχείο. Το τετραγωνικό μεταλλικό δοχείο έχει επιφάνεια μικρότερη από αυτή του WCR και τοποθετείται στο κέντρο κάτω από το WCR. Το WCR ανυψώθηκε πάνω από το μεταλλικό δοχείο σε απόσταση που ήταν ίση με *b*. Ο Gross αναγνώρισε τα 3 στάδια της καύσης που είχαν επισημανθεί και από τον Folk. Ακόμη, τοποθέτησε μονωτικό κάλυμμα στο έδαφος και διαπίστωσε ότι δεν έχει κάποια επίδραση στον ρυθμό καύσης ενώ όταν τοποθέτησε κάθετα μονωτικά καλύμματα γύρω από το περίβλημα του WCR ο ρυθμός καύσης μειώθηκε κατά 50%.



Σχήμα 2.3 Πειραματική διάταξη του Gross [Gross,1962].

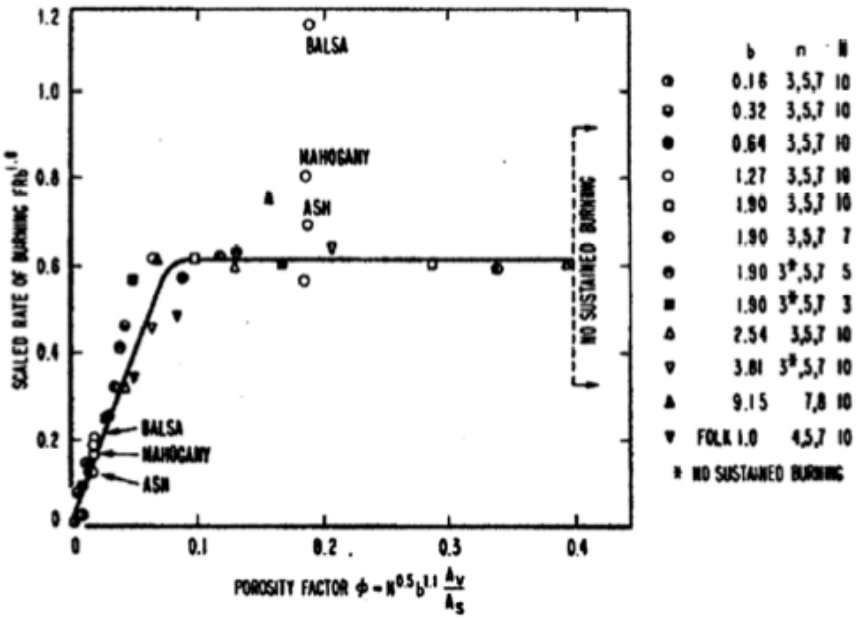
Όμως, η σημαντικότερη συμβολή αυτών των πειραμάτων ήταν η ποσοτικοποίηση της εσωτερικής ροής του αέρα διαμέσου του WCR μέσω της εμπειρικής παραμέτρου Φ, που ο Gross χαρακτήρισε ως 'αραιότητα του WCR'. Για να καθορίσει αυτή τη παράμετρο, όρισε τη συνολική εκτιθέμενη επιφάνεια των ξύλινων ράβδων πριν την ανάφλεξη A_s και την επιφάνεια των ανοιγμάτων κατά μήκος του επιπέδου επιφάνειας για κάθε πλευρά του τετραγωνικού πρίσματος A_v.

$$A_s = 2nb^2\left[N\left(2L-n\right)+n\right] \tag{2.1}$$

$$A_v = b^2\left(10-n\right)^2 \tag{2.2}$$

$$\Phi = \mathrm{N}^{0,5} b^{1.1} A_v / A_s \tag{2.3}$$

Ο Gross αναγνώρισε την ύπαρξη μίας κρίσιμης τιμής για την τιμή του Φ, κάτω από την οποία παρατηρείται ανεπαρκής ροή αερίων διαμέσου των ανοιγμάτων που έχει σαν αποτέλεσμα μειωμένη κορυφή στη καμπύλη του ρυθμού απώλειας μάζας. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων του Gross παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.4 στην οποία συμπεριλαμβάνονται και τα δεδομένα από τα πειράματα του Folk και εμφανίζονται ευκρινώς και τα 3 στάδια της καύσης που είχαν επισημανθεί και από τους δύο.



Σχήμα 2.4 Πειραματικά αποτελέσματα του Gross [Gross,1962].

Το 1970, οι Smith και Thomas πραγματοποίησαν μια στατιστική ανάλυση σε μια προσπάθεια να απομονώσουν τις επιδράσεις που είχε ξεχωριστά η κάθε σχεδιαστική παράμετρος του WCR [Smith & Thomas, 1970]. Αφού παρατηρήθηκε ότι η ταχύτητα των αερίων στο εσωτερικό του WCR διεπόταν από την άντωση και την αδράνεια των αερίων, χρησιμοποιήθηκε η μεταβλητή $A_v\sqrt{H}$, όπου H το ύψος του WCR , για να εκφραστεί ο ογκομετρικός ρυθμός της ροής των αερίων που κινούνται ανωστικά. Η προσπάθεια τους επικεντρώθηκε στην ανάλυση της σχέσης όπως αυτή φαίνεται στην εξίσωση 2.4:

$$r/\left(A_v\sqrt{H}\right)\infty A_v^{\,y}A_s^{\,x} \tag{2.4}$$

όπου r είναι ο ρυθμός καύσης.

Τελικά, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι υπάρχουν πάρα πολλές σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών για να μπορεί να διαχωριστεί με σιγουριά η επίδραση της κάθε σχεδιαστικής παραμέτρου στο ρυθμό καύσης του WCR. Η εμπειρική σχέση, εξίσωση 2.5, υπολογίζει το μέσο ρυθμό καύσης του WCR για μήκος ξύλινων ράβδων μεταξύ 30 και 200 εκατοστών.

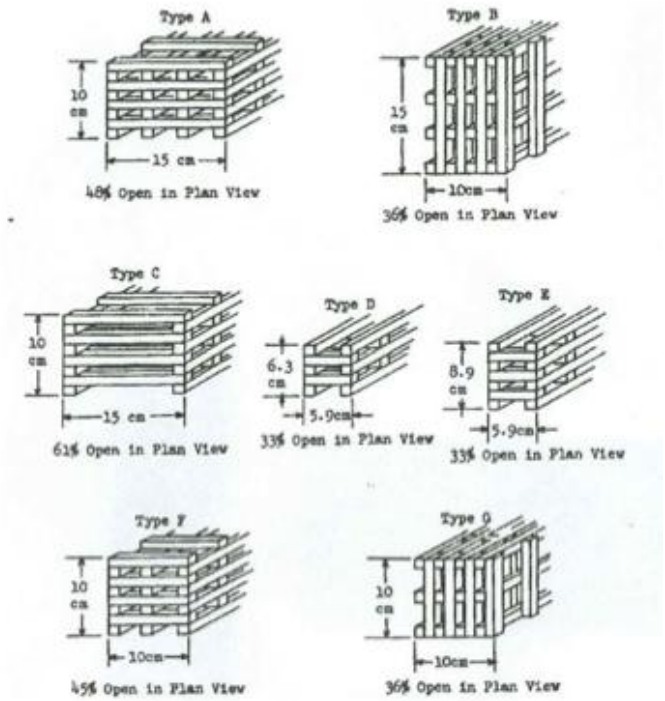
$$\frac{r}{\sqrt{A_v A_s Nb}} = 0,0017/\left(A_v A_s\right)^{0,052} \tag{2.5}$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι, σε προγενέστερη δημοσίευση, ο Thomas αναγνώρισε τη διαφορά μεταξύ φλογών εξαναγκασμένης συναγωγής όπως αυτές παράγονται από έναν καυστήρα αερίου (gas burner) και των φλογών ελεύθερης συναγωγής που παράγονται από την καύση ενός τυπικού WCR. Παρόλα αυτά, προσπάθησε να συσχετίσει το ύψος της φλόγας, τις διαστάσεις του μεταλλικού δοχείου που τοποθετείται το καύσιμο και το ρυθμό έγχυσης του καυσίμου. Έτσι, μέσα από μία αδιάστατη ανάλυση των εξισώσεων διατήρησης καθορίστηκε η συσχέτιση όπως φαίνεται στην εξίσωση 2.6 [Thomas, Webster & Raftery, 1961].

$$\frac{h_{\varphi\lambda\acute{o}\gamma\alpha\varsigma}}{d_{\delta o\chi\varepsilon\acute{\iota}o\upsilon}} \infty \frac{\dot{Q}}{d^5_{\delta o\chi\varepsilon\acute{\iota}o\upsilon}} \tag{2.6}$$

Το 1965, οι McCarter και Broido επικέντρωσαν τις προσπάθειές τους στον κύριο μηχανισμό της εξάπλωσης της φωτιάς στο εσωτερικό ενός WCR. Συγκεκριμένα, επιδίωξαν να κατανοήσουν τη σημασία της ακτινοβολούσας ενέργειας και της ενέργειας λόγω συναγωγής όταν ένα WCR φλέγεται. Για να το κάνουν αυτό, αναφέρθηκαν στα ευρήματα του Thomas και πιο συγκεκριμένα ότι ο ρυθμός καύσης επηρεάζεται από το ύψος της φλόγας πάνω από το WCR. Επεκτείνοντας αυτό το μοντέλο, ισχυρίστηκαν ότι η ακτινοβολία στο εσωτερικό της κατασκευής του WCR ήταν μία σημαντική παράμετρος που επηρέαζε το ρυθμό καύσης. Για να υποστηρίξουν την υπόθεση τους, επικεντρώθηκαν στη μέτρηση της ακτινοβολούμενης ενέργειας που εκλύεται από τα στοιχεία του WCR έξω από τη ζώνη της φλόγας.

Το είδος ξύλου που χρησιμοποιήθηκε στα συγκεκριμένα πειράματα ήταν έλατο (*western hemlock*). Σημαντική αναφορά πρέπει να γίνει στο γεγονός ότι χρησιμοποιήθηκαν επτά διαφορετικοί τρόποι τοποθέτησης των ξύλινων ράβδων σταθερής τετραγωνικής διατομής 1,3 εκατοστών που δομούσαν κάθε φορά το WCR. Οι υπόλοιπες σχεδιαστικές παράμετροι διέφεραν σε κάθε WCR. Αξίζει να σημειωθεί επίσης ότι, σε προηγούμενες μελέτες κύρια απαίτηση ήταν το ίσο μήκος όλων των ξύλινων ράβδων έτσι ώστε να σχηματιστεί ένα τετραγωνικό WCR. Στη συγκεκριμένη μελέτη όμως, χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα και μη τετραγωνικά WCR. Το μήκος των ξύλινων ράβδων, που βρίσκονταν σε διαδοχικές στρώσεις, ήταν ως εκ τούτου διαφορετικό. Ο συγκεκριμένος σχεδιασμός αποσκοπούσε στη μέτρηση της διάδοσης της φλόγας σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Στο Σχήμα 2.5 απεικονίζονται τα διαφορετικά WCR που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα [McCarter and Broido, 1965].



Σχήμα 2.5 Διάφορες διατάξεις για τα WCR που χρησιμοποίησαν οι McCarter και Broido [McCarter and Broido, 1965].

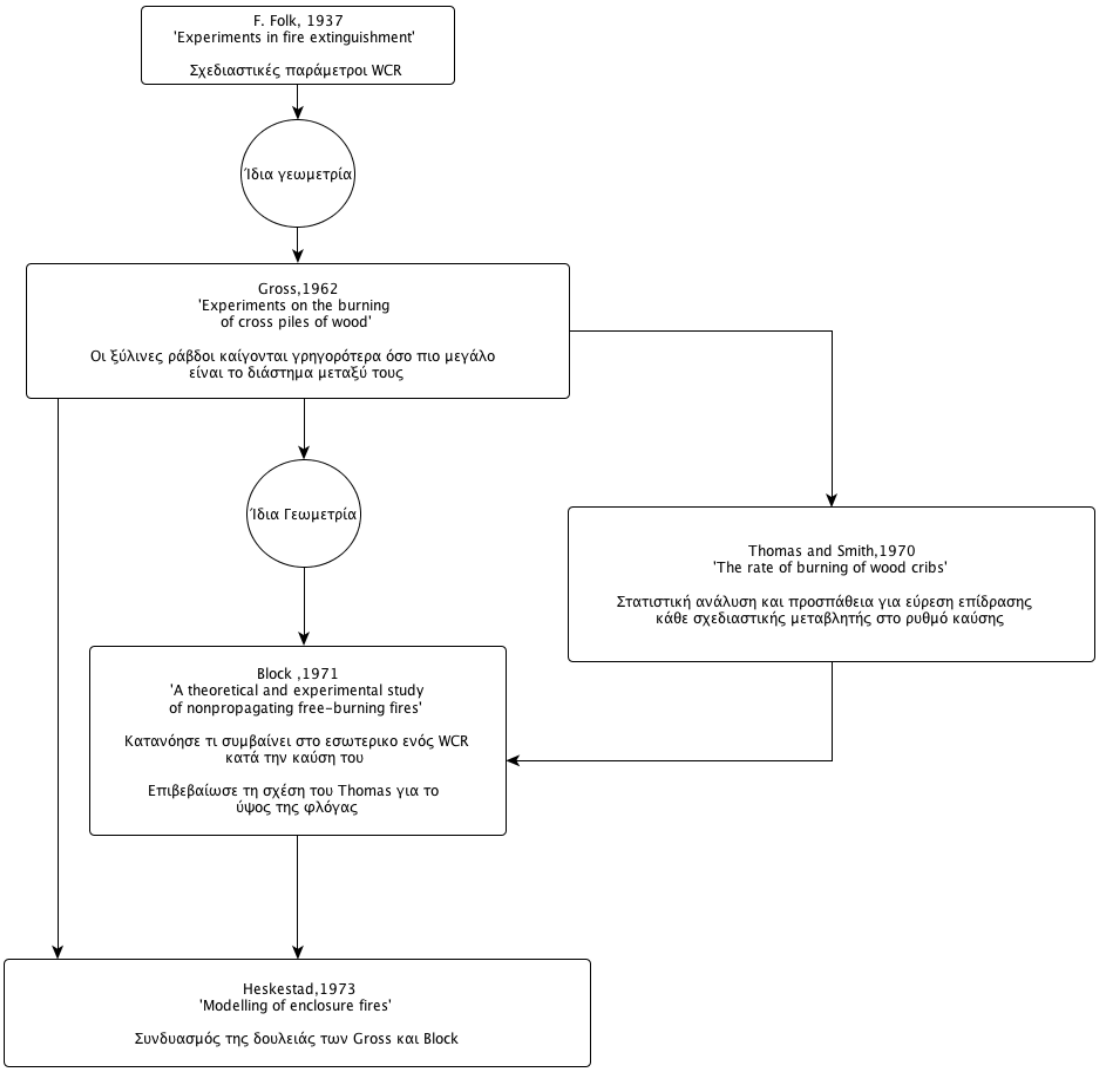
Το 1971, ο ερευνητής του πανεπιστημίου του Harvard, J.A. Block, προχώρησε στην ανάπτυξη μίας θεμελιώδους θεωρίας για το ρυθμό καύσης του WCR με σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης των βασικών σχεδιαστικών παραμέτρων του WCR στο ρυθμό απώλειας μάζας του WCR [Block, 1971]. Η κυρίως διαφορά με τις προηγούμενες έρευνες όμως είναι ότι ο Block εστιάστηκε στη κατανόηση του τι γίνεται στο εσωτερικό μέρος του WCR και όχι στο πάνω μέρος του. Θεώρησε ότι ο ρυθμός καύσης επηρεάζει το ύψος της φλόγας και όχι το αντίστροφο.

Για την έναυση της καύσης στο WCR στα πειράματά του, ο Block χρησιμοποίησε μία μικρή ποσότητα ακετόνης η οποία τοποθετήθηκε σε ένα μεταλλικό δοχείο κάτω από το WCR. Παρατήρησε ότι όσο το μεταλλικό δοχείο είναι λίγο μεγαλύτερο από το εμβαδό της βάσης του WCR, ο ρυθμός καύσης του WCR είναι ανεξάρτητος από το μέγεθος του μεταλλικού δοχείου που τοποθετείται το καύσιμο και ανεξάρτητο από το ποσό της ακετόνης που χρησιμοποιείται. Η δομή του WCR που χρησιμοποίησε ο Block ήταν ίδια με αυτή του Gross και το είδος ξύλου που χρησιμοποιήθηκε στις περισσότερες περιπτώσεις ήταν πεύκη (*Ponderosa Pine*).

Τα πειραματικά αποτελέσματα του Block επιβεβαίωσαν τα ευρήματα του Gross καθώς και την εμπειρική σχέση του Thomas για το ύψος της φλόγας. Όπως και ο Gross, έδειξε ότι η πυκνότητα στοίβαξης των ξύλινων ράβδων στο WCR επηρεάζει τον ειδικό ρυθμό καύσης του WCR. Για πυκνή στοίβαξη (densely-packed), ο ειδικός ρυθμός καύσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το ύψος του WCR και από τη πυκνότητα στοίβαξης, ενώ για αραιή στοίβαξη (loosely-packed) είναι ανεξάρτητος από αυτά. Ακόμη, ο Block βρήκε ότι η απόσταση μεταξύ του μεταλλικού δοχείου που τοποθετείται το καύσιμο και της κάτω επιφάνειας του WCR επηρέαζε το ρυθμός καύσης. Όσο αυτή αυξανόταν, αυξανόταν και ο ρυθμός καύσης. Όταν η απόσταση αυτή ξεπερνούσε το 1,5 εκατοστό, ο ρυθμός καύσης δεν επηρεαζόταν από περαιτέρω αύξηση της.

Το 1973, ο Gunnar Heskestad προσπάθησε να επεξεργαστεί περαιτέρω την εμπειρική παράμετρο Φ που είχε ορίσει ο Gross και η οποία διέφερε ελάχιστα σε σχέση με αυτή του Gross [Heskestad,1973]. Ακόμη, πρότεινε ότι για τη μελέτη ενός φαινομένου υπό κλίμακα θα πρέπει να υπάρξουν σχέσεις πέρα από τις σχέσεις που ίσχυαν μέχρι τότε και αφορούσαν μόνο τη γεωμετρία των WCR. Για να το κάνει αυτό συνδύασε τις έρευνες των Gross, Block και διάφορων άλλων. Τα πειράματα που πραγματοποίησε αφορούσαν δύο γεωμετρικές διατάξεις WCR όπου η μία ήταν διπλάσια σε μέγεθος από την άλλη. Διάφορα καύσιμα ερευνήθηκαν όπως WCR, αλκοόλη, παραφινέλαιο και διάφορα πλαστικά υλικά. Για τα πειράματά του, χρησιμοποίησε τη γεωμετρία από την εργασία του Tewarson (*A. Tewarson: Some observations on experimental fires in enclosures)* που είχε πραγματοποιηθεί στο ίδιο χρονικό διάστημα με αυτή του Heskestad.

Συγκεντρωτικά, ότι αναφέρθηκε παραπάνω σαν ιστορική αναδρομή για τιη μελέτη της καύσης WCR παρουσιάζεται στο διάγραμμα του Σχήματος 2.6.



Σχήμα 2.6 Ιστορική αναδρομή για τη μελέτη καύσης WCR.

2.3.Καύσιμα που χρησιμοποιούνται για την ανάφλεξη των WCR

Για την ανάφλεξη των WCR, τις περισσότερες φορές χρησιμοποιούνται υγρά καύσιμα. Συνήθως, όταν χρησιμοποιούνται στερεά καύσιμα για την ανάφλεξη των WCR, αυτά είναι εμποτισμένα με κάποιο υγρό καύσιμο. Τα υγρά καύσιμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέσο ανάφλεξης με τρεις τρόπους::

- Τοποθετούνται σε κάποιο μεταλλικό δοχείο κάτω από το WCR
- Τα WCR ψεκάζονται από το εκάστοτε υγρό καύσιμο που επιλέγεται
- Με τη χρήση καυστήρα

Συγκεντρωτικά, παρατίθεται ο παρακάτω Πίνακας 2.1 όπου περιλαμβάνει μελέτες στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν WCR ως κύριο καύσιμο και παρουσιάζεται ο τρόπος ανάφλεξης τους κάθε φορά:

Τίτλος Εργασίας	***Βιβλιογραφία***	***Καύσιμο που χρησιμοποιήθηκε για τη καύση των wood cribs***
Experiments in fire extinguishment	[F. Folk, 1931]	Το WCR αναφλέγεται λόγω ενός μεταλλικού δοχείου το οποίο περιείχε βενζίνη και βρίσκεται κάτω από το WC
Experiments on the burning of croos piles of wood	[D. Gross, 1962]	Το WCR αναφλέγεται λόγω ενός μεταλλικού δοχείου το οποίο περιείχε επτάνιο και βρίσκεται κάτω από το WC
A theoritical and experimental study of non-propagating free burning fires	[J.A. Block, 1971]	Το WCR αναφλέγεται λόγω ενός μεταλλικού δοχείου το οποίο περιείχε ακετόνη και βρίσκεται κάτω από το WC
Experimental study of the localized room fires	[Simo Hostikka et al., 2001]	Πραγματοποιήθηκαν δύο πειράματα με WCR. Και στα δύο το καύσιμο που χρησιμοποιήθηκε ήταν επτάνιο μέσα σε ένα κυκλικό μεταλλικό δοχείο. Στο 1ο πείραμα χρηισιμοποιήθηκε 1L επτανίου ενώ στο 2ο 0,7L.
Field model analysis and experimental assessment of fire severity and smoke movement in a partitioned and a non-partitioned dwelling unit	[K. Remesh, K. H. Tan, 2006]	Η ανάφλεξη των WCR πραγματοποιήθηκε με χρήση δάδας φωτιάς
Backdraft experiments in a small compartment	[H. Hayasaka et al., 2008]	Η ανάφλεξη των WCR πραγματοποιήθηκε με χρήση δάδας φωτιάς υγραερίου (LPG)

Design of a single-room heat release rate calorimeter for the characterization of fires in multi-suite residential dwellings project	[A. C. Bwalya, 2009]	Η ανάφλεξη των WCR πραγματοποιήθηκε με ένα τετραγωνικό καυστήρα προπανίου με ρυθμό παροχής καυσίμου 13L/min (19 kW) για 80 δευτερόλεπτα
Temperatures during fire tests on structure and its prediction according to Eurocodes	[F. Wald et al., 2009]	Η ταυτόχρονη ανάφλεξη των WCR πραγματοποιήθηκε με τη σύνδεση τους με σιδερένιος λεπτούς σωλήνες που ήταν γεμάτοι από ορυκτό μαλλί εμποτισμένο με παραφίνη
Numerical and experimental investigations of fire behavior due to polyurethane foam and wood cribs in a medium-sized residential room	[H.H. Saber et al., 2010]	Ενας τετραγωνικός καυστήρας προπανίου 19 kW χρησιμοποιήθηκε για 90 δευτερόλεπτα
Experimental investigation and numerical simulation of a furnished office fire	[Chien-Jung Chen et al., 2010]	Ένα λίτρο αιθανόλης τοποθετήθηκε σε ένα κυκλικό μεταλλικό δοχείο κάτω από το WCR
Large scale natural fire tests on protected engineered timber floor systems	[Tom Lennon et al., 2010]	Χρησιμοποιήθηκε 1,75 L παραφίνης το οποίο μοιράστηκε ισόποσα σε 6 λωρίδες ινών (fibre strips).
Fire simulation test and analysis of laminated bamboo frame building	[Yan Xiao and Jian Ma, 2012]	Το WCR ψεκάστηκε με 500 ml αιθανόλης καθαρότητας 100%

Πίνακας 2.1 Καύσιμα που χρησιμοποιήθηκαν για την καύση του WCR σε διαθέσιμες μελέτες.

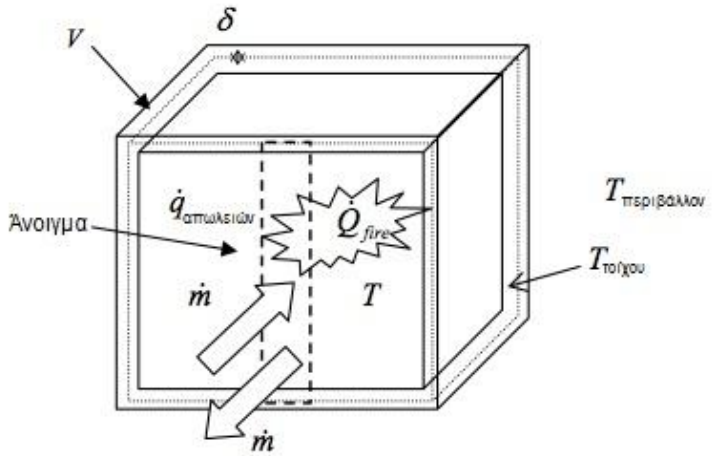
2.4.Συντελεστές κλίμακας και αδιαστατοποίηση

Οι αδερφοί Wright δεν θα είχαν καταφέρει τη πρώτη τους πτήση χωρίς τη χρήση αεροδυναμικής σήραγγας. Ακόμη και σήμερα, τα αεροσκάφη δεν θα μπορούσαν να σχεδιαστούν και να αναπτυχθούν χωρίς δοκιμές σε αεροδυναμική σήραγγα. Παρόλο που οι βασικές εξισώσεις της δυναμικής των στερεών έχουν καθιερωθεί εδώ και 200 χρόνια, ακόμη και τώρα δεν μπορούν να επιλυθούν πλήρως στους μεγαλύτερους υπολογιστές. Με τις δοκιμές σε αεροδυναμική σήραγγα μπορεί να ερευνηθεί η ροή γύρω από πολύπλοκα σχήματα σε μικρότερες γεωμετρικές κλίμακες κρατώντας σταθερό τον αριθμό Reynolds, ο οποίος ισούται με:

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho u l}{\mu} \qquad (1.7)$$

Αν και ο αριθμός Reynolds είναι επαρκής για να εξασφαλίσει την ομοιότητα μεταξύ του πρωτότυπου και του μοντέλου, πολλά φαινόμενα απαιτούν τη διατήρηση και άλλων παραμέτρων για να εξασφαλιστεί πλήρης ομοιότητα. Τα φαινόμενα φωτιάς εμπίπτουν σε αυτή τη κατηγορία. Αυτό όμως δεν αποκλείει τη χρήση μοντέλων κλίμακας ή αδιαστατοποίησης για φαινόμενα φωτιάς προκειμένου να βγουν χρήσιμα συμπεράσματα για την πραγματική κλίμακα [Quintiere, 2006].

Ενώ μπορεί να υπάρχουν σχέσεις που αφορούν πειράματα μικρής κλίμακας (small-scale experiments), δεν είναι απαραίτητο αυτές να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα σύστημα μεγαλύτερης κλίμακας. Η διαδικασία αυτή της αναπαραγωγής ενός συστήματος σε διαφορετική κλίμακα ονομάζεται μοντελοποίηση κλίμακας (scale modeling). Οι συντελεστές κλίμακας (scaling laws) που εφαρμόζονται σε διάφορα φαινόμενα φωτιάς προέρχονται από τις θεμελιώδεις διαφορικές εξισώσεις διατήρησης. Γενικά, σε ένα δωμάτιο φωτιάς (fire compartment), ισχύει η διατήρηση της ενέργειας γύρω από έναν όγκο ελέγχου. Αυτός ο όγκος ελέγχου περιλαμβάνει το εσωτερικό του δωματίου καθώς και το περιβάλλον γύρω από το δωμάτιο. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7, η παροχή αέρα που εισέρχεται μέσα στο δωμάτιο από το άνοιγμα είναι ίση με αυτή που βγαίνει από το άνοιγμα ($\dot{m}$) με τη συνθήκη ότι η ροή μάζας από το καιόμενο καύσιμο θεωρείται αμελητέα. δ είναι το πάχος των τοιχωμάτων του δωματίου και T είναι η θερμοκρασία των αερίων στο δωμάτιο. $\dot{Q}_{fire}$ είναι η θερμότητα που εκλύεται στο περιβάλλον λόγω της φωτιάς και $\dot{q}_{απωλειών}$ είναι η θερμότητα απωλειών από τον όγκο ελέγχου.



Σχήμα 2.7 Όγκος ελέγχου για τη διατήρηση της ενέργειας [Veloo, 2006].

Προκειμένου να γίνει η αδιαστατοποίηση, ο Quintiere [Quintiere, 2006] παρέθεσε τρεις τρόπους για να γίνει αυτό. Το θεώρημα των π (Buckingham pi theorem), τη μέθοδο με χρήση μερικών διαφορικών εξισώσεων και τη διαστατική ανάλυση (dimensional analysis). Σε αυτή την εργασία χρησιμοποιείται το θεώρημα των π (Buckingham pi theorem) επειδή αυτή είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιώντας το θεώρημα των π που αφορά τη μοντελοποίηση κλίμακας, δίνεται η δυνατότητα αδιαστατοποίησης των θεμελιωδών διαφορικών εξισώσεων διατήρησης που ισχύουν εισάγοντας τις παρακάτω κανονικοποιημένες παραμέτρους:

- Γεωμετρικό μήκος κλίμακας l
- Πάχος υλικού δ
- Χαρακτηριστική ταχύτητα v
- Χαρακτηριστικός χρόνος τ
- Αρχικές συνθήκες T_o, p_o, ρ_o
- Χαρακτηριστική απώλεια πίεσης (pressure defect) p_*

Στην εργασία του, ο Perricone για τη κατασκευή του WCR και τις κύριες σχεδιαστικές παραμέτρους του χρησιμοποιεί σχέσεις συναρτήσει του γεωμετρικού μήκους κλίμακας l. Με αυτό τον τρόπο, το μέγεθος του WCR μεταβάλλεται ανάλογα με την κλίμακα με βάση το εκάστοτε l. Οι σχέσεις που χρησιμοποιούνται παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2:

Σχεδιαστική Παράμετρος	Σχέση συναρτήσει του l
Πάχος ξύλινης ράβδου *b*	$b \propto l^{1/3}$
Μήκος ξύλινης ράβδου *L*	$L \propto l^{7/6}$
Αριθμός ξύλινων ράβδων σε κάθε στρώση *n*	$n \propto l^{5/6}$
Αριθμός στρώσεων *N*	$N \propto l^{1/3}$
Κενό μεταξύ διαδοχικών ξύλινων ράβδων *s*	$s \propto l^{1/3}$

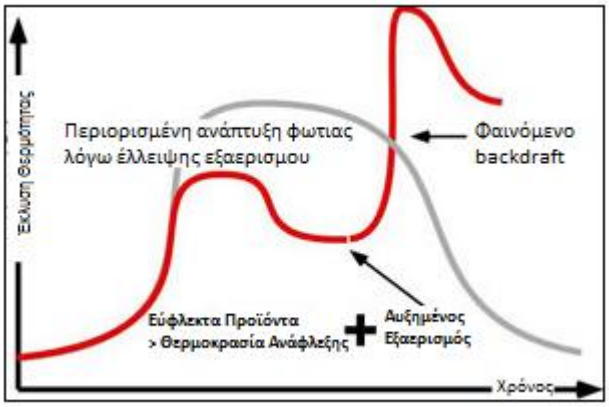
Πίνακας 2.2 Σχεδιαστικές παράμετροι του WCR συναρτήσει του l.

2.5.Διαθέσιμα πειράματα

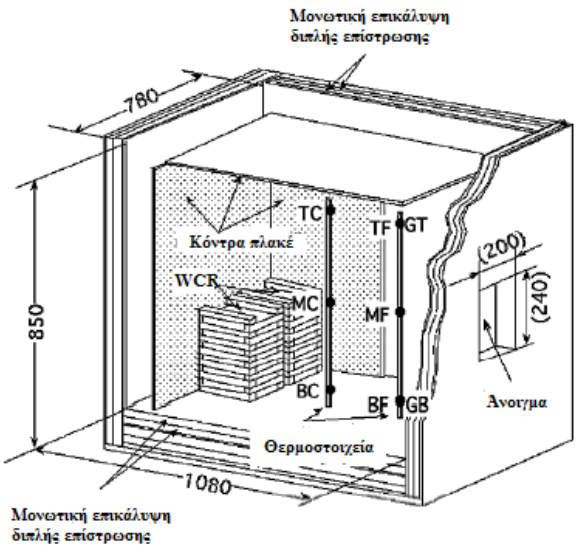
Τα WCR χρησιμοποιήθηκαν σε σημαντικό βαθμό ως καύσιμο στις μετέπειτα μελέτες που έγιναν και αφορούσαν τη πυροπροστασία ενός δωματίου και την αντοχή διάφορων δομικών υλικών σε περιπτώσεις πυρκαγιάς. Τα πειράματα έγιναν τόσο σε πραγματική κλίμακα (full-scale experiments) ,δηλαδή με διαστάσεις ενός πραγματικού δωματίου, όσο και σε μικρότερες κλίμακες. Σε ένα πείραμα πραγματικής κλίμακας, η εστίαση γίνεται στην αναπαραγωγή ενός πραγματικού σεναρίου φωτιάς (real fire scenario) το οποίο απαιτεί αρκετό προσωπικό, ένα μεγάλο χώρο καθώς και αρκετά χρήματα. Όμως, οι στόχοι ενός πειράματος πραγματικής κλίμακας είναι περιορισμένοι, η επαναληψιμότητα δεν είναι εφικτή λόγω της ασταθής φύσης της φωτιάς και είναι δύσκολο να βγουν ασφαλή συμπεράσματα λόγω των περιορισμένων πειραμάτων. Οι μικρότερες κλίμακες χωρίζονται σε πειράματα μικρής κλίμακας (small-scale experiments) και σε πειράματα μεσαίας κλίμακας (medium-scale experiments).

2.5.1. Πειράματα μικρής κλίμακας (small-scale experiments)

Το 2008, πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων μικρής κλίμακας (1/3 των πραγματικών διαστάσεων) προκειμένου να μελετηθεί το φαινόμενο εκτόνωσης της φωτιάς (*backdraft*) [Hayasaka et al., 2008]. Το φαινόμενο εκτόνωσης της φωτιάς περιγράφει την ανάφλεξη ή ταχεία καύση των θερμών προϊόντων πυρόλυσης και εύφλεκτων προϊόντων της καύσης κατά την αιφνίδια ανάμειξη τους με τον αέρα. Το φαινόμενο απεικονίζεται στην καμπύλη έκλυσης θερμότητας – χρόνου όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8. Οι διαστάσεις του δωματίου των πειραμάτων ήταν 0,78 m x 1,08 m με ύψος 0,85 m. Στο δωμάτιο υπήρχε ένα μικρό άνοιγμα στο μέσο του εμπρός τοίχου σε συνθήκες χαμηλού αερισμού (low ventilation conditions). Σε κάθε πείραμα, χρησιμοποιήθηκαν δύο μικρά WCR (συνολικού βάρους 2,2 kg) ως πυροθερμικό φορτίο και τοποθετήθηκαν στη δεξιά πίσω γωνία του δωματίου. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.9. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, αναγνωρίστηκε μία περίοδος πριν το φαινόμενο εκτόνωσης της φωτιάς στην οποία εύφλεκτα προϊόντα από τη καύση του WCR συγκεντρώνονται στην πάνω επιφάνεια του δωματίου και αναμειγνύονται με τον αέρα του περιβάλλοντος που εισέρχεται μέσω του ανοίγματος. Σαν αποτέλεσμα, δημιουργείται ένα εύφλεκτο αέριο μείγμα το οποίο, όταν αναφλέγεται, δημιουργείται μία πύρινη μπάλα (fire ball) η οποία βγαίνει έξω από το δωμάτιο διαμέσου του ανοίγματος. Κατά αυτό τον τρόπο πραγματοποιείται το φαινόμενο εκτόνωσης της φωτιάς.



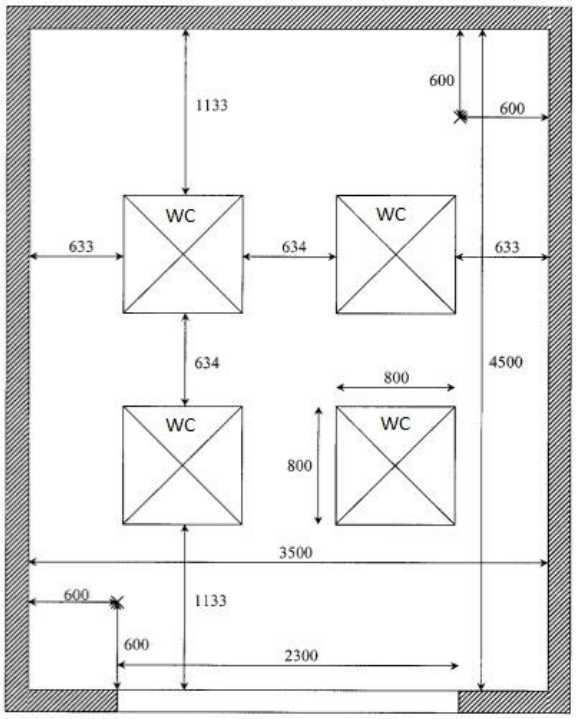
Σχήμα 2.8 Φαινόμενο εκτόνωσης της φωτιάς όπως απεικονίζεται στην καμπύλη έκλυσης θερμότητας – χρόνου.



Σχήμα 2.9 Πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε [Hayasaka et al., 2008]

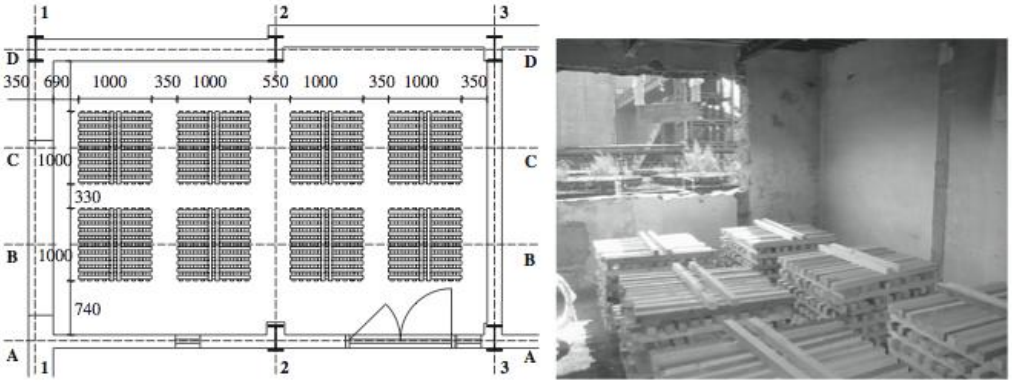
2.5.2. <u>Πειράματα πραγματικής κλίμακας (full-scale experiments)</u>

Το 2002 πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων φωτιάς πραγματικής κλίμακας που αφορούσαν τη μελέτη της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του δωματίου κατά τη διάρκεια πυρκαγιάς και τη συμπεριφορά των δομικών στοιχείων δωματίων ξύλινης κατασκευής (timber construction compartments) [Hakkarainen,2002]. Οι εσωτερικές διαστάσεις του δωματίου ήταν 4,5 m x 3,5 m με ύψος 2,5 m. Το άνοιγμα του δωματίου είχε πλάτος 2,3 m και ύψος 1,2 m. Το πυροθερμικό φορτίο (fire load) αποτελούταν από 4 WCR. Η τοποθέτηση των WCR μέσα στο δωμάτιο παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.10. Κάθε WCR αποτελούταν από δύο στρώσεις όπου κάθε στρώση είχε 10 ξύλινες ράβδους τετραγωνικής διατομής (38 mm x 38 mm) μήκους 800 mm. Το ποσοστό υγρασίας των ξύλινων ράβδων των WCR ήταν 10%. Τα πειραματικά αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τις θερμοκρασίες που προκύπτουν από τις παραμετρικές καμπύλες θερμοκρασίας-χρόνου του Ευρωκώδικα 1 που ήταν 300-500 ^{o}C μεγαλύτερες σε σχέση με τις πειραματικές μετρήσεις. Ακόμη, κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων παρατηρήθηκε ότι τα WCR που βρίσκονταν πιο κοντά στο άνοιγμα του δωματίου καίγονταν πιο γρήγορα σε σχέση με εκείνα που βρίσκονταν στο πίσω μέρος λόγω της έλλειψης οξυγόνου.



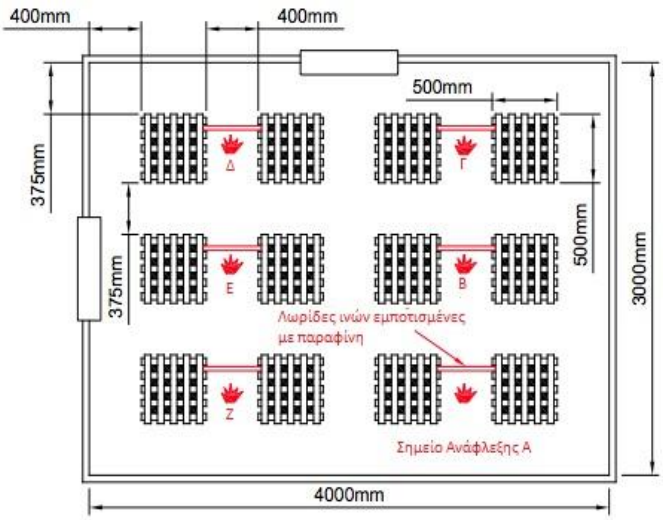
Σχήμα 2.10 Τοποθέτηση των WCR στα πειράματα της Hakkarainen [Hakkarainen,2002].

Το 2009 πραγματοποιήθηκε μια παρόμοια σειρά πειραμάτων φωτιάς πραγματικής κλίμακας όπου μετρήθηκαν οι θερμοκρασίες στο εσωτερικό του δωματίου κατά τη διάρκεια φωτιάς καθώς και η μετέπειτα σύγκρισή τους με αυτές που προκύπτουν από τη μεθοδολογία που προτείνει ο Ευρωκώδικας [Wald et al., 2009]. Οι διαστάσεις του δωματίου ήταν 3,8 m x 5,95 m και το ύψος του δωματίου ήταν 2,78 m. Το άνοιγμα του δωματίου είχε πλάτος 2,4 m και ύψος 1,4 m. Το πυροθερμικό φορτίο που χρησιμοποιήθηκε ήταν 8 WCR που το καθένα αποτελούταν από ξύλινες ράβδους τετραγωνικής διατομής (50 mm x 50 mm) μήκους ενός μέτρου με ποσοστό υγρασίας 13%. Η κατανομή των WCR μέσα στο δωμάτιο παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.11. Από τα πειραματικά αποτελέσματα, δεν παρατηρήθηκε σημαντική διαφορά σε σχέση με τις θερμοκρασίες που προκύπτουν με τη χρήση του Ευρωκώδικα. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων παρατηρήθηκε ότι η ανάπτυξη της φωτιάς επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την έλλειψη οξυγόνου μέσα στο δωμάτιο.



Σχήμα 2.11 Κατανομή WCR στο χώρο του διαμερίσματος [Wald et al., 2009]

Το 2010 πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων φωτιάς πραγματικής κλίμακας με σκοπό τον ελεγχο της αντοχής τριών διαφορετικών βιομηχανοποιημένων ξύλινων δοκών (engineered joists) που χρησιμοποιούνται στη κατασκευή ξύλινων δαπέδων [Lennon et al., 2010]. Η διαφορά στη δομή του δωματίου σε σχέση με τις προηγούμενες μελέτες είναι ότι στο δωμάτιο τώρα υπάρχουν δύο ανοίγματα (window openings). Οι διαστάσεις του δωματίου ήταν 4 m x 3 m και το ύψος του δωματίου ήταν 2,4 m. Το κάθε άνοιγμα του δωματίου είχε πλάτος 1 m και ύψος 0,75 m. Το πυροθερμικό φορτίο που χρησιμοποιήθηκε ήταν 12 WCR που το καθένα αποτελούταν από ξύλινες ράβδους τετραγωνικής διατομής (50 mm x 50 mm) μήκους 50 mm με ποσοστό υγρασίας 12%. Κάθε WCR αποτελούταν από 10 στρώσεις όπου κάθε στρώση είχε 5 ξύλινες ράβδους. Η διανομή των WCR μέσα στο δωμάτιο παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.12. Μετά το πέρας των πειραμάτων, προέκυψε ότι στις επιφάνειες των δοκών δαπέδου παρατηρήθηκαν θερμοκρασίες που ξεπερνούσαν τους 800 ^{o}C που είναι πολύ μεγαλύτερες από τη θεωρητική θερμοκρασία ανάφλεξης των υλικών των δοκών δαπέδου. Ακόμη, παρατηρήθηκε ότι οι δοκοί που βρισκόντουσαν κοντά στα ανοίγματα υπέστησαν τη μεγαλύτερη φθορά. Πάντως, το γενικό συμπέρασμα που προέκυψε ήταν ότι τα βιομηχανοποιημένα δάπεδα προσφέρουν την ίδια αντοχή σε περίπτωση πυρκαγιάς σε σχέση με τα παραδοσιακά ξύλινα δάπεδα με την προϋπόθεση ότι οι βιομηχανοποιημένες δοκοί αποτελούνται από επαρκή αριθμό σανίδων.



Σχήμα 2.12 Διάταξη WCR στο δωμάτιο [Lennon et al., 2010]

2.6. Υπολογιστικοί κώδικες Ρευστομηχανικής (Computational Fluid Dynamics-CFD) και μοντελοποίηση καύσης των wood crib

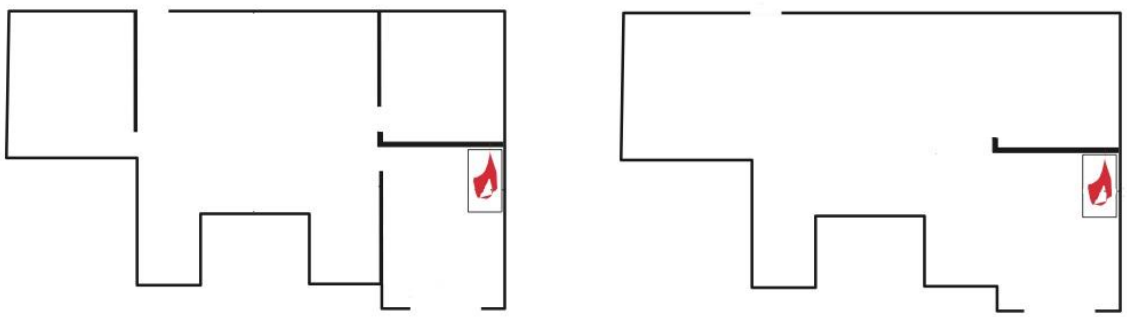
2.6.1. Εισαγωγή

Οι πειραματικές μετρήσεις και η υπολογιστική ανάλυση είναι δύο συμπληρωματικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται με σκοπό τη μελέτη της δυναμικής της φωτιάς σε πειράματα φωτιάς κλειστού χώρου (enclosure fire tests). Αυτές οι δύο μέθοδοι έχουν η κάθε μία τα δικά της προτερήματα αλλά και μειονεκτήματα. Παρόλα τα μειονεκτήματα των πειραμάτων πραγματικής κλίμακας, τα δεδομένα που προκύπτουν από αυτά μπορούν να συγκριθούν με εμπειρικές σχέσεις και με υπολογιστικά αποτελέσματα με στόχο την επικύρωση (validation) ή την βελτίωση του μοντέλου.

Μία προσομοίωση φωτιάς μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε από ένα γενικό κώδικα Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής είτε από κώδικες που επικεντρώνονται σε φωτιές διαμερισμάτων (compartment fires). Γενικοί CFD κώδικες που χρησιμοποιούνται είναι οι PHOENICS, ANSYS Fluent και openFOAM. Τα πιο συνηθισμένα CFD λογισμικά εργαλεία που ειδικεύονται για προσομοιώσεις φωτιάς είναι ο FDS, SmartFire, SOFIE, JASMINE και FireFoam. Η επικύρωση των CFD κωδίκων σε σχέση με πειραματικά δεδομένα δίνουν πληροφορίες για τις δυνατότητες του κάθε κώδικα για όσο το δυνατόν ακριβείς προλέψεις.

2.6.2. Διαθέσιμες μελέτες

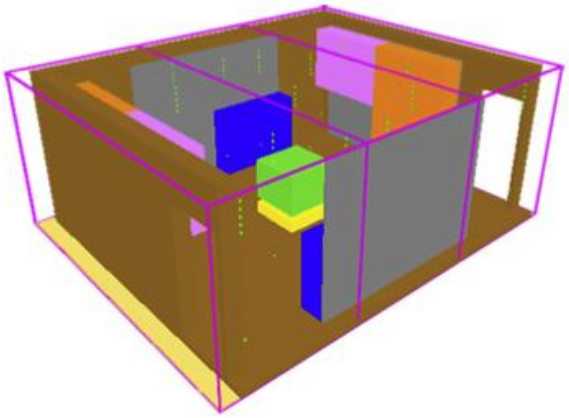
Το 2006 πραγματοποιήθηκε μια μελέτη για να διαπιστωθεί σε ποιο βαθμό επηρεάζουν τα διαχωριστικά τοιχώματα (partition walls) ενός διαμερίσματος (dwelling unit) την εξάπλωση του καπνού λόγω φωτιάς μέσα στο χώρο [Remesh et al., 2006]. Έτσι χρησιμοποιήθηκαν δύο διατάξεις ίδιου εμβαδού (12,65 m^2) όπου στη μία υπήρχαν διαχωριστικά τοιχώματα μέσα στο διαμέρισμα ενώ στην άλλη όχι. Το πυροθερμικό φορτίο που χρησιμοποιήθηκε και στις δύο περιπτώσεις ήταν κοινό και αποτελούταν από ένα WCR πυκνότητας περίπου 500 kg/m^3 και ποσοστού υγρασίας 10-15%. Οι συνολικές διαστάσεις του WCR ήταν 1,3 m x 0,5 m και αποτελούταν από 20 στρώσεις (layers) ενώ η τοποθέτησή του μέσα στο χώρο αντίστοιχα για κάθε περίπτωση φαίνεται στο Σχήμα 2.13. Η απόσταση των ξύλινων ράβδων, τετραγωνικής διατομής 39 mm, στο WCR είναι 0,075 m και η κατασκευή του WCR παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.14. Για την υπολογιστική μελέτη χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας FDS V4.0.5. Η προσομοίωση του WCR στην υπολογιστική μελέτη και στις δύο περιπτώσεις έγινε τοποθετώντας στη ίδια θέση με την πειραματική διάταξη ένα ορθογωνικό στερεό ύψους 0,95 m και ορίστηκε ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας του ορθογωνικού στερεού συναρτήσει του χρόνου, όπως αυτός καταγράφηκε στο WCR από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν. Συγκρίνοντας τα υπολογιστικά αποτελέσματα με τα πειραματικά, για τη διάταξη όπου υπάρχουν διαχωριστικά τοιχώματα διαπιστώθηκε ότι οι θερμοκρασίες των αερίων που προέκυψαν υπολογιστικά ήταν αρκετά μεγαλύτερες σε σχέση με τις πειραματικές μετρήσεις. Στη διάταξη όπου δεν υπάρχουν διαχωριστικά τοιχώματα, προκύπτει καλύτερη σχέση των υπολογιστικών και πειραματικών δεδομένων όσο αφορά τις θερμοκρασίες. Αξίζει να σημειωθεί ότι, η θερμοκρασία στα ανώτερα στρώματα του χώρου στον οποίο βρίσκεται το WCR ήταν μεγαλύτερη στη περίπτωση που υπήρχαν διαχωριστικά τοιχώματα.



Σχήμα 2.13 Απεικόνιση δύο διατάξεων (αριστερά αυτή που υπάρχουν διαχωριστικά τοιχώματα ενώ δεξιά αυτή που δεν υπάρχουν) [Remesh et al., 2006].

Σχήμα 2.14 Διάταξη του WCR που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα [Remesh et al., 2006].

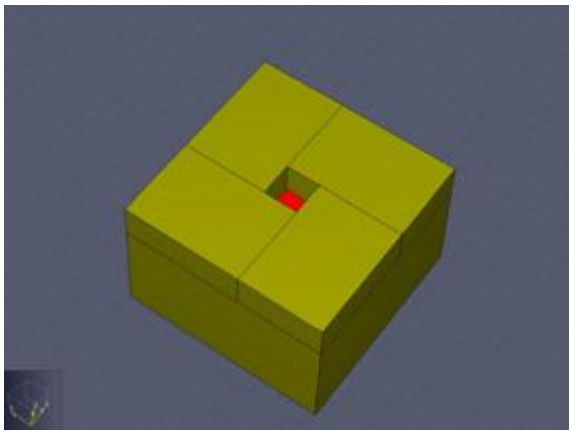
Το 2010 πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων φωτιάς σε δωμάτιο πραγματικής κλίμακας (full scale) με σκοπό να μελετηθεί η εξάπλωση της φωτιάς καθώς και οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του δωματίου κατά τη διάρκεια του φαινομένου [Chen et al. , 2010]. Επιπρόσθετα, ακολούθησε προσομοίωση του πειράματος στον κώδικα FDS (έκδοση 5.2.3) με σκοπό τη σύγκριση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων με τα πειραματικά δεδομένα για να διαπιστωθεί η ακρίβεια των υπολογιστικών προσομοιώσεων. Το μοντέλο προσομοίωσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.15. Οι διαστάσεις του δωματίου ήταν 5,7 m x 4,7 m και το ύψος του δωματίου ήταν 2,4 m. Το πυροθερμικό φορτίο αποτελούταν από ένα WCR το οποίο τοποθετήθηκε στο κέντρο του δωματίου και αποτελούταν από ξύλινες ράβδους ορθογωνικής διατομής (2,4 cm x 3,6 cm) μήκους 90 cm. Για την ανάφλεξη του WCR χρησιμοποιήθηκε ένα λίτρο αιθανόλης το οποίο τοποθετήθηκε σε ένα στρογγυλό μεταλλικό δοχείο κάτω από το WCR. Στην υπολογιστική προσομοίωση, το WCR αντικαταστήθηκε με ένα ορθογωνικό στερεό στο οποίο ορίστηκε ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας συναρτήσει του χρόνου, όπως αυτός καταγράφηκε στο WCR από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν. Κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης της φωτιάς, τα πειραματικά αποτελέσματα συμπίπτουν με τις αριθμητικές προλέξεις. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι ιδιότητες των υλικών είναι σημαντικοί παράγοντες στα υπολογιστικά αποτελέσματα. Όσο για τις θερμοκρασίες στα υψηλά στρώματα που προέκυψαν υπολογιστικά ήταν κοντά στις τιμές των πειραματικών, όμως ήταν γενικά ψηλότερες. Στα μεσαία και χαμηλά στρώματα, οι θερμοκρασίες διέφεραν κατά πολύ. Ας σημειωθεί ότι, θέτοντας ένα κατώτερο όριο οξυγόνου, ο συνολικός ρυθμός έκλυσης θερμότητας που προκύπτει υπολογιστικά είναι πιο κοντά στη πειραματική τιμή.



Σχήμα 2.15 Μοντέλο προσομοίωσης του δωματίου [Chen et al. , 2010].

Το 2012, μια άλλη μελέτη έγινε σχετικά με την πυραντοχή πλαστικοποιημένων μπαμπού (laminated bamboo) που χρησιμοποιούνται ως πλαίσια σε τοίχους κτιρίων [Xiao et al., 2012]. Για αυτό το σκοπό, κατασκευάστηκε ένα δωμάτιο του οποίου τα τοιχώματα αποτελούταν από πλαστικοποιημένα μπαμπού, υλικό θερμομόνωσης και από γυψοσανίδες. Το δωμάτιο είχε διαστάσεις 3,66 m x 2,44 m και το ύψος του ήταν 2,8 m. Ως πυροθερμικό φορτίο χρησιμοποιήθηκε ένα WCR το οποίο αποτελούταν από 20 στρώσεις ξύλινων ράβδων, όπου κάθε στρώση αποτελούταν από 10 ξύλινες ράβδους ορθογωνικής διατομής (80 mm x 40 mm) μήκους 1,2 mm. Η κατασκευή του WCR παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.16. Στην αρχή του πειράματος, το WCR ψεκάστηκε με 500 ml αιθανόλης καθαρότητας 100% για να επιτευχθεί η ανάφλεξή του. Στη συνέχεια, ακολούθησε προσομοίωση του πειράματος στον κώδικα FDS με σκοπό τη περαιτέρω μελέτη της αντοχής του υλικού. Συγκρίνοντας τα πειραματικά αποτελέσματα με τα υπολογιστικά, προκύπτει ότι υπάρχει απόκλιση 10% μεταξύ των αποτελεσμάτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι, το WCR τοποθετήθηκε στη μέση του δωματίου και στον FDS παρουσιάστηκε ως ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο στη κορυφή του οποίου τοποθετήθηκε η πηγή έκλυσης θερμότητας (fire source), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.17. Ακόμη, ορίζεται η ισοδύναμη πυκνότητα του WCR που προκύπτει από το πηλίκο της πυκνότητας του ξύλου που χρησιμοποιήθηκε προς το συνολικό όγκο του WCR. Με αυτό τον τρόπο, υπολογίζεται μία μικρότερη πυκνότητα παίρνοντας υπόψη τα κενά που υπάρχουν μεταξύ των ξύλινων ράβδων.

Σχήμα 2.16 Διάταξη του WCR που χρησιμοποιήθηκε [Xiao et al., 2012].



Σχήμα 2.17 Μοντέλο προσομοίωσης του WCR [Xiao et al., 2012].

2.7.Επίλογος

Η χρήση των WCR ως στερεό καύσιμο σε πειράματα φωτιάς ξεκίνησε το 1931. Παρά το γεγονός ότι έχει περάσει σχεδόν ένας αιώνας μέχρι τότε, τα WCR χρησιμοποιούνται ακόμη και σήμερα σε αρκετά πειράματα καθώς και σε υπολογιστικές προσομοιώσεις φωτιάς. Αυτό έγκειται στο γεγονός ότι σε πολλές περιπτώσεις φωτιάς το ξύλινο πυροθερμικό φορτίο αποτελεί ένα σημαντικό μέρος του συνολικού πυροθερμικού φορτίου ενός δωματίου εξαιτίας του γεγονότος ότι το ξύλο αποτελεί βασικό δομικό υλικό. Επιπροσθέτως, τα WCR τοποθετούνται εύκολα και η διάταξή τους μπορεί να επαναλαμβάνεται χωρίς ιδιαίτερη δυσκολία. Ένας ακόμη θετικός παράγοντας για τα WCR είναι η ακρίβεια γιατί γνωρίζεις επακριβώς πόσο καύσιμο έχει τοποθετηθεί στη πειραματική διάταξη. Ακόμη, αναλύθηκε ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η κατασκευή δωματίων φωτιάς υπό κλίμακα με στόχο την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για δωμάτια πραγματικής κλίμακας. Για τους παραπάνω λόγους είναι σημαντικό να μελετηθεί τόσο πειραματικά όσο και υπολογιστικά ο τρόπος που συμπεριφέρονται τα WCR σε συνθήκες φωτιάς. Για να πραγματοποιηθεί αυτό, είναι σημαντικό να γνωρίζουμε τις ιδιότητες του ξύλου που αποτελεί το WCR, το ποσοστό υγρασίας του, τα διάκενα μεταξύ των ξύλινων ράβδων και τη διάταξη που τοποθετούνται οι δοκοί.

Η σωστή προσομοίωση ενός WCR προσφέρει πιο ακριβείς προλέξεις. Οι δυσκολίες που υπάρχουν είναι ότι για τη προσομοίωση σε CFD κώδικες δεν υπάρχει ενιαία μεθοδολογία. Είναι αναγκαίο να μπορεί να διασφαλιστεί η ακρίβεια προσομοίωσης τους καθώς αποτελούν το βασικό πυροθερμικό φορτίο. Επίσης, πολλές φορές δεν υπάρχουν διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα για το ρυθμό έκλυσης θερμότητας του WCR. Για το λόγο αυτό, υπάρχουν και μέθοδοι που προσομοιώνεται η καύση τους ορίζοντας τις κινητικές παραμέτρους καύσης των ξύλων που αποτελεί το WCR.

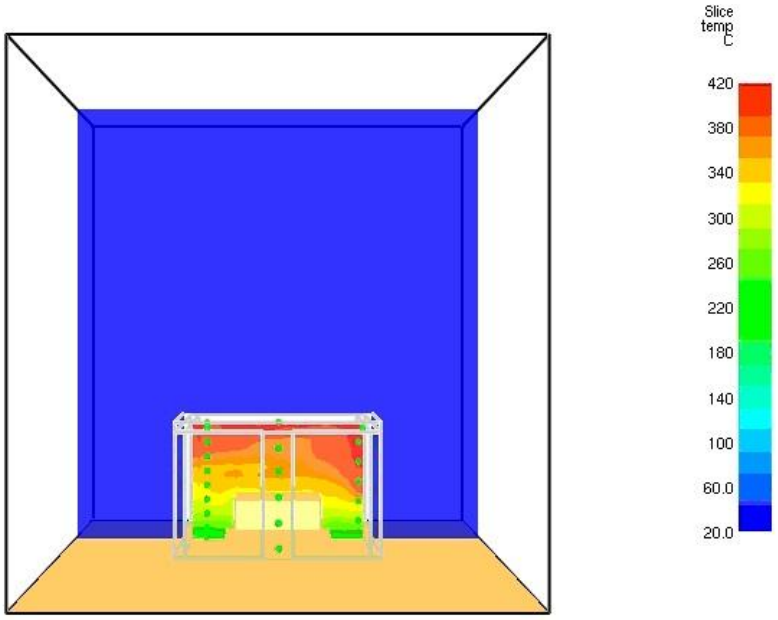
Σε πολλές περιπτώσεις, η προσομοίωση φωτιάς σε κτίρια με χρήση μόνο της μεθοδολογίας του Ευρωκώδικα δεν είναι αρκετή. Για αυτό είναι σημαντικό να δοθεί έμφαση στην υπολογιστική προσομοίωση των WCR, ένα διαδεδομένα πυροθερμικό φορτίο που χρησιμοποιείται σε πειράματα φωτιάς σε διαμερίσματα κάθε κλίμακας. Στο επόμενο κεφάλαιο λοιπόν, θα δοθεί έμφαση στα WCR και πως μπορεί να προσομοιωθεί η καύση τους.

3. Κώδικας Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής FDS

3.1. Εισαγωγή

Ο FDS είναι ένας κώδικας Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (Computational Fluid Dynamics - CFD) που υπολογίζει τα μεγέθη της ροής ρευστού που οφείλονται στην ύπαρξη φωτιάς. Αναπτύχθηκε από το NIST (National Institute of Standards and Technology) σε συνεργασία με το τεχνολογικό ερευνητικό κέντρο VTT της Φινλανδίας. Η έκδοση που χρησιμοποιείται είναι η FDS5 5.5.1. Στο κώδικα επιλύονται αριθμητικά οι εξισώσεις Navier-Stokes, κατάλληλα διαμορφωμένες για θερμικές ροές χαμηλών ταχυτήτων[1], με έμφαση στη παραγωγή καπνού και τη μεταφορά θερμότητας λόγω φωτιάς. Για την αριθμητική προσέγγιση των μερικών παραγώγων των εξισώσεων διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών. Η λύση ανανεώνεται χρονικά στο υπολογιστικό χωρίο, το οποίο διακριτοποιείται χρησιμοποιώντας τρισδιάστατο, ορθογωνικό πλέγμα. Για τον υπολογισμό της θερμικής ακτινοβολίας χρησιμοποιείται μια μέθοδος πεπερασμένου όγκου (Finite Volume Method – FVM) στο ίδιο πλέγμα στο οποίο γίνεται και η επίλυση της ροής.

Το Smokeview είναι ένα συνοδευτικό πρόγραμμα του κώδικα FDS που χρησιμοποιείται για την απεικόνιση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων. Δίνεται η δυνατότητα μέσα από το Smokeview να οπτικοποιηθεί η φωτιά και η αιθάλη μέσα στο υπολογιστικό χωρίο. Ακόμη, μπορεί να οπτικοποιήσει τη θερμοκρασία στα τοιχώματα και το πεδίο θερμοκρασιών σε οποιαδήποτε διατομή στο χώρο (Σχήμα 3.1). Ο προσδιορισμός της θέσης αυτής της διατομής αποτελεί είσοδο για τον κώδικα FDS. Επίσης, χρησιμοποιούνται έγχρωμα διανύσματα προκειμένου να οπτικοποιηθούν πληροφορίες για τα αέρια, όπως η ταχύτητά τους. Ας σημειωθεί ότι χρησιμοποιείται η έκδοση 5.6 για το συγκεκριμένο πρόγραμμα.



Σχήμα 3.1 Οπτικοποίηση του πεδίου θερμοκρασιών σε συγκεκριμένη διατομή κατά τον άξονα y με τη χρήση του προγράμματος Smokeview (Εκδοση 5.6).

[1] Αριθμός Mach μικρότερος από 0,3 [Rehm and Baum, 1978].

Στον κώδικα FDS υπολογίζονται η θερμοκρασία, η πυκνότητα, η πίεση, η ταχύτητα και η χημική σύσταση σε κάθε κελί του πλέγματος για κάθε χρονικό βήμα. Τυπικές ποσότητες που υπολογίζονται τόσο στην αέρια όσο και στη στερεά φάση είναι:

- Θερμοκρασία (αέριων και στερεών)
- Ταχύτητα
- Συγκεντρώσεις (υδρατμός, CO_2, CO, N_2)
- Συγκέντρωση αιθάλης
- Πίεση
- Κλάσμα μείγματος
- Πυκνότητα
- Ροή θερμότητας
- Ρυθμός καύσης
- Συνολικός ρυθμός έκλυσης θερμότητας

3.2. Θεμελιώδεις εξισώσεις

3.2.1. Εξίσωση διατήρησης μάζας

Οι θεμελιώδεις εξισώσεις διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας που επιλύονται στο κώδικα FDS παρουσιάζονται παρακάτω.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{u} = \dot{m}_b''' \tag{3.1}$$

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

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

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

3.2.2. Εξίσωση διατήρησης ορμής

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

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

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

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

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

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

3.2.3. Εξίσωση διατήρησης ενέργειας

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

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

$$\vec{q}''=-k\nabla T-\sum_a h_a\rho D_\alpha\nabla \mathrm{Y}_\alpha+\vec{q}_r'' \tag{3.8}$$

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

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

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

3.2.4. Καταστατική εξίσωση τέλειου αερίου

$$p=\frac{\rho RT}{W} \tag{3.10}$$

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

$$h = \int_{T_o}^{T} C_p(T)dT \tag{3.11}$$

3.3.Μέθοδος προσομοίωσης μεγάλων δινών (Large Eddy Simulation – LES)

Δυστυχώς υπάρχει ασάφεια στον ορισμό της τύρβης και ο ορισμός κάθε φορά διαφέρει ανάλογα με τη σκοπιά που εξετάζεται. Ένας πληρέστερος και εκτενής ορισμός δίνεται από τον Bradshaw κατά τον οποίο:

Τύρβη είναι μία τρισδιάστατη χρονικά μεταβαλλόμενη ροή στην οποία η έκταση των δινοσωλήνων προκαλεί διαταραχές ταχύτητας σε όλες τις συχνότητες μεταξύ ελάχιστης που καθορίζεται από τις οριακές συνθήκες και μέγιστης που καθορίζεται από τη συνεκτικότητα του ρευστού.

Ο παραπάνω ορισμός προκύπτει από το μηχανισμό μετάπτωσης της διαταραχής από μία ορισμένη συχνότητα (οριακή συνθήκη) στις συχνότητες του φάσματος κατά τη διαδικασία του 'σπασίματος' της αρχικής διαταραχής και μεταφοράς της ενέργειας της διαταραχής στις υψηλές συχνότητες όπου μέσω απορροφήσεως (λόγω συνεκτικότητας του ρευστού) μετατρέπεται σε θερμότητα [Μπεργελές, 2006].

Αν αποδεχθεί κανείς την υπόθεση ότι η λεπτομερής κίνηση μιας τυρβώδους ροής χαρακτηρίζεται από τις εξισώσεις Navier-Stokes, τότε οι θεμελιώδεις εξισώσεις της τύρβης μπορούν να θεωρηθούν γνωστές και με αυτόν τον τρόπο να αποτελέσουν τη βάση για οποιαδήποτε στατιστική θεωρία για τη περιγραφή του τυρβώδους πεδίου [Schiestel, 2005].

Η βασική ιδέα πίσω από τη μέθοδο Προσομοίωσης Μεγάλων Δινών (Large Eddy Simulation, LES) είναι ότι οι τυρβώδεις δίνες, που είναι υπεύθυνες για την περισσότερη μεγάλης κλίμακας κίνηση, είναι αρκετά μεγάλες έτσι ώστε να επιλυθούν με ικανοποιητική ακρίβεια από τις εξισώσεις της μηχανικής των ρευστών. Απώτερος σκοπός είναι η κίνηση μιας δίνης μικρής κλίμακας να προσεγγιστεί από κάποια κατάλληλα μοντέλα, που θα πρέπει επιβεβαιωθούν και πειραματικά. Η ανάπτυξη της μεθόδου LES προέρχεται από τη προσπάθεια πρόβλεψης των ατμοσφαιρικών ροών από τη δεκαετία του 1960 και χρησιμοποιείται και στο κώδικα FDS [Yeoh, 2009].

Σύμφωνα με τον Reynolds [Reynolds, 1990], ο στόχος της μεθόδου LES είναι να υπολογιστούν οι τρισδιάστατες, χρονικά εξαρτημένες μεταβλητές που αφορούν τη κίνηση μεγάλης κλίμακας (ευθύνονται για τη στοιχειώδη μεταφορά) χρησιμοποιώντας ένα απλούστερο μοντέλο για μικρότερες κλίμακες. Η μέθοδος LES είναι χρήσιμη στη μελέτη της τύρβης για μεγάλο αριθμό Reynolds, στην εξέλιξη των μοντέλων τύρβης, και στην πρόβλεψη ροών σε απαιτητικές περιπτώσεις όπου απλούστερες προσεγγίσεις είναι ανεπαρκείς [Grinstein, 2007].

3.4.Η εξίσωση θερμότητας στο στερεό

Η μονοδιάστατη εξίσωση αγωγής θερμότητας, για την εκτίμηση της θερμοκρασίας του στερεού τοιχώματος $T_s\left(x,t\right)$ εφαρμόζεται κατά τη διεύθυνση του άξονα x μέσα στο στερεό:

$$\rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} + \dot{q}_s''' \tag{3.12}$$

όπου για τις μέσες φυσικές ιδιότητες του υλικού k_s, ρ_s και c_s γίνεται αναφορά στην ενότητα 3.4.1. Ο όρος πηγής, $\dot{q}_s'''$, αποτελείται από δύο συνισταμένες, αυτή των χημικών αντιδράσεων και αυτή της απορρόφησης ακτινοβολίας:

$$\dot{q}_s''' = \dot{q}_{s,c}''' + \dot{q}_{s,r}''' \tag{3.13}$$

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

3.4.1.Θερμικές ιδιότητες δομικών υλικών

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

$$k_s = \sum_{\alpha=1}^{\mathrm{N}_m} X_\alpha k_{s,\alpha} \quad \text{και} \quad c_s = \frac{\sum_{\alpha=1}^{\mathrm{N}_m} \rho_{s,\alpha} c_{s,\alpha}}{\rho_s} \tag{3.14}$$

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

$$\rho_{s,\alpha} = \rho_s Y_a \tag{3.15}$$

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

$$\rho_s = \sum_{\alpha=1}^{\mathrm{N}_m} \rho_{s,\alpha} \tag{3.16}$$

X_α είναι το κλάσμα όγκου του κάθε στοιχείου a:

$$X_\alpha = \frac{\rho_{s,\alpha}}{\rho_a} \Bigg/ \sum_{\alpha'=1}^{\mathrm{N}_m} \frac{\rho_{s,\alpha'}}{\rho_{a'}} \tag{3.17}$$

όπου ρ_a είναι η πυκνότητα του υλικού a στην αρχική του μορφή. Στερεά που αποτελούνται από πολλά υλικά ορίζονται προσδιορίζοντας το κλάσμα μάζας, Y_a, και την πυκνότητα, ρ_a, του κάθε στοιχείου του σύνθετου υλικού.

3.4.2. Ροή θερμότητας στο στερεό λόγω ακτινοβολίας

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

$$\dot{q}_r''' = \dot{q}_{r,in}''' - \dot{q}_{r,out}''' \tag{3.18}$$

όπου για την κάθε συνιστώσα ισχύει:

$$\dot{q}_{r,in}''' = \varepsilon \int_{s' \cdot n_w < 0} I_W\left(s'\right)\left|s' \cdot n_w\right| \partial\Omega \tag{3.19}$$

$$\dot{q}_{r,out}''' = \varepsilon \sigma \Gamma_W^4 \tag{3.20}$$

Παρόλα αυτά, πολλά κοινά υλικά δεν έχουν άπειρο οπτικό πάχος. Αντιθέτως, η ακτινοβολία διεισδύει στο κάθε υλικό σε ένα συγκεκριμένο βάθος. Η μεταφορά της ακτινοβολίας μέσα στο στερεό (ή υγρό) μπορεί να περιγραφεί ως όρος πηγής στην Εξίσωση 3.12. Στον κώδικα FDS, ένα μοντέλο 'δύο ροών' , που βασίζεται στη προσέγγιση των Schuster-Schwarzschild [Siegel and Howell, 2002], χρησιμοποιείται στο οποίο γίνεται η υπόθεση ότι η ένταση της ακτινοβολίας είναι σταθερή μέσα στο 'εμπρός' και 'πίσω' ημισφαίριο. Η εξίσωση μεταφοράς για την ένταση κατά την 'εμπρός' κατεύθυνση είναι:

$$\frac{1}{2}\frac{dI^+\left(x\right)}{dx} = \kappa_s\left(I_b - I^+\left(x\right)\right) \tag{3.21}$$

όπου x είναι η απόσταση από την επιφάνεια του υλικού, κ_s ο συντελεστής απορρόφησης (absorption coefficient), I_b είναι η ένταση της ακτινοβολίας από μέλαν σώμα και σ ο συντελεστής διασποράς:

$$\kappa_s = \sum_{a=1}^{N_m} X_a \kappa_{s,a} \tag{3.22}$$

Μία αντίστοιχη εξίσωση μπορεί να δοθεί για την 'πίσω' κατεύθυνση. Πολλαπλασιάζοντας την Εξίσωση 3.21 με τον αριθμό π προκύπτει η 'εμπρός' θερμοροή στο εσωτερικό του υλικού λόγω ακτινοβολίας:

$$\frac{1}{2}\frac{\partial \dot{q}_r^{\,+}\left(x\right)}{\partial x} = \kappa_s\left(\sigma \Gamma_s^4 - \dot{q}_r^+\left(x\right)\right) \tag{1.23}$$

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

$$\dot{q}_r^{\,+}\left(0\right) = \dot{q}_{r,in}'' + \left(1-\varepsilon\right)\dot{q}_r^{\,-}\left(0\right) \tag{3.24}$$

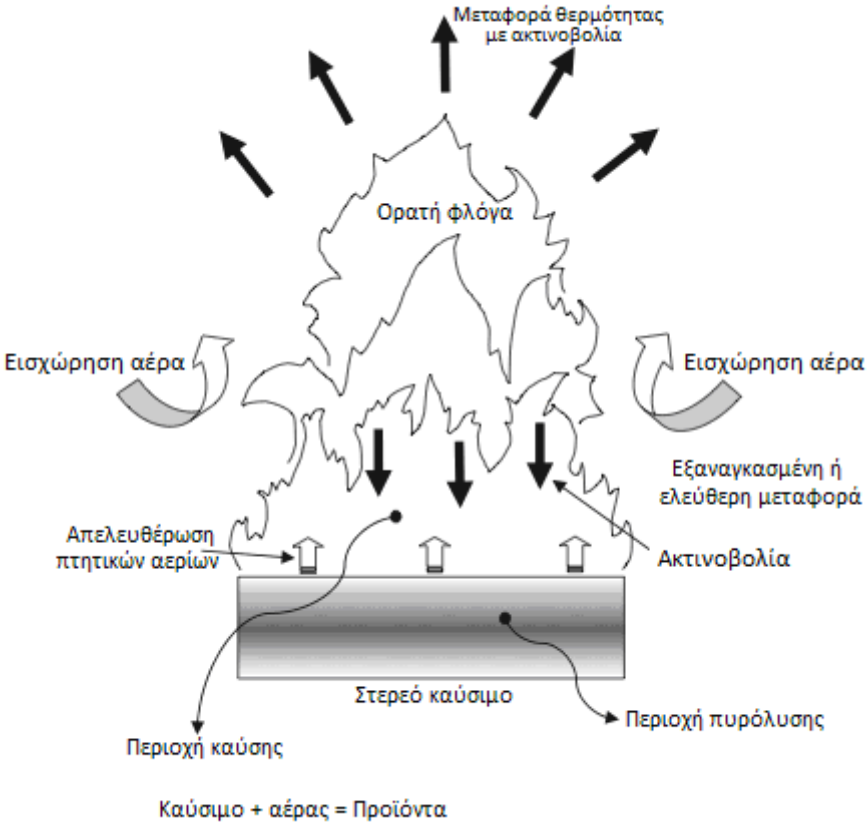
Ο όρος πηγής της ακτινοβολίας στην εξίσωση μεταφοράς λόγω αγωγής είναι το άθροισμα των 'εμπρός' και 'πίσω' κλίσεων των συναρτήσεων:

$$\dot{q}_{s,r}'''\left(x\right) = \frac{d\dot{q}_r^+\left(x\right)}{dx} + \frac{d\dot{q}_r^-\left(x\right)}{dx} \tag{3.25}$$

3.5. Μοντέλο πυρόλυσης

Σύμφωνα με τον Drysdale [Drysdale, 1999], ο όρος καύσιμο, μπορεί να οριστεί ως την κατάσταση της ύλης - είτε αυτό είναι σε αέρια μορφή, στερεά ή υγρή - που καίγεται υπό ατμοσφαιρικές συνθήκες. Εναλλακτικά, ο όρος καύσιμο σώμα περιλαμβάνει κάθε υλικό που μπορεί να καεί (οποιαδήποτε ύλη είναι δυνατόν να υποστεί καύση). Για την πλειονότητα των στερεών, η χημική αποσύνθεση (πυρόλυση) είναι υπεύθυνη για τη παραγωγή πτητικών προϊόντων με επαρκώς χαμηλό μοριακό βάρος και εισέρχονται στη φωτιά ως επιπλέον πηγή καυσίμου. Η ορατή φλόγα είναι ένα φαινόμενο αέριας φάσης και η φλεγόμενη καύση ενός στερεού καυσίμου, έτσι όπως περιγράφεται στη διαδικασία της πυρόλυσης, περιλαμβάνει τη μετατροπή του καυσίμου σε αέρια μορφή. Για τα υγρά καύσιμα, η διαδικασία είναι γενικά απλούστερη καθώς τα πτητικά αέρια απελευθερώνονται λόγω της εξάτμισης στην ελεύθερη επιφάνεια [Yeoh, 2009]. Επακόλουθα, πραγματοποιείται διάσπαση των πιο σύνθετων πτητικών συστατικών (διαδικασία ατμοποίησης) σε απλούστερα, τα οποία οξυδώνονται και καίγονται. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι θερμικές ιδιότητες ενός υλικού (k, c_p) που φλέγεται εισάγονται από το χρήστη. Αυτές όμως μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της καύσης συναρτήσει της θερμοκρασίας για αυτό και στον FDS είναι σημαντικό να μην είναι σταθερές σε σχέση με το χρόνο αλλά να μεταβάλλονται.

Ως ***πυρόλυση*** ορίζεται το φαινόμενο κατά το οποίο όταν η θερμοκρασία ενός υλικού αυξάνεται, οι χημικοί δεσμοί διασπώνται. Απουσία οξυγόνου, ή σε παρουσία πολύ μικρών ποσοτήτων, αυτή η θερμική υποβάθμιση ονομάζεται πυρόλυση. Κατά τη διάρκεια αυτής παράγονται πτητικά αέρια που διαχέονται στο χώρο, πυρολυτικά υγρά και στερεό υπόλοιπο.



Σχήμα 3.2 Σχηματική απεικόνιση καύσης στερεού [Yeoh, 2009].

Σε αυτή την ενότητα θα περιγραφεί ο τρόπος μοντελοποίησης των αντιδράσεων πυρόλυσης της στερεής φάσης στον κώδικα FDS και ο όρος πηγής λόγω χημικών αντιδράσεων, $\dot{q}'''_{s,c}$, που υπάρχει στην εξίσωση μεταφοράς θερμότητας λόγω αγωγής στην στερεή φάση (Εξίσωση 3.13). Αυτό γενικά αναφέρεται ως ***μοντέλο πυρόλυσης***, στην πραγματικότητα όμως αντιπροσωπεύει έναν αριθμό αντιδρώντων διεργασιών, που περιλαμβάνουν την εσωτερική θέρμανση, την ατμοποίηση και την απανθράκωση.

Υπάρχουν τρεις βασικές μέθοδοι προκειμένου να περιγραφεί η πυρόλυση στερεών και υγρών καυσίμων. Η επιλογή της μεθόδου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις ιδιότητες του υλικού που έχουμε στη διάθεσή μας και μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε. Η πρώτη μέθοδος χρησιμοποιείται αν θέλουμε να ορίσουμε μία φωτιά με σταθερό ρυθμό έκλυσης θερμότητας (Heat Release Rate). Σε αυτή τη περίπτωση δεν είναι ανάγκη να προσδιοριστούν ιδιότητες του υλικού. Αρκεί να οριστεί στον κώδικα FDS ο Ρυθμός Έκλυσης Θερμότητας ανά Μονάδα Επιφάνειας (*Heat Release Rate Per Unit Area* - HRRPUA) [kW/m^2]. Για παράδειγμα με την εντολή:

&SURF ID=’FIRE’, HRRPUA=500.00/

εκλύονται 500 kW/m^2 σε οποιαδήποτε επιφάνεια με το χαρακτηρισμό FIRE.

Η επόμενη μέθοδος χρησιμοποιείται όταν η φωτιά εξαπλώνεται με ένα δεδομένο ρυθμό που μεταβάλλεται σε σχέση με το χρόνο. Τότε θα πρέπει να οριστεί ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (HRRPUA) αλλά και μία χρονική παράμετρος με την εντολή *Ramp*. Χρησιμοποιώντας την εντολή *Ramp* έχουμε τη δυνατότητα να ορίσουμε ένα μέγεθος το οποίο μεταβάλλεται σε σχέση με το χρόνο. Για παράδειγμα, με τις εντολές:

&SURF ID=’FIRE’, HRRPUA=500.00, RAMP_Q=’fireramp’ /

&RAMP ID=’fireramp’, T=0.0, F=0.0 /

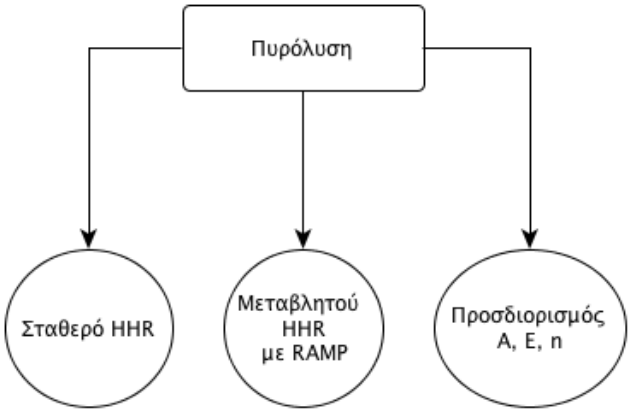
&RAMP ID=’fireramp’, T=1.0, F=1.0 /

&RAMP ID=’fireramp’, T=30.0, F=1.0 /

&RAMP ID=’fireramp’, T=31.0, F=0.0 /

στην επιφάνεια με το χαρακτηρισμό FIRE αρχικά η φωτιά είναι σβηστή, στο πρώτο δευτερόλεπτο εκλύονται 500 kW/m^2 μέχρι και το πέρας του 30^{ου} δευτερολέπτου και από το 31^{ο} δευτερόλεπτο η φωτιά είναι και πάλι σβηστή. Για στερεά καύσιμα, όπως ένας εξοπλισμός γραφείου, μπορεί να υπάρχει δυσκολία να οριστούν οι ιδιότητές τους. Προκειμένου να χαρακτηριστεί με καλή ακρίβεια ένα στερεό αντικείμενο που πρόκειται να καεί με ρεαλιστικό τρόπο είναι απαραίτητο να οριστούν οι παρακάτω ποσότητες όπως οι θερμικές ιδιότητές του, η θερμοκρασία ‘ανάφλεξης’ (IGNITION TEMPERATURE) και ο ρυθμός καύσης του όπου χρησιμοποιείται και πάλι η εντολή *Ramp*.

Η τρίτη και τελευταία μέθοδος, σχετίζεται με τον ορισμό από το χρήστη του ρυθμού αντίδρασης καύσης μέσω της εξίσωσης Arrhenius, καθορίζοντας τις μεταβλητές A, E και τη τάξη της αντίδρασης. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον και αναλύεται διεξοδικά σε επόμενη παράγραφο. Συμπερασματικά, όλες οι μέθοδοι περιγραφής της πυρόλυσης στον κώδικα FDS παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3 Μέθοδοι πυρόλυσης στερεών καυσίμων.

3.5.1. Περίπτωση προκαθορισμένου ρυθμού έκλυσης θερμότητας

Συνήθως ο σκοπός μιας υπολογιστικής μελέτης είναι να προβλεφθεί η μεταφορά αιθάλης και θερμότητας από μία συγκεκριμένη εστία φωτιάς. Με άλλα λόγια, ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας είναι ένα στοιχείο εισόδου του χρήστη και όχι κάτι που υπολογίζεται από το κώδικα. Σε τέτοιες περιπτώσεις, ο επιθυμητός ρυθμός έκλυσης θερμότητας μπορεί να θεωρηθεί σαν μια ροή μάζας καυσίμου πάνω σε μια δεδομένη στερεή επιφάνεια, που μπορεί να θεωρηθεί ως η επιφάνεια ενός καυστήρα:

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

Συχνά, ο χρήστης ορίζει τον επιθυμητό ρυθμό έκλυσης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας, $\dot{q}''_{user}$, καθώς και μία συνάρτηση ως προς το χρόνο (time ramp), $f(t)$, και με αυτά τα δεδομένα υπολογίζεται ο ρυθμός απώλειας μάζας του καυσίμου.

3.5.2. Περίπτωση μη προκαθορισμένου ρυθμού έκλυσης θερμότητας

3.5.2.1. Στερεά καύσιμα

Στον κώδικα FDS, τα στερεά καύσιμα μπορούν να υποστούν περισσότερες από μία αντιδράσεις. Παρόλα αυτά, γίνονται οι ακόλουθες θεωρήσεις:

- Η έκλυση πτητικών ουσιών από τη στερεά στην υγρή φάση γίνεται στιγμιαία,
- Υπάρχει τοπική θερμική ισορροπία μεταξύ στερεού και των πτητικών ουσιών,
- Δεν υπολογίζεται η συμπύκνωση των αέριων προϊόντων και
- Δεν μπορούν να γίνουν υπολογισμοί για πορώδη υλικά.

Κάθε δομικό συστατικό μπορεί να υποστεί αρκετές αντιδράσεις και κάθε μία από αυτές τις αντιδράσεις μπορεί να παράγει κάποια άλλα στερεά συστατικά-υπόλοιπα (residue), πτητικά αέρια, και/ή υδρατμό σύμφωνα με τους συντελεστές αποδοτικότητας v_s, v_f, v_w, αντίστοιχα. Αυτοί οι συντελεστές θα πρέπει απαραιτήτως να ικανοποιούν τη σχέση $v_s + v_f + v_w = 1$.

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

$$\text{Υλικό}_{\alpha} \rightarrow \nu_{s,\alpha\beta}\ \text{Υπόλοιπο}_{\alpha\beta} + \nu_{w,\alpha\beta}\ H_2O + \nu_{f,\alpha\beta}\ HC \tag{3.27}$$

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

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

πράγμα που σημαίνει ότι η μάζα του συστατικού α καταναλώνεται στις αντιδράσεις στερεής φάσης $r_{\alpha\beta}$ και παράγεται από άλλες αντιδράσεις. $r_{\alpha\beta}$ είναι ο ρυθμός της αντίδρασης β με μονάδες μέτρησης (1/s) και ρ_{s0} είναι η αρχική πυκνότητα του στρώματος του υλικού. S_{α} είναι ο ρυθμός παραγωγής του συστατικού α σαν αποτέλεσμα των αντιδράσεων των άλλων συστατικών. Οι ρυθμοί αντίδρασης είναι συναρτήσεις της τοπικής συγκέντρωσης μάζας και της θερμοκρασίας και υπολογίζονται σύμφωνα με την εξίσωση Arrhenius, όπως ορίζεται από την Εξίσωση 3.43:

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

Ο όρος παραγωγής είναι το άθροισμα όλων των αντιδράσεων όπου το στερεό υπόλοιπο είναι το συστατικού α:

$$S_{\alpha} = \sum_{a'=1}^{N_m} \sum_{\beta=1}^{N_{r,\alpha'}} \nu_{s,\alpha'\beta} r_{\alpha'\beta} \tag{3.30}$$

Ο ογκομετρικός ρυθμός παραγωγής των αέριων καυσίμων και του υδρατμού ορίζονται ως:

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

$$\dot{m}_w''' = \rho_{s0} \sum_{a=1}^{N_m} \sum_{\beta=1}^{N_{r,a}} \nu_{w,\alpha\beta} r_{\alpha\beta} \tag{3.32}$$

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

$$\dot{m}_f'' = \int_0^L \dot{m}_f'''(x)dx \tag{3.33}$$

$$\dot{m}_w'' = \int_0^L \dot{m}_w'''(x)dx \tag{3.34}$$

όπου L είναι το πάχος της επιφάνειας. Ο χημικός όρος πηγής στην εξίσωση μεταφοράς θερμότητας ορίζεται ως:

$$\dot{q}_{s,c}'''(x) = -\rho_{s0} \sum_{a=1}^{N_m} \sum_{\beta=1}^{N_{r,a}} r_{\alpha\beta}(x) H_{r,\alpha\beta} \tag{3.35}$$

3.5.2.2. Υγρά καύσιμα

Ο ρυθμός με τον οποίο ατμοποιούνται τα υγρά καύσιμα όταν καίγονται είναι μια συνάρτηση της θερμοκρασίας του υγρού και της συγκέντρωσης του ατμού του καυσίμου πάνω από την επιφάνεια του καυσίμου. Σύμφωνα με τη σχέση των Clausius-Clapeyron, το κλάσμα όγκου του ατμού του καυσίμου πάνω από την επιφάνεια του καυσίμου είναι μια συνάρτηση της θερμοκρασίας βρασμού του υγρού T_b:

$$X_f = \exp\left[-\frac{h_v W_f}{R}\left(\frac{1}{T_S}-\frac{1}{T_b}\right)\right] \tag{3.36}$$

όπου h_v είναι η θερμότητα ατμοποίησης, W_f είναι το μοριακό βάρος και T_S είναι η θερμοκρασία της επιφάνειας.

Προκειμένου να υπολογιστεί η θερμική αγωγιμότητα, το υγρό καύσιμο αντιμετωπίζεται σαν ένα θερμικό-λεπτό στερεό. Δεν πραγματοποιείται υπολογισμός της αγωγής θερμότητας των υγρών καυσίμων μέσα στη δεξαμενή.

3.6. Μοντέλο κλάσματος μείγματος

Το μοντέλο καύσης κλάσματος μείγματος βασίζεται στη παραδοχή ότι τα μεγάλης κλίμακας – λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας - φαινόμενα μπορούν να προσομοιωθούν απευθείας, αλλά οι φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε μικρές κλίμακες χρόνου και μήκους πρέπει να αναπαρασταθούν με προσεγγιστικό τρόπο. Η τιμή του κλάσματος μείγματος κυμαίνεται από Z=1 σε μία περιοχή όπου περιέχει μόνο καύσιμο έως Z=0 όπου το κλάσμα μάζας του οξυγόνου παίρνει την αρχική τιμή του, δηλαδή αυτή του περιβάλλοντος. Το κλάσμα μείγματος είναι μία συνάρτηση του χώρου και του χρόνου, που συνήθως παίρνει τη μορφή Z(x,t). Με τη θεώρηση ενός συστήματος που χαρακτηρίζεται από τη ροή ενός ρεύματος καυσίμου που αναμειγνύεται με ένα ρεύμα οξειδωτικού, το κλάσμα μείγματος του αέριου ρεύματος του καυσίμου ορίζεται ως [Φούντη, 2005]:

$$Z = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} \tag{3.37}$$

Το μοντέλο βασίζεται στην υπόθεση ότι, κατά τη διάρκεια της μείξης, η αντίδραση του καυσίμου και του οξυγόνου συμβαίνει ακαριαία και εξ' ολοκλήρου. Η αντιστοιχία μεταξύ του κλάσματος μείγματος ενός στοιχείου ή συστατικού και του κλάσματος μείγματος ονομάζεται '*σχέση κατάστασης*'. Στις εκδόσεις του κώδικα FDS 2 έως 4, γίνεται η παραδοχή ότι το αέριο μείγμα μπορεί να καθοριστεί εξ' ολοκλήρου από το κλάσμα μείγματος, κάτι που συνεπάγεται ότι το καύσιμο και το οξυγόνο αντιδρούν ακαριαία κατά τη διάρκεια της μείξης.

Σε πολλές εφαρμογές, το ότι το μείγμα καίγεται εξ' ολοκλήρου είναι μία λογική υπόθεση. Σε κάποιες περιπτώσεις όμως δεν μπορεί να γίνει η παραδοχή ότι το καύσιμο και το οξυγόνο αντιδρούν εξ' ολοκλήρου μετά τη μείξη. Μία τέτοια περίπτωση είναι τα μη επαρκώς αεριζόμενα δωμάτια (under-ventilated compartments). Το κλάσμα μείγματος παραμένει μία έγκυρη ποσότητα, ωστόσο δεν μπορεί να υποτεθεί ότι ορίζει αποκλειστικά τη σύνθεση του αέριου μείγματος.

Χρησιμοποιώντας το μοντέλο κλάσματος μείγματος, κάθε αντίδραση θεωρείται της μορφής:

$$C_x H_y O_z N_a M_b + \nu_{O_2} O_2 \rightarrow \nu_{CO_2} CO_2 + \nu_{H_2O} H_2O + \nu_{CO} CO + \nu_S S + \nu_{N_2} N_2 + \nu_M M \tag{3.38}$$

Ας σημειώσουμε ότι το άζωτο που βρίσκεται στο μόριο του καυσίμου υποτίθεται ότι σχηματίζει μόνο N_2. Επιπρόσθετα προϊόντα, κατά τη διάρκεια της αντίδρασης, μπορούν να οριστούν ως ένα στοιχείο M με το μέσο μοριακό βάρος αυτών. Αυτά τα προϊόντα δεν καταναλώνουν οξυγόνο κατά το σχηματισμό τους. Η αιθάλη είναι ένα μείγμα άνθρακα και υδρογόνου, όπου το ατομικό κλάσμα του υδρογόνου είναι X_H. Ο όρος y_S αντιστοιχεί στο ποσοστό παραγωγής αιθάλης και W_F, W_S τα μοριακά βάρη του καυσίμου και της αιθάλης αντίστοιχα. Ο στοιχειομετρικός συντελεστής ν_s παριστάνει το ποσοστό του καυσίμου που μετατρέπεται σε αιθάλη. Για την παραγωγή αιθάλη και μονοξείδιου του άνθρακα ισχύουν οι σχέσεις για τους στοιχειομετρικούς συντελεστές:

$$\nu_S = \frac{W_F}{W_S} y_S \quad \text{και} \quad W_S = X_H W_H + \left(1 - X_H\right) W_C \tag{3.39}$$

$$\nu_{CO} = \frac{W_F}{W_{CO}} y_{CO} \tag{3.40}$$

Το κλάσμα μείγματος Z μπορεί να καθοριστεί με βάση το κλάσμα μάζας του καυσίμου και των προϊόντων της καύσης που περιλαμβάνουν άνθρακα:

$$Z = Y_F + \frac{W_F}{xW_{CO_2}} y_{CO_2} + \frac{W_F}{xW_{CO}} y_{CO} + \frac{W_F}{xW_S} y_S \tag{3.41}$$

Το κλάσμα μείγματος ικανοποιεί την εξίσωση διατήρησης:

$$\rho \frac{DZ}{Dt} = \nabla \cdot \rho D \nabla Z \tag{3.42}$$

3.7.<u>Ρυθμός αντίδρασης</u>

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

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

όπου:

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

Ο όρος, r_{ij}, καθορίζει το ρυθμό της αντίδρασης στην θερμοκρασία, T_s, του i-οστού υλικού που συμμετέχει στην j-οστή αντίδραση. Ο δεύτερος όρος στο δεξί μέλος της εξίσωσης αντιπροσωπεύει τη συμμετοχή των υπολοίπων υλικών από τα οποία παράγεται το i-οστό υλικό σαν υπόλοιπο με απόδοση $\nu_{s,i'j}$. Ο όρος $\rho_{s,i}$ είναι η πυκνότητα του i-οστού υλικού του στρώματος, και ορίζεται ως η μάζα του i-οστού υλικού διαιρεμένη με τον όγκο του στρώματος. Ο όρος ρ_{s0} είναι η αρχική πυκνότητα του στρώματος. Για αυτό το λόγο, η ποσότητα $Y_{s,i} = \left(\rho_{s,i} / \rho_{s0}\right)$ αυξάνεται όταν το

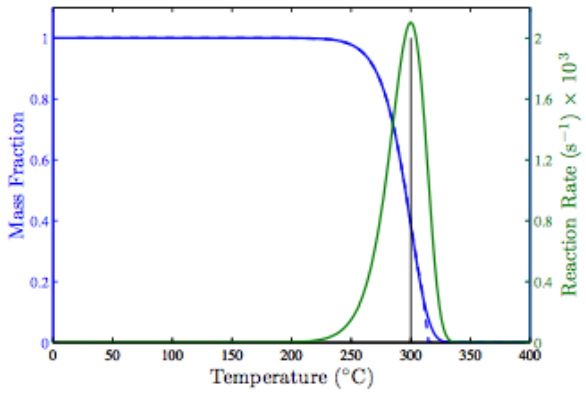
i-οστό υλικό παράγεται ως υπόλοιπο από κάποια άλλη αντίδραση και αντίστοιχα μειώνεται όταν καταναλώνεται. Αν το στρώμα αποτελείται μόνο από υλικό, τότε ο όρος $\rho_{s,i}/\rho_{s0}$ είναι μοναδιαίος. Ο όρος $n_{s,ij}$ είναι η τάξη της αντίδρασης και αν δεν είναι γνωστός ο συγκεκριμένος όρος, τότε λαμβάνεται ίσος με τη μονάδα.

Ο προ-εκθετικός παράγοντας A_{ij} εξαρτάται από τις συνθήκες της αντίδρασης, το σχήμα και το μέγεθος των αντιδρώντων και έχει μονάδες *1/s*. Ο όρος E_{ij} είναι η ενέργεια ενεργοποίησης και έχει μονάδες *kJ/kmol*. Για μία δεδομένη αντίδραση, πρέπει να προσδιοριστούν και οι δύο όροι A,E και η τάξη της αντίδρασης *n*. Αυτές οι παράμετροι μπορούν να υπολογιστούν μέσω πειραμάτων, όπως η μέθοδος θερμοβαρυμετρικής ανάλυσης, TGA (Thermo-Gravimetric Analysis).

Είναι σημαντικό να θυμόμαστε ότι οι παράμετροι A και E δεν είναι διαθέσιμες για τα περισσότερα υλικά. Αν αυτές δεν είναι γνωστές, υπάρχουν άλλες παράμετροι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον κώδικα FDS και να καθορίσουν έμμεσα αυτά τα μεγέθη. Η πιο σημαντική παράμετρος είναι η θερμοκρασία αναφοράς. (T_p). Στο σχήμα 3.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ενός υποθετικού πειράματος TGA. Το κλάσμα μάζας (μπλε καμπύλη) μειώνεται καθώς το δείγμα σταδιακά θερμαίνεται, στην συγκεκριμένη περίπτωση με ρυθμό θέρμανσης 5 K/min. Ο ρυθμός θέρμανσης είναι ο ρυθμός με τον οποίο αυξάνεται η θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Ο ρυθμός αντίδρασης (πράσινη καμπύλη) είναι ο ρυθμός μεταβολής του κλάσματος μάζας συναρτήσει του χρόνου $\left(-dY/dt\right)$. Το μέγιστο της καμπύλης αναφέρεται στον κώδικα FDS ως θερμοκρασία αναφοράς (REFERENCE_TEMPERATURE). Ας σημειώσουμε ότι η θερμοκρασία αναφοράς δεν είναι ίδια με την θερμοκρασία ανάφλεξης, ούτε απαραίτητα ίδια με την θερμοκρασία επιφάνειας του στερεού που καίγεται. Είναι απλά η θερμοκρασία στην οποία το κλάσμα μάζας ενός υλικού μειώνεται με μέγιστο ρυθμό όπως αυτός καθορίζεται από πειράματα τύπου TGA ή από κάποια ανάλογη πειραματική διάταξη. Οι κινητικές παράμετροι για την αντίδραση προσδιορίζονται μέσω των σχέσεων :

$$E = \frac{er_p}{Y_0}\frac{RT_p^2}{\dot{T}} \quad \text{και} \quad A = \frac{er_p}{Y_0}e^{E/RT_p} \tag{3.45}$$

όπου T_P και r_p / Y_0 είναι η θερμοκρασία και ο ρυθμός αντίδρασης σε συνθήκες αναφοράς, αντίστοιχα. Για κάποιο στερεό που αποτελείται από ένα υλικό και υπόκειται σε μία μόνο αντίδραση, ισχύει ότι Y_0=1. Στο σχήμα 3.4, στη περιοχή κάτω από τη πράσινη καμπύλη (ρυθμός αντίδρασης) είναι ίση με το ρυθμό θέρμανσης (σε μονάδες K/s).



$$\frac{dY}{dt} = -AY\exp(-E/RT) \qquad Y(0) = 1$$

$$T_p = 300\ ^\circ\mathrm{C}$$
$$r_p = 0.002\ \mathrm{s}^{-1}$$
$$\dot{T} = 5\ \mathrm{K/min}$$
$$\nu_s = 0$$

Σχήμα 3.4 Η μπλε καμπύλη αναπαριστά την κανονικοποιημένη μάζα, $Y=\rho_s/\rho_{s0}$, ενός στερεού υλικού το οποίο θερμαίνεται με ρυθμό 5 K/min. Η πράσινη καμπύλη αναπαριστά το ρυθμό της αντίδρασης, $-dY/dt$. Η εξίσωση που περιγράφει την αντίδραση φαίνεται στα δεξιά. Οι παράμετροι T_P, r_p και ν_s 'απεικονίζουν' τη θερμοκρασία αναφοράς, το ρυθμό της αντίδρασης και το βαθμό παραγωγής του υπολοίπου. Χρησιμοποιώντας αυτές τα μεγέθη, υπολογίζονται οι κινητικές παράμετροι A και E.

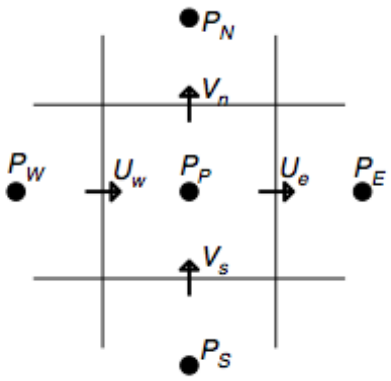
Υπάρχουν πολλές περιπτώσεις όπου είναι πιθανή μόνο η εκτίμηση της θερμοκρασίας αναφοράς μια συγκεκριμένης αντίδρασης επειδή δεν είναι διαθέσιμα δεδομένα θερμιδομετρίας μικρής κλίμακας. Σε τέτοιες περιπτώσεις μπορεί να οριστεί μία ακόμη παράμετρος εκτός από τη θερμοκρασία αναφοράς, για να οριστεί η καμπύλη του ρυθμού αντίδρασης. Αυτή η παράμετρος είναι το εύρος πυρόλυσης (T_P) το οποίο καθορίζεται από το πλάτος της πράσινης καμπύλης, αν υποτεθεί ότι το σχήμα της είναι τριγωνικό. Χρησιμοποιώντας αυτές τις παραμέτρους εισόδου, γίνεται μία εκτίμηση του μεγίστου της καμπύλης του ρυθμού αντίδρασης, από την οποία οι κινητικοί παράμετροι της αντίδρασης A,E υπολογίζονται.

$$\frac{r_p}{Y_0} = \frac{2T}{\Delta T}\left(1-\nu_s\right) \tag{3.46}$$

όπου, η παράμετρος ν_s είναι το ποσοστό του υλικού που μετατρέπεται σε στερεό.

3.8.Διαδικασία επίλυσης

Στον κώδικα FDS, χρησιμοποιείται ένα ημι-πεπλεγμένο σχήμα επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων για κάθε ένα από τα αριθμητικά πλέγματα που μπορεί να αποτελούν το χωρίο επίλυσης του κάθε προβλήματος. Οι μεταβλητές της ροής ανανεώνονται στο χρόνο χρησιμοποιώντας ένα ρητό σχήμα Runge-Kutta δεύτερης τάξης. Σε κάθε χρονικό βήμα, σε κάθε ένα από τα υπολογιστικά κελιά υπολογίζεται η ταχύτητα στα άκρα του κάθε υπολογιστικού κελιού ενώ στο κέντρο του υπολογίζεται η πίεση (Σχήμα 3.5).



Σχήμα 1.5 Υπολογιστικό κελί ενός πλέγματος και απεικόνιση των μεγεθών

που υπολογίζονται σε κάθε χρονικό βήμα

Για κάθε κελί του πλέγματος στο νιοστό χρονικό βήμα, έχουμε την πυκνότητα ρ^n, τα κλάσματα μάζας των συστατικών Y_a^n, τις συνιστώσες της ταχύτητας $\vec{u}^n$, η πίεση $\bar{p}^n$ και τη διαταραχή της πίεσης H^n. Ο υπολογισμός της θερμοκρασίας γίνεται μέσω της εξίσωσης (state equation). Η βασική διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής:

1. Υπολογισμός ρ^n, Y_a^n, $\bar{p}^n$ στο επόμενο χρονικό βήμα χρησιμοποιώντας ένα ρητό βήμα Euler. Για παράδειγμα, η πυκνότητα εκτιμάται από τη σχέση:

$$\frac{\rho^* - \rho^n}{\delta t} + \nabla \cdot \rho^n \bar{\vec{u}}^n = 0 \tag{3.47}$$

2. Υπολογισμός της απόκλισης, $\left(\nabla \cdot \vec{u}\right)^*$, με χρήση της εξίσωσης διατήρησης της ενέργειας. Ας σημειωθεί ότι το πεδίο ταχύτητας δεν έχει εκτιμηθεί για το επόμενο χρονικό βήμα, μόνο η απόκλισή του.

3. Επίλυση της εξίσωσης Poisson για τον όρο της πίεσης:

$$\nabla^2 H^n = -\left[\frac{\nabla \cdot \vec{u}^* - \nabla \cdot \vec{u}^n}{\delta t}\right] - \nabla \cdot \bar{\vec{F}}^n \tag{3.48}$$

4. Υπολογισμός της ταχύτητας στο επόμενο χρονικό βήμα:

$$\frac{\vec{u}^{*}-\vec{u}^{n}}{\delta t}+\vec{F}^{n}+\nabla\cdot H^{n}=0 \tag{3.49}$$

Ας σημειωθεί ότι η διαδικασία εγγυάται ότι η απόκλιση του πεδίου ταχύτητας, $\nabla\cdot\vec{u}^{*}$, είναι χαρακτηριστικά ίση με την απόκλιση που προκύπτει από τη χρήση της θερμοδυναμικής εξίσωσης στο βήμα 2.

5. Έλεγχος του χρονικού βήματος, δt, για να ικανοποιεί τις συνθήκες σταθερότητας *CFL* και *Von Neumann*:

$$\delta t\left(\frac{|u|}{\delta x}+\frac{|v|}{\delta y}+\frac{|w|}{\delta z}\right)<1 \quad \text{και} \quad 2\delta t\frac{\mu}{\rho}\left(\frac{1}{\delta x^{2}}+\frac{1}{\delta y^{2}}+\frac{1}{\delta z^{2}}\right)<1 \tag{3.50}$$

Αν το χρονικό βήμα είναι πολύ μεγάλο, μειώνεται προκειμένου να ικανοποιεί και τους δύο περιορισμούς και η διαδικασία επανέρχεται στην αρχή του χρονικού βήματος.

3.8.1.<u>Στάδιο διόρθωσης</u>

1. Διόρθωση ρ, Y_a και $\overline{p}$ στο επόμενο χρονικό βήμα. Για παράδειγμα, η πυκνότητα διορθώνεται:

$$\frac{\rho^{**}-\frac{1}{2}\left(\rho^{*}+\rho^{n}\right)}{\delta t/2}+\nabla\cdot\rho^{*}\vec{u}^{*}=0 \tag{3.51}$$

2. Χρονικός διαχωρισμός για τους όρους πηγής μάζας. Οι όροι πηγής αξιολογούνται χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα από τη διορθωμένη βαθμωτή εξίσωση μεταφοράς:

$$\frac{\left(\rho Y_{a}\right)_{ijk}^{n+1}-\left(\rho Y_{a}\right)_{ijk}^{**}}{\delta t}=\dot{m}_{a,ijk}'''\left(\vec{Y}^{**},T^{**}\right) \tag{3.52}$$

3. Υπολογισμός των αποκλίσεων, $\left(\nabla\cdot\vec{u}\right)^{n+1}$, από τις διορθωμένες θερμοδυναμικές ποσότητες.

4. Υπολογισμός του όρου πίεσης με τη χρήση των εκτιμημένων ποσοτήτων:

$$\nabla^{2}H^{*}=-\left[\frac{\left(\nabla\cdot\vec{u}\right)^{n+1}-\frac{1}{2}\left(\nabla\cdot\vec{u}^{*}+\nabla\cdot\vec{u}^{n}\right)}{\delta t/2}\right]-\nabla\cdot\vec{F}^{*} \tag{3.53}$$

5. Διόρθωση της ταχύτητας στο επόμενο χρονικό βήμα:

$$\frac{\vec{u}^{n+1} - \frac{1}{2}\left(\vec{u}^{*} + \vec{u}^{n}\right)}{\delta t/2} + \vec{F}^{*} + \nabla H^{*} = 0 \tag{3.54}$$

Ας σημειωθεί ξανά ότι η απόκλιση του διορθωμένου πεδίου ταχύτητας είναι χαρακτηριστικά ίση με την απόκλιση που υπολογίζεται στο βήμα 3.

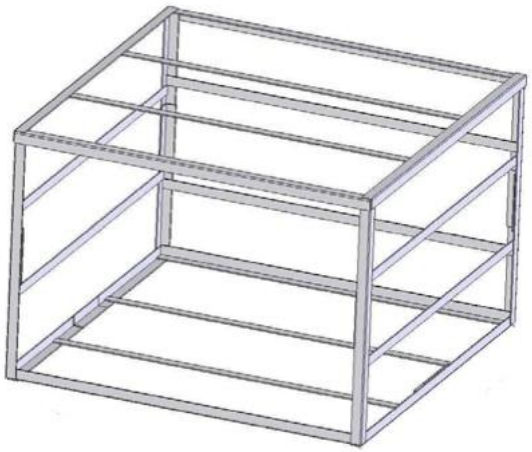
4. Υπολογιστικό Μέρος

4.1. Εισαγωγή

Στόχος της υπολογιστικής προσομοίωσης σε αυτό το κεφάλαιο είναι η επιλογή ενός δωματίου συγκεκριμένης κλίμακας και η προσομοίωση της στον CFD κώδικα FDS προκειμένου να πραγματοποιηθεί επαλήθευση των πειραματικών δεδομένων και των προλέξεων της θερμοκρασίας. Με στόχο την ανάπτυξη ενός φυσικού μοντέλου φωτιάς υπό κλίμακα έγινε η κατασκευή μοντέλων στα οποία πραγματοποιήθηκαν πειράματα φωτιάς σε συνθήκες μη επαρκούς αερισμού [Perricone, 2006]. Το καύσιμο που χρησιμοποιήθηκε στα συγκεκριμένα πειράματα ήταν σωροί ορθογωνικά διατεταγμένων ξύλινων ράβδων (wood crib - WCR). Τα πειράματα εστιάζονται στη καταγραφή της θερμοκρασίας τόσο στο εσωτερικό του δωματίου όσο και στη θέση του άνοιγματος.

4.2. Περιγραφή γεωμετρίας δωματίου πειραματικής διάταξης

Ο Perricone πραγματοποίησε πειράματα χρησιμοποιώντας 3 διαφορετικές κλίμακες δωματίου (1/8, 2/8 και 3/8 σε σχέση με τις πραγματικές διαστάσεις). Σε κάθε μοντέλο δωματίου, χρησιμοποιήθηκε ένα πλαίσιο αλουμινίου υποστηρικτικά για την στερέωση των εσωτερικών τοιχωμάτων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Στην προσομοίωση που έγινε στον FDS, παραλήφθηκε το συγκεκριμένο πλαίσιο για λόγους απλούστευσης.

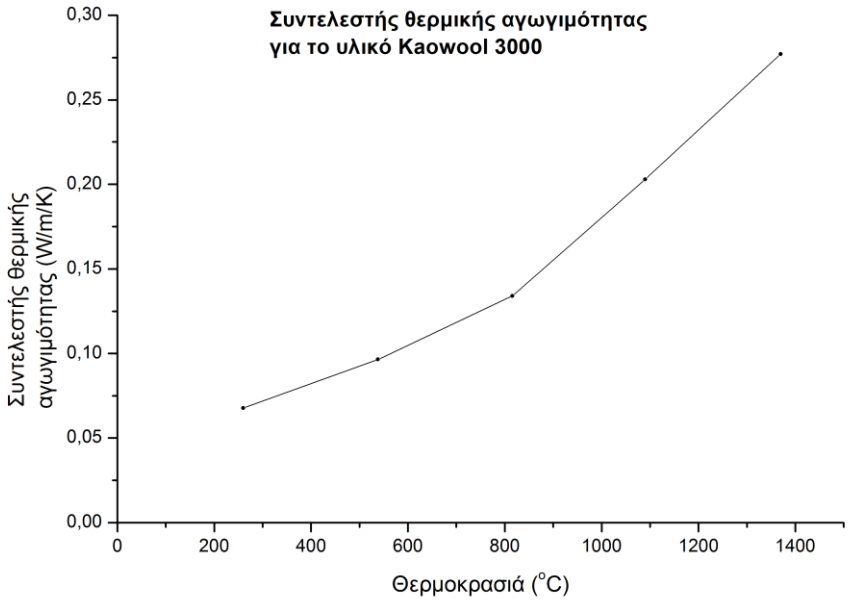


Σχήμα 4.1 Υποστηρικτικό πλαίσιο της κατασκευής.

Για τους υπολογισμούς, επιλέχθηκε το μοντέλο δωματίου κλίμακας 2/8. Το υλικό από το οποίο αποτελούνται οι τοίχοι του συγκεκριμένου δωματίου είναι μονωτικό υλικό (*Kaowool 3000).* Οι ιδιότητες του υλικού αυτού παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1 (Πηγή: www.matweb.com):

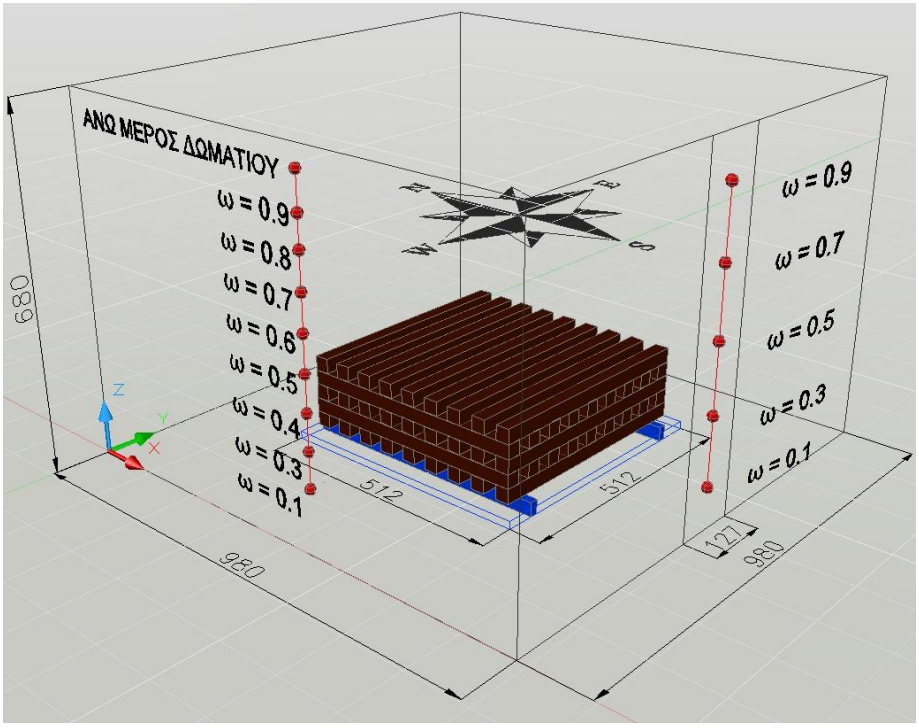
Πυκνότητα	40 kg/m^3
Θερμική αγωγιμότητα	Βλέπε Σχήμα 4.2

Πίνακας 4.1 Ιδιότητες μονωτικού υλικού (*Kaowool 3000).*

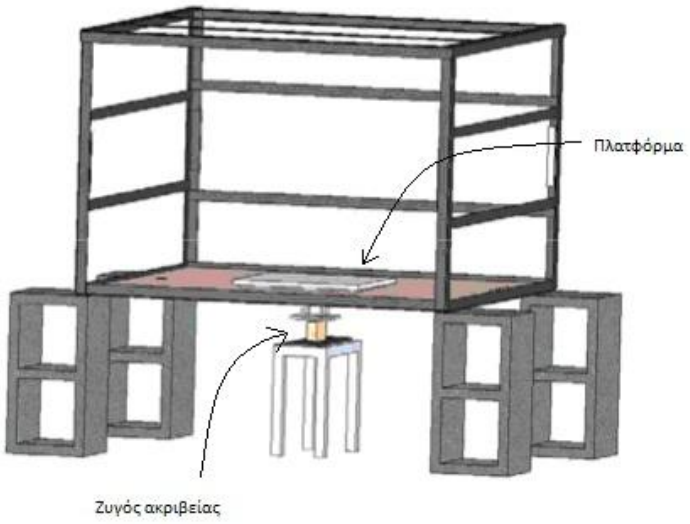


Σχήμα 4.2 Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του μονωτικού υλικού (*Kaowool 3000)* συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Κάθε κάθετος τοίχος του δωματίου έχει μήκος 98 cm, ύψος 67,3 cm και πάχος 34 mm. Στο μέσο του τοίχου που βρίσκεται στο νότιο μέρος (Σχήμα 4.3), υπάρχει ένα άνοιγμα 12,7 cm στο κέντρο του προκειμένου να υπάρχει εισαγωγή αέρα στο εσωτερικό του δωματίου. Η κατασκευή κατά τη διάρκεια των πειραμάτων είναι τοποθετημένη σε κάποιο σχετικό ύψος προκειμένου να τοποθετηθεί από κάτω ένας ζυγός ακριβείας (load cell) για τη μέτρηση της απώλειας μάζας του WCR καθώς πραγματοποιείται η καύση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.3 Σχεδιάγραμμα του δωματίου που χρησιμοποιείται στο συγκεκριμένο πείραμα καθώς και η θέση των θερμοστοιχείων που χρησιμοποιούνται.



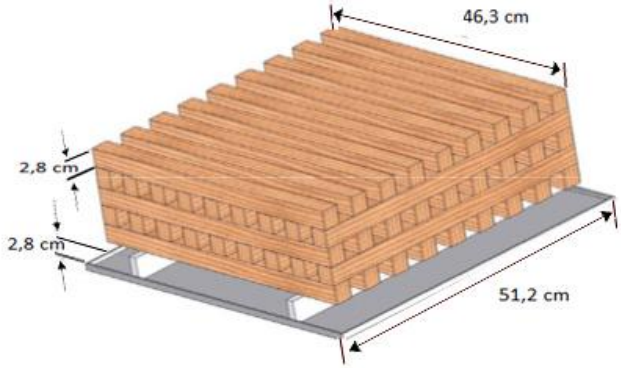
Σχήμα 4.4 Ο ζυγός ακριβείας τοποθετείται στο κάτω μέρος της πλατφόρμας για τη μέτρηση του βάρους του WCR.

Για την έναυση της καύσης του WCR χρησιμοποιείται επτάνιο. Το μεταλλικό δοχείο βάθους 0,5 mm, στο οποίο τοποθετείται το επτάνιο, έχει τετράγωνη μορφή και βρίσκεται κάτω από τα ξύλα στο επίπεδο του εδάφους. Οι διαστάσεις του είναι 51,2 cm x 51,2 cm και το υλικό κατασκευής του είναι ανοξείδωτος χάλυβας. Στο εσωτερικό του, τοποθετούνται 2 στηρίγματα από ανοξείδωτο χάλυβα τα οποία χρησιμοποιούνται για τη στήριξη των ξύλων και την τοποθέτηση τους σε ύψος 2,8 cm από το έδαφος. Οι ιδιότητες του ανοξείδωτου χάλυβα παρουσιάζονται στο Πίνακα 4.2 (Πηγή: www.matweb.com):

Πυκνότητα	7800 kg/m^3
Ειδική θερμοχωρητικότητα	0,477 kJ/kg/K
Θερμική αγωγιμότητα	16,4 W/m/K

Πίνακας 4.2 Ιδιότητες ανοξείδωτου χάλυβα.

Το πυροθερμικό φορτίο του πειράματος αποτελείται από σωρούς ορθογωνικά διατεταγμένων ξύλινων ράβδων. Η διάταξη αυτή επιτρέπει τη διείσδυση αέρα καύσης σε μεγαλύτερη επιφάνεια πυροθερμικού φορτίου, την ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας μεταξύ των καιγόμενων επιφανειών και την ανάπτυξη έντονης τυρβώδους ροής σε ολόκληρη την τρισδιάστατη δομή του. Το ξύλο από το οποίο αποτελείται το πυροθερμικό φορτίο είναι λευκός δρυς (*white-oak*), με πυκνότητα 720 kg/m^3 και επιλέγεται λόγω της υψηλής πυκνότητας και διαθεσιμότητας του. Κάθε ράβδος ξύλου που χρησιμοποιείται έχει τετράγωνη πρόσοψη πλευράς 2,8 cm και μήκος 46,3 cm. Σε κάθε στοιβάδα υπάρχουν 9 ξύλινες ράβδοι. Συνολικά υπάρχουν 5 στοιβάδες ξύλινων ράβδων, η κάθε μια εκ των οποίων είναι κάθετα προσανατολισμένη ως προς την προηγούμενη. Η διάταξη του WCR που χρησιμοποιείται στο συγκεκριμένο πείραμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.5 Διάταξη του wood crib που χρησιμοποιείται στο συγκεκριμένο μοντέλο δωματίου.

Χρησιμοποιήθηκαν θερμοστοιχεία τύπου K για να μετρηθούν τόσο οι θερμοκρασίες των αερίων αλλά και των στερεών εσωτερικών επιφανειών του δωματίου. Τα 8 θερμοστοιχεία που τοποθετούνται στον εσωτερικό χώρο, σε απόσταση 7,6 cm από τον δυτικό τοίχο, απέχουν μεταξύ τους 7,9 cm και το κάτω θερμοστοιχείο απέχει 6 cm από το έδαφος. Στην ίδια θέση τοποθετείται και ένα θερμοστοιχείο κοντά στην οροφή του δωματίου για τη καταγραφή των θερμοκρασιών στο άνω μέρος του δωματίου. Στην μέση του ανοίγματος, τοποθετούνται 5 θερμοστοιχεία, των οποίων η μεταξύ τους απόσταση είναι 12,8 cm.

4.3.Υπολογιστικό Πλέγμα

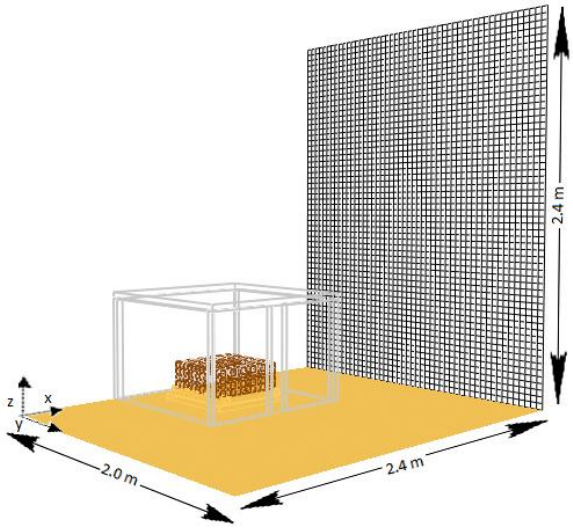
Το υπολογιστικό χωρίο που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της φωτιάς στο δωμάτιο υπό συνθήκες μη επαρκούς αερισμού έχει διαστάσεις 2,4 m x 2,0 m x 2,4 m κατά την x, y και z διάσταση αντιστοίχως, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6. Αποτελείται από 180.000 κυβικά υπολογιστικά κελιά, όπου το καθένα έχει πλευρά 0,04 m. Το υπολογιστικό χωρίο εκτείνεται πέρα από τις φυσικές διαστάσεις του δωματίου προκειμένου να είναι δυνατή η προσομοίωση της εισόδου αέρα στο δωμάτιο καθώς και η έξοδος του πλούμιου της φωτιάς δια μέσω του ανοίγματος με ικανοποιητικό τρόπο. Το πόσο εκτείνεται το υπολογιστικό χωρίο έχει να κάνει με το άνοιγμα του δωματίου και την αντίστοιχη υδραυλική διάμετρο του [Zhang et al., 2010]. Συγκεκριμένα, ανάμεσα στην υδραυλική διάμετρο του ανοίγματος D_H και την αποτελεσματική επέκταση του υπολογιστικού χωρίου D_e ισχύει ότι:

$$D_e = \eta D_H \tag{4.1}$$

όπου η είναι ο συντελεστής αποτελεσματικής επέκτασης του υπολογιστικού χωρίου και ισχύει:

$$\eta = \begin{cases} 0,5 & \text{για φωτιά ελεγχόμενη από τη διαθεσιμότητα καυσίμου} \\ 1 & \text{για φωτιά ελεγχόμενη από τις συνθήκες αερισμού} \end{cases} \tag{4.2}$$

Κάνοντας του υπολογισμούς, η αποτελεσματική επέκταση του υπολογιστικού χωρίου υπολογίζεται στα 22 cm από το άνοιγμα κατά την y διάσταση. Στη προσομοίωση που έγινε, η επέκταση του υπολογιστικού χωρίου κατά τον άξονα z (κατακόρυφο άξονα) είναι 1,7 m και κατά τον άξονα y, στην πλευρά του τοίχου που βρίσκεται το άνοιγμα, είναι 1 m.



Σχήμα 4.6 Υπολογιστικό χωρίο που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωσης.

Ένα άλλο ζήτημα που εξετάστηκε είναι η διακριτική ικανότητα πλέγματος με το οποίο γίνεται η προσομοίωση. Η ποσότητα $D^*/\delta x$ χαρακτηρίζει το κατά πόσο η διακριτική ικανότητα του πλέγματος είναι ικανοποιητική για τη μελέτη ενός σεναρίου φωτιάς [McDermott et al., 2010]. Η ποσότητα D^* είναι η χαρακτηριστική κλίμακα μήκους της φωτιάς (χαρακτηριστική διάμετρος της φωτιάς) και δx το μήκος του υπολογιστικού κελιού. Πρόκειται για αδιάστατη ποσότητα που προκύπτει συναρτήσει του μέγιστου ολικού ρυθμού έκλυσης θερμότητας, της πυκνότητας αέρα περιβάλλοντος, της ειδικής θερμοχωρητικότητας αέρα περιβάλλοντος και της θερμοκρασίας του σύμφωνα με τη σχέση:

$$D^* = \left\{ \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}} \right\}^{2/5} \tag{4.3}$$

Στη μελέτη των [McGrattan et al., 2002] αποδεικνύεται ότι αν $0,05 < \delta x/ D^* < 0,10$ τότε η ακρίβεια των προλέξεων είναι αρκούντως ικανοποιητική χωρίς να αυξάνεται υπέρμετρα το υπολογιστικό κόστος. Αρχικά, το υπολογιστικό χωρίο που επιλέχθηκε είχε πλευρά υπολογιστικού κελιού 0,05 m ($\delta x=0,05$ *m*), για το οποίο ισχύει $\delta x/ D^*=0,0704$. Παρότι ικανοποιείται η παραπάνω συνθήκη, στη παρούσα μελέτη για το υπολογιστικό χωρίο που χρησιμοποιήθηκε ($\delta x=0,04$ *m*), $\delta x/ D^*=0,056$, με αποτέλεσμα να ικανοποιείται η παραπάνω συνθήκη και να έχουμε καλύτερη προσέγγιση της πραγματικής γεωμετρίας του WCR. Αξίζει να σημειωθεί ότι στον κώδικα FDS η μεταφορά θερμότητας επιλύεται μόνο αν το στερεό έχει πάχος όσο το μήκος της πλευράς του υπολογιστικού κελιού.

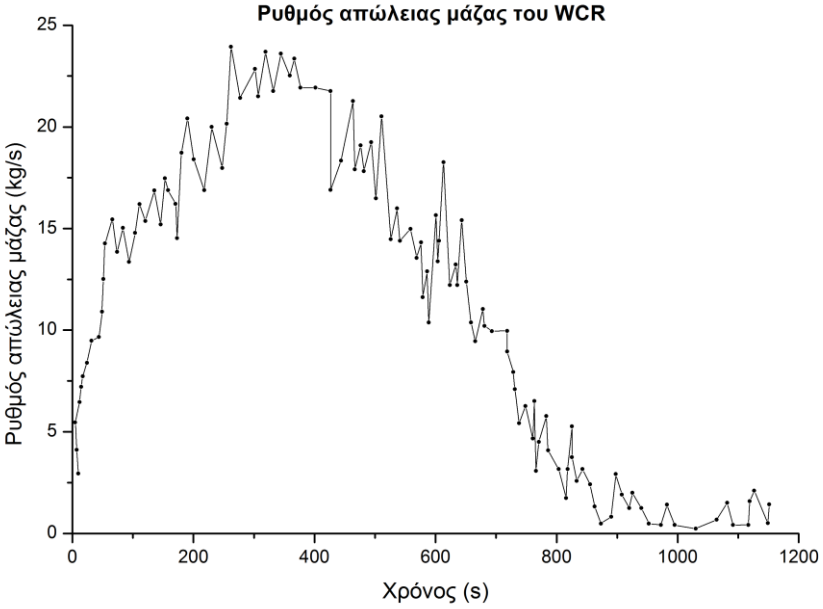
4.4.<u>Αρχικές και οριακές συνθήκες</u>

Στην αρχή της υπολογιστικής προσομοίωσης (t=0), θεωρείται ότι το πεδίο ταχυτήτων σε όλο το υπολογιστικό χωρίο, είναι μηδενικό και υπάρχει ενιαία αρχική θερμοκρασία 20°C. Ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης είναι 1500 s, προκειμένου να απεικονιστούν με ακρίβεια τα χαρακτηριστικά στάδια εξέλιξης της φωτιάς. Τα στάδια αυτά είναι η ανάπτυξη (growth period), η πλήρως ανεπτυγμένη φωτιά (fully developed fire) και η φάση της μείωσης (decay period). Ο χρόνος προσομοίωσης είναι μεγαλύτερος από το χρόνο των πειραματικών αποτελεσμάτων καθώς, όπως θα σχολιασθεί και παρακάτω, παρατηρήθηκε στη προσομοίωση ότι η ανάπτυξη του φαινομένου αργεί να ξεκινήσει.

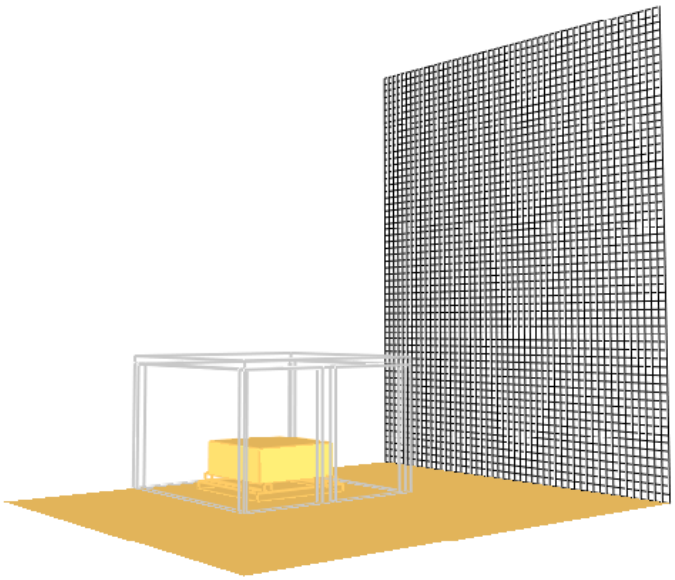
4.5.Προσομοίωση WCR με χρήση του κώδικα FDS

Στο Κεφάλαιο 3, είχαν επισημανθεί οι τρεις τρόποι με τους οποίους μπορεί να μοντελοποιηθούν οι αντιδράσεις πυρόλυσης στερεών και υγρών καυσίμων. Συνοπτικά, στην πρώτη μέθοδο ορίζεται μία φωτιά με σταθερό ρυθμό έκλυσης θερμότητας, στη δεύτερη ορίζεται μία φωτιά που εξαπλώνεται με σταθερό ρυθμό που μεταβάλλεται σε σχέση με το χρόνο και στην τρίτη χρησιμοποιείται η εξίσωση Arrhenius, για την οποία απαιτείται ο καθορισμός των παραμέτρων A, E και της τάξης της αντίδρασης. Αυτές υπολογίζονται μέσω πειραμάτων θερμικής ανάλυσης, όπως η μέθοδος θερμοβαρυμετρικής ανάλυσης, TGA (Thermo-Gravimetric Analysis). Να σημειωθεί ότι, στη τρίτη μέθοδο, αν δεν είναι γνωστές οι τρεις αυτές παράμετροι μπορεί να οριστεί η θερμοκρασία αναφοράς (REFERENCE_TEMPERATURE).

Η πρώτη και η δεύτερη μέθοδος για τη μοντελοποίηση της αντιδράσης πυρόλυσης στερεών και υγρών καυσίμων προϋποθέτουν την ύπαρξη μιας στερεής επιφάνειας για να είναι δυνατός ο ορισμός του ρυθμού έκλυσης θερμότητας ή εξάπλωσης. Στην περίπτωση του WCR αυτό δεν μπορεί να γίνει λόγω της ανομοιομορφίας της κατασκευής του. Για αυτό το λόγο, αποφασίστηκε η αντικατάσταση του WCR με ένα ισοδύναμο ορθογωνικό στερεό στο οποίο θα είναι εφικτός ο ορισμός των παραπάνω ποσοτήτων. Στην εργασία του, ο Perricone κατέγραφε το ρυθμό απώλειας μάζας του WCR μέσω του ζυγού ακριβείας όπου βρισκόταν κάτω από τη κατασκευή του δωματίου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.4. Το συγκεκριμένο διάγραμμα απώλειας μάζας του WCR παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.6. Πολλαπλασιάζοντας τα δεδομένα αυτά με τη θερμογόνο ικανότητα του συγκεκριμένου ξύλου (*white-oak*) προκύπτει ο ρυθμός έκλυσης θερμότητάς του (Heat Release Rate). Στη συνέχεια, διαιρώντας με το συνολικό εμβαδόν της εξωτερικής επιφάνειας του κουτιού προκύπτει ο ρυθμό έκλυσης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (Heat Release Rate Per Unit Area), που είναι το μέγεθος που χρειάζεται για να οριστεί η φωτιά που θα μεταβάλλεται σε σχέση με το χρόνο. Έτσι, στη πρώτη προσέγγιση που έγινε, το WCR αντικαταστάθηκε με ένα ορθογωνικό στερεό όπου στις πέντε επιφάνειές του (οι περιφερειακές πλευρές καθώς και η πάνω πλευρά) θα εκλύεται θερμότητα με συγκεκριμένο ρυθμό, ο οποίος εισάγεται από τον χρήστη βάση των πειραματικών μετρήσεων όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6. Η απεικόνηση του WCR ως ορθογωνικό στερεό παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.7. Το ορθογωνικό στερεό έχει τετραγωνική διατομή 44 cm και ύψος 16 cm, η οποία είναι η καλύτερη προσέγγιση που μπορεί να γίνει σύμφωνα τόσο με τις διαστάσεις του Perricone (Σχήμα 4.5), όσο και με τις διαστάσεις του πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις.



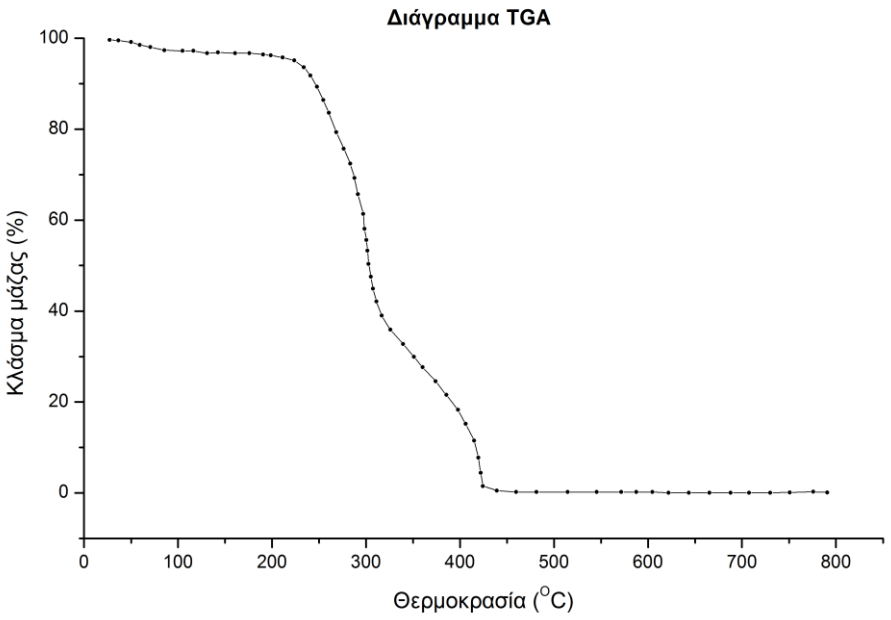
Σχήμα 4.6 Διάγραμμα ρυθμού απώλειας μάζας του WCR.



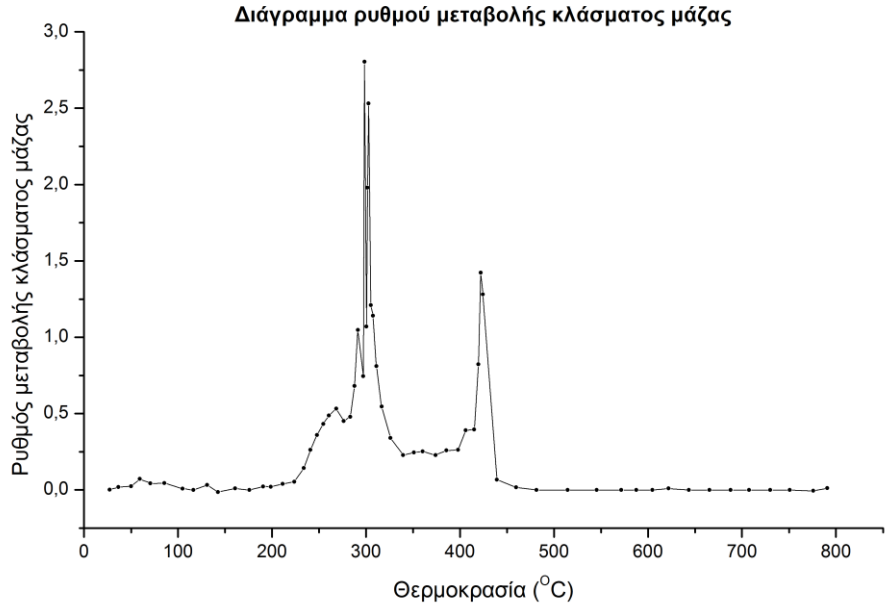
Σχήμα 4.7 Τρισδιάστατη απεικόνιση του WCR ως ορθογωνικό στερεό.

Σχετικά με την καύση του WCR με τη ρεαλιστική δομή του, αυτή θα πραγματοποιηθεί με τη χρήση της τρίτης μεθόδου για τη μοντελοποίηση των αντιδράσεων πυρόλυσης στερεών και υγρών καυσίμων. Αυτό γίνεται είτε με το καθορισμό των τριών παραμετρων A, E και της τάξης της αντίδρασης είτε με τον καθορισμό της θερμοκρασίας αναφοράς (REFERENCE_TEMPERATURE). Όλα αυτά αφορούν τις ιδιότητες κάθε υλικού και διαφέρουν για κάθε είδος ξύλου. Στην εργασία του Perricone δεν αναφέρονται οι συγκεκριμένες ιδιότητες για τον τύπο ξύλου που χρησιμοποιήθηκε, για αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκαν βιβλιογραφικές τιμές για τον ίδιο τύπο ξύλου.

Στην εργασία [Matala, 2008], ορίστηκαν οι παράμετροι A, E και η τάξη της αντίδρασης μέσω της μεθόδου θερμοβαρυμετρικής ανάλυσης TGA για ορισμένα είδη ξύλου, συμπεριλαμβανομένου και του ξύλου δρυς (*oak*). Το συγκεκριμένο ξύλο έχει πυκνότητα 760 kg/m^3, θεωρείται αφυγραμένο και προσεγγίζει ικανοποιητικά το ξύλο που χρησιμοποίησε στη πειραματική διάταξη (720 kg/m^3) του οποίου η υγρασία δεν αναφέρεται. Το κύριο ερώτημα που τέθηκε σε αυτήν την εργασία ήταν αν επαρκεί το απλό μοντέλο για τη καύση του ξύλου (μονοβηματική αντίδραση – one ster reaction) ή αν η ανάλυση θα έπρεπε να βασιστεί στην αυτόνομη καύση των πολυμερών από τα οποία κυρίως αποτελείται το ξύλο. Όπως είναι γνωστό, το ξύλο αποτελείται κατά βάση από τρία φυσικά πολυμερή: την κυτταρίνη (40-44%), τη λιγνίνη (18-25%) και την ημικυτταρίνη (23-40%). Έτσι, ορίστηκαν οι παραμέτροι A, E καθώς και η τάξη της αντίδρασης για τέσσερα διαφορετικά σενάρια. Στο πρώτο σενάριο, γίνεται η παραδοχή ότι η αποσύνθεση του ξύλου (degradation) μπορεί να περιγραφεί μέσω της αποσύνθεσης των επιμέρους πολυμερών του. Στο δεύτερο σενάριο (*Σενάριο Α*), εξετάζεται ένα πιο απλό μοντέλο για τη καύση του ξύλου, δηλαδή με χρήση μονοβηματικής αντίδρασης. Στο τρίτο σενάριο (*Σενάριο Β)*, το ξύλο θεωρείται ως ένα μείγμα δύο συνθετικών, της 'ολοκυτταρίνης' (hollocellulose: κυτταρίνη+ ημικυτταρίνη) και της λιγνίνης, τα οποία υπόκεινται σε παράλληλες αντιδράσεις αποσύνθεσης. Τέλος, εξετάζεται (*Σενάριο* Γ) η αντίδραση τριών βημάτων (3-step reaction). Οι τρεις παράμετροι, καθώς και όλα τα απαραίτητα δεδομένα, δίνονται και παρουσιάζονται για τα τρία τελευταία σενάρια στο Πίνακα 4.3. Όπως περιγράφεται και στο Κεφάλαιο 3, με χρήση του διάγραμμα κλάσματος μάζας – χρόνου (Σχήμα 4.8) από τη μέθοδο θερμοβαρυμετρικής ανάλυσης, TGA, προκύπτει το διάγραμμα του ρυθμού μεταβολής του κλάσματος μάζας συναρτήσει του χρόνου (Σχήμα 4.9). Το μέγιστο της καμπύλης αυτής αναφέρεται στο κώδικα FDS ως θερμοκρασία αναφοράς (REFERENCE_TEMPERATURE). Ακολουθώντας αυτή τη διαδικασία προκύπτει ότι η θερμοκρασία αναφοράς για ρυθμό καύσης ξύλου, τύπου *δρυ* (oak), 2 K/min είναι ίση με 305°C.



Σχήμα 4.8 Διάγραμμα TGA ξύλου τύπου *δρυς* (*oak*) για ρυθμό καύσης 2 K/min [Matala, 2008].



Σχήμα 4.9 Διάγραμμα ρυθμού μεταβολής κλάσματος μάζας ξύλου τύπου *δρυς* (*oak*) για ρυθμό καύσης 2 K/min [Matala, 2008].

Παράμετροι (μονάδες)	Σενάριο Α	Σενάριο Β	Σενάριο Γ
A_1 (s^{-1})	$5{,}49 \cdot 10^{12}$	$5{,}45 \cdot 10^{11}$	$7{,}95 \cdot 10^{13}$
E_1 (kJ/kmol)	$1{,}70 \cdot 10^{5}$	$1{,}62 \cdot 10^{5}$	$1 \cdot 10^{5}$
$N_{S,1}$	3,56	2,66	1
y_1	0,231642	0,216802	1
k_1 (W/mK)	0,25	0,236	0,25
$c_{p,1}$ (kJ/kgK)	1,8	1,96	1,8
ΔH_1 (kJ/kg)	250	467	0
$\Delta H_{c,1}$ (kJ/kg)	15000	13000	-
A_2 (s^{-1})	-	$1{,}16 \cdot 10^{19}$	$3{,}05 \cdot 10^{14}$
E_2 (kJ/kmol)	-	$2{,}10 \cdot 10^{5}$	$1{,}91 \cdot 10^{5}$
$N_{S,2}$	-	2,16	1
y_2	-	0,350364	0,246950
k_2 (W/mK)	-	0,386	0,2
$c_{p,2}$ (kJ/kgK)	-	1,0	2,2
ΔH_2 (kJ/kg)	-	487	200
$\Delta H_{c,2}$ (kJ/kg)	-	16000	15000
A_3 (s^{-1})	-	-	$4{,}77 \cdot 10^{11}$
E_3 (kJ/kmol)	-	-	$2{,}33 \cdot 10^{5}$
$N_{S,3}$	-	-	1
y_3	-	-	0

Πίνακας 4.3 Παράμετροι αντίδρασης για το είδος ξύλου *δρυς* (Σενάρια Α,Β και Γ) [Matala, 2008].

Για να επιλεχθεί ποια από τις παραπάνω αντιδράσεις θα έπρεπε να χρησιμοποιηθεί, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές όπου παραμένουν σταθερά η γεωμετρία, το υπολογιστικό πλέγμα και ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας στην επιφάνεια του μεταλλικού δοχείου. Οι διαθέσιμες μετρήσεις WCR σε ανοιχτό χώρο χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να επιλεχθεί ποιο μοντέλο είναι καταλληλότερο για περαιτέρω χρήση. Το υπολογιστικό χωρίο που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση καύσης του WCR έχει διαστάσεις 0,9 m x 0,5 m x 0,5 m κατά την x, y και z διάσταση αντιστοίχως. Είναι χωρισμένο σε 14400 κυβικά υπολογιστικά κελιά, όπου το καθένα έχει πλευρά 0,025 m. Χρησιμοποιώντας αυτό το υπολογιστικό πλέγμα, έχουμε τη δυνατότητα να προσεγγίσουμε τη δομή του WCR της πειραματικής διάταξης καθώς οι ξύλινες ράβδοι που αποτελούν το WCR της προσομοίωσης είναι τετραγωνικής διατομής 2,5 cm και μήκους 42,5 cm. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το WCR να αποτελείται από 5 στοιβάδες ξύλινων ράβδων όπου κάθε στοιβάδα περιέχει 9 ξύλινες ράβδους, όσες είναι και στη πειραματική διάταξη. Στην εργασία του Perricone αναφέρεται ότι στο μεταλλικό δοχείο βάθους 0,5 mm κάτω από το WCR τοποθετείται επτάνιο το οποίο χρησιμοποιείται για την ανάφλεξη του WCR, η καύση του οποίου διαρκεί για 257 s. Χρησιμοποιώντας αυτά τα δεδομένα, υπολογίστηκε το ρυθμό έκλυσης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας του επτανίου (*HHRPUA=58,91 kW/m*^{2}). Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί μία παραδοχή που έγινε σχετικά με την καύση του επτανίου. Τα 58,91 kW/m^2 που εκλύονται από την καύση του επτανιόυ αντιστοιχούν σε διάρκεια καύσης 257 s. Στις προσομοιώσεις που έγιναν, για διάρκεια καύσης του επτανίου 257 s δεν επιτυχόταν η έναυση του WCR, Για αυτό το λόγο, αποφασίστηκε η πηγή φωτιάς να διατηρείται σε όλο το χρόνο προσομοίωσης. Εξετάζοντας ποιος είναι ο αποδοτικότερος τρόπος καύσης του WCR, επιλέχθηκαν οι προσομοιώσεις να γίνουν είτε χρησιμοποιώντας την αντίδραση τριών βημάτων (*Σενάριο Γ*) {Περίπτωση Α1} είτε με χρήση της θερμοκρασία αναφοράς {Περίπτωση Α2}. Οι δύο περιπτώσεις ελεύθερης καύσης του WCR που εξετάστηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4:

Περίπτωση	**Μέθοδος πυρόλυσης**
Α1	Αντίδραση 3 βημάτων
Α2	Θερμοκρασία αναφοράς

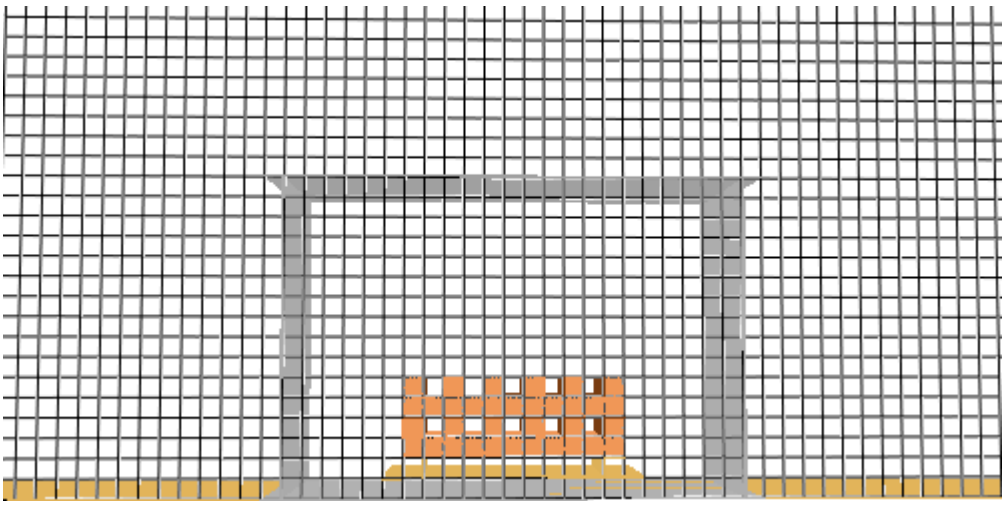
Πίνακας 4.4 Μέθοδοι πυρόλυσης που χρησιμοποιήθηκαν στις περιπτώσεις ελεύθερης καύσης του WCR.

Πραγματοποιώντας λοιπόν δύο πανομοιότυπα τρεξίματα όπου το μόνο που άλλαζε ήταν ο τρόπος μοντελοποίησης της πυρόλυσης του WCR, βγήκαν κάποια χρήσιμα συμπεράσματα. Η απώλεια μάζας του WCR ξεκινά 20 s πιο γρήγορα στην Περίπτωση Α1 από ότι στην Περίπτωση Α2. Και στις δύο περιπτώσεις ξεκινάει από τη κάτω επιφάνεια του WCR, εκείνη δηλαδή που εκτίθεται πιο πολύ στην εστία της φωτιάς λόγω καύσης του επτανίου.

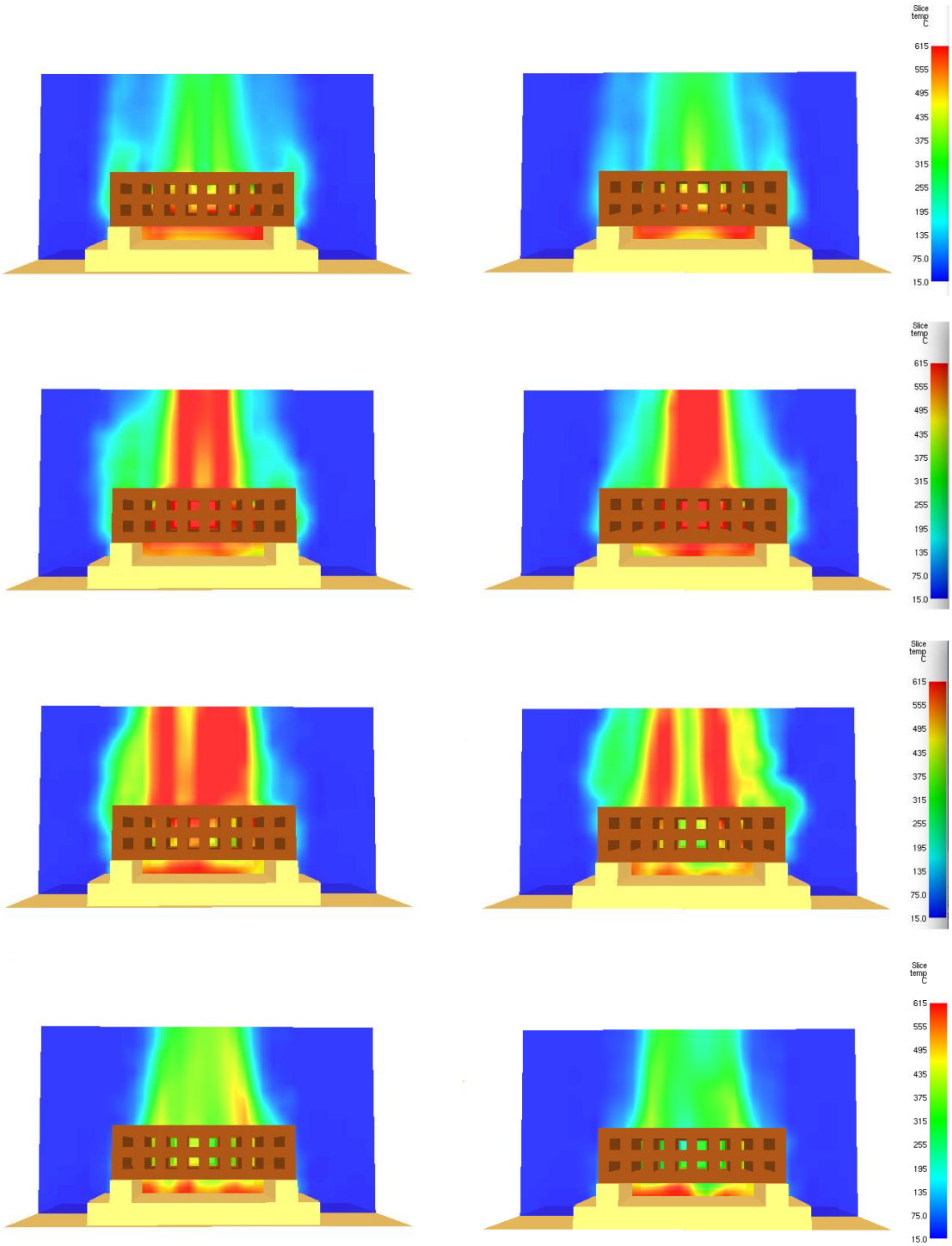
Όσο αφορά τις θερμοκρασίες, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.11, στα αρχικά στάδια της φωτιάς (300 s) οι θερμοκρασίες αέρα που επικρατούν είναι περίπου ίδιες και δεν ξεπερνούν τους 450°C. Στη συνέχεια η καύση του WCR έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας τόσο στον αέρα στο εσωτερικό του WCR όσο και πάνω από αυτό που φτάνει μέχρι και τους 615°C. Στα 700 s, κατά τη διάρκεια της περιόδου της πλήρως ανεπτυγμένης φωτιάς παρατηρείται ότι στην Περίπτωση Α1 οι θερμοκρασίες συνεχίζουν να είναι υψηλές και η φωτιά καλύπτει πλέον ολόκληρη την επιφάνεια του WCR. Αντίθετα, στην Περίπτωση Α2 παρατηρείται μείωση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια πάνω από το WCR και τα πιο θερμά στρώματα βρίσκονται γύρω από αυτό. Μετά το πέρας του κύριου μέρους της καύσης του WCR, στα 900 s, οι θερμοκρασίες μειώνονται και στις δύο περιπτώσεις και κυμαίνονται στους 300-370 ^{o}C. Συνολικά, παρατηρείται ότι στην Περίπτωση Α1 κυριαρχούν μεγαλύτερες θερμοκρασίες οι οποίες καλύπτουν και μεγαλύτερο χώρο πάνω από το WCR σε σχέση με την Περίπτωση Α2.

Ο ρυθμός απώλειας μάζας είναι μεγαλύτερος στην Περίπτωση Α1 από ότι στην Περίπτωση Α2. Στο επάνω μέρος του WCR, η απώλεια μάζας του ξύλου ξεκινάει στα 340 s από την έναρξη της προσομοίωσης στην Περίπτωση Α1 ενώ στην Περίπτωση Α2 στα 370 s, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.12. Σε αυτό το χρονικό διάστημα, στη Περίπτωση Α1 η απώλεια μάζας είναι ελάχιστα μεγαλύτερη από τη Περίπτωση Α2. Στα 600 s, παρατηρείται απώλεια μάζας κυρίως στο κέντρο του WCR που φτάνει τα 3,50 kg/m^3 και στις δύο περιπτώσεις. Στα 800 s, η απώλεια μάζας ξεκινάει να επεκτείνεται και πέρα από το κέντρο του WCR με τα επίπεδα απώλειας να παραμένουν στα 3,50 kg/m^3. Σε αυτό το χρονικό διάστημα, η ποσότητα του WCR που έχει πυρολυθεί στην Περίπτωση Α1 είναι πιο μεγάλη σε σχέση με την Περίπτωση Α2. Μετά το πέρας 2000 s από τη έναρξη της προσομοίωσης, παρατηρώντας το WCR και στις δύο περιπτώσεις, φαίνεται ξεκάθαρα ότι μεγαλύτερη απώλεια μάζας έχει υποστεί το WCR στην Περίπτωση Α1. Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις στις προλέξεις τόσο της θερμοκρασίας όσο και της απώλειας μάζας, αποφασίστηκε οι προσομοιώσεις του WCR με το κώδικα FDS να πραγματοποιηθούν χρησιμοποιώντας την μεθοδολογία για τον ορισμό της πυρόλυσης με χρήση ορισμού της θερμοκρασία αναφοράς.

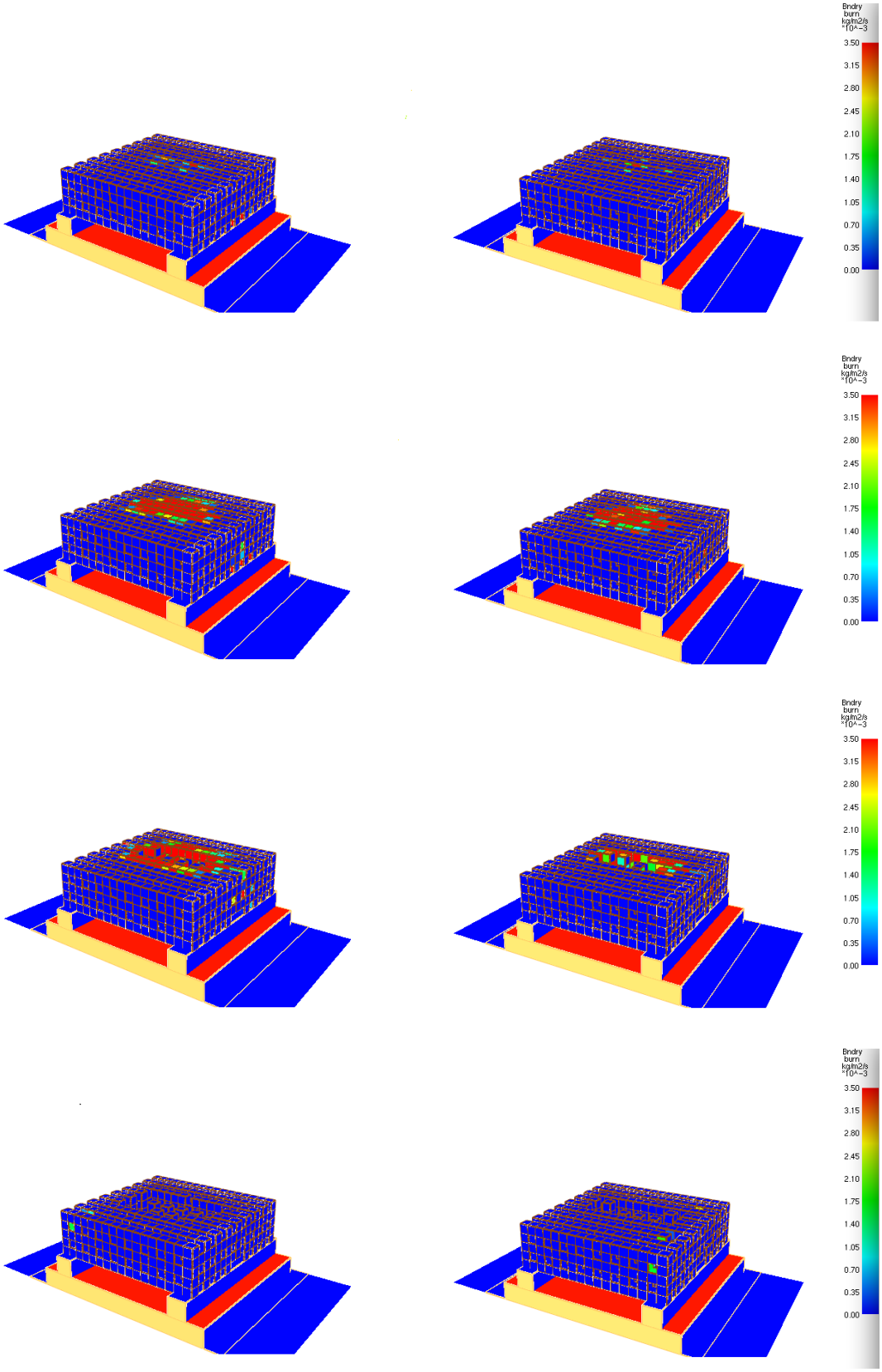
Επιλέγοντας επομένως την μεθοδολογία για τον ορισμό της πυρόλυσης του WCR, σχεδιάστηκε στον κώδικα FDS και η υπόλοιπη γεωμετρία της πειραματικής διάταξης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5, οι ξύλινες ράβδοι που αποτελούν το WCR στο πείραμα έχουν τετραγωνική διατομή 2,8 cm. Στην υπολογιστική προσομοίωση, επειδή το κάθε υπολογιστικό κελί του πλέγματος είναι 0,04 m, θα πρέπει και η διατομή των ξύλινων ράβδων να είναι η ελάχιστη δυνατή για να μπορεί να γίνει ο υπολογισμός της μεταφοράς θερμότητας στο στερεό. Για αυτό το λόγο, κάθε ξύλινη ράβδος του WCR είναι τετραγωνικής διατομής 4 cm και μήκους 44 cm με αποτέλεσμα το WCR να αποτελείται από 4 στοιβάδες ξύλινων ράβδων όπου κάθε στοιβάδα έχει 6 ξύλινες ράβδους. Ο τρόπος με τον οποίο μοντελοποιείται στο κώδικα FDS το WCR και γενικότερα το δωμάτιο της πειραματικής διάταξης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.10. Στη συγκεκριμένη εικόνα φαίνεται το πλέγμα και ότι η διατομή κάθε ξύλινης ράβδου εμπεριέχεται σε ένα υπολογιστικό κελί.



Σχήμα 4.10 Τομή ως προς τον άξονα z στο μέσο του WCR.



Σχήμα 4.11 Προλέξεις θερμοκρασίας αέρα κατά την ελεύθερη καύση του WCR για την Περίπτωση Α1 (δεξιά) και για την Περίπτωση Α2 (αριστερά) για τα 300, 500, 700 και 900 s της προσομοίωσης.



Σχήμα 4.12 Προλέξεις απώλειας μάζας του WCR για την Περίπτωση A1 (δεξιά) και για την Περίπτωση A2 (αριστερά) για τα 400, 600, 800 και 2000 s της προσομοίωσης.

4.6.Αποτελέσματα υπολογιστικής προσομοίωσης

Στο Σχήμα 4.13 παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο αναπτύσσεται η φωτιά στην αρχή της προσομοίωσης και κατά τη διάρκεια των κύριων σταδίων της (50, 600, 1000 και 1200 s). Στα 50 s, το πλούμιο της φωτιάς στην Περίπτωση B1 (Πίνακα 4.5) εξέρχεται από το εσωτερικού του δωματίου μέσω του ανοίγματος στο νότιο τοίχο. Στην Περίπτωση B2, στο ίδιο χρονικό διάστημα, η φωτιά είναι ακόμη μικρής έκτασης και φαίνεται να έχει κατεύθυνση προς το βόρειο τμήμα του δωματίου, δηλαδή προς την αντίθετη πλευρά από την οποία βρίσκεται το άνοιγμα. Στα 600 s, όπου στην Περίπτωση B2 ξεκινάει το στάδιο ανάπτυξης της φωτιάς, το ύψος της φτάνει μέχρι και το ταβάνι του δωματίου. Αντίθετα, στην Περίπτωση B1 σχεδόν όλη η φωτιά έχει βγει έξω από το δωμάτιο και βρίσκεται στη περιοχή του ανοίγματος. Στα 1000 s, δηλαδή στο στάδιο της πλήρως ανεπτυγμένης φωτιάς, στην Περίπτωση B2 η φωτιά έχει καλύψει το μεγαλύτερο μέρος του δωματίου και κυρίως το κάτω μέρος αυτού ενώ το πλούμιο της φωτιάς μέσω του ανοίγματος έχει βγει και έξω από το δωμάτιο. Ακόμη, έχει ξεκινήσει η μείωση της μάζας του WCR και η μεγαλύτερη απώλεια μάζας παρατηρείται στη πλευρά του WCR που είναι σε μεγαλύτερη απόσταση από το άνοιγμα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η φωτιά ξεκινάει να αναπτύσσεται από το βόρειο μέρος του δωματίου. Στην Περίπτωση B1, στο ίδιο χρονικό διάστημα, δεν υπάρχει φωτιά παρά μόνο σε μία μικρή εστία στο πάνω μέρος του ορθογωνικού στερεού. Στη φάση της μείωσης της φωτιάς στην Περίπτωση B2, σχεδόν όλο το WCR έχει καεί και ένα πολύ μικρό μέρος αυτού έχει παραμείνει στη θέση του. Η εστία της φωτιάς εξακολουθεί να καίει στην περιοχή όπου έχει τοποθετηθεί το μεταλλικό δοχείο, γεγονός που επιβεβαιώνει την παραδοχή που έγινε ότι η πηγή της φωτιάς παραμένει σταθερή σε όλο το χρόνο της προσομοίωσης. Στην Περίπτωση B1, στο τέλος της προσομοίωσης, η φωτιά έχει μεγαλύτερη ισχύ από ότι στα 1000 s και η εστία της έχει καλύψει εξολοκλήρου το πάνω μέρος του ορθογωνικού στερεού.

Περίπτωση	**Τρόπος προσομοίωσης WCR**
B1	Ορθογωνικό στερεό
B2	Ρεαλιστική μορφή WCR

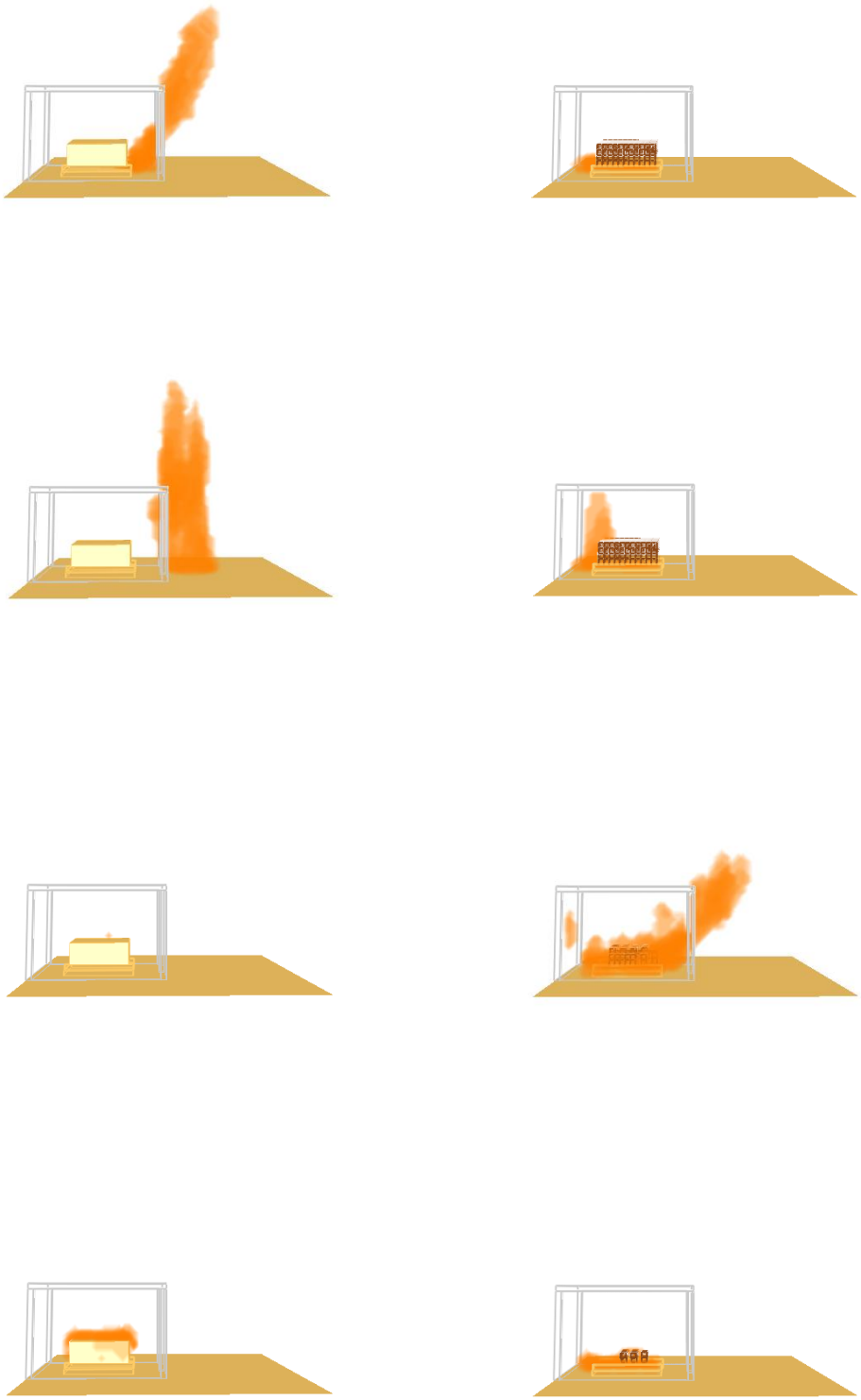
Πίνακας 4.5 Περιπτώσεις προσομοίωσης του WCR.

Στο Σχήμα 4.14 παρουσιάζεται το θερμοκρασιακό πεδίο στην τομή στο μέσο του δωματίου και του ανοίγματος για τις αντίστοιχες χρονικές στιγμές στα 50, 600, 1000 και 1200 δευτερόλεπτά. Στα πρώτα 50 s της προσομοίωσης, στην Περίπτωση B1 παρατηρούνται αρκετά υψηλές θερμοκρασίες στο εσωτερικό του δωματίου που κυμαίνονται από 300°C έως 600°C. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο επίπεδο του δωματίου στο ύψος του πατώματος οι θερμοκρασίες είναι χαμηλότερες και κυμαίνονται από 150°C έως 250°C. Στο ίδιο ύψος και στην περιοχή του δωματίου κοντά στο άνοιγμα η θερμοκρασία δεν είναι ιδιαίτερα υψηλή και σε κάποια σημεία είναι ίση με αυτή του περιβάλλοντος. Επίσης, η φωτιά εξέρχεται από το εσωτερικό του δωματίου και κινείται προς τα πάνω και στην περιοχή κοντά στο άνοιγμα η θερμοκρασία είναι υψηλότερη και φτάνει μέχρι και τους 700°C. Αντίθετα, στην Περίπτωση B2 η θερμοκρασία στο εσωτερικό του δωματίου δεν ξεπερνάει τους 275°C και μεγαλύτερες θερμοκρασίες επικρατούν στο βόρειο μέρος του δωματίου. Εδώ παρατηρείται ότι θερμά στρώματα αέρα, θερμοκρασίας μέχρι 300°C, εξέρχονται κυρίως διαμέσου του πάνω μέρος του ανοίγματος με ανοδική τάση κίνησης. Στο 600 s, στην Περίπτωση B1, η θερμοκρασία έχει μειωθεί αισθητά στο εσωτερικό του δωματίου. Συγκεκριμένα, από το επίπεδο του πάνω μέρους του ορθογωνικού στερεού και πάνω, η θερμοκρασία δεν ξεπερνάει τους 280°C ενώ πιο χαμηλά η θερμοκρασία είναι περίπου 100°C-150°C. Στο εξωτερικού του δωματίου, διαπιστώνεται η ύπαρξη θερμών στρωμάτων αέρα θερμοκρασίας μέχρι 600°C που οφείλεται στο ότι η φωτιά έχει βγει εκτός του δωματίου. Στο ίδιο χρονικό διάστημα, στην Περίπτωση B2 η θερμοκρασία αυξάνεται συνεχώς καθώς βρισκόμαστε στο στάδιο πλήρους ανάπτυξης της φωτιάς. Η θερμοκρασία στο μεγαλύτερο τμήμα του δωματίου δεν ξεπερνάει τους 550°C ενώ στην πλευρά του WCR που βρίσκεται στο βόρειο μέρος του δωματίου παρατηρείται σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας που φτάνει μέχρι και τους 800°C λόγω του ότι το WCR ξεκινάει να αναφλέγεται πρώτα

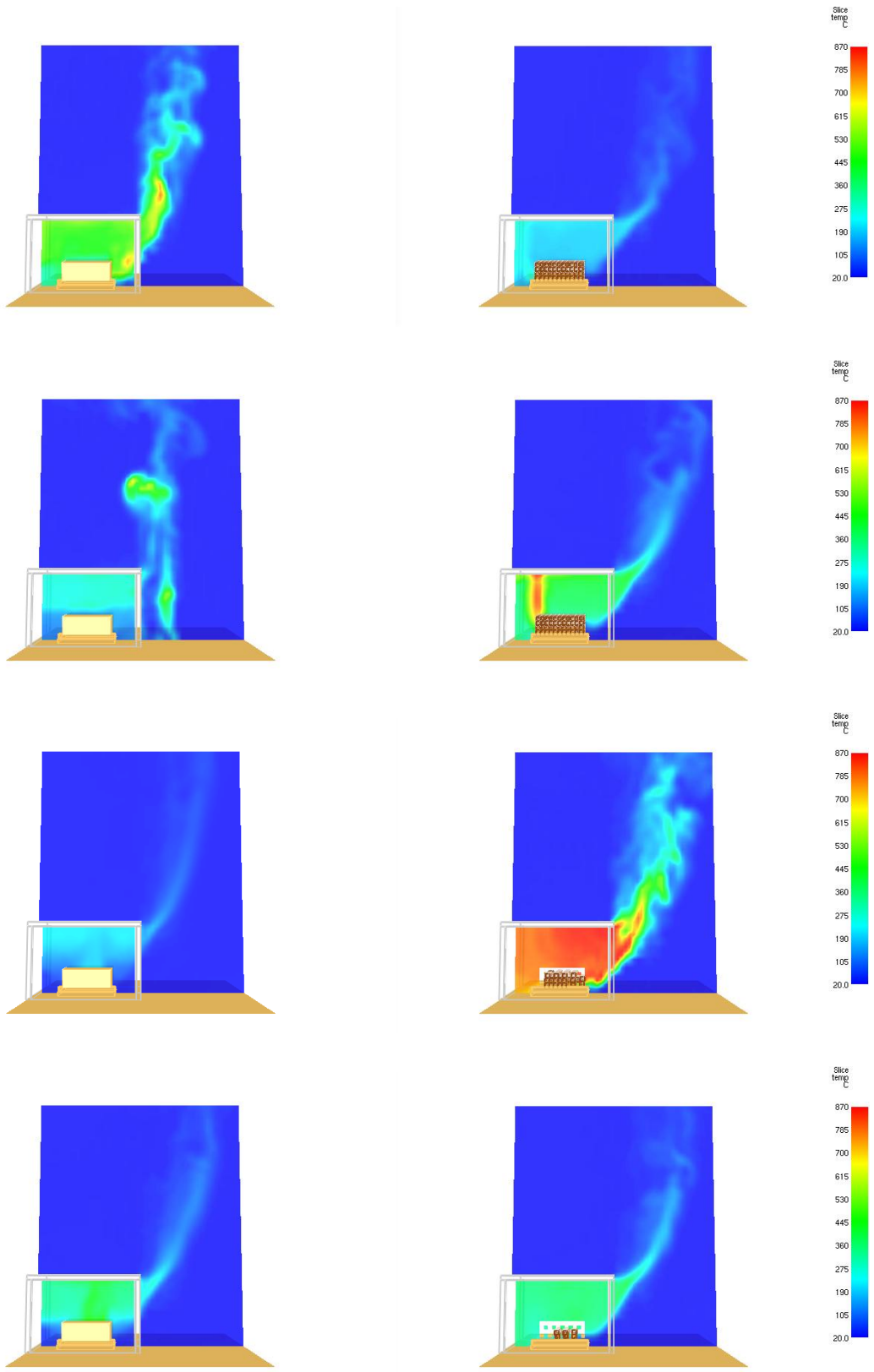
από εκείνη την πλευρά. Ακόμη, θερμά στρώματα αέρα εξέρχονται από το δωμάτιο με ανοδική κατεύθυνση. Στην περιοχή όπου βρίσκεται το άνοιγμα, στο επίπεδο του πατώματος η θερμοκρασία που επικρατεί φαίνεται να είναι ίση με αυτή του περιβάλλοντος. Αυτό οφείλεται στο ότι εισάγεται αέρας περιβάλλοντος από τα κατώτερα τμήματα του ανοίγματος. Στα 1000 s, στην Περίπτωση B1 η θερμοκρασία έχει πέσει αισθητά και δεν ξεπερνά τους 200°C. Αυτό οφείλεται στο ότι η ισχύς της φωτιάς έχει μειωθεί σε σχέση με τα προηγούμενα χρονικά διαστήματα κάτι που επιβεβαιώνεται και από το Σχήμα 4.13. Στην Περίπτωση B2, στο ίδιο χρονικό διάστημα η θερμοκρασία έχει αυξηθεί σε σχέση με πριν στο εσωτερικό του δωματίου και φτάνει μέχρι τους 870°C. Επίσης φαίνεται ότι έχει ξεκινήσει η κατανάλωση μάζας του WCR σε αυτό το χρονικό σημείο. Διαμέσου του ανοίγματος, θερμά στρώματα αέρα εξέρχονται από το δωμάτιο προς το περιβάλλον με θερμοκρασίες που κοντά στο άνοιγμα φτάνουν τους 800°C. Ακόμη, το πλούμιο της φωτιάς είναι μεγαλύτερου όγκου λόγω της αύξησης της ισχύος της φωτιάς. Στα 1200 s, στην Περίπτωση B1 η θερμοκρασία δεν ξεπερνάει τους 360°C. Στα κατώτερα στρώματα του δωματίου η θερμοκρασία δεν έχει καμία αύξηση. Στην Περίπτωση B2, επικρατούν παρόμοιες συνθήκες με την Περίπτωση B1. Η μόνη διαφορά είναι ότι στο βόρειο μέρος του εσωτερικού του δωματίου υπάρχουν θερμά στρώματα αέρα που φτάνουν μέχρι το επίπεδο του πατώματος. Και στις δύο περιπτώσεις, ένα θερμό στρώμα αέρα θερμοκρασίας περίπου 300°C βγαίνει διαμέσου του ανοίγματος προς το περιβάλλον με ανοδική κατεύθυνση.

Η απεικόνιση του ροϊκού πεδίου στο μέσο του δωματίου φαίνεται καθαρά στο Σχήμα 4.15 για τις χρονικές στιγμές των 50, 600, 1000 και 1200 s. Στα πρώτα 50 s της προσομοίωσης, στην Περίπτωση B1 παρατηρείται μεγάλη αύξηση της ταχύτητας της ροής στον περιβάλλοντα χώρο έξω από το δωμάτιο και κοντά στο άνοιγμα, μέσω του οποίου μεταφέρονται τα θερμά καυσαέρια από το δωμάτιο όπου είναι η εστία της φωτιάς. Οι μεγαλύτερες ταχύτητες παρουσιάζονται στον εξωτερικό χώρο πάνω από το άνοιγμα καθώς μέσω του ανοίγματος γίνεται η είσοδος των καυσαερίων στον περιβάλλοντα χώρο. Καθώς εξέρχονται από το άνοιγμα, η ταχύτητας τους είναι της τάξης των 3,5 m/s, με ανοδική κατεύθυνση. Στο πάνω μέρος του περιβάλλοντα χώρου δημιουργούνται δίνες που οφείλονται στη διαφορά θερμοκρασίας των θερμών καυσαερίων που εξέρχονται από το δωμάτιο σε σχέση με τη θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα που υπάρχει στο περιβάλλον. Στον περιβάλλοντα χώρο, η ταχύτητα των καυσαερίων φτάνει μέχρι και τα 4,50 m/s. Επίσης παρατηρείται μία μικρή ανακυκλοφορία καυσαερίων γύρω από τα τοιχώματα του δωματίου όπου η ταχύτητα τους δεν ξεπερνάει τα 2 m/s. Στην Περίπτωση B2, οι μεγαλύτερες ταχύτητες παρουσιάζονται στον εξωτερικό χώρο πάνω από το άνοιγμα και είναι της τάξης των 2,5 m/s. Και σε αυτήν την περίπτωση, στον περιβάλλοντα χώρο δημιουργούνται δίνες λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας των θερμών καυσαερίων και του ατμοσφαιρικού αέρα. Επίσης, παρατηρείται ανακυκλοφορία καυσαερίων γύρω από τα τοιχώματα του δωματίου όπου η μέγιστη ταχύτητά τους δεν ξεπερνάει τα 1,1 m/s. Στα 600 s, στην Περίπτωση B1 δεν φαίνεται να υπάρχουν σημαντικές μεταβολές στο ροϊκό πεδίο στο εσωτερικό του δωματίου. Στον εξωτερικό χώρο, τα καυσαέρια κινούνται κατακόρυφα από το άνοιγμα με ανοδική διεύθυνση με υψηλές ταχύτητες που φτάνουν τα 4,50 m/s. Αξίζει να σημειωθεί ότι, η μάζα των καυσαερίων όπου κινείται με υψηλή ταχύτητα έχει αυξηθεί σε σχέση με την αρχή της προσομοίωσης. Στην Περίπτωση B2, στο ίδιο χρονικό διάστημα και από τη στιγμή που ξεκινάει το στάδιο της ανάπτυξης της φωτιάς, υπάρχει δημιουργία αιθάλης και καυσαερίων, τα οποία μεταφέρονται από το βόρειο μέρος του δωματίου, διαμέσου της οροφής του δωματίου, προς το άνοιγμα και η ταχύτητα τους φτάνει μέχρι και 3,20 m/s. Στον εξωτερικό χώρο, συγκεντρώνονται τα καυσαέρια που εξέρχονται από το εσωτερικό του δωματίου και το μεγαλύτερο μέρος τους έχει ταχύτητα περίπου 3 m/s. Στα 1000 s, στην Περίπτωση B1 η ισχύς της φωτιάς από το ορθογωνικό στερεό έχει μειωθεί σε μεγάλο βαθμό με αποτέλεσμα να υπάρχει κίνηση καυσαερίων μόνο στον εξωτερικό χώρο και η ταχύτητα τους να μην ξεπερνάει τα 1,80 m/s. Στην Περίπτωση B2, στο ίδιο χρονικό διάστημα και κατά τη διάρκεια του σταδίου της πλήρως ανεπτυγμένης φωτιάς τα θερμά καυσαέρια που έχουν δημιουργηθεί από τη καύση του WCR έχουν γεμίσει το εσωτερικό του δωματίου με ταχύτητα που κοντά στο άνοιγμα είναι της τάξης των 3,5 m/s. Τα συγκεκριμένα καυσαέρια κινούνται κάθετα με φορά προς τα πάνω, ώσπου να φτάσουν στην οροφή και στη συνέχεια να κατευθυνθούν προς το άνοιγμα. Στον εξωτερικό χώρο, μεγάλο μέρος των θερμών καυσαερίων και της αιθάλης που εξέρχονται από το δωμάτιο έχουν ταχύτητα της τάξης των 4,50 m/s. Η μάζα αυτή φαίνεται να καλύπτει το υπολογιστικό χωρίο που έχει οριστεί έξω από το δωμάτιο από τη περιοχή του ανοίγματος και μετά. Ας σημειωθεί ότι τα καυσαέρια δεν έχουν τη τάση να κινηθούν στον περιβάλλοντα χώρο πάνω από το δωμάτιο. Στα 1200 s, στην

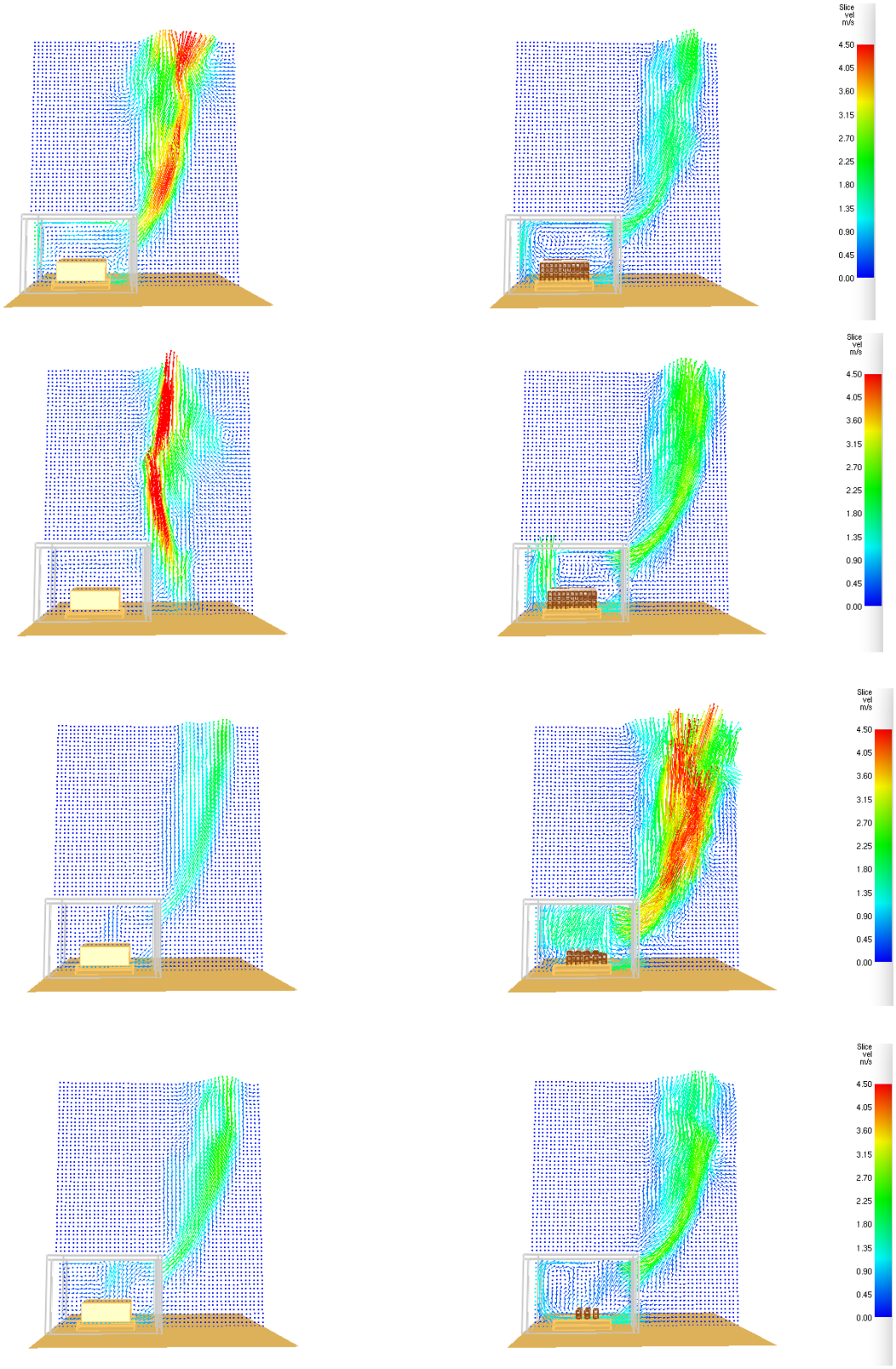
Περίπτωση Β1 η ισχύς της φωτιάς αυξάνεται ελάχιστα σε σχέση με πριν και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ροής καυσαερίων στο κέντρο του δωματίου πάνω από το ορθογωνικό στερεό που κινούνται με ταχύτητα της τάξης των 1,35 m/s. Στον εξωτερικό χώρο, αυξάνεται ελάχιστα και η ροή καυσαερίων με ανοδική κατεύθυνση με ταχύτητα που φτάνει τα 2,70 m/s. Στην Περίπτωση Β2, έχοντας φτάσει στο στάδιο της μείωσης της φωτιάς παρατηρείται μια ανακυκλοφορία καυσαερίων γύρω από τα τοιχώματα του δωματίου όπου η μέγιστη ταχύτητα που παρατηρείται είναι 2,50 m/s.



Σχήμα 4.13 Παρουσίαση εξάπλωσης της φωτιάς στις περιπτώσεις B1(αριστερά) και B2 (δεξιά) για 50, 600, 1000 και 1200 s της προσομοίωσης.



Σχήμα 4.14 Παρουσίαση θερμοκρασιακού πεδίου στις περιπτώσεις B1(αριστερά) και B2 (δεξιά) για 50, 600, 1000 και 1200 s της προσομοίωσης.



Σχήμα 4.15 Παρουσίαση διανυσματικού πεδίου ταχυτήτων στις περιπτώσεις B1(αριστερά) και B2 (δεξιά) για 50, 600, 1000 και 1200 s της προσομοίωσης.

4.6.1. Σύγκριση με τα διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα

Οι χρονικές μεταβολές θερμοκρασίας των αερίων και των επιφανειών εξαρτώνται από τον ρυθμό τροφοδότησης του καυσίμου (*fuel supply rate*) WCR. Προκειμένου να καθοριστεί η θέση των θερμοστοιχείων στο εσωτερικό του δωματίου και στη θέση του ανοίγματος ορίζεται το αδιάστατο ύψος ως:

$$\omega = \frac{z}{H} \tag{4.4}$$

όπου z είναι το ύψος του θερμοστοιχείου από την επιφάνεια του δαπέδου και H το ύψος του δωματίου.

Έτσι στο εσωτερικό του δωματίου έχουμε 8 θερμοστοιχεία στις θέσεις ω=0,1, ω=0,3, ω=0,4, ω=0,5, ω=0,6, ω=0,7, ω=0,8, ω=0,9. Στην ίδια θέση στο εσωτερικό του δωματίου, τοποθετείται και ένα θερμοστοιχείο 3 εκατοστά κάτω από το ταβάνι του δωματίου, προκειμένου να καταγράφει τις θερμοκρασίες στο πιο υψηλό επίπεδο. Στη μέση του ανοίγματος τοποθετούνται 5 θερμοστοιχεία στις θέσεις ω=0,1, ω=0,3, ω=0,5, ω=0,7, ω=0,9.

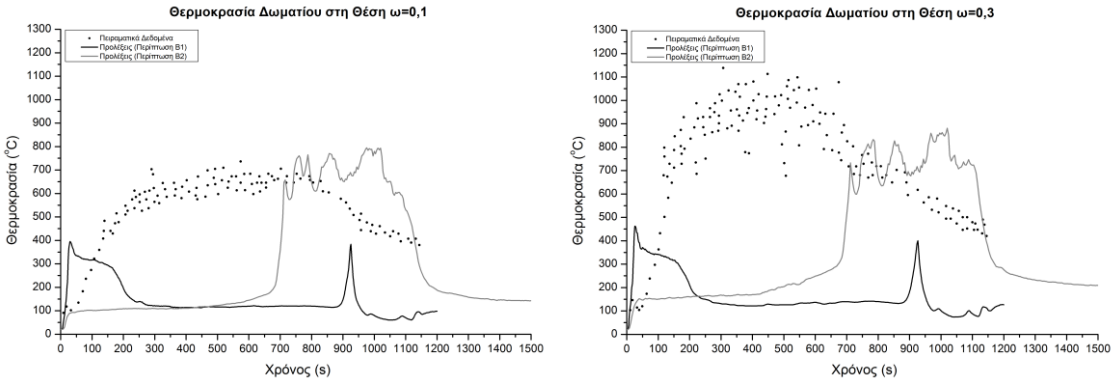
Στα Σχήματα 4.16, 4.17, 4.18, 4.19, 4.20 παρουσιάζονται οι πειραματικές μετρήσεις της θερμοκρασίας και οι προλέξεις από τον κώδικα FDS στο εσωτερικό του δωματίου για τα θερμοστοιχεία που βρίσκονται στις εννιά θέσεις μέτρησης ξεκινώντας από τη θέση ω=0,1 (Σχήμα 4.3). Με σύμβολα απεικονίζονται οι πειραματικές μετρήσεις και με συνεχή γραμμή τα υπολογιστικά αποτελέσματα. Οι προλέξεις από τον κώδικα FDS αντιστοιχούν τόσο στην Περίπτωση Β1 όσο και στην Περίπτωση Β2. Στη θέση μέτρησης ω=0,1, οι προλέξεις της θερμοκρασίας της Περίπτωσης Β1 δεν συμφωνούν με τις πειραματικές μετρήσεις. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα (Σχήμα 4.16), η θερμοκρασία αυξάνεται απότομα στην αρχή της προσομοίωσης και πέφτει μετά το πέρας περίπου 200 s. Στη συνέχεια, η θερμοκρασία παραμένει σταθερή περίπου στους 100°C μέχρι τα 900 s όπου σε αυτό το σημείο γίνεται μία απότομη αύξηση της θερμοκρασίας μέχρι τους 400°C για να επανέλθει περίπου στους 100°C μέχρι το τέλος της προσομοίωσης. Η όχι και τόσο καλή προσέγγιση είναι αναμενόμενη λόγω της απλουστευτικής προσέγγισης με την οποία έγινε η προσομοίωση του WCR.

Στα διαγράμματα των υπολοίπων θερμοστοιχείων που βρίσκονται στο εσωτερικό του δωματίου, όσο αφορά τις προλέξεις της θερμοκρασίας της Περίπτωσης Β1, δεν παρατηρείται κάποια αξιοσημείωτη αλλαγή στα αποτελέσματα σε σχέση με αυτά της θέσης ω=0,1. Το ίδιο ισχύει και για το θερμοστοιχείο που βρίσκεται στο άνω μέρους του τοίχου.

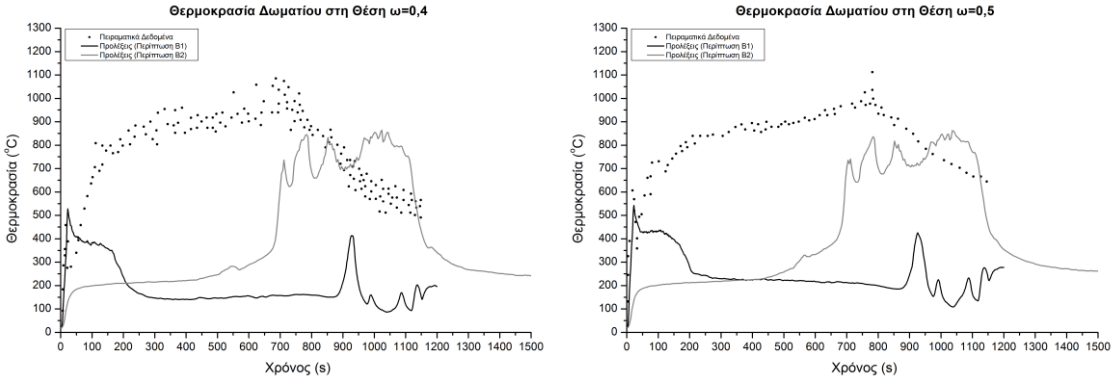
Όσο αφορά τις προλέξεις της θερμοκρασίας στην Περίπτωση Β2 για τη θέση ω=0,1, υπάρχει συμφωνία με τις πειραματικές μετρήσεις. Το πρόβλημα είναι ότι το φαινόμενο της πυρόλυσης αργεί να ξεκινήσει. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα (Σχήμα 4.16), το στάδιο της ανάπτυξης της φωτιάς ξεκινάει περίπου στα 650 s. Τα επίπεδα της θερμοκρασίας στο στάδιο της πλήρως ανεπτυγμένης φωτιάς συμφωνούν σε μεγάλο βαθμό με τις πειραματικές μετρήσεις, πράγμα που επιβεβαιώνει ότι οι ιδιότητες του ξύλου που χρησιμοποιήθηκαν από [Matala, 2008] είναι περίπου ίδιες με αυτές του ξύλου της πειραματικής διάταξης. Ένα άλλο πρόβλημα είναι ο χρόνος που διαρκεί το φαινόμενο της καύσης του WCR. Στις προλέξεις, ο χρόνος του φαινομένου της καύσης είναι περίπου 500 s ενώ στις πειραματικές μετρήσεις διαρκεί περίπου 1150 s. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η περίοδος της πλήρως ανεπτυγμένης φωτιάς στις προλέξεις δεν διαρκεί τόσο πολύ όσο στις πειραματικές μετρήσεις. Ένας λόγος που μπορεί να συμβαίνει αυτό οφείλεται στη παραδοχή που έγινε να μένει σταθερου ρυθμού έκλυσης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας του επτανίου για όλο το διάστημα της προσομοίωσης με αποτέλεσμα τη γρήγορη καύση του WCR.

Για την Περίπτωση Β2, στη θέση ω=0,3 οι προλέξεις της θερμοκρασίας προκύπτουν μικρότερες κατά 200°C σε σχέση με τις πειραματικές μετρήσεις όσο αφορά τις θερμοκρασίες στο στάδιο της πλήρως ανεπτυγμένης φωτιάς. Αντίστοιχα, στη θέση ω=0,4 οι προλέξεις της θερμοκρασίας προκύπτουν μικρότερες κατά 100°C σε σχέση με τις πειραματικές μετρήσεις. Στις ανώτερες θέσεις των

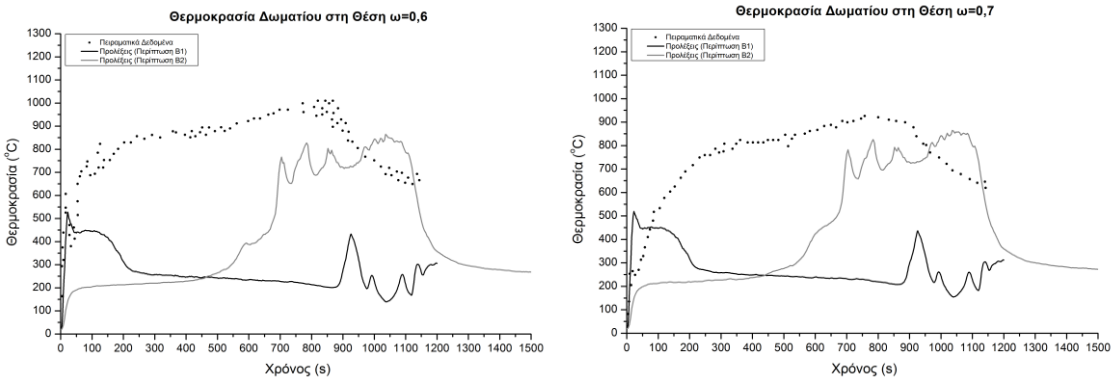
θερμοστοιχείων, οι προλέξεις είναι πάλι μικρότερες σε σχέση με τις πειραματικές μετρήσεις με απόκλιση 50-100°C. Στη θέση του θερμοστοιχείου που βρίσκεται στο άνω μέρους του τοίχου υπάρχουν κοινά χαρακτηριστικά με τη θέση του θερμοστοιχείου που βρίσκεται στη θέση ω=0,9.



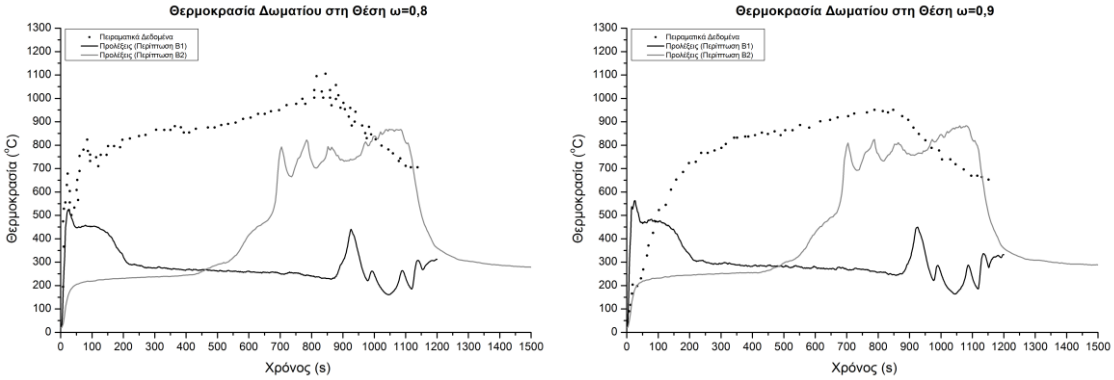
Σχήμα 4.16 Διαγράμματα πειραματικών δεδομένων και προλέξεων θερμοκρασίας στο εσωτερικό του δωματίου στις θέσεις μέτρησης των θερμοστοιχείων ω=0,1 και ω=0,3.



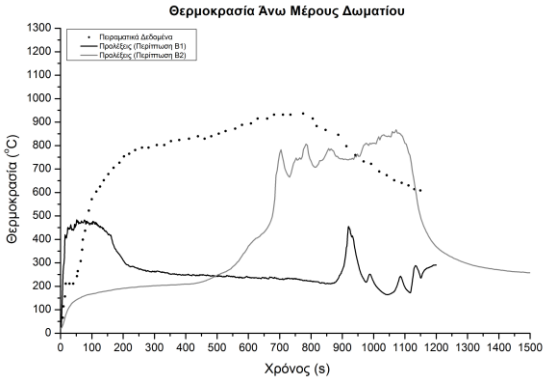
Σχήμα 4.17 Διαγράμματα πειραματικών δεδομένων και προλέξεων θερμοκρασίας στο εσωτερικό του δωματίου στις θέσεις μέτρησης των θερμοστοιχείων ω=0,4 και ω=0,5.



Σχήμα 4.18 Διαγράμματα πειραματικών δεδομένων και προλέξεων θερμοκρασίας στο εσωτερικό του δωματίου στις θέσεις μέτρησης των θερμοστοιχείων ω=0,6 και ω=0,7



Σχήμα 4.19 Διαγράμματα πειραματικών δεδομένων και προλέξεων θερμοκρασίας στο εσωτερικό του δωματίου στις θέσεις μέτρησης των θερμοστοιχείων ω=0,8 και ω=0,9.



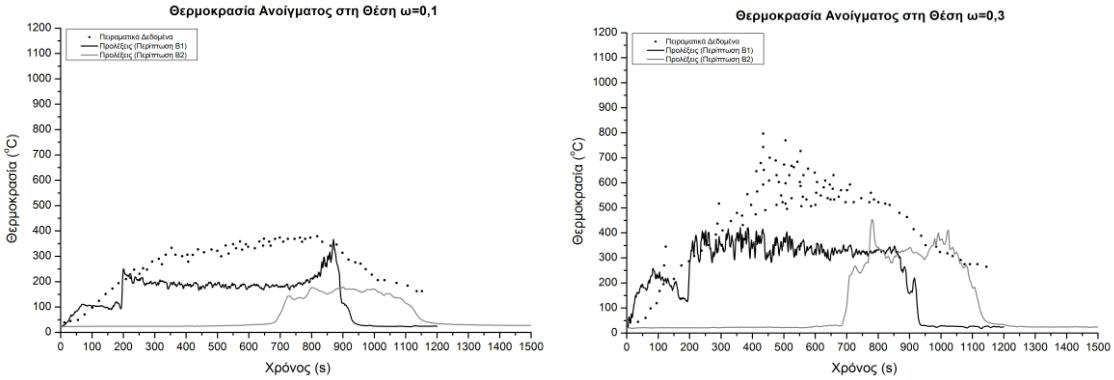
Σχήμα 4.20 Διάγραμμα πειραματικών δεδομένων και προλέξεων θερμοκρασίας στο άνω μέρος στο εσωτερικό του δωματίου.

Στα Σχήματα 4.21, 4.22 και 4.23 παρουσιάζονται οι πειραματικές μετρήσεις της θερμοκρασίας και οι προλέξεις από τον κώδικα FDS στη θέση του ανοίγματος για τα θερμοστοιχεία που βρίσκονται σε πέντε θέσεις μέτρησης ξεκινώντας από τη θέση ω=0,1 (Σχήμα 4.3). Με σύμβολα απεικονίζονται οι πειραματικές μετρήσεις και με συνεχή γραμμή τα υπολογιστικά αποτελέσματα. Οι προλέξεις από το κώδικα FDS αντιστοιχούν τόσο στην Περίπτωση Β1 όσο και στην Περίπτωση Β2. Στη θέση μέτρησης ω=0,1 οι προλέξεις της θερμοκρασίας στην Περίπτωση Β1 συμφωνούν σε μεγαλύτερο βαθμό με τις πειραματικές μετρήσεις στο άνοιγμα από ότι στο εσωτερικό του δωματίου. Όπως φαίνεται στο αντίστοιχο διάγραμμα (Σχήμα 4.20), το στάδιο της ανάπτυξης της φωτιάς προσεγγίζεται αρκετά καλά. Στο στάδιο της πλήρως ανεπτυγμένης φωτιάς υπάρχει μία απόκλιση 100-150°C και δεν υπάρχει τάση αύξησης θερμοκρασίας. Περίπου από τα 800 s, παρατηρείται μία ξαφνική αύξηση της θερμοκρασίας μέχρι τους 370°C, όσο δηλαδή είναι και οι πειραματικές μετρήσεις. Στη συνέχεια, στη φάση της μείωσης της φωτιάς, υπάρχει κατακόρυφη πτώση των προλέξεων της θερμοκρασίας στα επίπεδα της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος όπου παραμένει σταθερή μέχρι το τέλος του χρόνου προσομοίωσης, ενώ η φάση της μείωσης της φωτιάς στις πειραματικές μετρήσεις διαρκεί περίπου για 200 s και η μείωση της θερμοκρασίας είναι περίπου 100°C.

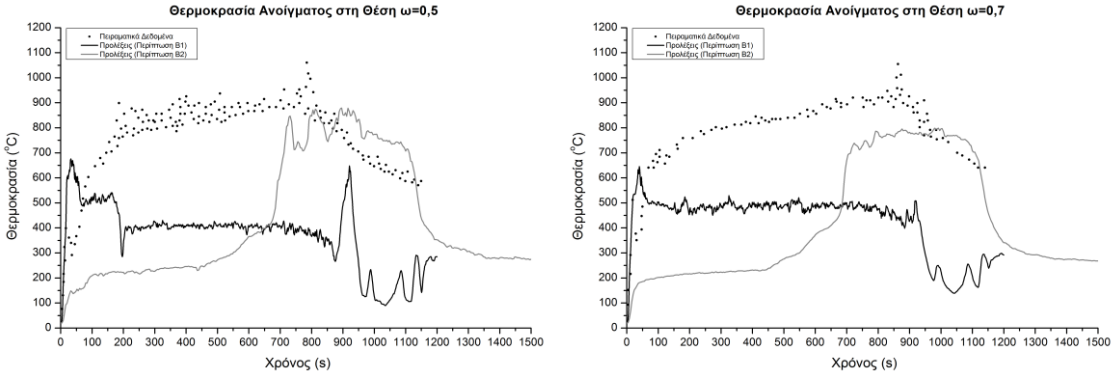
Στα διαγράμματα των υπολοίπων θερμοστοιχείων που βρίσκονται στη θέση του ανοίγματος (Σχήματα 4.21, 4.22 και 4.23), όσο αφορά τις προλέξεις της θερμοκρασίας στην Περίπτωση Β1, μπορούν να γίνουν οι εξής παρατηρήσεις. Το στάδιο ανάπτυξης της φωτιάς προσεγγίζεται αρκετά καλά και στις υπόλοιπες θέσεις των θερμοστοιχείων του ανοίγματος. Στο στάδιο της πλήρως ανεπτυγμένης φωτιάς παρατηρείται ότι το μέγιστο των προλέξεων της θερμοκρασίας είναι μικρότερο κατά περίπου 400°C από το μέγιστο των πειραματικών μετρήσεων, γεγονός που παρατηρείται και σε όλες τις θέσεις των θερμοστοιχείων. Στο στάδιο της μείωσης της φωτιάς, στη θέση μέτρησης ω=0,3, παρατηρείται η ίδια κατακόρυφη πτώση των προλέξεων της θερμοκρασίας φτάνοντας τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στις υπόλοιπες θέσεις όμως, παρατηρείται μία συνεχής αυξομείωση των προλέξεων της θερμοκρασίας σε αυτό το στάδιο της φωτιάς και ο μέσος όρος των προλέξεων της θερμοκρασίας είναι περίπου 200°C.

Όσο αφορά τις προλέξεις της θερμοκρασίας στη προσομοίωση του WCR στην Περίπτωση Β2, τα αποτελέσματα στη θέση ω=0,1 όπως και στις προλέξεις θερμοκρασίας στο εσωτερικό του δωματίου παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά. Το φαινόμενο της πυρόλυσης αργεί να ξεκινήσει, όπως φαίνεται και στο αντίστοιχο διάγραμμα (Σχήμα 4.20). Στο στάδιο ανάπτυξης της φωτιάς παρατηρείται μία αύξηση 100°C, η οποία οδηγεί στο στάδιο της πλήρως ανεπτυγμένης φωτιάς. Βέβαια, και εδώ υπάρχει απόκλιση της τάξης 100-150°C μεταξύ των προλέξεων και των πειραματικών μετρήσεων. Η καύση του WCR φαίνεται από το διάγραμμα ότι διαρκεί για περίπου 500 s, όσο και στις προλέξεις της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του δωματίου. Από το διάγραμμα διαπιστώνεται ότι και εδώ η μορφή της καμπύλης είναι παρόμοια με αυτή των πειραματικών μετρήσεων όμως, η περίοδος της πλήρως ανεπτυγμένης φωτιάς στις προλέξεις δεν διαρκεί τόσο πολύ όσο στις πειραματικές μετρήσεις.

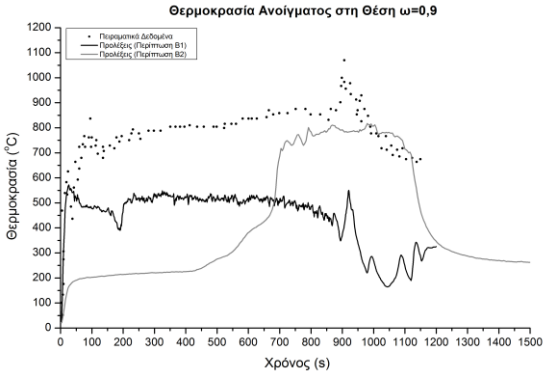
Στις ανώτερες θέσεις των θερμοστοιχείων, παρατηρείται ότι οι θερμοκρασίες αυξάνονται όσο αυξάνεται και το ύψος των θερμοστοιχείων όπως και στις πειραματικές μετρήσεις. Και πάλι όμως, οι προλέξεις της θερμοκρασίας είναι μικρότερες από αυτές των πειραματικών μετρήσεων. Η διαφορά του μέγιστου των προλέξεων της θερμοκρασίας είναι περίπου 250°C από το μέγιστο των πειραματικών μετρήσεων στη θέση ω=0,3. Στις ανώτερες θέσεις θερμοστοιχείων παρατηρείται ότι οι προλέξεις της θερμοκρασίας προσεγγίζουν με καλύτερο τρόπο τις πειραματικές μετρήσεις, καθώς η απόκλιση μειώνεται περίπου στους 50°C.



Σχήμα 4.21 Διαγράμματα πειραματικών δεδομένων και προλέξεων θερμοκρασίας στο κέντρο του ανοίγματος στις θέσεις μέτρησης των θερμοστοιχείων ω=0,1 και ω=0,3.



Σχήμα 4.22 Διαγράμματα πειραματικών δεδομένων και προλέξεων θερμοκρασίας στο κέντρο του ανοίγματος στις θέσεις μέτρησης των θερμοστοιχείων ω=0,5 και ω=0,7.



Σχήμα 4.23 Διάγραμμα πειραματικών δεδομένων και προλέξεων θερμοκρασίας στο κέντρο του ανοίγματος στη θέση μέτρησης του θερμοστοιχείου ω=0,9.

Στους συγκεντρωτικούς Πίνακες 4.6 και 4.7 που ακολουθούν παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές καθώς και ο μέσος όρος των θερμοκρασιών για όλες τις παραπάνω περιπτώσεις (Περιπτώσεις Β1 και Β2), τόσο για τις προλέξεις όσο και για τις πειραματικές μετρήσεις. Οι τιμές αυτές υπολογίστηκαν για όλες τις θέσεις και τα ύψη που υπήρχαν διαθέσιμες πειραματικές μετρήσεις. Ο Πίνακας 4.6 αφορά τα θερμοστοιχεία που βρίσκονται στο εσωτερικό του δωματίου ενώ ο Πίνακας 4.7 αφορά τα θερμοστοιχεία που βρίσκονται στο άνοιγμα. Ακόμη, υπολογίστηκε το σχετικό σφάλμα των μέγιστων τιμών και των μέσων όρων μεταξύ πειραματικών τιμών και προλέξεων. Για τον υπολογισμό του σχετικού σφάλματος ε χρησιμοποιήθηκε η Εξίσωση (4.5):

$$\varepsilon = \frac{(\text{τιμή πειραματικών δεδομένων})\text{-}(\text{τιμή προλέξεων FDS})}{\left(\text{τιμή πειραματικών δεδομένων}\right)} \tag{4.5}$$

Τα γενικά συμπεράσματα της προσομοίωσης της πειραματικής διάταξης χρησιμοποιώντας του δύο τρόπους των Περιπτώσεων Β1 και Β2 συνοψίζονται ως εξής:

- Η Περίπτωση Β2, είναι, γενικά, αυτή που προσεγγίζει με το καλύτερο τρόπο τα πειραματικά δεδομένα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη χρήση πιο λεπτομερούς προσέγγισης που χρησιμοποιήθηκε στην Περίπτωση Β2 από αυτήν της Περίπτωσης Β1.

- Η Περίπτωση Β1 παρουσιάζει τις μεγαλύτερες αποκλίσεις όσο αφορά τις μέγιστες τιμές θερμοκρασίες σε κάθε θέση τόσο στο άνοιγμα όσο και στο εσωτερικό του δωματίου.

- Η Περίπτωση Β1 παρουσιάζει τις μεγαλύτερες αποκλίσεις όσο αφορά και το μέσο όρο της θερμοκρασίας σε κάθε θέση τόσο στο άνοιγμα όσο και στο εσωτερικό του δωματίου. Η διαφορά της απόκλισης των δύο περιπτώσεων, όσο αφορά το μέσο όρο της θερμοκρασίας, είναι μικρή.

Τα υπολογιστικά αποτελέσματα για τις θερμοκρασίες δεν προσεγγίζουν απόλυτα τις πειραματικές μετρήσεις, όμως υπάρχει μια βάση σε αυτό, καθώς ο κώδικας FDS όπως έχει παρατηρηθεί από πολλούς ερευνητές δεν δύναται ακόμα να προσομοιώσει με τον πλέον ικανοποιητικό τρόπο την εξέλιξη φωτιάς σε διαμέρισμα σε συνθήκες μη επαρκούς αερισμού. Το συγκεκριμένο πεδίο μελέτης είναι ακόμα υπό διερεύνηση.

Οι αρνητικές τιμές σφάλματος αντιστοιχούν σε υπερεκτίμηση των πειραματικών μετρήσεων σε σχέση με τις προλέξεις ενώ οι θετικές τιμές σφάλματος αντιστοιχούν σε υποεκτίμηση των πειραματικών μετρήσεων σε σχέση με τις προλέξεις.

Σχετικό σφάλμα (%)				
Θέση θερμοστοιχείου	**Περίπτωση Β1**		**Περίπτωση Β2**	
	Μέγιστης τιμής	**Μέσου όρου**	**Μέγιστης τιμής**	**Μέσου όρου**
ω=0,1	46,31	73,96	-7,9	64,63
ω=0,3	59,36	78,86	22,6	65,98
ω=0,4	51,28	74,51	20,33	60,59
ω=0,5	51,15	68,65	22,47	60,6
ω=0,6	47,74	65,31	14,37	58,7
ω=0,7	43,91	60,41	6,64	52,61
ω=0,8	52,65	64,89	21,38	59,26
ω=0,9	40,41	56,96	7,06	51,14
Άνω μέρος δωματίου	48,4	58,9	7,37	53,63

Πίνακας 4.6 Σχετικό σφάλμα για τις Περιπτώσεις Β1 και Β2 στο εσωτερικό του δωματίου.

Σχετικό σφάλμα (%)				
Θέση θερμοστοιχείου	**Περίπτωση Β1**		**Περίπτωση Β2**	
	Μέγιστης τιμής	**Μέσου όρου**	**Μέγιστης τιμής**	**Μέσου όρου**
ω=0,1	3,08	49,96	52,73	85,42
ω=0,3	47,09	51,68	43,06	89,07
ω=0,5	44,15	51,65	27,37	57,37
ω=0,7	38,83	45,29	24,27	58,82
ω=0,9	46,55	40,38	23,59	57,03

Πίνακας 4.7 Σχετικό σφάλμα για τις Περιπτώσεις Β1 και Β2 στη θέση του ανοίγματος.

4.7.Παραμετρική μελέτη επίδρασης ανοίγματος

4.7.1. Εισαγωγή

Υπάρχουν δύο κυρίαρχες καταστάσεις σε μία πλήρως ανεπτυγμένη φωτιά σε ένα δωμάτιο σε σχέση με τη διαθεσιμότητα αέρα για την καύση των στερεών καυσίμων. Ο καθολικός λόγος ισοδυναμίας (Global Equivalence Ratio – GER) ορίζεται , όπως φαίνεται στην Εξίσωση 4.5 [Hwang, 2009], και χαρακτηρίζει τις συνθήκες αερισμού στο εσωτερικό του δωματίου.

$$(GER) = \frac{r_s}{Y_{O_2,a}} \times \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} \tag{1.5}$$

όπου: r_s είναι το στοιχειομετρικό κλάσμα μάζας οξυγόνου – επτανίου

$Y_{O_2,a}$ είναι το στοιχειομετρικό κλάσμα μάζας οξυγόνου στον ατμοσφαιρικό αέρα,

$\dot{m}_f$ είναι ο ρυθμός κατανάλωσης του καυσίμου και

$\dot{m}_a$ είναι η παροχή μάζας του αέρα μέσω ενός ανοίγματος από του δωματίου φωτιάς.

Για την παροχή μάζας $\dot{m}_a$, ισχύει:

$$\dot{m}_a \approx 0,52 A_o \sqrt{h_o} \tag{1.6}$$

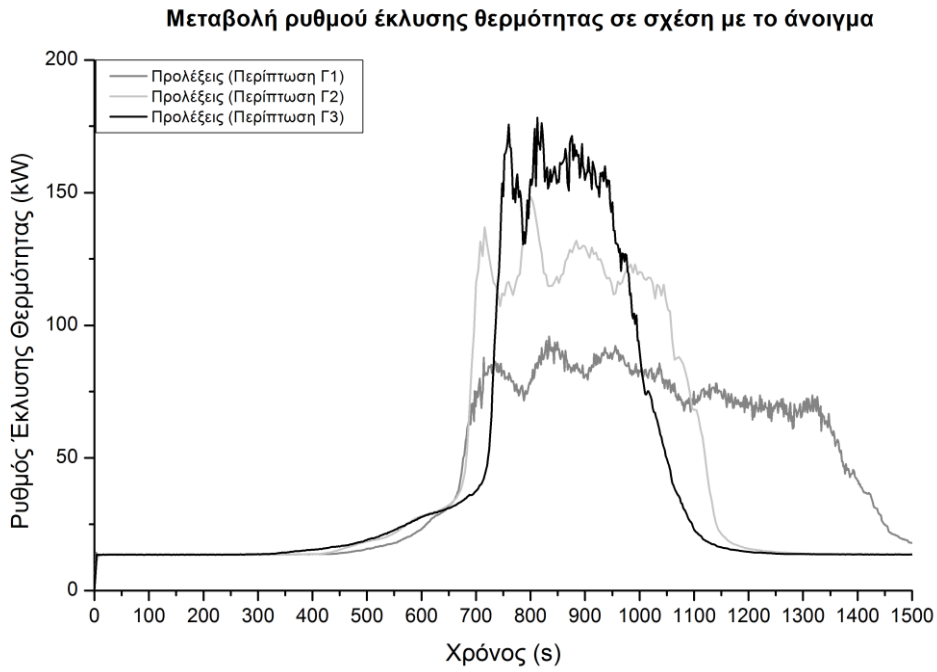
όπου A_o και h_o είναι το εμβαδόν και το ύψος του ανοίγματος αντίστοιχα [Hwang, 2009].

Όταν ισχύει GER<1 κυριαρχούν συνθήκες περίσσειας αέρα στο δωμάτιο (overventillated conditions), όπου τα ποσοστά CO και άκαυστων υδρογονανθράκων είναι πολύ μικρά (μερικές φορές τείνουν στο μηδέν), λόγω της σχεδόν τέλειας καύσης. Για GER>1 έχουμε συνθήκες μη επαρκούς αερισμού (underventillated conditions), όπου τα ποσοστά των τοξικών ουσιών μπορεί να είναι μεγαλύτερα κατά 10 φορές σε σχέση με τις συνθήκες περίσσειας αέρα. Στην πειραματική διάταξη οι συνθήκες που επικρατούν στο δωμάτιο είναι συνθήκες μη επαρκούς αερισμού. Σε αυτήν την παραμετρική μελέτη, εξετάζεται πόσο επηρεάζει το μήκος του ανοίγματος τη θερμοκρασία τόσο στο εσωτερικό του δωματίου όσο και στη θέση του ανοίγματος για 3 διαφορετικές τιμές του ανοίγματος. Το άνοιγμα στην αρχική προσομοίωση είναι 12 cm {Περίπτωση Γ2} και χωρίς να γίνει άλλη αλλαγή δεδομένων άλλαξε το άνοιγμα σε 8 cm {Περίπτωση Γ1} και σε 16 cm {Περίπτωση Γ3} και παρουσιάζονται στο Πίνακα 4.8.

Περίπτωση	Μήκος ανοίγματος
Γ1	8 cm
Γ2	12 cm
Γ3	16 cm

Πίνακας 4.8 Περιπτώσεις παραμετρικής μελέτης ως προς το άνοιγμα.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.24, που παρουσιάζεται ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας, όσο μειώνεται το άνοιγμα τόσο αυξάνεται και ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας. Ακόμη, όσο αυξάνεται το άνοιγμα, αυξάνει και το πλάτος της καμπύλης του ρυθμού έκλυσης θερμότητας, δηλαδή αυξάνεται ο χρόνος καύσης του WCR. Στην Περίπτωση Γ1, το μέγιστο του ρυθμού έκλυσης θερμότητας είναι περίπου 175 kW και η διάρκεια της καύσης είναι περίπου 300-350 s. Στην Περίπτωση Γ2, το μέγιστο του ρυθμού έκλυσης θερμότητας είναι περίπου 150 kW και ο χρόνος διάρκειας της καύσης είναι περίπου 500 s. Στην Περίπτωση Γ3, το μέγιστο δεν ξεπερνάει τα 100 kW και ο χρόνος διάρκειας της καύσης είναι περίπου 700 s, δηλαδή σχεδόν διπλάσιος από την Περίπτωση Γ1. Συνεπώς, με την αύξηση του μήκους του ανοίγματος παρατηρείται αύξηση του μέγιστου του ρυθμού έκλυσης θερμότητας αλλά ταυτόχρονα και μείωση του χρόνου διάρκειας καύσης του WCR. Αυτό συμβαίνει γιατί η φωτιά έχει το απαραίτητο οξυγόνο στο εσωτερικό του δωματίου που χρειάζεται, που διοχετεύεται μέσω του ανοίγματος, για να διατηρηθεί η καύση του WCR.



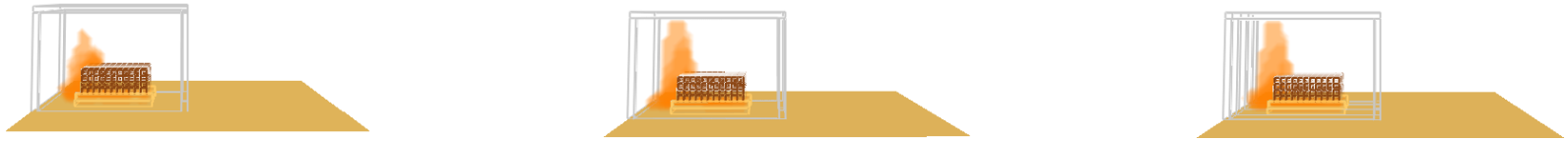
Σχήμα 4.24 Μεταβολή ρυθμού έκλυσης θερμότητας ως προς το μήκος του ανοίγματος.

4.7.2. <u>Αποτελέσματα υπολογιστικής προσομοίωσης</u>

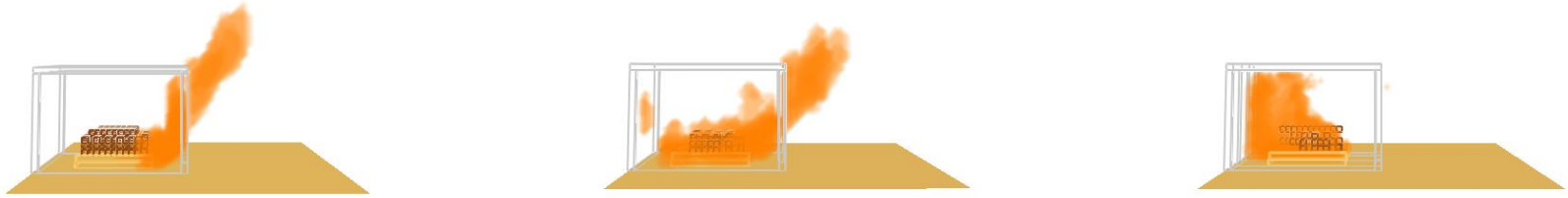
Στα Σχήματα 4.25, 4.26 και 4.27 παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο αναπτύσσεται η φωτιά σε τρεις διαφορετικές χρονικές στιγμές (600, 1000 και 1200 s) για τις περιπτώσεις Γ1, Γ2 και Γ3. Οι χρόνοι αυτοί αντιπροσωπεύουν τα 3 στάδια της καύσης: το στάδιο της ανάπτυξης της φωτιάς, της πλήρως ανεπτυγμένης φωτιάς και της μείωσης της φωτιάς. Στα 600 s, η φωτιά ξεκινά να αναπτύσσεται στο βόρειο τμήμα του δωματίου και καθώς αυξάνεται το άνοιγμα ανάλογα με την περίπτωση η φωτιά στο πίσω μέρος του WCR έχει και μεγαλύτερη ισχύ. Στα 1000 s, στην Περίπτωση Γ1 η φωτιά βγαίνει από το εσωτερικό του δωματίου διαμέσου του ανοίγματος. Αυτό οφείλεται στο ότι το άνοιγμα είναι πολύ μικρό και δεν επιτρέπει την ελεύθερη είσοδο αέρα στο εσωτερικό του δωματίου, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει αρκετή διαθεσιμότητα οξυγόνου για να διατηρηθεί η φωτιά. Αυτό επιβεβαιώνεται παρατηρώντας την ίδια χρονική στιγμή την Περίπτωση Γ3. Η φωτιά σε αυτή την περίπτωση παραμένει μέσα στο εσωτερικό του δωματίου καθώς έχει το απαραίτητο οξυγόνο που χρειάζεται για να διατηρηθεί. Στα 1200 s, στην Περίπτωση Γ1 το στάδιο της πλήρως ανεπτυγμένης φωτιάς δεν έχει ολοκληρωθεί καθώς το WCR συνεχίζει να καίγεται. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις η ισχύς της φωτιάς έχει μειωθεί αισθητά. Όμως, παρατηρείται μεγαλύτερη απώλεια μάζας του WCR στην Περίπτωση Γ2 από ότι στην Γ3.

Στα Σχήματα 4.28, 4.29 και 4.30 παρουσιάζεται το θερμοκρασιακό πεδίο στο μέσο του δωματίου και του ανοίγματος σε τρεις διαφορετικές χρονικές στιγμές (600, 1000 και 1200 s) για τις περιπτώσεις Γ1, Γ2 και Γ3. Στα 600 s, δεν παρατηρείται κάποια σημαντική διαφοροποίηση στις θερμοκρασίες σε καμία από τις τρεις περιπτώσεις. Στην Περίπτωση Γ2, στην περιοχή όπου ξεκινάει να καίγεται το WCR στη Περίπτωση Γ2 η θερμοκρασία είναι ελάχιστα μεγαλύτερη από τις άλλες περιπτώσεις και φτάνει μέχρι και τους 850°C. Στα 1000 s, παρατηρείται ότι καθώς το άνοιγμα μεγαλώνει αυξάνεται και η θερμοκρασία του εσωτερικού του δωματίου. Συγκεκριμένα, στην Περίπτωση Γ1 η θερμοκρασία του δωματίου φτάνει μέχρι τους 680°C και μέχρι τους 800°C στη περιοχή κοντά στο άνοιγμα. Στη, Περίπτωση Γ2, η θερμοκρασία στο βόρειο μέρος του δωματίου είναι της τάξης των 700°C και αυξάνεται μέχρι τους 800°C στην περιοχή κοντά στο άνοιγμα. Στην Περίπτωση Γ3, στο βόρειο μέρος εντοπίζονται οι μεγαλύτερες θερμοκρασίες και είναι της τάξης των 850°C ενώ στο άνοιγμα η θερμοκρασία φτάνει μέχρι τους 800°C. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η φωτιά παραμένει στο εσωτερικό του δωματίου και κυρίως στο βόρειο μέρος. Ακόμη τα καυσαέρια που εξέρχονται από το άνοιγμα προς το περιβάλλον έχουν μεγαλύτερη θερμοκρασία στις περιπτώσεις Γ2 και Γ3. Στα 1200 s, στην Περίπτωση Γ1 η θερμοκρασία παραμένει στα ίδια επίπεδα και κοντά στο άνοιγμα αυξάνεται και είναι της τάξης των 800°C. Στην Περίπτωση Γ2, έχοντας ολοκληρωθεί η καύση του WCR η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη, της τάξης των 275°C. Στην Περίπτωση Γ3, έχει ολοκληρωθεί η καύση του WCR και η θερμοκρασία έχει πέσει στους 250°C.

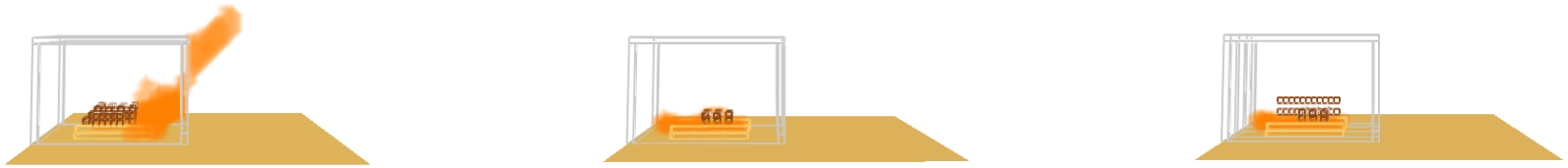
Στα Σχήματα 4.31, 4.32 και 4.33 απεικονίζεται το ροϊκό πεδίο στο μέσο του δωματίου σε τρεις διαφορετικές χρονικές στιγμές (600, 1000 και 1200 s) για τις περιπτώσεις Γ1, Γ2 και Γ3. Στα 600 s δεν παρατηρείται σημαντική διαφοροποίηση στις τρεις περιπτώσεις. Και στις τρεις περιπτώσεις υπάρχει ανακυκλοφορία καυσαερίων που ξεκινάει από το βόρειο τμήμα του δωματίου, όπου τα καυσαέρια φτάνουν στην οροφή του δωματίου και οδηγούνται προς το άνοιγμα. Μεγαλύτερες ταχύτητες τόσο στα καυσαέρια στο εσωτερικό του δωματίου όσο και στα καυσαέρια που εξέρχονται στο περιβάλλοντα χώρο παρουσιάζονται στις περιπτώσεις Γ2 και Γ3, της τάξης των 3,50 m/s. Στα 1000 s, στην Περίπτωση Γ1 παρατηρείται κίνηση καυσαερίων γύρω από τα τοιχώματα του δωματίου με ταχύτητα της τάξης των 1,35 m/s. Στις περιπτώσεις Γ2 και Γ3 η κίνηση καυσαερίων στο εσωτερικό του δωματίου παρατηρείται σχεδόν σε ολόκληρο το δωμάτιο με ταχύτητες της τάξης των 1,80 m/s. Όσο αφορά τα καυσαέρια που βρίσκονται στον εξωτερικό χώρο, και στις τρεις περιπτώσεις κινούνται με ταχύτητες που φτάνουν τα 4,50 m/s. Μεγαλύτερος όγκος καυσαερίων που κινούνται με αυτή τη ταχύτητα παρατηρείται στις περιπτώσεις Γ2 και Γ3. Στα 1200 s, στις περιπτώσεις Γ2 και Γ3 παρατηρείται ανακυκλοφορία καυσαερίων γύρω από τα τοιχώματα του δωματίου με ταχύτητες της τάξης των 1,20 m/s. Στον περιβάλλοντα χώρο, τα καυσαέρια κινούνται με ταχύτητες που σε κάποια σημεία φτάνει τα 3,20 m/s. Στην Περίπτωση Γ1, υπάρχει μεγαλύτερη ανακυκλοφορία καυσαερίων στο εσωτερικό του δωματίου με ταχύτητα που φτάνει τα 2,50 m/s ενώ στον εξωτερικό χώρο η κίνηση των καυσαερίων είναι πιο έντονη από τις άλλες περιπτώσεις και τα καυσαέρια κινούνται με ταχύτητες που σε κάποια σημεία κοντά στο άνοιγμα φτάνει στα 4 m/s. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η καύση στην Περίπτωση Γ1 δεν έχει ολοκληρωθεί ακόμη εκείνη τη χρονική στιγμή, σε αντίθεση με τις άλλες περιπτώσεις.



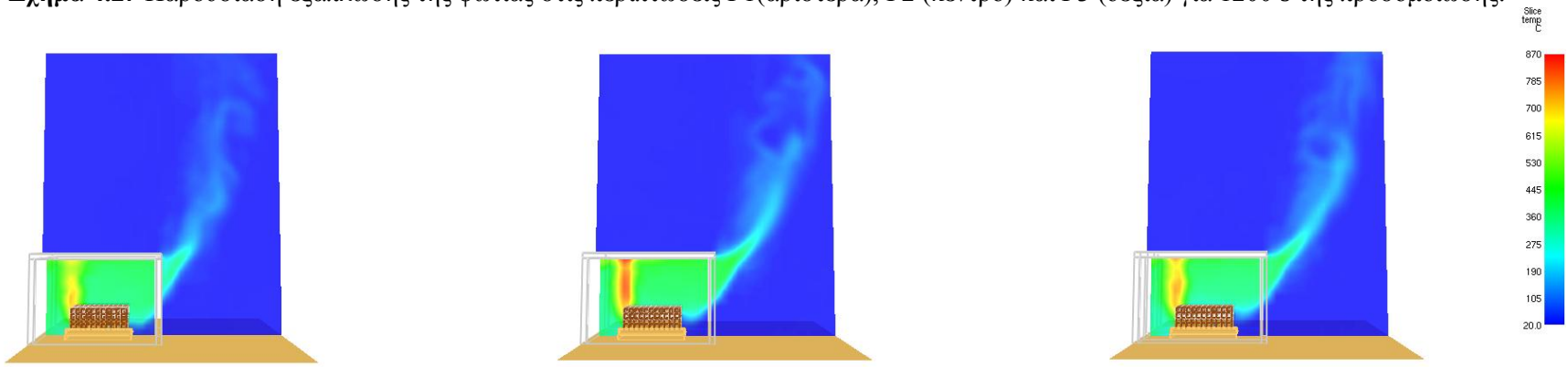
Σχήμα 4.25 Παρουσίαση εξάπλωσης της φωτιάς στις περιπτώσεις Γ1(αριστερά), Γ2 (κέντρο) και Γ3 (δεξιά) για 600 s της προσομοίωσης.



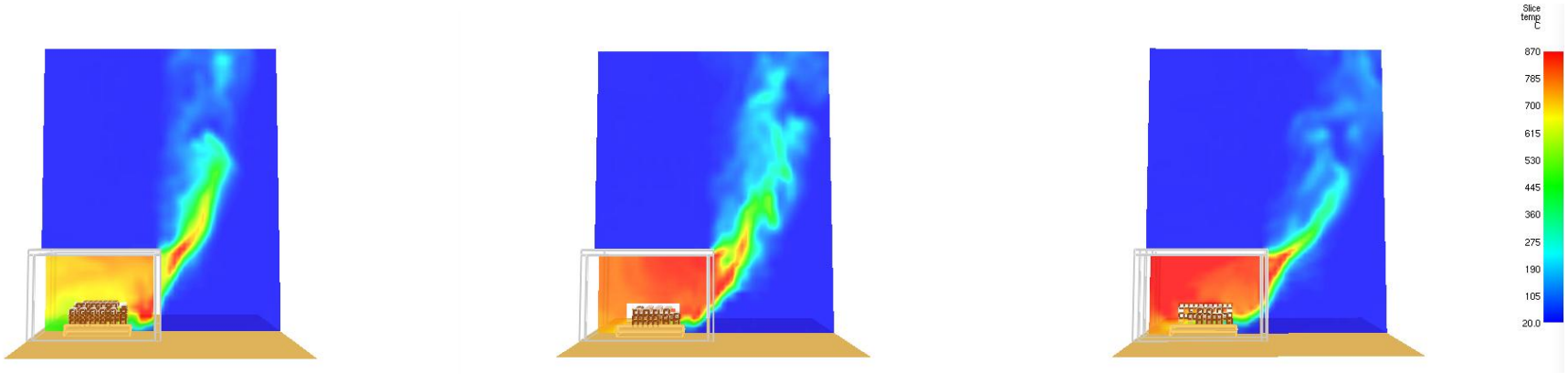
Σχήμα 4.26 Παρουσίαση εξάπλωσης της φωτιάς στις περιπτώσεις Γ1(αριστερά), Γ2 (κέντρο) και Γ3 (δεξιά) για 1000 s της προσομοίωσης.



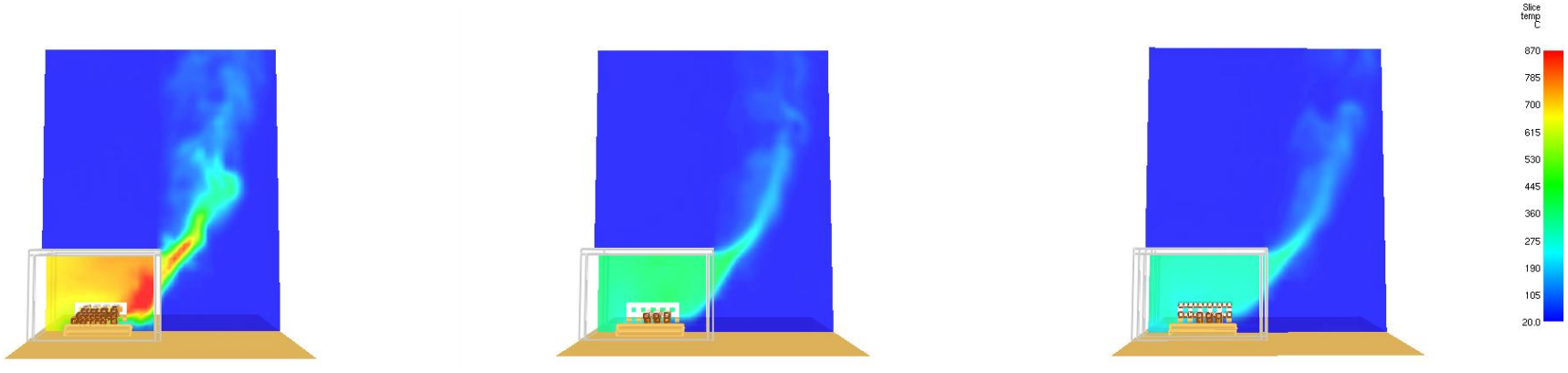
Σχήμα 4.27 Παρουσίαση εξάπλωσης της φωτιάς στις περιπτώσεις Γ1(αριστερά), Γ2 (κέντρο) και Γ3 (δεξιά) για 1200 s της προσομοίωσης.



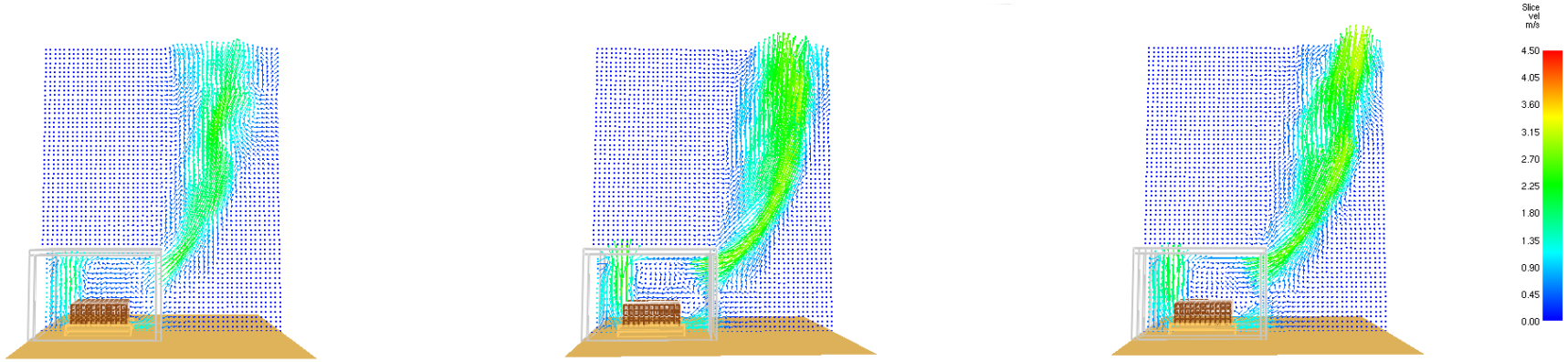
Σχήμα 4.28 Παρουσίαση θερμοκρασιακού πεδίου στις περιπτώσεις Γ1 (αριστερά), Γ2 (κέντρο) και Γ3 (δεξιά) για 600 s της προσομοίωσης.



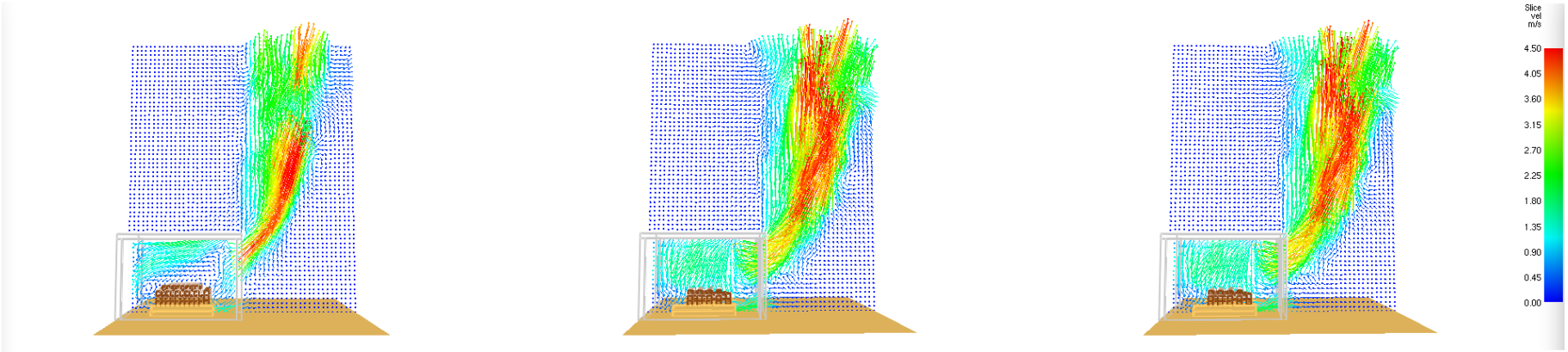
Σχήμα 4.29 Παρουσίαση θερμοκρασιακού πεδίου στις περιπτώσεις Γ1 (αριστερά), Γ2 (κέντρο) και Γ3 (δεξιά) για 1000 s της προσομοίωσης.



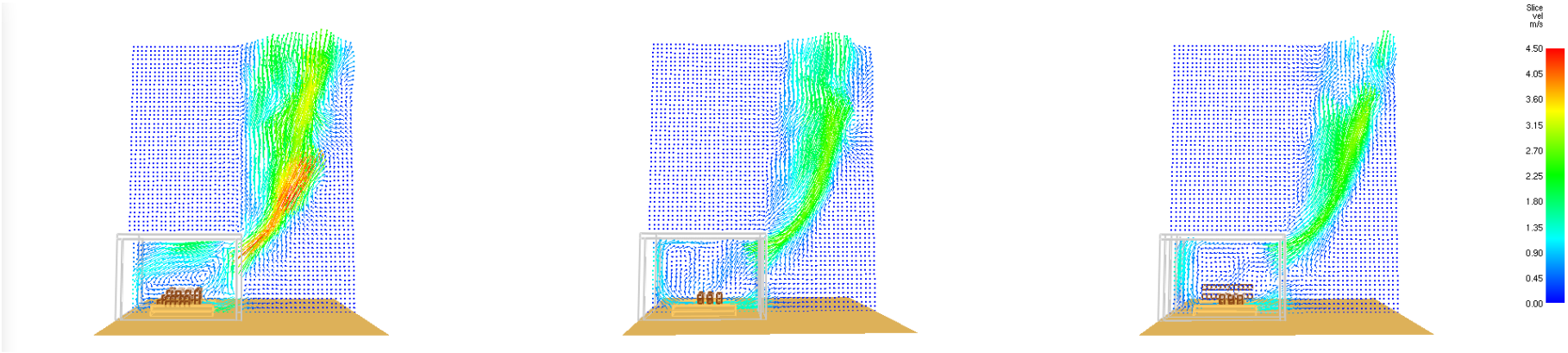
Σχήμα 4.30 Παρουσίαση θερμοκρασιακού πεδίου στις περιπτώσεις Γ1 (αριστερά), Γ2 (κέντρο) και Γ3 (δεξιά) για 1200 s της προσομοίωσης.



Σχήμα 4.31 Παρουσίαση διανυσματικού πεδίου ταχυτήτων στις περιπτώσεις Γ1 (αριστερά), Γ2 (κέντρο) και Γ3 (δεξιά) για 600 s της προσομοίωσης.



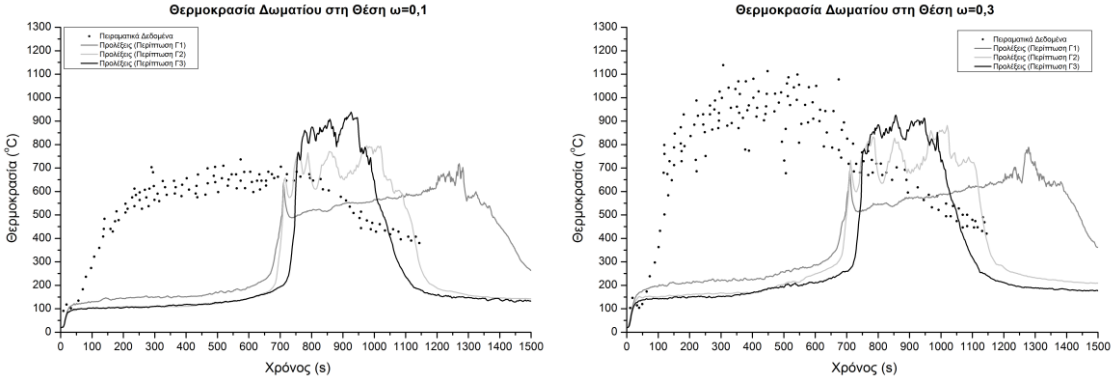
Σχήμα 4.32 Παρουσίαση διανυσματικού πεδίου ταχυτήτων στις περιπτώσεις Γ1 (αριστερά), Γ2 (κέντρο) και Γ3 (δεξιά) για 1000 s της προσομοίωσης.



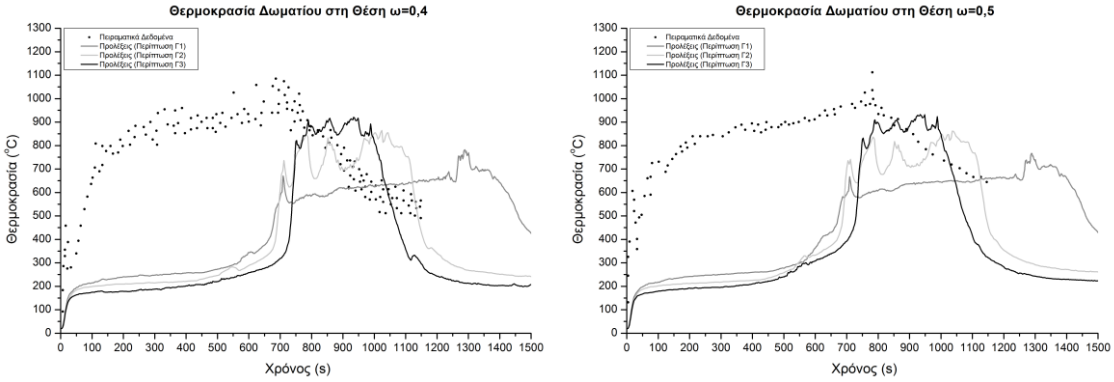
Σχήμα 4.33 Παρουσίαση διανυσματικού πεδίου ταχυτήτων στις περιπτώσεις Γ1 (αριστερά), Γ2 (κέντρο) και Γ3 (δεξιά) για 1200 s της προσομοίωσης.

4.7.3. Σύγκριση με τα διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα

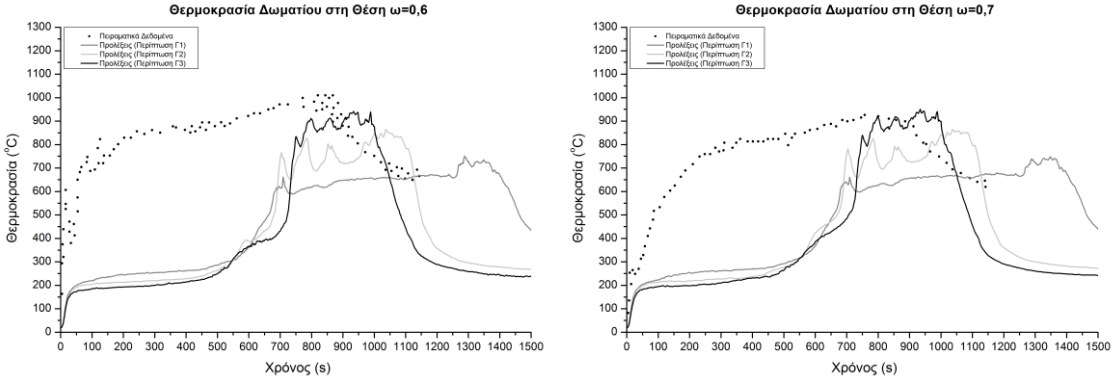
Στο Σχήμα 4.34, 4.35, 4.36, 4.37 και 4.38 παρουσιάζονται οι πειραματικές μετρήσεις της θερμοκρασίας και οι προλέξεις από τον κώδικα FDS στο εσωτερικό του δωματίου για τα θερμοστοιχεία, ξεκινώντας από τη θέση ω=0,1. Παρατηρείται ότι σε όλες τις θέσεις, το στάδιο της ανάπτυξης της φωτιάς ξεκινάει μετά από 600 s ανεξάρτητα από την περίπτωση. Σε όλες τις θέσεις, όσο μικραίνει το άνοιγμα τόσο πιο γρήγορα τείνει να ξεκινήσει η φωτιά. Όσο για τις θερμοκρασίες, για την Περίπτωση Γ2 ισχύει ότι και στην Παράγραφο 4.6. Όσο για την Περίπτωση Γ1, διαπιστώνεται ότι στη θέση ω=0,1 οι προλέξεις θερμοκρασίας υποεκτιμούν σε μικρό βαθμό τις πειραματικές μετρήσεις. Στις ανώτερες θέσεις, παρατηρείται ότι η απόκλιση των προλέξεων και των πειραματικών μετρήσεων μεγαλώνει καθώς οι προλέξεις της θερμοκρασίας είναι μικρότερες κατά περίπου 250-300°C από τις πειραματικές. Όπως διαπιστώνεται και στα παρακάτω διαγράμματα, η διάρκεια της πλήρως ανεπτυγμένης φωτιάς είναι αισθητά μεγαλύτερη (700 s) σε σχέση με το αρχικό άνοιγμα. Για την Περίπτωση Γ3, παρατηρούμε στη θέση ω=0,1 ότι οι προλέξεις της θερμοκρασίας είναι υπερεκτιμούν τις πειραματικές μετρήσεις κατά περίπου 100°C. Στις υπόλοιπες θέσεις των θερμοστοιχείων, οι προλέξεις της θερμοκρασίας για την συγκεκριμένη τιμή ανοίγματος υποεκτιμούν τις πειραματικές μετρήσεις και είναι λίγο μεγαλύτερες τις προλέξεις της θερμοκρασίας για την Περίπτωση Γ2.



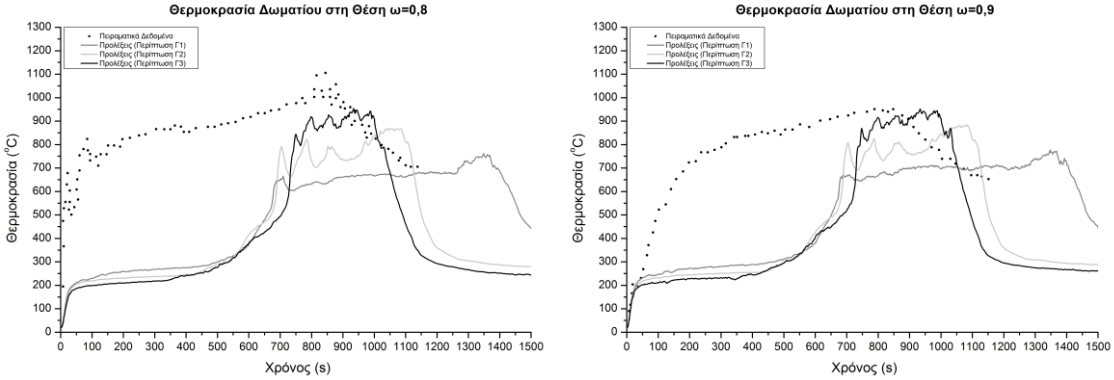
Σχήμα 4.34 Διαγράμματα πειραματικών δεδομένων και προλέξεων θερμοκρασίας στο εσωτερικό του δωματίου για τις περιπτώσεις Γ1, Γ2 και Γ3 στις θέσεις μέτρησης των θερμοστοιχείων ω=0,1 και ω=0,3.



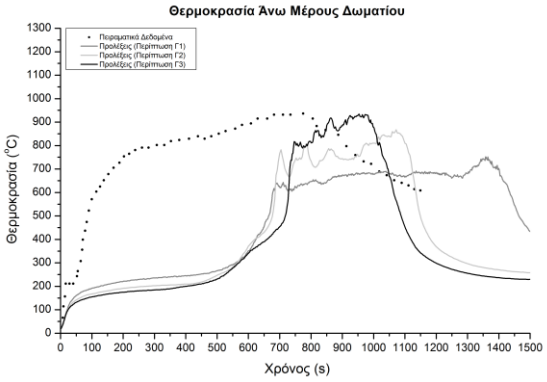
Σχήμα 4.35 Διαγράμματα πειραματικών δεδομένων και προλέξεων θερμοκρασίας στο εσωτερικό του δωματίου για τις περιπτώσεις Γ1, Γ2 και Γ3 στις θέσεις μέτρησης των θερμοστοιχείων ω=0,4 και ω=0,5.



Σχήμα 4.36 Διαγράμματα πειραματικών δεδομένων και προλέξεων θερμοκρασίας στο εσωτερικό του δωματίου για τις περιπτώσεις Γ1, Γ2 και Γ3 στις θέσεις μέτρησης των θερμοστοιχείων ω=0,6 και ω=0,7.

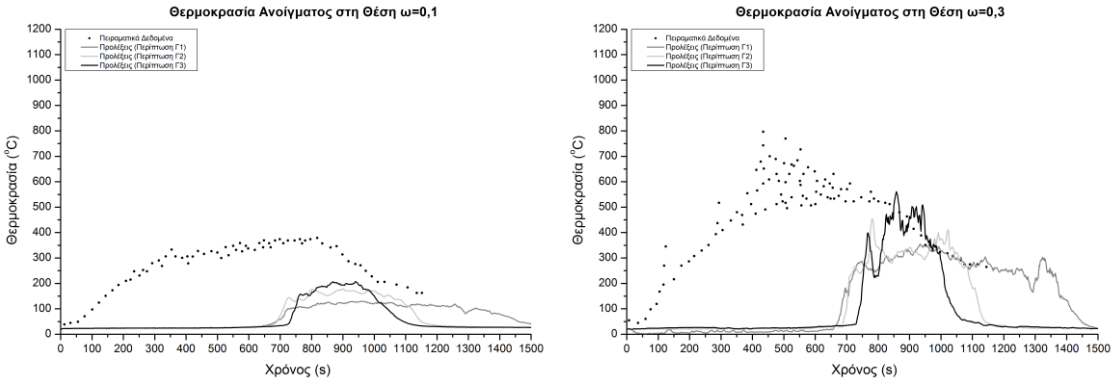


Σχήμα 4.37 Διαγράμματα πειραματικών δεδομένων και προλέξεων θερμοκρασίας στο εσωτερικό του δωματίου για τις περιπτώσεις Γ1, Γ2 και Γ3 στις θέσεις μέτρησης των θερμοστοιχείων ω=0,8 και ω=0,9.

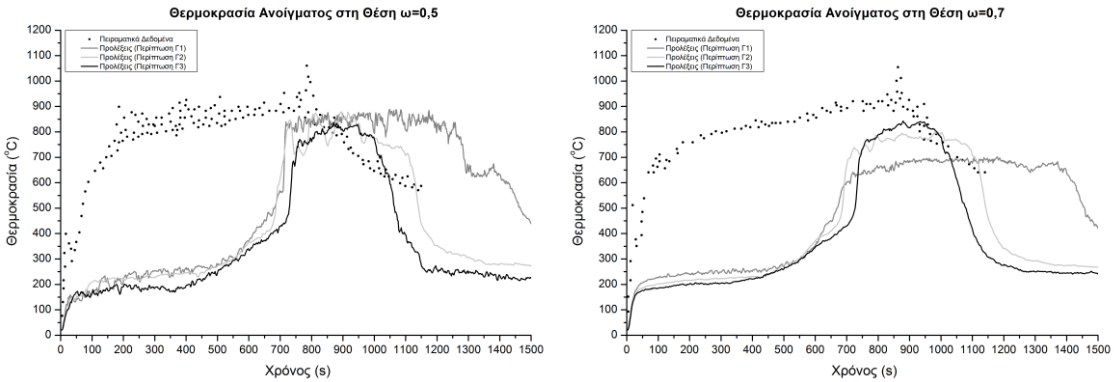


Σχήμα 4.38 Διάγραμμα πειραματικών δεδομένων και προλέξεων θερμοκρασίας στο εσωτερικό του δωματίου για τις περιπτώσεις Γ1, Γ2 και Γ3 στο άνω μέρος του δωματίου.

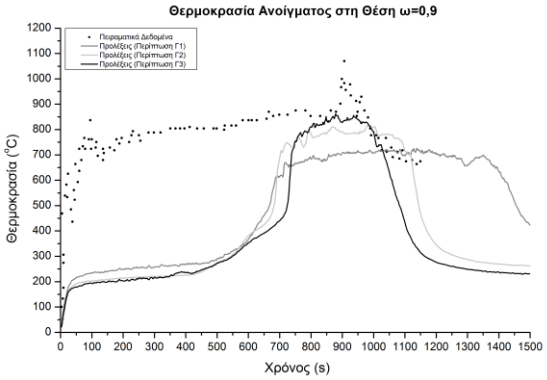
Στα Σχήματα 4.39, 4.40, 4.41 παρουσιάζονται οι πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας και οι προλέξεις στο άνοιγμα για τα θερμοστοιχεία που βρίσκονται σε πέντε θέσεις μέτρησης για τις περιπτώσεις Γ1, Γ2 και Γ3 ξεκινώντας από τη θέση ω=0,1.Σε όλες τις θέσεις παρατηρείται μεταβολή της θερμοκρασίας στο κέντρο του ανοίγματος γύρω στα 700 s προσομοίωσης. Περίπου 100 s πιο μετά από ότι στα αντίστοιχα θερμοστοιχεία στο εσωτερικό του δωματίου. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι στην αρχή η φωτιά δεν είναι τόσο ισχυρή για να εξέλθει από το δωμάτιο και υπάρχει αρκετό οξυγόνο μέσα στο δωμάτιο. Στη θέση ω=0,1, οι προλέξεις της θερμοκρασίας δεν συμφωνούν σε μεγάλο βαθμό με τις πειραματικές μετρήσεις και είναι περίπου 100-150°C μικρότερες από τις πειραματικές τιμές. Όσο αυξάνεται το μήκος του ανοίγματος, μεγαλώνει και το μέγιστο των προλέξεων θερμοκρασίας. Αυτό παρατηρείται και στις υπόλοιπες θέσεις των θερμοστοιχείων, εκτός από τη θέση ω=0,5 που οι προλέξεις της θερμοκρασίας της Περίπτωσης Γ1 είναι μεγαλύτερες από τις υπόλοιπες και τα επίπεδα της θερμοκρασίας συμφωνούν σε μεγάλο βαθμό με τις πειραματικές μετρήσεις. Όσο για τις υπόλοιπες θέσεις, οι προλέξεις της θερμοκρασίας προκύπτουν μικρότερες κατά 50-100°C από αυτές των πειραματικών μετρήσεων. Η απόκλιση των θερμοκρασιών τείνει να μικραίνει καθώς αυξάνεται το ύψος της θέσης του θερμοστοιχείου.



Σχήμα 4.39 Διαγράμματα πειραματικών δεδομένων και προλέξεων θερμοκρασίας στο κέντρο του ανοίγματος για τις περιπτώσεις Γ1, Γ2 και Γ3 στις θέσεις μέτρησης των θερμοστοιχείων ω=0,1 και ω=0,3.



Σχήμα 4.40 Διαγράμματα πειραματικών δεδομένων και προλέξεων θερμοκρασίας στο κέντρο του ανοίγματος για τις διαφορετικές τιμές του ανοίγματος στις θέσεις μέτρησης των θερμοστοιχείων ω=0,5 και ω=0,7.

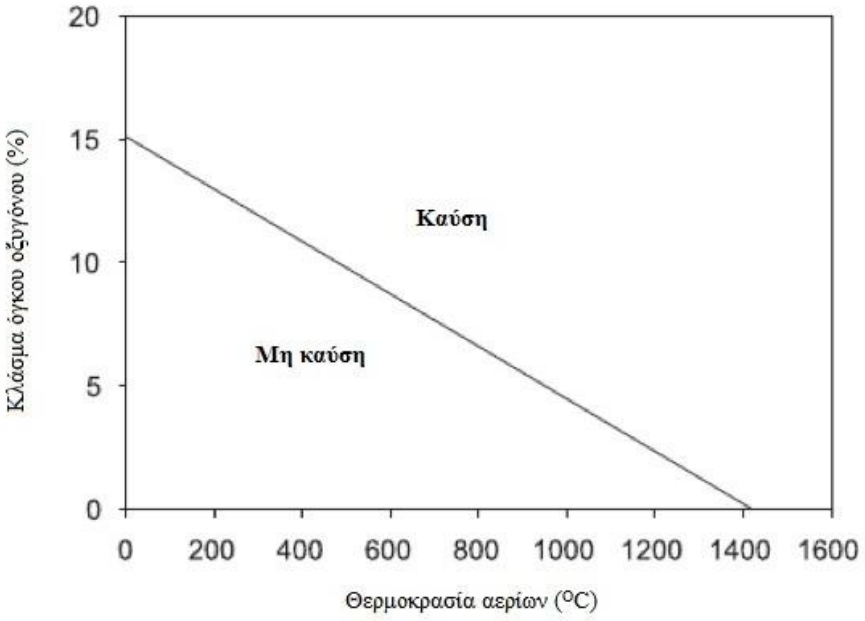


Σχήμα 4.41 Διαγράμματα πειραματικών δεδομένων και προλέξεων θερμοκρασίας στο κέντρο του ανοίγματος για τις περιπτώσεις Γ1, Γ2 και Γ3 στη θέση μέτρησης του θερμοστοιχείου ω=0,9.

4.8.Παραμετρική μελέτη επίδρασης της συγκέντρωσης οξυγόνου

4.8.1. Εισαγωγή

Σε αυτή τη παραμετρική μελέτη, εξετάζουμε πόσο επηρεάζει η τιμή της παραμέτρου *Limiting Oxygen Index*, X_O2_LL, στη θερμοκρασία τόσο του εσωτερικού του δωματίου όσο και στη θέση του ανοίγματος για 3 διαφορετικές τιμές της παραμέτρου. Στο Σχήμα 4.42 φαίνεται πως επηρεάζει η θερμοκρασία αερίων το κλάσμα όγκου οξυγόνου. Η προκαθορισμένη τιμή της παραμέτρου στο κώδικα FDS είναι 15% {Περίπτωση Δ3}. Οι υπόλοιπες τιμές της παραμέτρου που επιλέχθηκαν για τη παραμετρική μελέτη, σύμφωνα και με το διάγραμμα στο Σχήμα 4.42, είναι 6% {Περίπτωση Δ1} και 8% {Περίπτωση Δ2}. Όλες οι περιπτώσεις που εξετάστηκαν παρουσιάζονται στο Πινακα 4.9. Επιλέχθηκαν αυτές οι τιμές επειδή οι πειραματικές τιμές της θερμοκρασίας της πειραματικής διάταξης κυμαίνονται περίπου στους 800-1000°C.

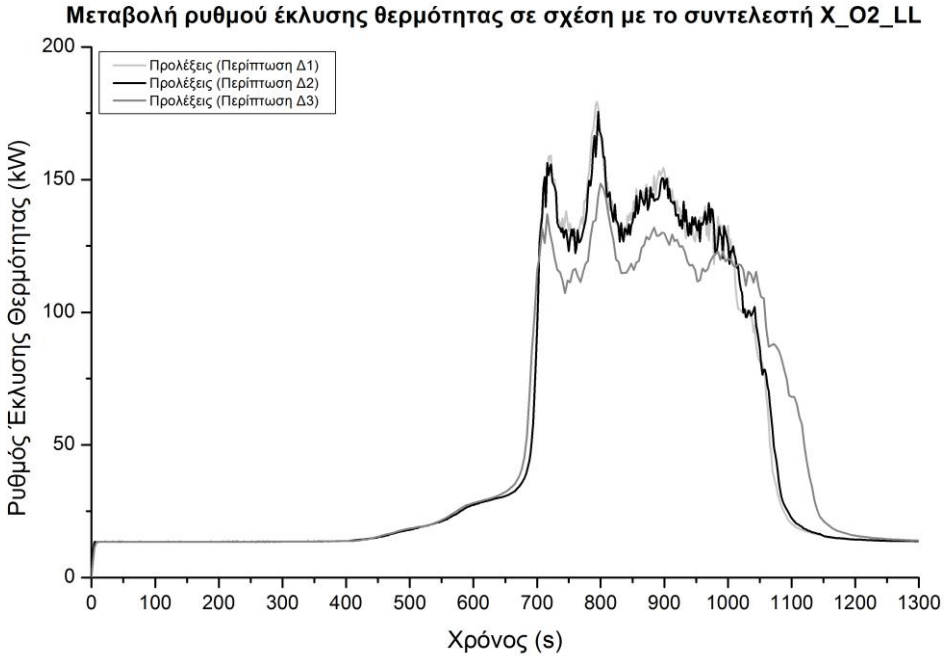


Σχήμα 4.42 Διάγραμμα του κλάσματος όγκου οξυγόνου συναρτήσει της θερμοκρασίας αερίων [McGrattan, 2007].

Περίπτωση	Τιμή συντελεστή X_O2_LL
Δ1	6%
Δ2	8%
Δ3	15%

Πίνακας 4.9 Περιπτώσεις παραμετρικής μελέτης ως προς το συντελεστή X_O2_LL.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.43, που παρουσιάζει το ρυθμό έκλυσης θερμότητας, όσο μειώνεται ο συντελεστής X_O2_LL τόσο αυξάνεται και ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας. Παρατηρώντας το διάγραμμα, η μεταβολή του συγκεκριμένου συντελεστή δεν επιφέρει κάποια σημαντική μεταβολή στη μορφή της καμπύλης του ρυθμού έκλυσης θερμότητας σε σχέση με το χρόνο. Συγκεκριμένα, όσο μειώνεται ο συντελεστής X_O2_LL οι τιμές του ρυθμού έκλυσης θερμότητας αυξάνονται. Η καμπύλη των προλέξεων του ρυθμού έκλυσης θερμότητας της Περίπτωσης Δ1 είναι ελάχιστα πιο πάνω από τη καμπύλη των προλέξεων του ρυθμού έκλυσης θερμότητας της Περίπτωσης Δ2, μια διαφορά που δεν φαίνεται να ξεπερνάει τα 5 kW. Τα μέγιστα σημεία αυτών των δύο καμπύλων είναι μεγαλύτερα από το μέγιστο της καμπύλης των προλέξεων του ρυθμού έκλυσης θερμότητας της Περίπτωσης Δ3 και η διαφορά μεταξύ τους είναι περίπου 30 kW.



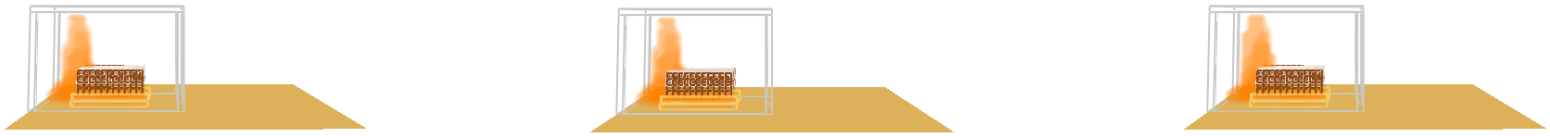
Σχήμα 4.43 Διάγραμμα μεταβολής ρυθμού έκλυσης θερμότητας ως προς το συντελεστή X_O2_LL.

4.8.2. Αποτελέσματα υπολογιστικής προσομοίωσης

Στα Σχήματα 4.44, 4.45 και 4.46 παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο αναπτύσσεται η φωτιά σε τρεις διαφορετικές χρονικές στιγμές (600, 1000 και 1200 s) για τις περιπτώσεις Δ1, Δ2 και Δ3. Οι χρόνοι αυτοί αντιπροσωπεύουν τα τρία στάδια της καύσης: το στάδιο της ανάπτυξης της φωτιάς, της πλήρως ανεπτυγμένης φωτιάς και της μείωσης της φωτιάς. Στα 600 s δεν παρατηρείται κάποια διαφοροποίηση στην ανάπτυξη της φωτιάς στις 3 περιπτώσεις. Στα 1000 s, στις περιπτώσεις Δ1 και Δ2 η φωτιά έχει εξαπλωθεί σε ολόκληρο το βόρειο τμήμα του δωματίου σε αντίθεση με την Περίπτωση Δ3 που βρίσκεται στο κατώτερο επίπεδο του εσωτερικό του δωματίου, στο ύψος του WCR. Ακόμη, και στις 3 περιπτώσεις, η μορφή της φωτιάς που βγαίνει από το άνοιγμα στο περιβάλλοντα χώρο είναι ίδια. Στα 1200 s, η καύση του WCR έχει ολοκληρωθεί και στις 3 περιπτώσεις και δεν παρατηρείται κάποια διαφοροποίηση.

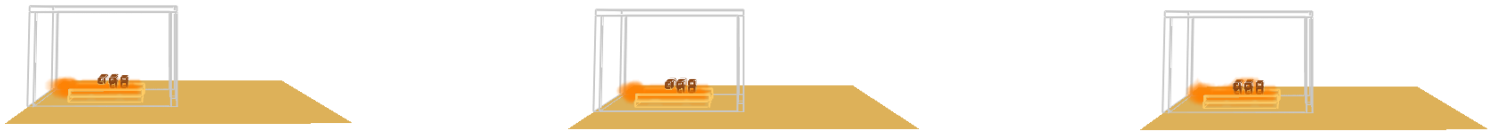
Στα Σχήματα 4.47, 4.48 και 4.49 παρουσιάζεται το θερμοκρασιακό πεδίο στο μέσο του δωματίου και του ανοίγματος σε τρεις διαφορετικές χρονικές στιγμές (600, 1000 και 1200 s) για τις περιπτώσεις Δ1, Δ2 και Δ3. Στα 600 s δεν παρατηρείται κάποια σημαντική διαφορά στις 3 περιπτώσεις όσο αφορά τη θερμοκρασία τόσο στο εσωτερικό του δωματίου όσο και στον περιβάλλοντα χώρο. Στα 1000 s, παρατηρείται για τις περιπτώσεις Δ1 και Δ2 αύξηση της θερμοκρασίας σε όλο σχεδόν το εσωτερικό του δωματίου που φτάνει τους 870°C. Στην Περίπτωση Δ3, η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη. Ακόμη, η μέγιστη θερμοκρασία στο εσωτερικό του δωματίου εντοπίζεται στην περιοχή κοντά στο άνοιγμα και φτάνει τους 785°C. Στο βόρειο τμήμα του δωματίου η θερμοκρασία φτάνει τους 700°C. Στα 1200 s, δεν παρατηρείται κάποια σημαντική διαφορά στις 3 περιπτώσεις, παρά μόνο ότι στην Περίπτωση Γ3 η θερμοκρασία στο εσωτερικό του δωματίου είναι ελάχιστα μεγαλύτερη από τις άλλες δύο περιπτώσεις, της τάξης των 300°C.

Στα Σχήματα 4.50, 4.51 και 4.52 απεικονίζεται το ροϊκό πεδίο στο μέσο του δωματίου σε τρεις διαφορετικές χρονικές στιγμές (600, 1000 και 1200 s) για τις περιπτώσεις Γ1, Γ2 και Γ3. Στα 600 s δεν παρατηρείται σημαντική διαφοροποίηση για τις 3 περιπτώσεις. Ούτε στα 600 s υπάρχει κάποια διαφορά στη κίνηση ή τη ταχύτητα των καυσαερίων. Η μόνη διαφορά που παρατηρείται είναι στα καυσαέρια, που κινούνται στο περιβάλλοντα χώρο στις περιπτώσεις Γ1 και Γ2, ότι το μεγαλύτερο μέρος αυτών κινείται με ταχύτητα της τάξης των 3,20 m/s. Στα 1000 s, στις περιπτώσεις Δ1 και Δ2 παρατηρείται ανακυκλοφορία καυσαερίων γύρω από τα τοιχώματα του δωματίου με ταχύτητες που φτάνουν του 1,5 m/s ενώ κοντά στο άνοιγμα η ταχύτητα των καυσαερίων φτάνει σε κάποια σημεία τα 4 m/s. Τα καυσαέρια που έχουν εξέλθει από το δωμάτιο κινούνται με ταχύτητες της τάξης των 4,50 m/s. Στη Περίπτωση Δ3, στο εσωτερικό του δωματίου τα καυσαέρια που βρίσκονται πάνω από το επίπεδο του WCR κινούνται με ταχύτητα της τάξης του 1,5 m/s. Τα καυσαέρια που βρίσκονται στο περιβάλλοντα χώρο κινούνται με ταχύτητες που φτάνουν τα 4,20 m/s. Η διαφορά με τις άλλες δύο περιπτώσεις είναι ότι μεγαλύτερος όγκος καυσαερίων κινείται με αυτή την ταχύτητα. Στα 1200 s δεν υπάρχει κάποια σημαντική διαφοροποίηση στη κίνηση και την ταχύτητα των καυσαερίων στις 3 περιπτώσεις που εξετάζονται.

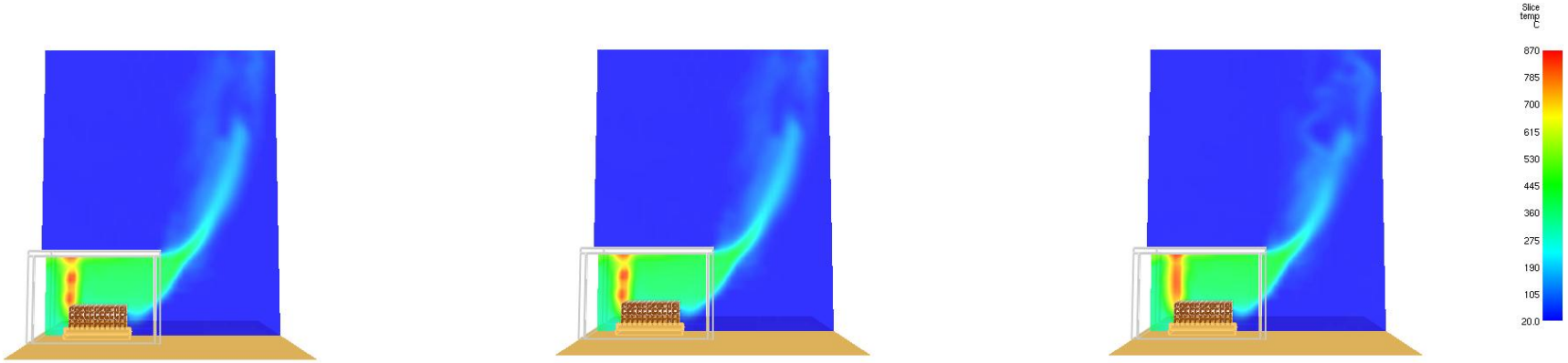


Σχήμα 4.44 Παρουσίαση εξάπλωσης της φωτιάς στις περιπτώσεις Δ1(αριστερά), Δ2 (κέντρο) και Δ3 (δεξιά) για 600 s της προσομοίωσης.

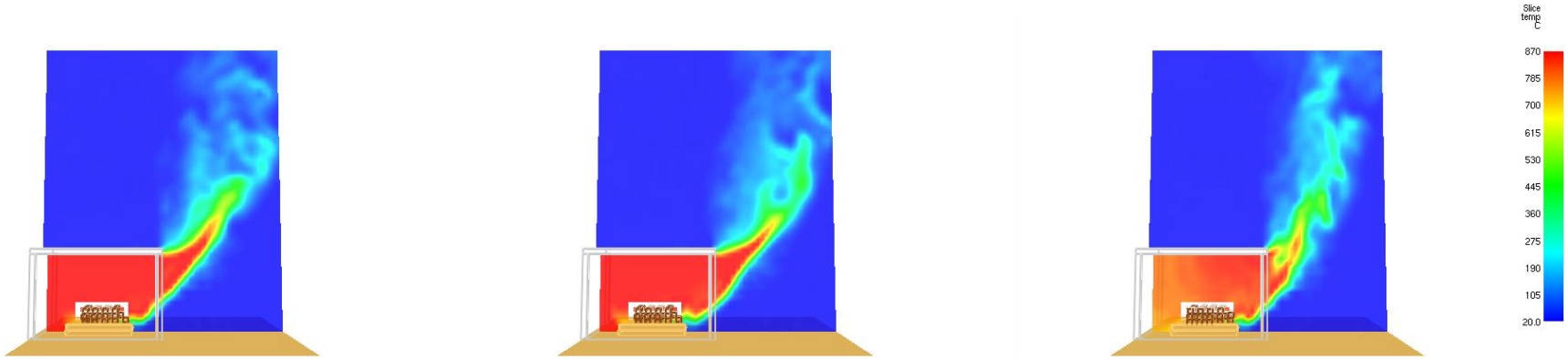
Σχήμα 4.45 Παρουσίαση εξάπλωσης της φωτιάς στις περιπτώσεις Δ1(αριστερά), Δ2 (κέντρο) και Δ3 (δεξιά) για 1000 s της προσομοίωσης.



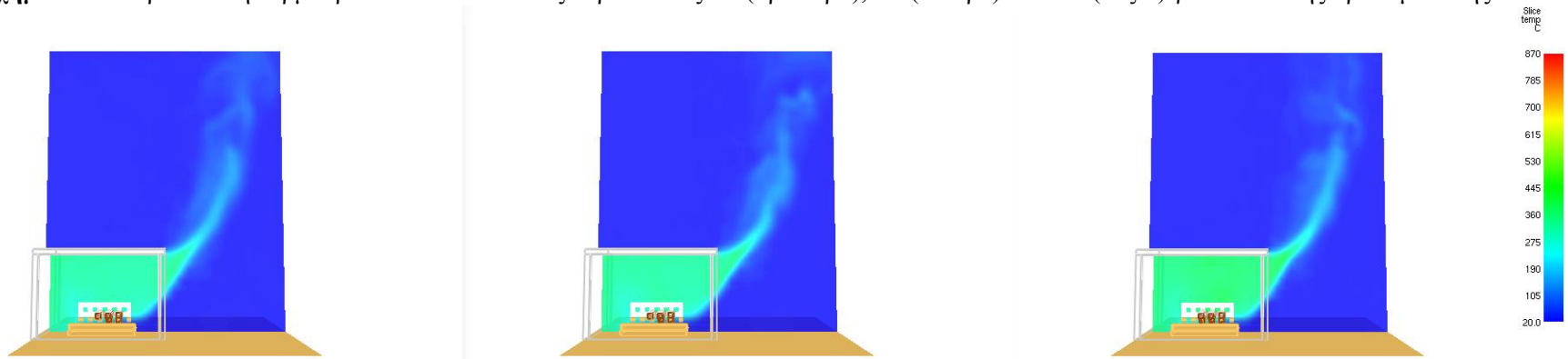
Σχήμα 4.46 Παρουσίαση εξάπλωσης της φωτιάς στις περιπτώσεις Δ1(αριστερά), Δ2 (κέντρο) και Δ3 (δεξιά) για 1200 s της προσομοίωσης.



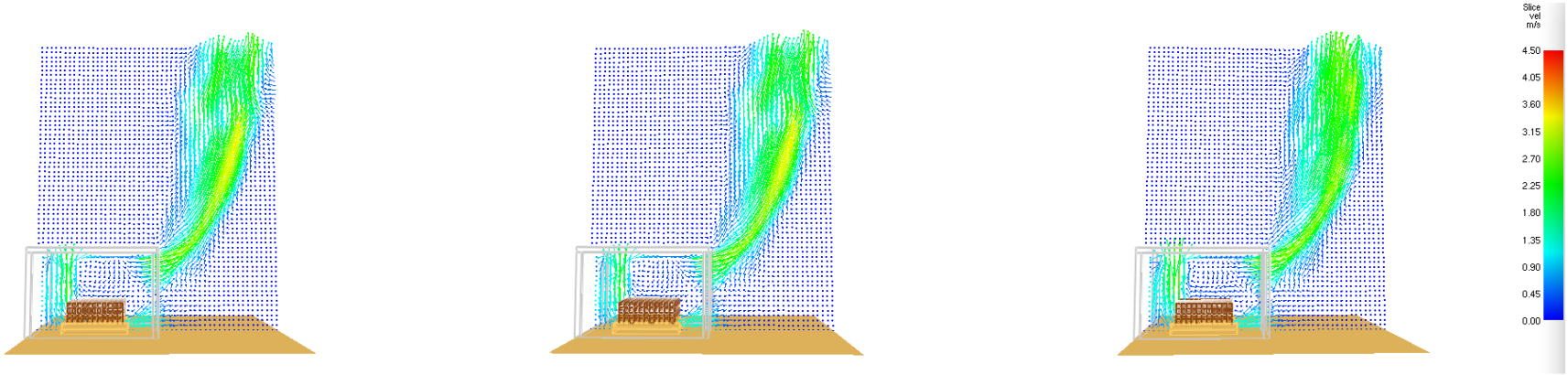
Σχήμα 4.47 Παρουσίαση θερμοκρασιακού πεδίου στις περιπτώσεις Γ1 (αριστερά), Γ2 (κέντρο) και Γ3 (δεξιά) για 600 s της προσομοίωσης.



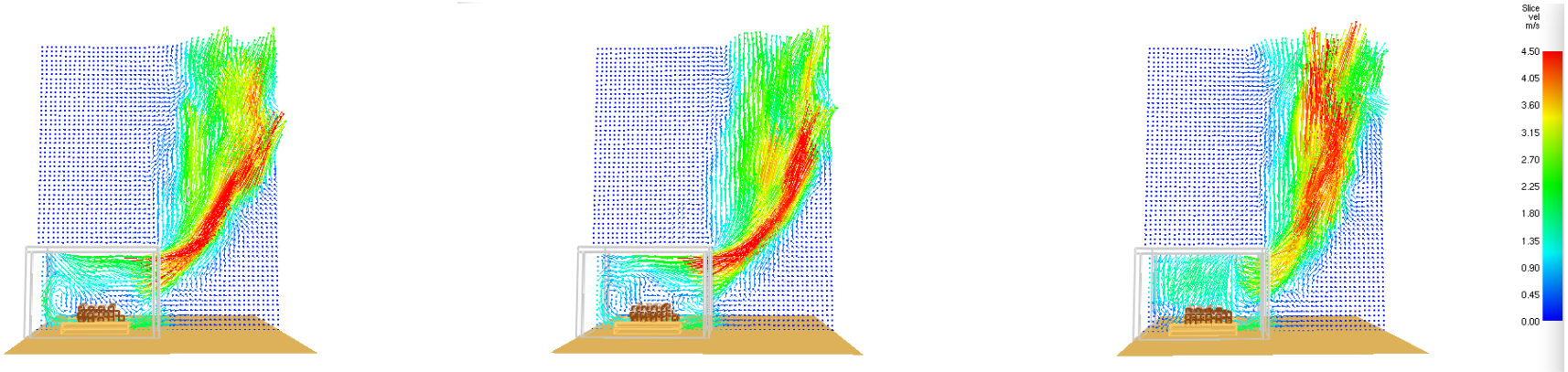
Σχήμα 4.48 Παρουσίαση θερμοκρασιακού πεδίου στις περιπτώσεις Γ1 (αριστερά), Γ2 (κέντρο) και Γ3 (δεξιά) για 1000 s της προσομοίωσης.



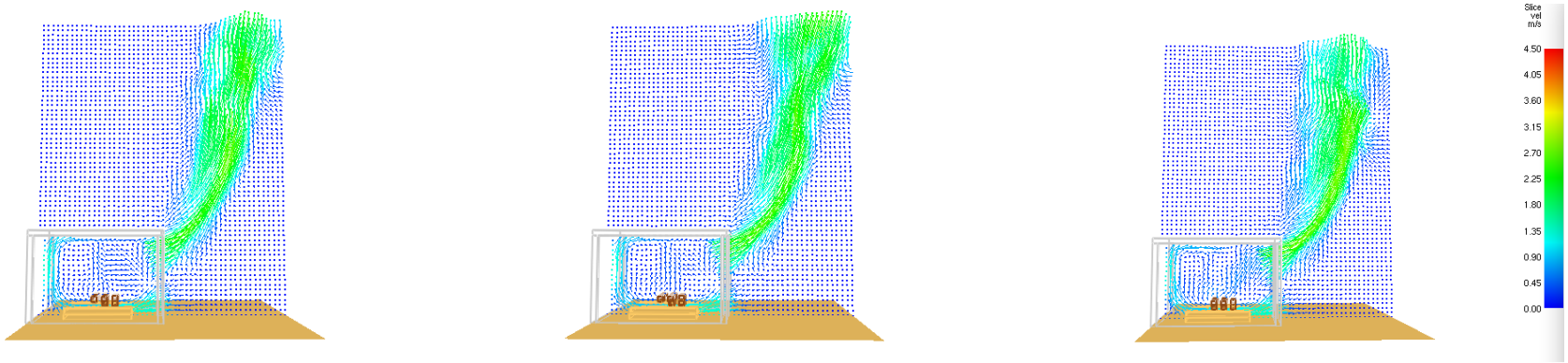
Σχήμα 4.49 Παρουσίαση θερμοκρασιακού πεδίου στις περιπτώσεις Γ1 (αριστερά), Γ2 (κέντρο) και Γ3 (δεξιά) για 1200 s της προσομοίωσης.



Σχήμα 4.50 Παρουσίαση διανυσματικού πεδίου ταχυτήτων στις περιπτώσεις Δ1 (αριστερά), Δ2 (κέντρο) και Δ3 (δεξιά) για 600 s της προσομοίωσης.



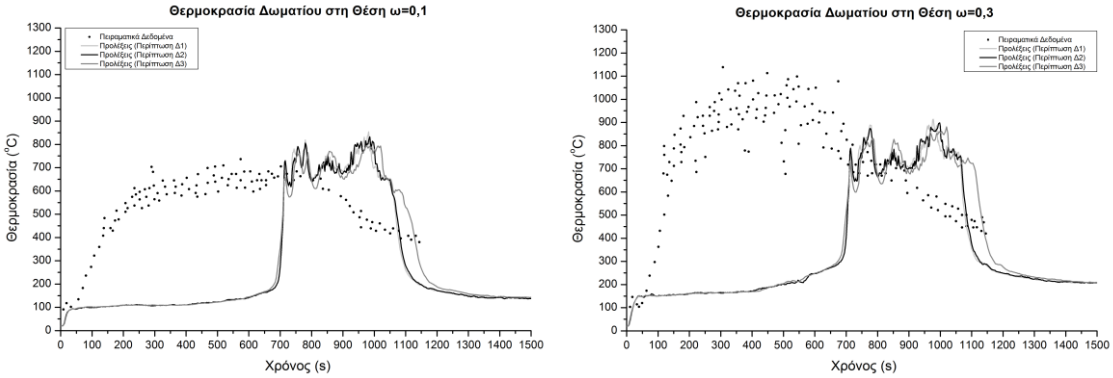
Σχήμα 4.51 Παρουσίαση διανυσματικού πεδίου ταχυτήτων στις περιπτώσεις Δ1 (αριστερά), Δ2 (κέντρο) και Δ3 (δεξιά) για 1000 s της προσομοίωσης.



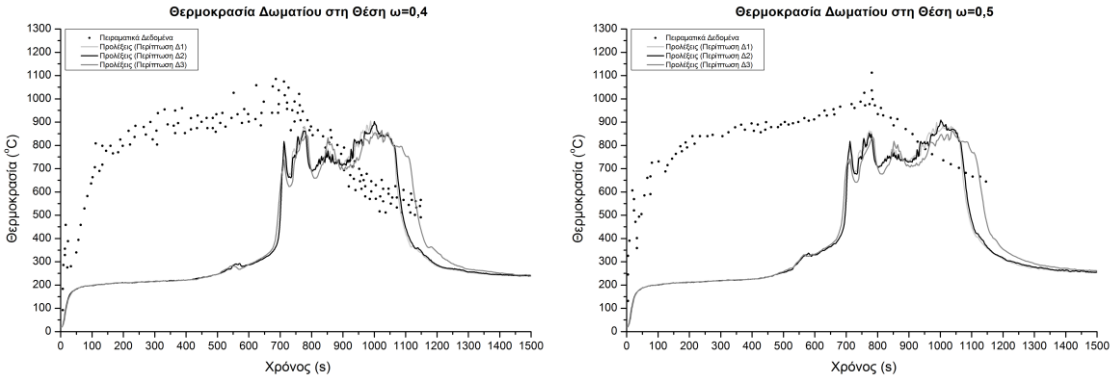
Σχήμα 4.52 Παρουσίαση διανυσματικού πεδίου ταχυτήτων στις περιπτώσεις Δ1 (αριστερά), Δ2 (κέντρο) και Δ3 (δεξιά) για 1200 s της προσομοίωσης..

4.8.3. Σύγκριση με τα διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα

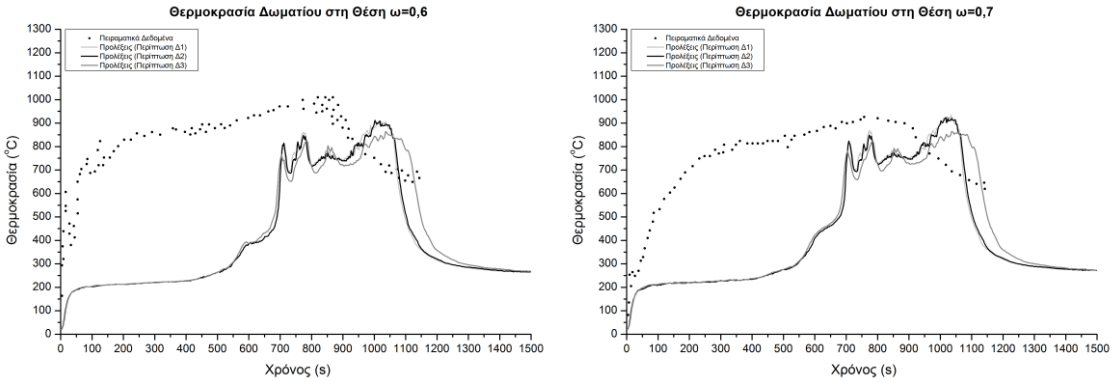
Στα Σχήματα 4.53, 4.54, 4.55, 4.56 και 4.57 παρουσιάζονται οι πειραματικές μετρήσεις και οι προλέξεις θερμοκρασίας στο εσωτερικό του δωματίου για τις περιπτώσεις Δ1, Δ2 και Δ3, ξεκινώντας από τη κατώτερη θέση ω=0,1. Στην Περίπτωση Δ3, όσο αφορά τις προλέξεις θερμοκρασίας σε σχέση με τις πειραματικές δεν παρουσιάζεται κάποια ιδιαίτερη αλλαγή σε σχέση με τις παρατηρήσεις που έγιναν στην Παράγραφο 4.6 και αφορούσαν τις προλέξεις θερμοκρασίας για την Περίπτωση Β2. Άλλωστε, η προκαθορισμένη τιμή του συντελεστή X_O2_LL στο κώδικα FDS είναι 15%. Επομένως οι προλέξεις της Περίπτωσης Δ3 και της Περίπτωση Β2 ταυτίζονται. Παρατηρώντας τα διαγράμματα στις διάφορες θέσεις, μπορεί να παρατηρηθεί ότι η μείωση του συντελεστή δεν επηρεάζει το χρόνο στον οποίο ξεκινάει το στάδιο της ανάπτυξης της φωτιάς. Αυτό που μεταβάλλεται είναι η διάρκεια του σταδίου της πλήρως ανεπτυγμένης φωτιάς καθώς με τη μείωση του συντελεστή από 15% σε 8% και 6% έχουμε μείωση του χρόνου κατά 50 με 70 s. Επίσης παρατηρείται ότι στις ανώτερες θέσεις των θερμοστοιχείων, η διαφορά που υπάρχει στις θερμοκρασίες για X_O2_LL=15% και για X_O2_LL=6% και X_O2_LL=8% αυξάνεται ενώ στις κατώτερες θέσεις των θερμοστοιχείων υπάρχουν ελάχιστες διαφορές. Η συγκεκριμένη διαφορά σε κάποια σημεία φτάνει τους 30°C. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι προλέξεις της θερμοκρασίας των Περιπτώσεων Δ1 και Δ2 δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες διαφορές με τις προλέξεις της Περίπτωσης Δ1 να είναι ελάχιστα μεγαλύτερες.



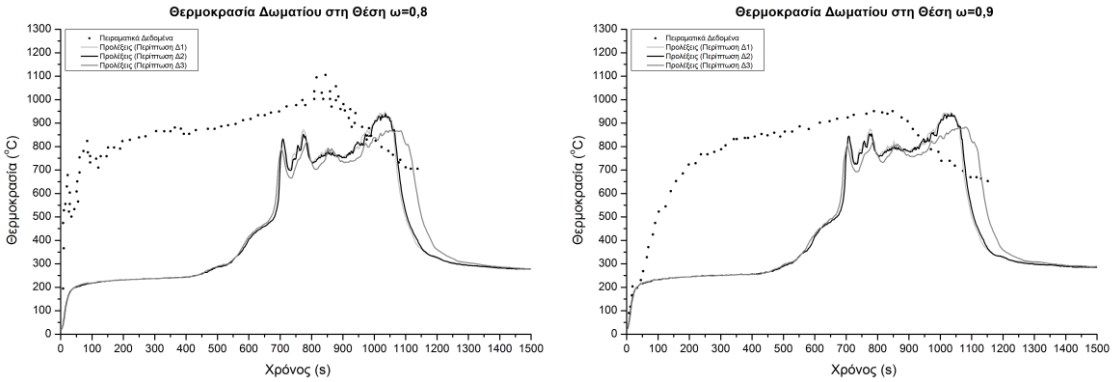
Σχήμα 4.53 Διαγράμματα πειραματικών δεδομένων και προλέξεων θερμοκρασίας στο εσωτερικό του δωματίου για τις περιπτώσεις Δ1, Δ2 και Δ3 στις θέσεις μέτρησης των θερμοστοιχείων ω=0,1 και ω=0,3.



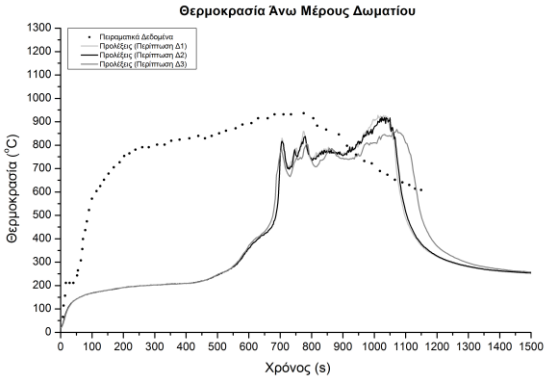
Σχήμα 4.54 Διαγράμματα πειραματικών δεδομένων και προλέξεων θερμοκρασίας στο εσωτερικό του δωματίου για τις περιπτώσεις Δ1, Δ2 και Δ3 στις θέσεις μέτρησης των θερμοστοιχείων ω=0,4 και ω=0,5.



Σχήμα 4.55 Διαγράμματα πειραματικών δεδομένων και προλέξεων θερμοκρασίας στο εσωτερικό του δωματίου για τις περιπτώσεις Δ1, Δ2 και Δ3 στις θέσεις μέτρησης των θερμοστοιχείων ω=0,6 και ω=0,7.

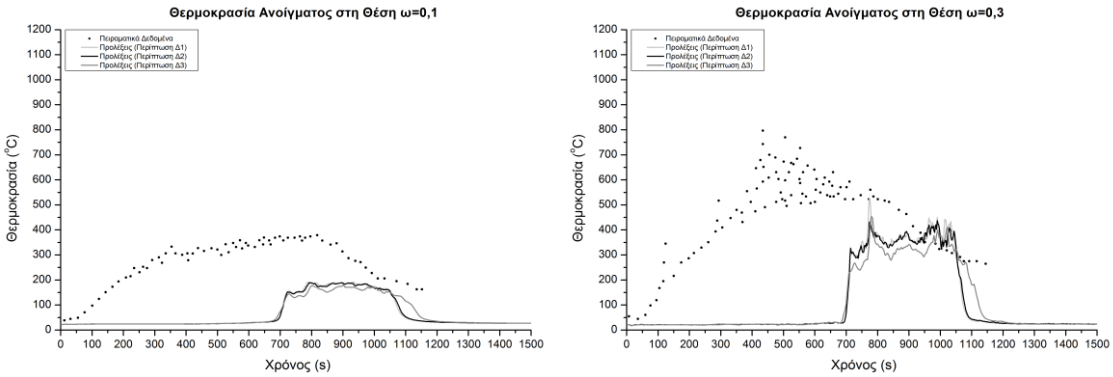


Σχήμα 4.56 Διαγράμματα πειραματικών δεδομένων και προλέξεων θερμοκρασίας στο εσωτερικό του δωματίου για τις περιπτώσεις Δ1, Δ2 και Δ3 στις θέσεις μέτρησης των θερμοστοιχείων ω=0,8 και ω=0,9.

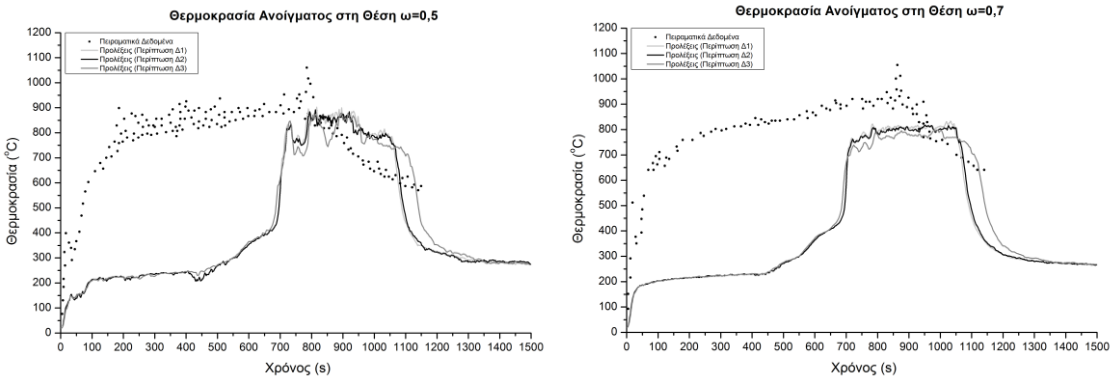


Σχήμα 4.57 Διαγράμματα πειραματικών δεδομένων και προλέξεων θερμοκρασίας στο εσωτερικό του δωματίου για τις περιπτώσεις Δ1, Δ2 και Δ3 στο άνω μέρος του δωματίου.

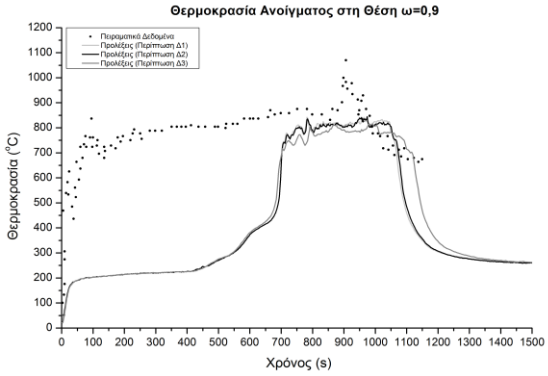
Στα Σχήματα 4.58, 4.59 και 4.60 παρουσιάζονται οι πειραματικές μετρήσεις της θερμοκρασίας και οι προλέξεις στο άνοιγμα για τα θερμοστοιχεία που βρίσκονται σε πέντε θέσεις μέτρησης για τις περιπτώσεις Δ1, Δ2 και Δ3, ξεκινώντας από τη κατώτερη θέση ω=0,1. Και στα διαγράμματα αυτά, ανεξάρτητα από τη θέση του θερμοστοιχείου, φαίνεται το άνοιγμα της καμπύλης των προλέξεων της θερμοκρασίας της Περίπτωσης Δ3 να είναι μεγαλύτερο κατά 50 s σε σχέση με αυτό των καμπύλων των Περιπτώσεων Δ1 και Δ2. Όσο για τη διαφορά που υπάρχει στις θερμοκρασίες ανάμεσα στις προλέξεις της θερμοκρασίας της Περίπτωσης Δ3 και των Περιπτώσεων Δ1 και Δ2, στη θέση ω=0,1 έχουμε μια διαφορά της τάξης των 10°C. Στη θέση ω=0,3 η διαφορά αυτή αυξάνει και φτάνει σε κάποια σημεία τους 30°C ενώ στις ανώτερες θέσεις η διαφορά αυτή ξαναμείωνεται και δεν ξεπερνά τους 20°C.



Σχήμα 1.57 Διαγράμματα πειραματικών δεδομένων και προλέξεων θερμοκρασίας στο κέντρο του ανοίγματος για τις περιπτώσεις Δ1, Δ2 και Δ3 στις θέσεις μέτρησης των θερμοστοιχείων ω=0,1 και ω=0,3.



Σχήμα 4.58 Διαγράμματα πειραματικών δεδομένων και προλέξεων θερμοκρασίας στο κέντρο του ανοίγματος για τις περιπτώσεις Δ1, Δ2 και Δ3 στις θέσεις μέτρησης των θερμοστοιχείων ω=0,5 και ω=0,7.



Σχήμα 4.59 Διάγραμμα πειραματικών δεδομένων και προλέξεων θερμοκρασίας στο κέντρο του ανοίγματος για τις περιπτώσεις Δ1, Δ2 και Δ3 στη θέση μέτρησης του θερμοστοιχείου ω=0,9.

5. Γενικά Συμπεράσματα

Η φωτιά είναι ένα εξαιρετικά απρόβλεπτο φαινόμενο ως προς τη συμπεριφορά του και για αυτό το λόγο είναι δύσκολη η ακριβής προσομοίωση της. Παρόλα αυτά η προσομοίωση του φαινομένου με τον κώδικα FDS μπορεί να θεωρηθεί καλή λόγω της ικανοποιητικής προσέγγισης των υπολογιστικών με τα πειραματικά αποτελέσματα όπως περιγράφηκαν σε αυτό το κεφάλαιο. Ο κώδικας FDS όπως έχει παρατηρηθεί από πολλούς ερευνητές δεν δύναται ακόμα να προσομοιώσει με τον πλέον ικανοποιητικό τρόπο την εξέλιξη φωτιάς σε διαμέρισμα σε συνθήκες μη επαρκούς αερισμού. Το συγκεκριμένο πεδίο μελέτης είναι ακόμα υπό διερεύνηση. Υπάρχουν ωστόσο χρήσιμα συμπεράσματα που προκύπτουν μέσα από τη μελέτη των αποτελεσμάτων:

- Στην προσομοίωση του WCR ως ορθογωνικό στερεό οι προλέξεις της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του δωματίου δεν συμφωνούν με τις πειραματικές μετρήσεις και είναι ιδιαίτερα χαμηλές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η φωτιά έχει μεγάλη ισχύ με αποτέλεσμα έχει να τείνει προς το εξωτερικό του δωματίου. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί και από το γεγονός ότι οι θερμοκρασίες που επικρατούν στο άνοιγμα είναι μεγαλύτερες περίπου κατά 200°C από αυτές στο εσωτερικό του δωματίου. Επομένως, η υπόθεση με την ομοιόμορφη έκλυση θερμότητας από όλες τις πλευρές του ορθογωνικού στερεού δεν είναι επαρκής.

- Στην προσομοίωση του WCR στην πραγματική μορφή του φαίνεται ότι το κύριο πρόβλημα είναι ότι το φαινόμενο της καύσης του WCR αργεί να ξεκινήσει σε σχέση με τις πειραματικές μετρήσεις. Κατά τα άλλα, η μορφή της καμπύλης από τις προλέξεις της θερμοκρασίας είναι ίδια με αυτή των πειραματικών μετρήσεων αφού διακρίνονται ξεκάθαρα τα 3 στάδια της ανάπτυξης της φωτιάς. Το πρόβλημα που υπάρχει είναι η μικρή διάρκεια του φαινομένου στη προσομοίωση σε σχέση με τις πειραματικές μετρήσεις κάτι που κατά κύριο λόγο οφείλεται στο μήκος του ανοίγματος, όπως διαπιστώθηκε και στην αντίστοιχη παραμετρική μελέτη. Το πολύ μικρό άνοιγμα έχει σαν αποτέλεσμα να επικρατούν στο δωμάτιο συνθήκες μη επαρκούς αερισμού.

- Στην προσομοίωση του WCR στην πραγματική μορφή του, τα επίπεδα των προλέξεων της θερμοκρασίας είναι παρόμοια με αυτά των πειραματικών μετρήσεων, κάτι που δείχνει ότι παρόλο που έγινε χρήση ιδιοτήτων ξύλου από άλλη μελέτη [Matala, 2008] δεν επέφερε κάποια σημαντική συνέπεια στα υπολογιστικά αποτελέσματα.

- Ο ορισμός της πυρόλυσης των ξύλινων ράβδων του WCR με τη χρήση της εξίσωσης Arrhenius και συγκεκριμένα της θερμοκρασίας αναφοράς προσεγγίζει με πιο ικανοποιητικό τρόπο τις πειραματικές μετρήσεις σε σχέση με την προσομοίωση του WCR ως ορθογωνικό στερεό.

- Στην παραμετρική μελέτη σχετικά με το μήκος του ανοίγματος, παρατηρείται ότι η αύξηση του μήκους του ανοίγματος επιφέρει αύξηση του ρυθμού έκλυσης θερμότητας. Αυτό έχει σαν συνέπεια μεγαλύτερες θερμοκρασίες στις προλέξεις της θερμοκρασίας. Ακόμη στη Περίπτωση Γ3, εκεί δηλαδή που το άνοιγμα έχει μήκος 12 cm, η φωτιά στα 1000 s παραμένει στο εσωτερικό του δωματίου σε αντίθεση με τις άλλες περιπτώσεις.

- Στην παραμετρική μελέτη σχετικά με το δείκτη LOI, παρατηρείται ότι με τη μείωση του δείκτη από την προκαθορισμένη τιμή (15%) αυξάνεται ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας. Αυτό έχει σαν συνέπεια μεγαλύτερες θερμοκρασίες στις προλέξεις της θερμοκρασία

Όσο αφορά το πειραματικό μέρος, οι πειραματικές μετρήσεις προσέγγισαν σε ικανοποιητικό βαθμό τις βιβλιογραφικές τιμές. Συγκεκριμένα, στα αεροπορικά καύσιμα η διαφορά στη τιμή δεν ξεπερνούσε τα 50 cal/g. Στο επτάνιο η πειραματική τιμή της ανώτερης θερμογόνου δύναμης είναι 500

cal/g μεγαλύτερη από τη βιβλιογραφική ενώ μεγαλυτέρη είναι και η πειραματική τιμή της κατώτερης θερμογόνου δύναμης κατά 200 cal/g περίπου σε σχέση με αυτές που υπολογίστηκαν. Στα Σχήματα 1.25 και 1.26 παρουσιάζονται τα διαγράμματα με τις πειραματικές μετρήσεις των υγρών καυσίμων τόσο για την ανώτερη (Σχήμα 1.25) όσο και για την κατώτερη (Σχήμα 1.26) θερμογόνο δύναμη. Στα συγκεκριμένα τρία υγρά καύσιμα, η ανώτερη θερμογόνος δύναμη τους είναι κοντά στα 11000 cal/g ενώ η κατώτερη κοντά στα 10500 cal/g. Και στα τρία διαγράμματα, το υγρό καύσιμο με τη μεγαλύτερη θερμογόνο δύναμη είναι το επτάνιο ενώ αυτό με τη μικρότερη είναι το JET A-1. Στο Σχήμα 1.26 παρατηρείται ότι οι τιμές που προκύπτουν για την κατώτερη θερμογόνο δύναμη θεωρητικά είναι μεγαλύτερες από αυτές που προκύπτουν χρησιμοποιώντας το πρότυπο ASTM D240.

Βιβλιογραφία

ASTM D240 - 09 Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter. ASTM International.

R. Bergman, Z. Cai, C. G. Carll, A. C. Clausen, A. M. Dietenberger, R. H. Falk, C. R. Frihart, S. V. Glass, C. G. Hunt, R. E. Ibach, E. D. Kretschmann, D. R. Rammer, R. J. Ross. Wood Handbook: Wood as an Engineering Material. Forest Products Laboratory, United States Department of Agriculture Forest Service, 2010.

J. A. Block. Atheoretical and experimental study of non-propagating free-burning fires. Thirteenth Symposium on Combustion, 1971.

A.C. Bwalya, E. Gibbs, G. D. Lougheed, A. Kashef, H. H. Saber. Design of a single-room heat release rate calorimeter for the characterization of fires in multi-suite residential dwellings project. Institute for Research in Construction, 2009.

C. J. Chen, W. D. Hsieh, W. C. Hu, C. Lai, T. H. Lin. Experimental investigation and numerical simulation of a furnished office fire. Building and environment 45 (2010) 2735-2742, Elsevier.

D. Drysdale. An Introduction To Fire Dynamics, Wiley, Second Edition, 1999.

F. Folk. Experiments in fire extinguishment. National Fire Protection Association Quarterly, 31 (2): p. 115-126, 1937.

E. Gissi. An Introduction To Fire Simulation With FDS And Smokeview. Updated to FDS 5.5.1 and Blender FDS, 2010.

F.F. Grinstein, L.G. Margolin, W.J. Rider. Implicit Large Eddy Simulation, Computing Turbulent Fluid Dynamics. Cambridge University Press, 2007.

D. Gross. Experiments on the burning of cross piles of wood. Journal of Research, Vol. 66C, 1962.

T. Hakkarainen. Post-Flashover Fires in Light and Heavy Timber Construction Compartments. Journal of Fire Sciences 2002 20: 133.

H. Hayasaka, Y. Kudo, H. Kojima, T. Hashigami, J. Ito, T. Ueda. Backdraft Experiments in a Small Compartment. Springer Science+Business Media B.V., 2008.

G. Heskestad. Modelling of enclosure fires. Journal of Fire and Flammability p. 253-273,1975.

S. Hostikka, M. Kokkala, J. Vaari. Experimental study of the localized room fires. VTT Technical Research Center of Finland, 2001.

C. H. Hwang, A. Lock, M. Bundy, E. Johnsson, G. H. Ko. Studies on fire characteristics in over- and underventilated full-scale compartments. Journal of Fire Sciences, Vol 28- September 2010.

Ch. Keramiotis, G. Zannis, G. Skevis, M.A. Founti. Performance Investigation of Fischer-Tropsch Kerosene Blends In A Laboratory-Scale Premixed Flame Burner. Experimental Thermal and Fluid Science 44 868-874, 2013.

T. Lennon, D. Hopkin, J. El-Rimawi, V. Silberschmidt. Large scale natural fire tests on protected enginnered timber floor systems. . Fire Safety Journal, 45:168-182, 2010.

A. Matala. Estimation of solid phase reaction parameters for fire simulation. Master of Science in Technology in the Degree Programme in Engineering Physics 2008.

McCarter and Broido. Radiative and convective energy from wood crib fires. Pyrodynamics, 2: p. 65-85, 1965.

K. McGrattan, H. Baum, R. Rehm, S. Hostikka, J. Floyd. Fire Dynamics Simulator (Version 5), Technical Reference Guide. NIST Special Publication 1018-5, 2007.

K. McGrattan, R. McDermott, S. Hostikka, J. Floyd. Fire Dynamics Simulator (Version 5), User's Guide. NIST Special Publication 1019-5, 2010.

Moisture Analyzer MJ33: Operation Instructions. Mettler Toledo Company.

Oxygen Bomb Calorimeter 6200: Operating Instruction Manual. No. 585M. Parr Instrument Company, 2011.

J. A. Perricone. Scale modeling of the transient behavior of wood crib fires in enclosures. Master Thesis, Worcester Polytechnic Institute, 2005.

J. G. Quientere. Fundamentals of Fire Phenomena, John Wiley & Sons Ltd., Sussex, England, 2006.

J. G. Quientere. Scaling Applications in Fire Research. Fire Safety Journal, 15:3-29, 1989.

Reaction To Fire Tests For Building Products – Determination Of The Heat Of Combustion (ISO 1716:2002). European Standard, 2002

K. Remesh and K. H. Tan. Field Model Analysis and Experimental Assessment of Fire Severity and Smoke Movement in a Partitioned and a Non-partitioned Dwelling Unit. Journal of Fire Sciences 2006 24: 365.

R. Schiestel, A. Dejoan. Towards A New Partially Integrated Transport Model For Coaarse Grid And Unsteady Turbulent Flow Simulations. Theoretical Computational Fluid Dynamics, 18:443-468, 2005.

P. H. Thomas, P.G. Smith. The rate of burning of wood cribs. Fire Technology p. 29-38, 1970.

Thomas, Webster and Raftery. Some experiments on buoyant diffusion flames. Combustion and Flame, 5 (4): p. 359-367, 1961.

P. S. Veloo. Scale modeling of the transient behavior of heat flux in enclosure fires. Master of Science, 2006.

F. Wald, J. Chlouba, A. Uhlir, P. Kallerova, M. Stujberova. Temperatures during fire tests on structure and its prediction according to Eurocodes. Fire Safety Journal, 44:135-146, 2009.

Y. Xiao, J. Ma. Fire simulation test and analysis of laminated bamboo frame building. Construction and Building Materials 34 (2012) 257-266, Elsevier.

G.H. Yeoh, K.K. Yuen. Computational Fluid Dynamics In Fire Engineering, Elsevier, 2009.

X. Zhang, M. Yang, J. Wang, Y. He. Effects of computational domain on numerical simulation of building fires. Journal of Fire Protection Engineering 2010 20:225.

Ε. Μ. Ασημακοπούλου. Υπολογιστική Προσομοίωση Διάδοσης Φωτιάς σε Κτίριο με Συστήματα Ξηράς Δόμησης και με Υλικά Αλλαγής Φάσης. Μεταπτυχιακή εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Φεβρουάριος 2011.
Σ. Επαμεινώνδας. Υπολογιστική προσομοίωση της εξάπλωσης πυρκαγιάς σε κτίρια με χρήση της μεθόδου 'προσομοίωσης μεγάλης δίνης'. Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Μάρτιος 2008.

Δ. Κολαΐτης, Ε. Ασημακοπούλου, Μ. Φούντη, Π. Τουλιάτος. Πειραματική Διερεύνηση Συμπεριφοράς Έναντι Φωτιάς Σύγχρονων Τεχνικών Δόμησης με Χρήση Ξύλου. Αθήνα, 2011.

Γ. Μαντάνης. Δομη και ιδιότητες ξύλου. Καρδίτσα, 2003.

Γ. Μπεργελές. Υπολογιστική Ρευστομηχανική. ΣΥΜΕΩΝ, Αθήνα, 2006.

Μ. Φούντη. Θεωρία Καύσης και Συστήματα Καύσης. Αθήνα, 2005.