

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

Διπλωματική εργασία

Αριθμητική προσομοίωση φυσικής πυρκαγιάς σε σύστημα βιομηχανικών ραφιών
αποθήκευσης

Αναστασία Χαλδαίου

Επιβλέπων Καθηγητής: Ευριπίδης Μυστακίδης

Βόλος , Ιούνιος 2025

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου, κ. Ευριπίδη Μυστακίδη, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με την παρούσα εργασία, για τη συνεχή καθοδήγησή του και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της.

Ευχαριστώ θερμά την καθηγήτρια, κα Καλλιόπη Ζωγραφοπούλου, για την πολύτιμη υποστήριξη και βοήθειά της, καθώς και για τις γνώσεις που μου μετέδωσε στον τομέα της πυρομηχανικής.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια μου για την αγάπη και τη στήριξη τους.

Περίληψη

Η παρούσα μελέτη διερευνά τη δυναμική εξάπλωσης της φωτιάς σε αποθηκευτικούς χώρους χαρτόκουτων, με τη χρήση του λογισμικού προσομοίωσης *PyroSim*. Η εστίαση δίνεται στην εξάπλωση της φωτιάς από ένα αρχικό κουτί στο γειτονικό του. Λαμβάνονται υπόψη παράμετροι όπως ο τρισδιάστατος χώρος που περιβάλλει τη γεωμετρία, το ύψος της οροφής άνωθεν της καύσιμης ύλης, καθώς και οι συνθήκες αερισμού. Ως κύριες μεταβλητές εξετάζονται οι επιφάνειες της καύσιμης ύλης που καίγονται και το πάχος αυτής. Η μελέτη βασίζεται σε πειραματικά δεδομένα προηγούμενης έρευνας του Σουηδικού Εθνικού Ινστιτούτου Δοκιμών και Έρευνας (SP Technical Research Institute of Sweden), όπου πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις καύσης χαρτόκουτων μεγάλης κλίμακας υπό ρεαλιστικές συνθήκες. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ακριβής αναπαράσταση των πειραματικών προσομοιώσεων στο ψηφιακό περιβάλλον, με σκοπό τη συγκριτική ανάλυση μεταξύ φυσικού και προσομοιωμένου χώρου, καθώς και την αξιολόγηση της ακρίβειας των αριθμητικών μοντέλων. Η προσομοίωση βασίζεται στον κώδικα Fire Dynamics Simulator (FDS), ο οποίος επιλύει τις διαφορικές εξισώσεις Navier–Stokes.

Λέξεις Κλειδιά: Pyrosim, FDS, ράφια αποθήκευσης, χαρτόκουτα

Abstract

This study investigates the fire spread dynamics within cardboard storage areas using the fire simulation software *PyroSim*. The focus is placed on the propagation of fire from an initially ignited box to adjacent boxes. Several parameters are considered, including the three-dimensional geometry of the surrounding space, the ceiling height above the combustible materials, and ventilation conditions. The main variables examined are the burning surface area of the combustible material and its thickness. The study is based on experimental data from previous research conducted by the SP Technical Research Institute of Sweden, in which large-scale fire tests involving cardboard boxes were carried out under realistic conditions. The primary objective of this work is to accurately reproduce the experimental simulations in a digital environment, enabling comparative analysis between physical and computational models and evaluating the accuracy of the numerical results. The simulation is performed using the Fire Dynamics Simulator (FDS), which solves the Navier–Stokes equations for low-speed, thermally driven flows typical of fire scenarios.

Keywords: Pyrosim, FDS, cardboard box, storage racks

Περιεχόμενα

	Περίληψη	2
1.	Εισαγωγή	7
1.1	Η Φυσική και Χημική Συμπεριφορά της Φωτιάς	8
1.2	Η Διαδικασία της Καύσης: Στοιχεία, Συνθήκες και Μηχανισμός	9
1.3	Περιγραφή Σταδίων Ανάπτυξης Φωτιάς	10
1.4	Μηχανισμοί Μετάδοσης Θερμότητας	11
1.4.1	Μηχανισμός Μετάδοσης Θερμότητας: Αγωγή (Conduction)	11
1.4.2	Μηχανισμός Μετάδοσης Θερμότητας: Συναγωγή (Convection)	12
1.4.3	Μηχανισμός Μετάδοσης Θερμότητας: Ακτινοβολία (Radiation)	13
2.	Αριθμητική Μέθοδος Επίλυσης Πειραμάτων	15
2.1	Υπολογιστική Ρευστοδυναμική - Computational Fluid Dynamics, CFD	15
2.2	Κώδικας Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής – Fire Simulation Dynamics, FDS	16
3.	Περιγραφή Προσομοιώσεων Πραγματικού Χώρου	19
3.1	Μελέτη Καύσης Χαρτόκουτων Biwell σε Βιομηχανικούς Χώρους	19
3.2	Δοκιμές Καύσης Χαρτόκουτων: Από Πραγματική Μορφή σε Ψηφιακή	20
4.	Πειραματική Διάταξη Ψηφιακού Μοντέλου	22
4.1	Μοντελοποίηση και Προσομοίωση σε Ψηφιακό Περιβάλλον	22
4.2	Διαμόρφωση Ορίων και Δυναμική Καύσης στον Κάναβο	23
4.3	Περιγραφή Γεωμετρίας Ψηφιακού Μοντέλου	25

5.	Εισαγωγή Μοντέλου στο Περιβάλλον του Pyrosim	27
5.1	Περιγραφή Καννάβου (Mesh)	27
5.2	Εισαγωγή Αντίδρασης Καύσης (Reaction)	28
5.3	Obstructions (Εμπόδια)	30
5.4	Surface (Επιφάνεια)	30
5.5	Εισαγωγή Ρυθμού Απελευθέρωσης Θερμότητας (Heat Release rate)	31
5.5.1	Διαδικασία Εύρεσης Επιφάνειας Καύσης	33
5.5.1.1	Υπολογισμός Συνολικού Εμβαδού ενός Κουτιού	33
5.5.1.2	Υπολογισμός Ρυθμού Έκλυσης Θερμότητας ανά Μονάδα Επιφάνειας (HRRPA)	34
5.5.1.3	Προσαρμοσμένη Καμπύλη Ρυθμού Μεταβολής Θερμότητας	35
5.6	Συσκευές (Devices)	37
6.	Επιλογή Κατάλληλου Αριθμού Κελιών Πλέγματος	38
6.1	Ανάλυση Ευαισθησίας Πλέγματος, Grid Sensitivity Analysis	38
6.2	Παρουσίαση Διαγραμμάτων HRR και Θερμοκρασίας	40
6.3.1	Βέλτιστη Διακριτοποίηση Πλέγματος για Προσομοιώσεις Καύσης	43
6.3.2	Η Επίδραση του Πλάτους Πλέγματος στις Θερμοκρασιακές Προσομοιώσεις	44
7.	Ανάλυση και Αποτελέσματα Βασικής Σειράς Πειραμάτων	46
7.1	Ανάλυση και Αποτελέσματα Πειραμάτων Κλειστών Ορίων Κανάβου	46
7.1.1	Επιρροή Κλειστών Ορίων Κανάβου στις Προσομοιώσεις Καύσης	49
7.1.2	Ανάλυση Θερμοκρασιακής Συμπεριφοράς Πειραμάτων	51
7.2	Παρουσίαση και Ανάλυση Πειραμάτων Ανοιχτών Ορίων Κανάβου	52
7.2.1	Ανάλυση Ρυθμού Έκλυσης Θερμότητας ανά Πάχος Κουτιών	56
7.2.2	Ανάλυση Θερμικής Συμπεριφοράς κατά την Καύση Χαρτόκουτων	57
7.2.3	Η Επίδραση των Επιφανειών Καύσης στην Θερμοκρασιακή Εξέλιξη του Χώρου	59
7.2.4	Ο Ρόλος των Γεωμετρικών Παραμέτρων στη Συμπεριφορά της Φωτιάς	61
7.3	Συμπεράσματα	63
	Βιβλιογραφία	64

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 3.2: Πλάγια όψη, εμπρόσθια όψη και άνω όψη της πειραματικής διάταξης	21
Σχήμα 4.3: Γεωμετρική Περιγραφή Μοντέλου. (α) Μπροστινή Όψη (β) Πλαϊνή όψη (γ) Άνω Όψη	26
Σχήμα 5.5: Ρυθμός έκλυσης θερμότητας για κουτιά με διαφορετικό πάχος	32

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.2: Επιλεγμένα πειράματα της δεύτερης σειράς σε ψηφιακό περιβάλλον	20
Πίνακας 4.1: Δοκιμές Ψηφιακής Προσομοίωσης	22
Πίνακας 5.5.1.2: Ρυθμός έκλυσης θερμότητας ανά τετραγωνικό μέτρο (HRRPA)	35
Πίνακας 5.5.1.3(a): Custom καμπύλη για κουτιά πάχους 7mm	35
Πίνακας 5.5.1.3(b): Custom καμπύλη για κουτιά πάχους 14mm	36
Πίνακας 5.5.1.3(c): Custom καμπύλη για κουτιά πάχους 21mm	36

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.4.4: Απεικόνιση του Ηλεκτρομαγνητικού Φάσματος	14
Εικόνα 4.2: Απεικόνιση Πειραματικής Διάταξης Καύσης Χαρτόκουτων σε Περιβάλλον Pyrosim	24
Εικόνα 5.2: Καρτέλα Αποδόσεων Προϊόντων Καύσης Επτανίου	29
Εικόνα 7.2: Καύση κουτιών 14mm σε εικονική αναπαράσταση μέσω Smokeview	55
Εικόνα 7.2.4: Αλληλεπίδραση στήλης καπνού πυρκαγιάς με την οροφή ενός διαμερίσματος	62

1. Εισαγωγή

Η ανάλυση της συμπεριφοράς της φωτιάς σε βιομηχανικούς και αποθηκευτικούς χώρους αποτελεί βασικό ζήτημα για την πρόληψη καταστροφών και την ανάπτυξη αποδοτικών μέτρων πυροπροστασίας. Οι χώροι αυτοί, λόγω της φύσης των υλικών που φιλοξενούν, κυρίως χαρτοκιβώτια, ξύλο και άλλα εύφλεκτα υλικά, παρουσιάζουν αυξημένο κίνδυνο ταχείας ανάφλεξης και εξάπλωσης της πυρκαγιάς. Ιδιαίτερη πρόκληση εντοπίζεται σε ράφια και αποθηκευτικά συστήματα με πυκνή διάταξη αντικειμένων, όπου η φωτιά μπορεί να αναπτυχθεί κάθετα ή οριζόντια με υψηλή ταχύτητα, δημιουργώντας σοβαρές απειλές για το ανθρώπινο δυναμικό και τις υποδομές.

Οι παραδοσιακές μέθοδοι κατανόησης της εξάπλωσης της φωτιάς δεν επαρκούν πλέον, καθώς οι σύγχρονες απαιτήσεις απαιτούν ακριβή πρόβλεψη και αξιολόγηση των φαινομένων αυτών σε ρεαλιστικές συνθήκες. Σε αυτό το πλαίσιο, η χρήση λογισμικών προσομοίωσης όπως το PyroSim και ο υπολογιστικός κώδικας Fire Dynamics Simulator (FDS) προσφέρει νέες δυνατότητες στην ανάλυση των πυρκαγιών. Μέσω της προσομοίωσης, είναι δυνατή η μελέτη κρίσιμων παραμέτρων, όπως η επιφάνεια καύσης, το πάχος των υλικών, ο αερισμός και η γεωμετρία του χώρου, χωρίς να απαιτείται η διενέργεια επικίνδυνων ή δαπανηρών πειραμάτων.

Η παρούσα εργασία εστιάζει στην κατανόηση της μετάδοσης της φωτιάς σε συστήματα αποθήκευσης χαρτόκουτων, βασισμένη σε πειραματικά δεδομένα μεγάλης κλίμακας. Μέσω της μεταφοράς αυτών των δεδομένων σε ψηφιακό περιβάλλον, αναλύεται η επίδραση της γεωμετρίας και των θερμικών χαρακτηριστικών στην εξάπλωση της φωτιάς. Το τελικό ζητούμενο είναι η σύγκριση των προσομοιωμένων αποτελεσμάτων με τα πραγματικά και η αξιολόγηση της ακρίβειας των αριθμητικών μοντέλων, με στόχο την ενίσχυση της πρόληψης και της αντιμετώπισης πυρκαγιών σε αποθηκευτικούς χώρους.

1.1 Η Φυσική και Χημική Συμπεριφορά της Φωτιάς

Η φωτιά αποτελεί ένα από τα πλέον εντυπωσιακά φυσικά φαινόμενα και ορίζεται ως η διαδικασία ταχείας οξείδωσης, μια χημική αντίδραση που συνοδεύεται από την παραγωγή φωτός και θερμότητας (Quintiere, 2006). Η ένταση και η δυναμική της φωτιάς εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες όπως η θερμοκρασία, το είδος και η ποσότητα του καυσίμου, καθώς και οι συνθήκες περιβάλλοντος (Drysdale, 2011). Οι φυσικές ιδιότητές της διαφέρουν ανάλογα με αυτές τις παραμέτρους, καθιστώντας τη συμπεριφορά της ιδιαίτερα σύνθετη και δύσκολα προβλέψιμη.

Η μορφή της φλόγας εξαρτάται από τον τύπο του καυσίμου, τη ροή και την ανάμειξη με τον οξειδωτικό παράγοντα, οδηγώντας στην ανάπτυξη διαφορετικών δομών φλόγας, καθεμία με ξεχωριστά χαρακτηριστικά. Η αλληλεπίδραση των χημικών συστατικών και οι φυσικές συνθήκες του περιβάλλοντος παίζουν καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξη της φωτιάς, γεγονός που καθιστά δύσκολη την ακριβή πρόβλεψη της εξάπλωσης και της έντασής της (Drysdale, 2011).

Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που σχετίζονται με τη φωτιά είναι η ικανότητά της να εξελίσσεται σε ανεξέλεγκτες καταστάσεις, προκαλώντας σοβαρές επιπτώσεις στον άνθρωπο, τις υποδομές και το φυσικό περιβάλλον. Παρά την εκτενή επιστημονική έρευνα, ο περιορισμός των ανεξέλεγκτων πυρκαγιών παραμένει πρόκληση, ειδικά υπό ευνοϊκές συνθήκες εξάπλωσης, όπως υψηλές θερμοκρασίες, χαμηλή υγρασία και ισχυροί άνεμοι (Gollner & Williams, 2018). Οι συνέπειες τέτοιων φαινομένων μπορεί να είναι καταστροφικές, με ανυπολόγιστες ζημιές στα οικοσυστήματα και απώλειες σε ανθρώπινες ζωές.

Συνοψίζοντας, η φωτιά παραμένει ένα δυναμικό και πολύπλοκο φαινόμενο που απαιτεί διαρκή επιστημονική μελέτη και παρακολούθηση. Η εμβάθυνση στη χημική και φυσική της συμπεριφορά, καθώς και η ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογιών πρόβλεψης και αντιμετώπισης, αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για τον περιορισμό των επιπτώσεων των ανεξέλεγκτων πυρκαγιών.

1.2 Η Διαδικασία της Καύσης: Στοιχεία, Συνθήκες και Μηχανισμός

Η εκκίνηση και διατήρηση μιας φωτιάς προϋποθέτει την ταυτόχρονη παρουσία τεσσάρων θεμελιωδών στοιχείων: καύσιμο (Fuel), θερμότητα (Heat), οξυγόνο (Oxygen) και χημική αλυσιδωτή αντίδραση (Chemical Chain Reaction) (DiNunno & Beyler, 2008). Αυτά τα στοιχεία συγκροτούν το λεγόμενο "Τετράεδρο της φωτιάς", θεωρητική επέκταση του κλασικού "Τριγώνου της φωτιάς" με την προσθήκη της χημικής αλυσιδωτής αντίδρασης, η οποία είναι καθοριστική για τη διατήρηση της καύσης.

Η φωτιά μπορεί να εκδηλωθεί και να εξαπλωθεί μόνο όταν όλα τα παραπάνω στοιχεία συνυπάρχουν σε επαρκείς συνθήκες. Η έλλειψη ή η απομάκρυνση οποιουδήποτε από αυτά τα συστατικά διακόπτει τη χημική διεργασία της καύσης, οδηγώντας στον περιορισμό ή την πλήρη κατάσβεση της φωτιάς. Αυτή η θεμελιώδης αρχή αποτελεί τη βάση για τις στρατηγικές πυρόσβεσης, οι οποίες επικεντρώνονται στην εξουδετέρωση ενός ή περισσότερων από τα κρίσιμα αυτά στοιχεία, είτε μέσω φυσικών είτε μέσω χημικών μεθόδων (Karlsson & Quintiere, 1999).

Η καύση ξεκινά με την παρουσία καυσίμου, το οποίο μπορεί να είναι στερεό, υγρό ή αέριο (όπως ξύλο, βενζίνη ή προπάνιο). Όταν θερμαίνεται, το καύσιμο διασπάται χημικά, απελευθερώνοντας πτητικές ουσίες και αέρια όπως μονοξείδιο και διοξείδιο του άνθρακα. Αυτά τα προϊόντα είναι αναφλέξιμα και συμβάλλουν στη διατήρηση της φωτιάς. Η σύσταση, ποσότητα και μορφή του καυσίμου επηρεάζουν την ένταση και τη συμπεριφορά της φωτιάς (Karlsson & Quintiere, 1999).

Η θερμότητα αποτελεί βασικό παράγοντα, καθώς είναι η ενέργεια που ρέει από σώματα υψηλής θερμοκρασίας προς χαμηλότερης. Σε μοριακό επίπεδο, σχετίζεται με την κίνηση των μορίων – όσο μεγαλύτερη η θερμοκρασία, τόσο ταχύτερη η κίνησή τους και μεγαλύτερη η ενέργεια που μεταφέρεται. Το οξυγόνο είναι επίσης απαραίτητο για την καύση. Πρόκειται για άχρωμο και άοσμο αέριο με ατομικό αριθμό 8, που επιτρέπει την αντίδραση του καυσίμου με τη θερμότητα. Αν μειωθεί η συγκέντρωσή του (που στην ατμόσφαιρα είναι περίπου 21%), η καύση διακόπτεται. Η επάρκειά του είναι σημαντική για πλήρη καύση και περιορισμό του καπνού ή των ατελών προϊόντων (DiNunno & Beyler, 2008). Τέλος, η χημική αλυσιδωτή αντίδραση είναι αυτή που διατηρεί τη διαδικασία της καύσης. Μετά την ανάφλεξη, η συνεχής αντίδραση καυσίμου και οξυγόνου παράγει θερμότητα και ενισχύει τη φωτιά. Αν κάποιος από τους βασικούς παράγοντες (καύσιμο, θερμότητα, οξυγόνο) απομακρυνθεί, η φωτιά σβήνει, γεγονός που υπογραμμίζει την αλληλεξάρτηση των στοιχείων της καύσης.

1.3 Περιγραφή Σταδίων Ανάπτυξης Φωτιάς

Για την κατανόηση της εξάπλωσης της φωτιάς, περιγράφονται τα βασικά στάδια που ακολουθεί η καύση σε έναν κλειστό χώρο. Το πρώτο στάδιο είναι η ανάφλεξη, κατά το οποίο το καύσιμο φτάνει στη θερμοκρασία ανάφλεξης και ενεργοποιεί την αντίδραση με το οξυγόνο. Σε αυτή την φάση, η θερμοκρασία αυξάνεται, κυρίως στην οροφή, παράγοντας αέρια πυρόλυσης που αναφλέγονται αργότερα. Η καύση μπορεί να είναι είτε φλεγόμενη είτε σιγοκαίει (Karlsson & Quintiere, 1999).

Στο επόμενο στάδιο, την ανάπτυξη, ο ρυθμός της φωτιάς εξαρτάται από το υλικό του καυσίμου και την αλληλεπίδραση με τον περιβάλλοντα χώρο. Όταν η θερμότητα από το καύσιμο είναι επαρκής για να αναφλεγεί το κοντινότερο καύσιμο, η φωτιά αναπτύσσεται γρήγορα. Η φωτιά σε αυτό το στάδιο χαρακτηρίζεται ως «φωτιά ελεγχόμενη από καύσιμο» «fuel-controlled fire» όταν υπάρχει επαρκές οξυγόνο (Karlsson & Quintiere, 1999).

Ακολουθεί το στάδιο του flashover, το οποίο σηματοδοτεί τη μετάβαση από την αρχική ανάπτυξη της φωτιάς στην πλήρη ανάπτυξή της. Κατά τη διάρκεια του flashover, η θερμοκρασία μπορεί να φτάσει τα 500°C - 600°C και τα επίπεδα ακτινοβολίας τα 15-20 kW/m². Παράγοντες όπως η γεωμετρία του χώρου και οι ιδιότητες του καυσίμου επηρεάζουν την εξέλιξή του (Karlsson & Quintiere, 1999).

Στο τέταρτο στάδιο, την πλήρη ανάπτυξη της φωτιάς, η φωτιά καταναλώνει το διαθέσιμο οξυγόνο και τείνει να συρρικνώνεται. Εδώ, η θερμοκρασία φτάνει τα 700°C - 1200°C, και ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας είναι μέγιστος, χαρακτηρίζοντας την φωτιά ως « καύση ελεγχόμενη με αερισμό » (Karlsson & Quintiere, 1999).

Τέλος, στο στάδιο της απόσβεσης, η φωτιά εξαντλεί σχεδόν όλη την καύσιμη ύλη, με αποτέλεσμα τη μείωση του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας και της ζήτησης για οξυγόνο. Η δυναμική της πυρκαγιάς εξετάζει τη διαδικασία με την οποία μια φωτιά ξεκινά, αναπτύσσεται, εξαπλώνεται και τελικά σβήνει.

1.4 Μηχανισμοί Μετάδοσης Θερμότητας

Η μετάδοση θερμότητας είναι η διαδικασία κατά την οποία η θερμική ενέργεια μεταφέρεται από μια περιοχή υψηλότερης θερμοκρασίας σε μια περιοχή με χαμηλότερη, χωρίς μεταφορά ύλης. Η θερμική ενέργεια κινείται για να εξισώσει τις θερμοκρασίες, ακολουθώντας τον δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής, ο οποίος αναφέρει ότι η ενέργεια ρέει προς την κατεύθυνση της μεγαλύτερης αταξίας (Cengel & Boles, 2008). Η μετάδοση μπορεί να συμβεί μέσω αγωγής, συναγωγής ή ακτινοβολίας, με στόχο την επίτευξη θερμικής ισορροπίας (Incropera & DeWitt, 2007).

1.4.1 Μηχανισμός Μετάδοσης Θερμότητας: Αγωγή (Conduction)

Η μετάδοση θερμότητας με αγωγή είναι η διαδικασία μεταφοράς θερμότητας από μια περιοχή υψηλότερης θερμοκρασίας σε μια χαμηλότερης θερμοκρασίας μέσω άμεσων συγκρούσεων των μορίων του υλικού (Kreith & Bohn, 2001). Η αγωγή είναι ιδιαίτερα χαρακτηριστική στα στερεά σώματα, όπου τα μόρια βρίσκονται σε σταθερές θέσεις και μπορούν να μεταφέρουν ενέργεια μέσω ταλαντώσεων και συγκρούσεων.

Όταν ένα μέρος του υλικού θερμαίνεται, τα μόρια αποκτούν μεγαλύτερη κινητική ενέργεια και τη μεταδίδουν στα ψυχρότερα γειτονικά μόρια. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι να επιτευχθεί θερμική ισορροπία, δηλαδή ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας (Incropera & Dewitt, 2007).

Στα μέταλλα, η αγωγή είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική χάρη στα ελεύθερα ηλεκτρόνια, τα οποία κινούνται μέσα στο υλικό και μεταφέρουν θερμότητα γρήγορα μέσω συγκρούσεων, εξηγώντας την υψηλή θερμική αγωγιμότητά τους (Callister & Rethwisch, 2018). Η αγωγή συμβαίνει και στα ρευστά με τη θερμότητα να μεταδίδεται μέσω μοριακών συγκρούσεων, όμως η διαδικασία είναι πιο αργή λόγω της ελεύθερης κίνησης και των ασθενέστερων δεσμών μεταξύ των μορίων. Η μεταφορά μπορεί να ενισχυθεί με κυκλοφορία ή εξαναγκασμένη ροή του ρευστού.

Παρακάτω, παρουσιάζεται η εξίσωση Fourier που εκφράζει τον ρυθμό μεταφοράς θερμότητας μέσω αγωγής λόγω διαφοράς θερμοκρασίας και εφαρμόζεται κυρίως σε μηχανολογικές και ενεργειακές εφαρμογές (Kreith & Bohn, 2001):

$$\dot{q} = \kappa A \frac{[T_2 - T_1]}{L} \quad \text{Εξ.1}$$

$\dot{q}$: Ρυθμός ροής θερμότητας (heat transfer rate)

k : Συντελεστής θερμική αγωγιμότητα υλικού

A : Επιφάνεια επαφής μέσω της οποίας μεταφέρεται θερμότητα

$T_2 - T_1$: Διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ δύο περιοχών ή σωμάτων.

L : Πάχος ή απόσταση ανάμεσα σε δύο περιοχές μεταφοράς θερμότητας.

1.4.2 Μηχανισμός Μετάδοσης Θερμότητας: Συναγωγή (Convection)

Η μετάδοση θερμότητας μέσω συναγωγής προκύπτει όταν ένα ρευστό (υγρό ή αέριο) έρχεται σε επαφή με μια στερεή επιφάνεια διαφορετικής θερμοκρασίας και ρέει πάνω της, μεταφέροντας θερμική ενέργεια (Kreith & Bohn, 2001).

Ανάλογα με τον τρόπο κίνησης του ρευστού, διακρίνεται σε ελεύθερη και εξαναγκασμένη συναγωγή. Στην ελεύθερη συναγωγή, η ροή του ρευστού προκαλείται από φυσικές διαφορές θερμοκρασίας και πυκνότητας. Όταν το ρευστό θερμαίνεται, αποκτά χαμηλότερη πυκνότητα και ανέρχεται, ενώ το ψυχρότερο κατέρχεται, δημιουργώντας κυκλικά ρεύματα που μεταφέρουν θερμότητα. Η διαδικασία αυτή εμφανίζεται σε φυσικά φαινόμενα όπως η κυκλοφορία του αέρα σε ένα δωμάτιο ή στην ατμόσφαιρα (Cengel & Boles, 2008).

Αντίθετα, στην εξαναγκασμένη συναγωγή, η κίνηση του ρευστού επιβάλλεται από εξωτερικά μέσα, όπως ανεμιστήρες ή αντλίες, αυξάνοντας σημαντικά την ταχύτητα ροής και την αποτελεσματικότητα της θερμικής μεταφοράς. Αυτή η μορφή συναγωγής χρησιμοποιείται ευρέως σε τεχνικές εφαρμογές, όπως τα συστήματα ψύξης, οι εναλλάκτες θερμότητας και οι μονάδες θέρμανσης-κλιματισμού, όπου απαιτείται ελεγχόμενη και αποδοτική ροή θερμότητας. Και στις δύο περιπτώσεις, η συναγωγή εξαρτάται από τη θερμοκρασιακή διαφορά, τις ιδιότητες του ρευστού και τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας (Cengel & Ghajar, 2015).

Παρακάτω, παρουσιάζεται ο νόμος του Newton για τη συναγωγή που περιγράφει τον ρυθμό μεταφοράς θερμότητας από μια στερεή επιφάνεια σε ένα κινούμενο ρευστό:

$$Q = hA(T_s - T_\infty) \quad \text{Εξ.2}$$

Q : Ρυθμός ροής θερμότητας (W)

h : Συντελεστής συναγωγής θερμότητας ($W/m^2 K$)

A : Επιφάνεια επαφής (m^2)

T_s : Θερμοκρασία επιφάνειας (K ή $^{\circ}C$)

T : Θερμοκρασία του ρευστού μακριά από την επιφάνεια (K ή $^{\circ}C$)

1.4.3 Μηχανισμός Μετάδοσης Θερμότητας: Ακτινοβολία (Radiation)

Η ακτινοβολία αποτελεί έναν από τους βασικούς μηχανισμούς μετάδοσης θερμότητας, μαζί με την αγωγή και τη συναγωγή. Σε αντίθεση με τους άλλους μηχανισμούς, η ακτινοβολία δεν απαιτεί την παρουσία υλικού μέσου, καθώς η θερμική ενέργεια μεταφέρεται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, κυρίως με τη μορφή φωτονίων.

Η ποσότητα θερμότητας που εκπέμπεται από ένα σώμα εξαρτάται άμεσα από τη θερμοκρασία του. Όσο πιο υψηλή είναι η θερμοκρασία, τόσο μεγαλύτερη είναι και η εκπομπή ακτινοβολίας. Η ενέργεια αυτή μεταδίδεται κυρίως στα υπέρυθρα και ορατά μήκη κύματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (Incropera & DeWitt, 2007). Οι ιδιότητες των φωτονίων – όπως το μήκος κύματος και η συχνότητα – καθορίζουν την ποσότητα της μεταφερόμενης ενέργειας, καθώς και τη μορφή της (Siegel & Howell, 2002).

Όταν δύο σώματα ανταλλάσσουν θερμότητα μέσω ακτινοβολίας, η ροή ενέργειας μεταξύ τους συνεχίζεται μέχρι να εξισωθούν οι θερμοκρασίες τους. Σε αυτό το σημείο επιτυγχάνεται θερμική ισορροπία και δεν υπάρχει καθαρή ροή θερμότητας, καθώς η απορροφούμενη και η εκπεμπόμενη ενέργεια είναι ίσες (Modest, 2013). Αν όμως υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας, η ροή θερμότητας κατευθύνεται από το θερμότερο προς το ψυχρότερο αντικείμενο.

Οι τύποι ακτινοβολίας ταξινομούνται με βάση το μήκος κύματος. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα εκτείνεται από 0,1 έως 100 μικρόμετρα (μm) και περιλαμβάνει ακτινοβολίες όπως η υπεριώδης, το ορατό φως και η υπέρυθρη ακτινοβολία (Howell, Mengüç & Siegel, 2015), όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3. Κάθε τύπος ακτινοβολίας έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά και συνεισφέρει με διαφορετικό τρόπο στη μετάδοση της θερμότητας μέσω ακτινοβολίας.

Η ροή θερμότητας μέσω ακτινοβολίας περιγράφεται μαθηματικά με τη χρήση της εξίσωσης Stefan-Boltzmann:

$$Q = \sigma A \varepsilon (T^4 - T_0^4) \quad \text{Εξ.3}$$

Q : Θερμική ροή, εκφράζει την ποσότητα θερμικής ενέργειας που μεταφέρεται ανά μονάδα χρόνου μέσω ακτινοβολίας (Watt)

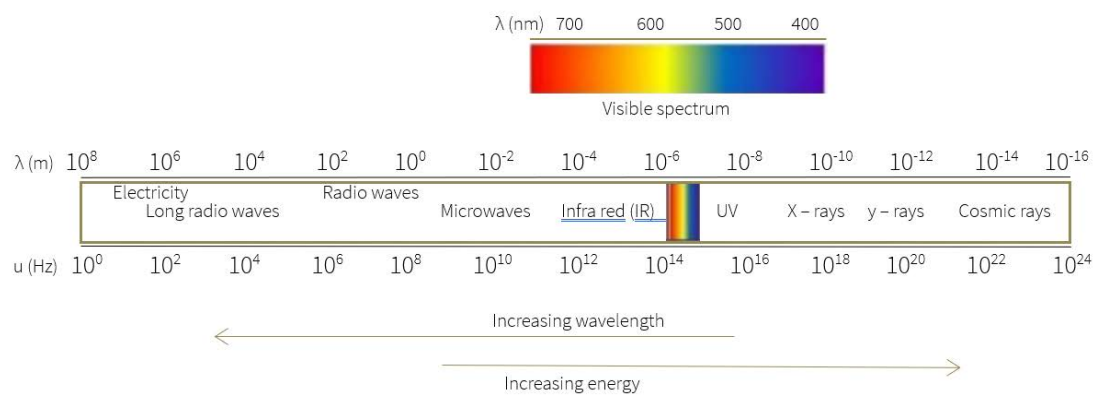
σ : Σταθερά Stefan-Boltzmann, είναι μία φυσική σταθερά ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)

A : Επιφάνεια εκπομπής, είναι η επιφάνεια του σώματος που εκπέμπει θερμότητα

ε : Συντελεστής εκπομπής, δηλαδή, η ικανότητα ενός υλικού να εκπέμπει ακτινοβολία.

T : Θερμοκρασία του σώματος

T_0 : Θερμοκρασία του περιβάλλοντος



Εικόνα 1.4.4: Απεικόνιση του Ηλεκτρομαγνητικού Φάσματος (Engineering ToolBox, 2016)

2. Αριθμητική Μέθοδος Επίλυσης Πειραμάτων

2.1 Υπολογιστική Ρευστοδυναμική - Computational Fluid Dynamics

Η Υπολογιστική Μηχανική Ρευστών (CFD) είναι η επιστήμη που χρησιμοποιεί υπολογιστές για την ποσοτική πρόβλεψη φαινομένων ροής ρευστών, επιλύοντας διαφορικές εξισώσεις που διέπουν την κίνηση τους (Versteeg & Malalasekera, 2024). Στη διαδικασία επίλυσης ενός φυσικού προβλήματος, αρχικά καθορίζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, οι φυσικοί παράμετροι και οι οριακές συνθήκες. Στη συνέχεια, ο χώρος διαχωρίζεται σε μικρούς υποχώρους (κελιά), δημιουργώντας το δίκτυο κελιών (κανάβος). Μέσα στα κελιά του κανάβου, οι διαφορικές εξισώσεις διακριτοποιούνται μέσω μεθόδων όπως οι πεπερασμένοι όγκοι και οι πεπερασμένες διαφορές (Μαρκάτος & Ασημακόπουλος, 1995).

Η ρευστοδυναμική αναφέρεται στη μελέτη της κίνησης των σωματιδίων (μορίων ή ατόμων) σε ένα ρευστό, το οποίο λόγω της υψηλής πυκνότητας προσεγγίζεται ως συνεχές μέσο. Η ροή του ρευστού περιγράφεται μέσω διαφορικών εξισώσεων που βασίζονται σε νόμους διατήρησης, όπως η διατήρηση της ενέργειας, ορμής και μάζας. Οι φυσικές ποσότητες, όπως η ταχύτητα, πίεση, θερμοκρασία και πυκνότητα, εξαρτώνται από τη διατήρηση αυτών των ποσοτήτων κατά τη διάρκεια της ροής.

Η ροή ρευστού διαχωρίζεται σε δύο μέρη: τη ροή λόγω συναγωγής, που αφορά τη μακροσκοπική κίνηση του ρευστού, και τη μοριακή κίνηση, που προκαλεί διάχυση φυσικών ποσοτήτων. Η μελέτη της ροής πραγματοποιείται μέσω πεπερασμένων όγκων ελέγχου, αναλύοντας τόσο τη συναγωγή όσο και τη διάχυση των μορίων (Incropera & DeWitt, 2011).

Η τεχνολογία CFD έχει εξελιχθεί συνεχώς και χρησιμοποιείται για την ασφάλεια και την εκτίμηση κινδύνων, όπως σε πυρκαγιές και διάσπαρση τοξικών ουσιών (NIST, 2018). Το πρώτο μοντέλο CFD αναπτύχθηκε στη δεκαετία του 1970 στο Imperial College του Λονδίνου. Στην παρούσα μελέτη, πραγματοποιήθηκε πείραμα με χρήση της εφαρμογής PyroSim 2023 και του υπολογιστικού κώδικα FDS (Thunderhead Engineering, 2018), προσομοιώνοντας συνθήκες πυρκαγιάς σε πραγματική κλίμακα, με ανάλυση του πλέγματος και των διαστάσεων των κελιών που χρησιμοποιήθηκαν στο FDS.

2.2 Κώδικας Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής - Fire Dynamics Simulator

Ο Fire Dynamics Simulator (FDS) είναι ένας υπολογιστικός κώδικας που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση φαινομένων πυρκαγιάς και ροής ρευστών, βασισμένος στην αριθμητική επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes, οι οποίες περιγράφουν τη διατήρηση της μάζας, της ορμής και της ενέργειας σε ρευστά. Το FDS χρησιμοποιεί την αριθμητική μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών για την επίλυση αυτών των εξισώσεων, λαμβάνοντας υπόψη τις θερμικές ροές χαμηλής ταχύτητας, όπου ο αριθμός Mach είναι μικρότερος από 0,30. Αυτό το καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλο για την προσομοίωση της εξάπλωσης καπνού και θερμότητας (McGrattan, 2016).

Η υπολογιστική προσέγγιση του FDS πραγματοποιείται σε έναν τρισδιάστατο υπολογιστικό χώρο που δομείται ως ορθογώνιο πλέγμα. Ο υπολογιστικός χώρος διαιρείται σε μικρότερα στοιχεία (κελία), και τα βαθμωτά μεγέθη, όπως η πίεση, υπολογίζονται στο κέντρο των κελιών. Αντίθετα, τα διανυσματικά μεγέθη, όπως η ταχύτητα, τοποθετούνται στις επιφάνειες των κελιών (Patankar, 1980). Οι εξισώσεις ροής επιλύονται σε κάθε κελί μέσω πεπερασμένων διαφορών, και αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την ακριβή περιγραφή της ροής και της θερμικής συμπεριφοράς του ρευστού.

Ένα βασικό πρόγραμμα που συνοδεύει το FDS είναι το Smokeview, το οποίο χρησιμοποιείται για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων. Μέσω τρισδιάστατης απεικόνισης, το Smokeview προσφέρει μια εξαιρετικά ρεαλιστική αναπαράσταση της εξάπλωσης της φωτιάς και του καπνού. Οι χρήστες μπορούν να παρακολουθούν την εξέλιξη των φαινομένων σε πραγματικό χρόνο, αξιολογώντας σημαντικές παραμέτρους, όπως η ορατότητα και η θερμική κατανομή (Forney, 2018).

Το FDS και το Smokeview είναι ελεύθερο λογισμικό ανοιχτού κώδικα που υποστηρίζεται από το National Institute of Standards and Technology (NIST) και χρησιμοποιείται ευρέως από ερευνητικά εργαστήρια, πανεπιστήμια και επαγγελματίες του τομέα για την ανάλυση πυρκαγιών και την κατανόηση της δυναμικής τους. Η συνεχής εξέλιξη και υποστήριξή του από το NIST, σε συνεργασία με άλλους ερευνητικούς φορείς, ενισχύει τη χρησιμότητα του FDS στην ανάλυση σύνθετων φαινομένων πυρκαγιάς και καπνού (McGrattan, 2016).

Παρακάτω, περιγράφονται οι εξισώσεις Navier-Stokes με τις οποίες επιλύονται τα πειράματα με κώδικα FDS.

Εξίσωση διατήρησης μάζας (Conservation of Mass)

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla(\vec{u}p) = \dot{m}_b''' \quad \text{Εξ.4.1}$$

p : Η πυκνότητα του αερίου

$\vec{u}$: Το διάνυσμα ταχύτητας του ρευστού

$\frac{\partial p}{\partial t}$: Μεταβολή πυκνότητας με την πάροδο του χρόνου

$\dot{m}_b'''$: Ο ρυθμός παραγωγής μάζας ανά μονάδα όγκου λόγω εσωτερικών πηγών

$\nabla(\vec{u}p)$: Σύγκλιση ή απόκλιση της ροής μάζας μέσα από τα όρια ενός ελεγχόμενου όγκου (McGrattan, 2016).

Εξίσωση διατήρησης μάζας για αέριο α (Conservation of Mass)

$$\frac{\partial}{\partial t}(pY_a) + \nabla p Y_a \vec{u} = \nabla p D_a \nabla Y_a + \dot{m}_a''' + \dot{m}_{b,a}''' \quad \text{Εξ.4.2}$$

Y_a : Το κλάσμα μάζας του αερίου α

p : Η πυκνότητα του αερίου

D_a : Ο συντελεστής διάχυσης του αερίου α

$\vec{u}$: Το διάνυσμα ταχύτητας, με συνιστώσες $\vec{u} = (u, v, w)$

$\dot{m}_a'''$: Ο ρυθμός παραγωγής μάζας του αερίου α

$\dot{m}_{b,a}'''$: Ο ρυθμός παραγωγής μάζας που προέρχεται από την εξάτμιση σταγονιδίων και σωματιδίων (McGrattan, 2016).

Εξίσωση διατήρησης της ορμής (Conservation of Momentum)

$$\frac{\partial}{\partial t}(p\vec{u}) + \nabla p \vec{u} \vec{u} + \nabla p = p\vec{g} + \vec{f}b + \nabla \tau_{ij} \quad \text{Εξ.4.3.1}$$

p : Η πυκνότητα του ρευστού

$\vec{u}$: Το διάνυσμα ταχύτητας του ρευστού

$\frac{\partial}{\partial t}(p\vec{u})$: Η χρονική μεταβολή της ορμής

$\nabla p \vec{u} \vec{u}$: Όρος μεταφοράς ορμής, εκφράζει την αλλαγή της ορμής λόγω της ροής του ρευστού

p : Η πίεση του ρευστού

$p\vec{g}$: Εξωτερικές δυνάμεις λόγω της βαρύτητας

$\vec{f}b$: Εξωτερικές δυνάμεις όπως η ανωστική δύναμη ή η οπισθέλκουσα που ασκούν τα σταγονίδια

τ_{ij} : Τανυστής των τάσεων , ο οποίος εκφράζει τις εσωτερικές δυνάμεις λόγω του ιξώδους του ρευστού (McGrattan, 2016).

Εξίσωση διατήρησης ενέργειας (Conservation of Energy)

$$\frac{\partial}{\partial t}(ph_s) + \nabla p h_s u = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}''' - q_b''' - \nabla \dot{q}'' + \varepsilon \quad \text{Εξ.4.3.5}$$

k : Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

$\dot{q}'''$: Ρυθμός έκλυσης θερμότητας ανά μονάδα όγκου

q_b''' : Ενέργεια μεταφερόμενη σε σταγονίδια εξάτμισης

$\frac{\partial}{\partial t}(ph_s)$: Χρονική μεταβολή της ενέργειας στο σύστημα λόγω της πίεσης και της ενθαλπίας (h_s)

$\nabla p h_s u$: Μεταφορά ενέργειας λόγω της ροής ρευστού

h_s : Αισθητή ενθαλπία η οποία βρίσκεται σε συνάρτηση με την θερμοκρασία (McGrattan, 2016).

Εξίσωση κατάστασης για ένα τέλειο αέριο (Equation of state for a perfect gas)

$$P = \frac{p R T}{\bar{W}} \quad \text{Εξ.4.3.9}$$

Ο όρος $\bar{W} = \sum \frac{m_a}{Y_a}$ είναι το μέσο μοριακό βάρος του μείγματος αερίου (McGrattan, 2016).

3. Περιγραφή Προσομοιώσεων Πραγματικού Χώρου

3.1 Μελέτη Καύσης Χαρτόκουτων Biwell σε Βιομηχανικούς Χώρους

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η μελέτη πραγματικών προσομοιώσεων πυρκαγιάς που πραγματοποιήθηκαν σε μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις και αποθήκες. Το αντικείμενο της μελέτης είναι η καύση χαρτόκουτων τοποθετημένων σε ράφια εντός κλειστού χώρου. Στόχος είναι η ανάλυση της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς σε συνάρτηση με τη γεωμετρία και την απόσταση της καύσιμης ύλης στον χώρο. Το βασικό υλικό καύσης που χρησιμοποιήθηκε είναι το διπλό κυματοειδές χαρτόνι (biwell) πάχους 7mm, το οποίο χρησιμοποιείται για βαριές συσκευασίες και δοκιμές πυρκαγιάς, καθώς αποτελεί μια ρεαλιστική μορφή της καύσιμης ύλης (Drysdale, 2011). Συνολικά, πραγματοποιήθηκαν έξι κατηγορίες πειραμάτων, οι οποίες διεξήχθησαν στο Σουηδικό Εθνικό Ινστιτούτο Δοκιμών και Έρευνας (SP Swedish National Testing and Research Institute) (Lönnermark & Ingason, 2005).

Η πρώτη σειρά πειραμάτων επικεντρώνεται στη δοκιμή των χαρτόκουτων ως βασικό υλικό και αξιολογούνται η ευφλεκτότητα και οι θερμικές του ιδιότητες, με στόχο την εκτίμηση της συμπεριφορά τους κατά την καύση (Lönnermark & Ingason, 2005).

Στην τρίτη και πέμπτη σειρά δοκιμών, τοποθετήθηκαν τέσσερα συστήματα ραφιών με πέντε επίπεδα το καθένα, το ένα δίπλα στο άλλο, με μικρή απόσταση μεταξύ τους. Πάνω σε αυτά τοποθετήθηκαν χαρτόκουτα σε διάταξη (2 x 12 x 5) (X Y Z). Στη σειρά αυτή αναλύεται η καύσης της ύλης και εξετάζεται η επίδραση της γεωμετρίας του χώρου στη διαδικασία καύσης. Επιπλέον, μεταβλήθηκαν δύο βασικές παράμετροι: το ύψος μεταξύ της τελευταίας στοιβάδας και της οροφής και η κλίση της οροφής, προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδρασή τους στην εξάπλωση της πυρκαγιάς. Στην τρίτη σειρά δοκιμών, τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν χωρίς οροφή, ενώ στην πέμπτη σειρά, τα ράφια τοποθετήθηκαν κάτω από οροφή (Lönnermark & Ingason, 2005).

Στην τέταρτη σειρά δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν ξύλινα πλέγματα καύσης (wood cribs) τα οποία κάηκαν σε ελεγχόμενο περιβάλλον, με στόχο τη μελέτη της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς σε περιορισμένο χώρο.

Τέλος, στην έκτη σειρά δοκιμών η έρευνα επικεντρώθηκε σε χαμηλές στοίβες εμπορευμάτων, ώστε να αξιολογηθεί η επίδραση του ύψους τους στη διάδοση της φωτιάς (Lönnermark & Ingason, 2005).

3.2 Δοκιμές Καύσης Χαρτόκουτων: Από Πραγματική Μορφή σε Ψηφιακή

Η παρούσα ενότητα επικεντρώνεται στη δεύτερη σειρά δοκιμών, η οποία αποτέλεσε την πειραματική βάση για την ανάπτυξη των ψηφιακών προσομοιώσεων. Η επιλογή αυτή βασίζεται στη γεωμετρική απλότητα του πειράματος, καθώς αποτελείται από τέσσερα επίπεδα χαρτόκουτων με τέσσερα κουτιά σε κάθε επίπεδο. Η απλή αυτή γεωμετρία διευκολύνει τη μεταφορά δεδομένων σε ψηφιακό περιβάλλον και, κατά συνέπεια, καθιστά τη διερεύνηση της φωτιάς πιο ξεκάθαρη και αποτελεσματική. Ένα ενδεικτικό σχήμα για την εικονική περιγραφή των πειραμάτων είναι το Σχήμα 3.2, με μόνη διαφορά ότι αυτό απεικονίζει πέντε στοιβάδες κουτιών αντί για τέσσερις, μία γεωμετρία που δεν προσομοιώθηκε ψηφιακά.

Τα χαρτόκουτα είναι κατασκευασμένα από διπλό κυματοειδές χαρτόνι (biwell) και διατίθενται σε τρία διαφορετικά πάχη: 7mm, 14mm και 21mm, με σταθερές διαστάσεις 240mm × 200mm × 195mm (βλ. Σχήμα 3.2.α και Σχήμα 3.2.β). Σύμφωνα με κάθε πάχος, προσομοιώθηκαν τρία διαφορετικά πειράματα, καθώς το πάχος επιδρά σημαντικά στα αποτελέσματα. Μία από τις βασικές παραμέτρους που διερευνήθηκαν στη δεύτερη σειρά πειραμάτων είναι η κατάλληλη εσωτερική απόσταση (w) ανάμεσα στα κουτιά, τόσο οριζόντια όσο και κατακόρυφα (βλ. Σχήμα 3.2.γ). Αρχικά, προσομοιώθηκαν δύο αποστάσεις: 50mm και 75mm. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μικρότερη απόσταση των 50mm αποτελεί την πιο κατάλληλη επιλογή, καθώς προσφέρει πιο σταθερά και συγκρίσιμα αποτελέσματα. Βάσει αυτού του συμπεράσματος, τα ψηφιακά πειράματα σχεδιάστηκαν με εσωτερική απόσταση 50 mm. Επομένως, η παρούσα μελέτη παρουσιάζει σταθερότητα στις παραμέτρους και στη γεωμετρία, γεγονός που την καθιστά κατάλληλη για περαιτέρω διερεύνηση (Lönnemark & Ingason, 2005).

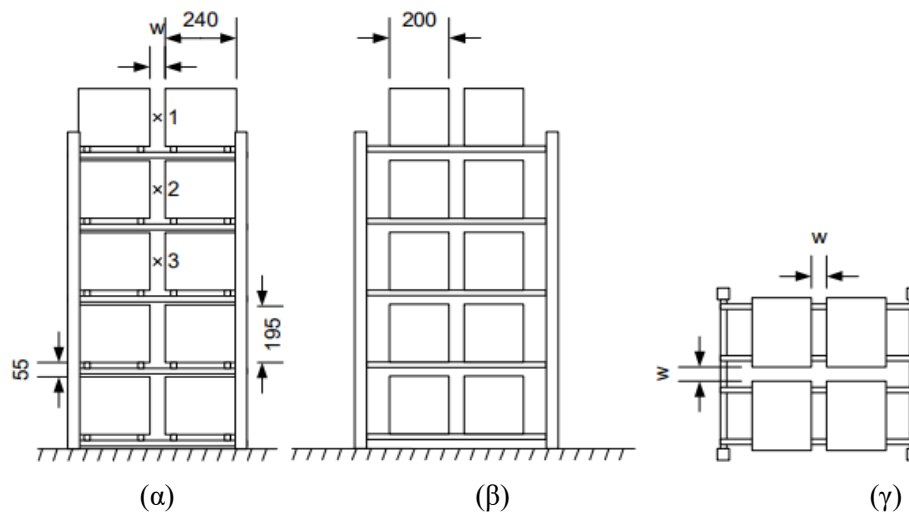
Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τρεις από τις κατηγορίες πραγματικών πειραμάτων που μεταφέρθηκαν σε ψηφιακό περιβάλλον, στο πλαίσιο μιας πρώτης προσέγγισης για τη μελέτη της καύσης χαρτόκουτων. Τα πραγματικά πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε κλίμακα 1:5, σε κλειστό χώρο, και αποτελούν τις βασικές πειραματικές κατηγορίες αυτής της έρευνας.

Πίνακας 3.2 : Επιλεγμένα πειράματα της δεύτερης σειράς σε ψηφιακό περιβάλλον	
1.	Δοκιμή με ένα ράφι, 2 x 2 x 4 μονά κουτιά και ενδιάμεση απόσταση 5 cm
2.	Δοκιμή με ένα ράφι, 2 x 2 x 4 διπλά κουτιά και ενδιάμεση απόσταση 5 cm
3.	Δοκιμή με ένα ράφι, 2 x 2 x 4 τριπλά κουτιά και ενδιάμεση απόσταση 5 cm

Η έρευνα του Σουηδικού Ινστιτούτου, στην οποία βασίζεται η παρούσα μελέτη, αποτελεί μία από τις πιο αξιόπιστες προσπάθειες διερεύνησης της εξάπλωσης της φωτιάς σε αποθηκευτικούς χώρους, λαμβάνοντας υπόψη κρίσιμες μεταβλητές, όπως το ύψος της οροφής, η απόσταση μεταξύ των ραφιών και ο ρυθμός καύσης των υλικών.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η διεθνής βιβλιογραφία παρουσιάζει περιορισμένο αριθμό μελετών που να αναλύουν διεξοδικά τις παραμέτρους προσομοίωσης μέσω πραγματικών πειραμάτων και να παραθέτουν εκτενώς τα αποτελέσματα. Ενδεικτικά, όσον αφορά την παράμετρο της εσωτερικής απόστασης των 50 mm, υπάρχουν και άλλες πηγές που προτείνουν διαφορετικές εσωτερικές αποστάσεις. Ωστόσο, η εν λόγω πηγή παρέχει τα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα λόγω της σύγκρισης που κάνει με την απόσταση 75mm, και για τον λόγο αυτό αποτελεί τη βάση της παρούσας έρευνας.

Τα μεγέθη που μελετώνται στις πραγματικές προσομοιώσεις είναι η θερμοκρασία και η ταχύτητα, σε καθορισμένες θέσεις μέτρησης (Θέσεις 1, 2 και 3), όπως παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.2: Πλάγια όψη, εμπρόσθια όψη και άνω όψη της πειραματικής διάταξης (Lönnermark & Ingason, 2005).

4. Πειραματική Διάταξη Ψηφιακού Μοντέλου

4.1 Μοντελοποίηση και Προσομοίωση σε Ψηφιακό Περιβάλλον

Είναι γεγονός πως η ψηφιακή μεταφορά πειραμάτων καύσης, σε σύγκριση με τα πραγματικά, αποφέρει μηδενικό κίνδυνο, έχει χαμηλότερο κόστος και είναι ευκολότερη στην εκτέλεση. Τα ψηφιακά πειράματα διεξάγονται στο υπολογιστικό περιβάλλον του PyroSim, το οποίο αποτελεί ένα από τα πιο ρεαλιστικά τρισδιάστατα εργαλεία αποτύπωσης της καύσης. Ο στόχος της μεταφοράς της πραγματικής προσομοίωσης σε ψηφιακή μορφή είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο χώρων, πώς ο διαφορετικός χώρος επηρεάζει την καύση και σε ποιον βαθμό συσχετίζονται τα αποτελέσματα των δύο περιπτώσεων, ώστε, αν πράγματι υπάρχει συσχέτιση, τα ψηφιακά μοντέλα να μπορούν να αποτελέσουν βάση για μελλοντική μελέτη.

Στα προσομοιωμένα πειράματα, η βασική παράμετρος που εξετάζεται είναι το πάχος της καύσιμης ύλης (7mm, 14mm, 21mm) το οποίο, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, δημιουργεί τρεις κατηγορίες πειραμάτων. Τα πάχη των κουτιών αναπαρίστανται ψηφιακά με την εφαρμογή διαφορετικού ρυθμού έκλυσης θερμότητας στις επιφάνειές τους. Ωστόσο, ένας επίσης σημαντικός παράγοντας για τη διερεύνηση της καύσης είναι οι επιφάνειες που επιλέγεται να καούν κάθε φορά, οι οποίες δημιουργούν τις υποκατηγορίες των τριών βασικών κατηγοριών.

Όπως περιγράφεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.1), η παρούσα έρευνα προσομοιώνει πέντε δοκιμές με διαφορετικές επιφάνειες καύσης κάθε φορά. Στις δύο πρώτες δοκιμές, που διεξάγονται με κλειστά όρια κανάβου, καίγεται μεγάλο μέρος του κουτιού. Το ίδιο συμβαίνει και στις δοκιμές με ανοικτά όρια κανάβου, όπου πραγματοποιούνται τρεις δοκιμές: δύο με καύση μεγάλου μέρους του κουτιού και μία με καύση μόνο της άνω επιφάνειας.

Πίνακας 4.1: Δοκιμές Ψηφιακής Προσομοίωσης

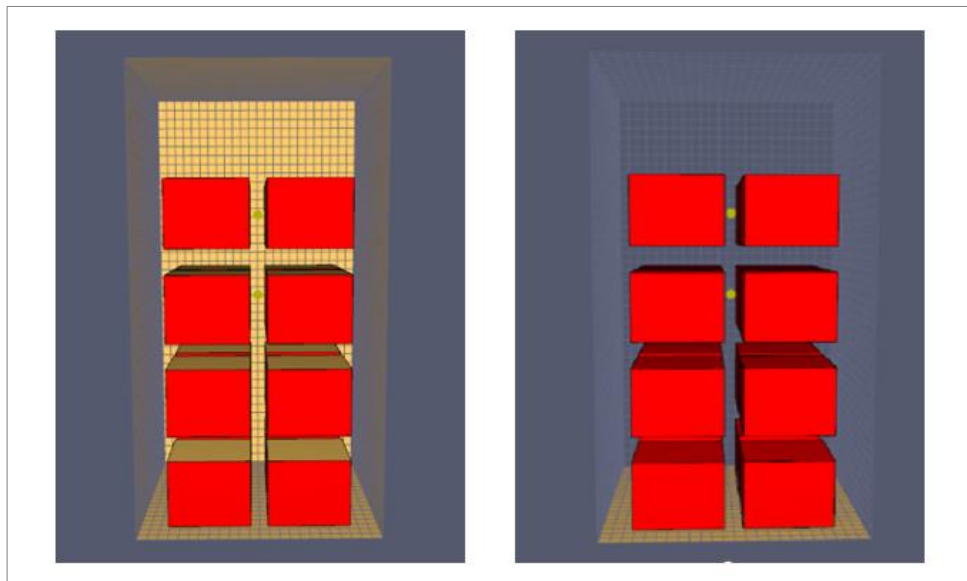
1.	Καύση τεσσάρων πλαϊνών πλευρών της καύσιμης ύλης (Κλειστά όρια)
2.	Καύση τεσσάρων πλαϊνών πλευρών και της άνω επιφάνεια της καύσιμης ύλης (Κλειστά όρια)
3.	Καύση τεσσάρων πλαϊνών πλευρών και της άνω επιφάνεια της καύσιμης ύλης (Ανοικτά όρια)
4.	Ολική καύση επιφανειών της καύσιμης ύλης (Ανοικτά όρια)
5.	Καύση άνω επιφάνειας της καύσιμης ύλης (Ανοικτά όρια)

4.2 Διαμόρφωση Ορίων και Δυναμική Καύσης στον Κάναβο

Για μια περαιτέρω ανάλυση των παραμέτρων, ο κάναβος αποτελείται από έξι επιφάνειες, σχηματίζοντας ένα τρισδιάστατο υπολογιστικό πλέγμα. Το πλέγμα σύμφωνα με τις δοκιμές, έχει είτε ανοιχτά είτε κλειστά όρια. Ορίζοντας κλειστά όρια, εννοείται ότι όλες οι επιφάνειες του κανάβου λειτουργούν ως φραγμοί, δηλαδή, αποτρέπουν τη διαφυγή όσο και την εισροή αέρα από και προς το εξωτερικό περιβάλλον, όπως συμβαίνει σε ένα κλειστό δωμάτιο (Εικόνα 4.2α). Αντίθετα, κατά την εφαρμογή ανοικτών ορίων, ο χρήστης επιλέγει να παραμείνουν ανοικτές οι τέσσερις πλαϊνές πλευρές του πλέγματος και η άνω επιφάνειά του, ενώ η βάση παραμένει κλειστή (Εικόνα 4.2β). Με αυτήν τη διαμόρφωση, ο αέρας μπορεί να διαφεύγει στον εξωτερικό χώρο και να εισέρχεται νέος αέρας από το περιβάλλον, ενισχύοντας την εξάπλωση της φωτιάς. Σκοπός της εφαρμογής των δύο διαφορετικών συνθηκών είναι η σύγκρισή τους και η αξιολόγηση του βαθμού επίδρασης της κυκλοφορίας του αέρα στην ψηφιακή καύση.

Στη συνέχεια, καθορίζονται οι επιφάνειες της καύσιμης ύλης που θα συμμετάσχουν στη διαδικασία της καύσης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Η καύσιμη ύλη αποτελείται από έξι πλευρές, και η επιλογή των επιφανειών που θα καούν είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς η φωτιά ξεκινά από μια αρχική εστία, η οποία ορίζεται σε συγκεκριμένη επιφάνεια, και στη συνέχεια διαχέεται στον χώρο. Σε αντίθεση με τον πραγματικό χώρο, όπου η πηγή ανάφλεξης τοποθετείται εσωτερικά της γεωμετρίας και τελικά καίγεται ολόκληρο το σύστημα, στις ψηφιακές προσομοιώσεις εξετάζονται διαφορετικά σενάρια. Συγκεκριμένα, κάθε φορά καίγονται διαφορετικές επιφάνειες, ώστε να διερευνηθούν όλα τα πιθανά ενδεχόμενα εξάπλωσης της φωτιάς. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων συγκρίνονται με εκείνα των πραγματικών πειραμάτων για την εξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων.

Παραδείγματος χάριν, όταν καίγονται οι τέσσερις πλαϊνές επιφάνειες του κουτιού, δεν ορίζεται πηγή θερμότητας στην άνω και κάτω πλευρά. Το ίδιο ισχύει και όταν καίγονται οι τέσσερις πλαϊνές και η άνω επιφάνεια· σε αυτή την περίπτωση, η κάτω πλευρά παραμένει χωρίς πηγή θερμότητας. Αντίθετα, όταν καίγονται και οι έξι πλευρές του κουτιού, ορίζεται πηγή θερμότητας σε όλες τις επιφάνειες. Τέλος, όταν καίγεται μόνο η άνω επιφάνεια του κουτιού, αυτή αποτελεί τη μοναδική πηγή θερμότητας.



(α) Κλειστά Όρια Κανάβου

(β) Ανοιχτά Όρια Κανάβου

Εικόνα 4.2: Απεικόνιση Πειραματικής Διάταξης Καύσης Χαρτόκουτων σε Περιβάλλον PyroSim

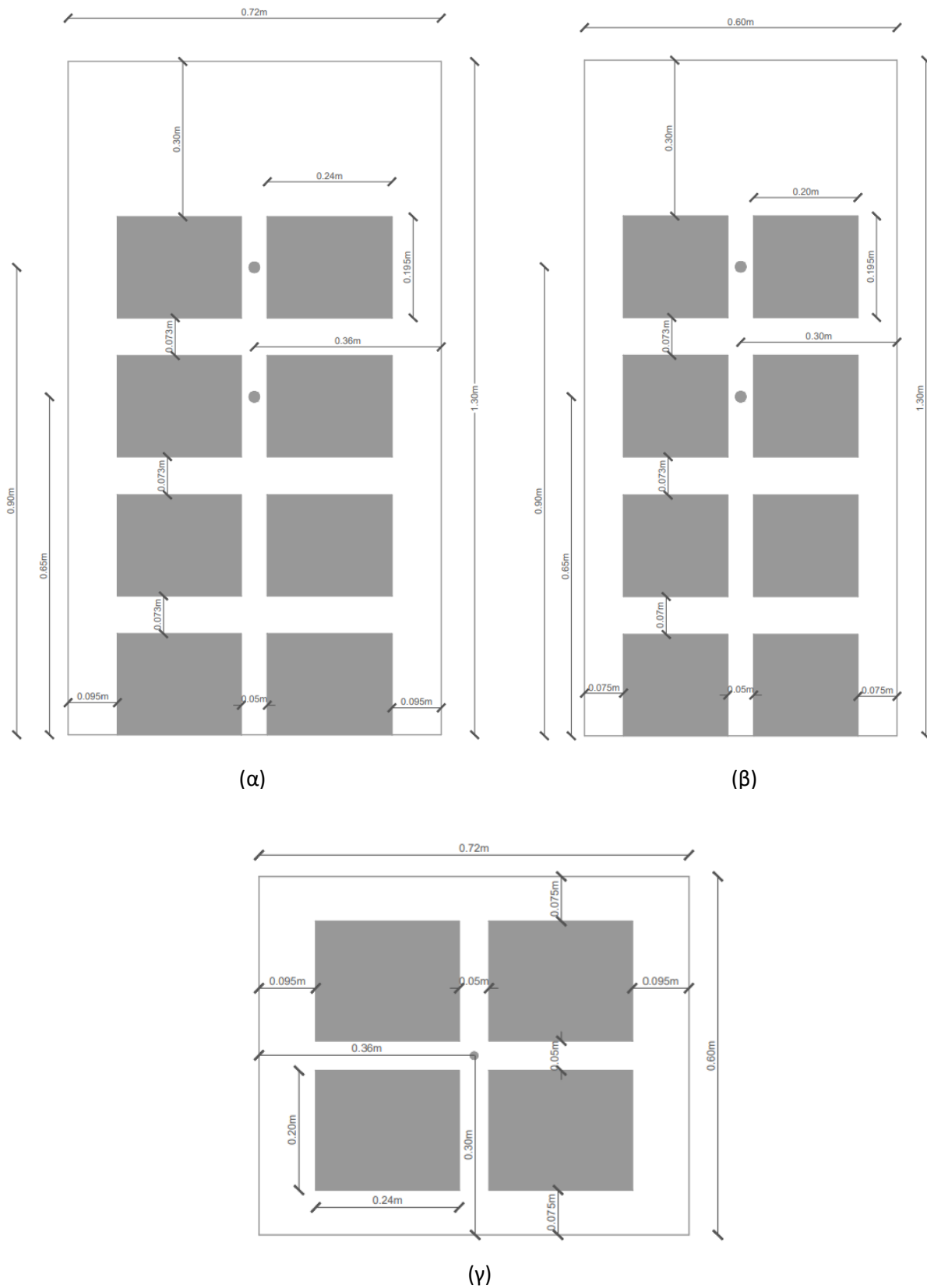
4.3 Περιγραφή Γεωμετρίας Ψηφιακού Μοντέλου

Ο σχεδιασμός της προσομοίωσης περιλαμβάνει ένα ορθογώνιο πλέγμα, μέσα στο οποίο τοποθετούνται συνολικά δεκαέξι κουτιά, διαμορφώνοντας τέσσερις στήλες. Η κάθε στήλη αποτελείται από τέσσερα κουτιά, σχηματίζοντας μια συμμετρική δομή. Οι διαστάσεις κάθε κουτιού είναι 0,24m μήκος, 0,20m πλάτος και 0,195m ύψος.

Στο πρώτο επίπεδο της διάταξης, τέσσερα κουτιά τοποθετούνται σε ύψος 0,00m, σχηματίζοντας δύο σειρές των δύο κουτιών η καθεμία. Η ομοιόμορφη κατανομή των κουτιών διατηρείται με εσωτερική απόσταση στηλών 0,05m τόσο οριζόντια όσο και κάθετα. Επιπλέον, η τοποθέτηση τους είναι προσαρμοσμένη σε συγκεκριμένες αποστάσεις από τα εξωτερικά όρια της γεωμετρίας. Συγκεκριμένα, κατά τον άξονα x, τα κουτιά απέχουν 0,095m από τα αριστερά και δεξιά όρια, ενώ κατά τον άξονα y, η πρώτη σειρά κουτιών τοποθετείται σε απόσταση 0,075m από τη βάση της κατασκευής. Παρακάτω, δίνεται σχηματικά η άνω όψη του μοντέλου, η οποία περιγράφει επαρκώς την αρχική τοποθέτηση των κουτιών (Σχήμα 4.3 (γ)).

Η δομή αναπτύσσεται κατακόρυφα μέσω της τοποθέτησης τριών επιπλέον επιπέδων κουτιών κατά μήκος του άξονα z. Η μεταξύ τους απόσταση είναι 0,073m, διατηρώντας έτσι μια σταθερή και ισορροπημένη διάταξη. Συνολικά, οι τέσσερις στήλες καύσιμης ύλης φτάνουν σε ύψος 1,00m, ενώ η απόσταση από την κορυφή της ανώτερης σειράς κουτιών έως το ανώτερο όριο της γεωμετρίας ανέρχεται σε 0.30m (Σχήμα 4.3 (α),(β)).

Για την παρακολούθηση της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια του πειράματος, δύο θερμομετρικές τοποθετούνται στον ενδιάμεσο χώρο μεταξύ των τεσσάρων στηλών. Ο πρώτος θερμομετρικός βρίσκεται σε ύψος $z_1 = 0,6525\text{m}$, ενώ ο δεύτερος είναι τοποθετημένος σε ύψος $z_2 = 0,9025\text{m}$. Αυτή η διάταξη εξασφαλίζει ακριβή μέτρηση της θερμοκρασιακής μεταβολής στη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας.



Σχήμα 4.3: Γεωμετρική Περιγραφή Μοντέλου. (α) Μπροστινή Όψη (β) Πλαϊνή όψη (γ) Άνω όψη

5. Εισαγωγή του Μοντέλου στο Περιβάλλον του PyroSim

5.1 Περιγραφή Κανάβου (Mesh)

Ως πλέγμα κανάβου θεωρείται το εξωτερικό περίβλημα του μοντέλου, εντός του οποίου θα σχεδιαστεί η γεωμετρία. Για την ακριβή διεξαγωγή του πειράματος, είναι απαραίτητο να διαιρεθεί ο κánaβος σε πολλαπλά κελιά πλέγματος και να οριοθετηθεί κατάλληλα μέσα στο πρόγραμμα Pyrosim. Για την οριοθέτηση του κανάβου, ανοίγεται η καρτέλα Mesh του προγράμματος και προστίθενται τα παρακάτω όρια:

MinX: 0 MaxX: 0.72 m

MinY: 0 MaxY: 0.60 m

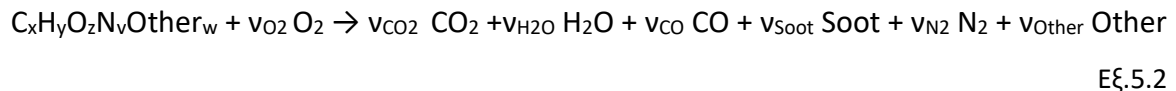
MinZ: 0 MaxZ: 1.3 m

Αυτά τα όρια καθορίζουν τις διαστάσεις του υπολογιστικού τομέα κατά τις διευθύνσεις x, y και z, αντίστοιχα (Patankar, 1980). Το πλέγμα διαιρείται σε κύβους: 24 κύβοι στην κατεύθυνση x, 20 κύβοι στην κατεύθυνση y και 42 κύβοι στην κατεύθυνση z. Με αυτόν τον τρόπο, ο κánaβος χωρίζεται σε πολλαπλούς μικρότερους κύβους, με τις κυψέλες πλέγματος να έχουν πλάτος 0.03m (Cell size).

Η διαδικασία καθορισμού των αριθμών των κελιών δεν είναι απλή, καθώς οι συνδυασμοί ποικίλλουν σημαντικά. Για τον λόγο αυτό, πραγματοποιείται έρευνα με τίτλο Grid Sensitivity Analysis, η οποία αναλύει διεξοδικά τους πιθανούς συνδυασμούς αριθμών κελιών, προκειμένου να επιλεγεί ο καλύτερος συνδυασμός για να διασφαλιστεί η ακρίβεια των υπολογισμών (Anderson, 1995). Η πλήρης διερεύνηση αυτής της διαδικασίας γίνεται στο Κεφάλαιο 7. Ωστόσο, σε αυτήν την ενότητα παρατίθενται οι αριθμοί κελιών που κρίθηκαν κατάλληλοι μέσω αυτής της ανάλυσης. Επιπλέον, απαιτείται η εφαρμογή μιας οριακής συνθήκης στα εξωτερικά όρια του υπολογιστικού τομέα. Αυτή η συνθήκη καθορίζει αν ο κánaβος είναι ανοιχτός ή κλειστός. Στο συγκεκριμένο πείραμα, έχουν ερευνηθεί και οι δύο συνθήκες (NIST, 2018).

5.2 Εισαγωγή Αντίδρασης Καύσης (Reaction)

Ο προσδιορισμός της καύσης στην ψηφιακή προσομοίωση αποτελεί ένα σημαντικό μέρος του πειράματος, διότι συνθέτει την αντίδραση του καυσίμου και των ατμών με το οξυγόνο που διαχέεται στο χώρο. Στα προγράμματα Pyrosim που χρησιμοποιούν τον κώδικα FDS, η αντίδραση αέριας καύσης αναπαρίσταται με την ακόλουθη χημική εξίσωση:



Η προσομοίωση λαμβάνει υπόψη μόνο ένα κυρίαρχο αέριο καύσιμο, επομένως μοντελοποιείται μια και μόνο αντίδραση στην αέρια φάση, η οποία υποκαθιστά όλες τις πιθανές πηγές καυσίμου (Patankar, 1980).

Μέσω της εντολής Edit Reaction στην καρτέλα Menu, το επτάνιο (HEPTANE) ορίζεται ως το κύριο καύσιμο, με την συμπλήρωση των στοιχειομετρικών του χαρακτηριστικών, προσδιορίζοντας έτσι τη βασική χημική αντίδραση του μοντέλου (heptane reaction). Στην καρτέλα Reaction (Εικόνα 5), καθορίζεται ο μοριακός τύπος του επτανίου, καθώς και οι αποδόσεις των προϊόντων καύσης: μονοξείδιο του άνθρακα (CO), αιθάλη (Soot), υδρογόνο (H₂) και το ποσοστό υδρογόνου στην αιθάλη (Hfrac) (Anderson, 1995). Τα τέσσερα πεδία που απαιτούνται για τον πλήρη ορισμό της αντίδρασης είναι τα εξής:

1. Καρτέλα Καυσίμου (Fuel)
2. Καταστολή Πυρκαγιάς (Fire Suppression)
3. Θερμοκρασία Αυτόματης Ανάφλεξης (Critical Flame Temperature)
4. Κρίσιμη Θερμοκρασία Φλόγας (Autoignition Temperature)

Τα παραπάνω πεδία συμπληρώνονται αυτόματα από το FDS (NIST, 2018).

Το επτάνιο είναι υδρογονάνθρακας που ανήκει στα αλκάνια, μία ομάδα απλών οργανικών ενώσεων που αποτελούνται αποκλειστικά από άνθρακα και υδρογόνο. Πρόκειται για άχρωμο και άοσμο στοιχείο. Ο μοριακός τύπος του επτανίου είναι C₇H₁₆, δηλαδή περιλαμβάνει επτά άτομα άνθρακα και δεκαέξι άτομα υδρογόνου. Ο συντακτικός του τύπος είναι CH₃(CH₂)₅CH₃. (Patankar, 1980).

Όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.2, οι αποδόσεις του επτανίου που χρησιμοποιούνται στην Εξίσωση 5.2 έχουν ως εξής:

- Μονοξείδιο του άνθρακα (CO Yield, Y_{CO}): 0.006
- Κυανιούχο Υδρογόνο (HCN Yield, Y_{HCN}): 0
- Αιθάλη (Soot Yield, Y_s): 0.015

The screenshot displays the 'HEPTANE' fuel configuration window in Pyrosim. The 'Description' field is set to 'NIST NRC FDSS Validation' and the 'Reaction Type' is 'Simple Chemistry'. The 'Byproducts' tab is active, showing the following settings:

- Energy Released:**
 - ☒ Specify release per unit mass oxygen: 1,31e4 kJ/kg
 - ☐ Specify heat of combustion: 0,0 kJ/kg
 - ☐ Radiative Fraction: 0,35
 - ☐ Energy is Ideal (does not account for yields of CO, H₂, or Soot)
- CO Yield (Y_{CO}):** 6,0e-3
- Soot Yield (Y_s):** 0,015
- HCN Yield (Y_{HCN}):** 0,0

Εικόνα 5.2: Καρτέλα Αποδόσεων Προϊόντων Καύσης Επτανίου (Pyrosim)

5.3 Obstructions (Εμπόδια)

Η εντολή Obstruction στο περιβάλλον του FDS χρησιμοποιείται για τον ορισμό των στερεών αντικειμένων εντός του υπολογιστικού μοντέλου. Στο πλαίσιο των παρόντων πειραμάτων, η εντολή αξιοποιείται για τη γεωμετρική αναπαράσταση της καύσιμης ύλης, δηλαδή τα χάρτινα κουτιά (Patankar, 1980). Κάθε αντικείμενο που εντάσσεται στον υπολογιστικό τομέα καθορίζεται μέσω έξι συντεταγμένων, οι οποίες σχηματίζουν τρία επίπεδα στον τρισδιάστατο χώρο. Συνεπώς, οι συντεταγμένες X, Y και Z προσδιορίζονται βάσει αυτών των επιπέδων. Από τη γραμμή μενού, επιλέγεται η εντολή New Obstruction, μέσω της οποίας ανοίγουν τρεις καρτέλες: General, Geometry και Surfaces (Anderson, 1995). Στην καρτέλα Geometry καταχωρούνται οι διαστάσεις κάθε κουτιού ξεχωριστά, ώστε να αποδοθεί με ακρίβεια η γεωμετρία της καύσιμης ύλης στον υπολογιστικό χώρο.

5.4 Surface (Επιφάνεια)

Η ενότητα Surface του FDS χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των θερμικών και φυσικών ιδιοτήτων των επιφανειών που συνθέτουν τα στερεά αντικείμενα του υπολογιστικού μοντέλου. Για τη δημιουργία μιας επιφάνειας, απαιτείται η πρόσβαση στο παράθυρο διαλόγου Edit Surfaces Dialog (McGrattan, 2018), το οποίο ενεργοποιείται μέσω της εντολής Edit Surface Properties από τη γραμμή μενού Model.

Στο πλαίσιο του παρόντος πειράματος, οι βασικές επιφάνειες που ορίζονται είναι:

- η επιφάνεια καύσης (*Burner*), και
- ο αεραγωγός (*Vent*) (Anderson, 1995).

Αξίζει να σημειωθεί ότι, από προεπιλογή, όλα τα στερεά αντικείμενα στο περιβάλλον PyroSim θεωρούνται πως έχουν θερμοκρασία ίση με εκείνη του περιβάλλοντος.

Η ενεργοποίηση της καύσης επιτυγχάνεται μέσω της επιφάνειας τύπου *Burner*, στην οποία ορίζεται ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας (Heat Release Rate) ανά μονάδα επιφάνειας. Η ρύθμιση αυτή πραγματοποιείται στην καρτέλα *Burner*, βάσει των επιφανειών του στερεού που προορίζονται να καούν (Patankar, 1980). Στη συνέχεια, η συσχέτιση της επιφάνειας με το αντίστοιχο στερεό επιτυγχάνεται μέσω της καρτέλας *Surface*, στην εντολή *Obstruction*, αποδίδοντας την ιδιότητα της καύσης σε συγκεκριμένες πλευρές του αντικειμένου, για παράδειγμα, στα τοιχώματα ενός χάρτινου κουτιού.

Για την πλήρη περιγραφή του μοντέλου πυρκαγιάς, είναι απαραίτητη και η εισαγωγή αεραγωγών στα εξωτερικά όρια του υπολογιστικού πεδίου. Από προεπιλογή, το FDS θεωρεί

ότι τα εξωτερικά όρια είναι στερεά (συμπαγείς τοίχοι). Για την αναπαράσταση συνθηκών ελεύθερης ροής (π.χ. ανοικτό παράθυρο ή πόρτα), χρησιμοποιείται επιφάνεια τύπου Open Vent, η οποία τοποθετείται στα εξωτερικά τοιχώματα του πλέγματος (McGrattan, 2018).

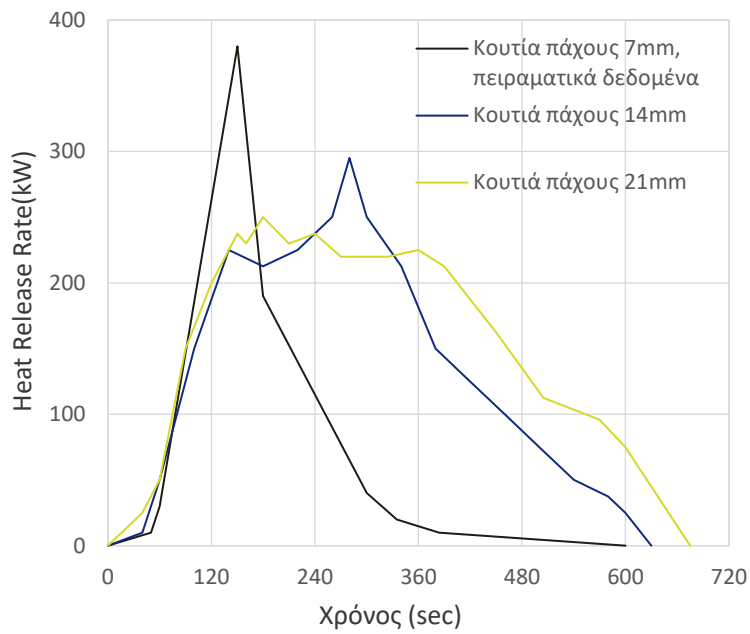
5.5 Εισαγωγή Ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας (Heat Release Rate)

Ο καθορισμός μιας πυρκαγιάς στο λογισμικό PyroSim πραγματοποιείται μέσω του ορισμού του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (Heat Release Rate per Unit Area, HRRPUA). Η παράμετρος αυτή εκφράζει τη μέγιστη θερμική ενέργεια που εκλύεται από κάθε τετραγωνικό μέτρο καύσιμου υλικού σε διάστημα ενός δευτερολέπτου και μετράται σε kW/m^2 (Karlsson & Quintiere, 1999). Η διαδικασία αυτή υλοποιείται μέσω της εντολής Surf Line και της καρτέλας Burner, επιτρέποντας την προσομοίωση της καύσης και της εξάπλωσης της πυρκαγιάς.

Η παράμετρος HRRPU είναι καθοριστική για τη συμπεριφορά της προσομοιωμένης πυρκαγιάς, καθώς προσδιορίζει τη δυναμική της και επιτρέπει την ποσοτικοποίηση του κινδύνου εξάπλωσής της. Η αξιοπιστία της ανάλυσης του μοντέλου εξαρτάται άμεσα από την ακρίβεια καθορισμού αυτής της τιμής, η οποία θα πρέπει να είναι γνωστή εκ των προτέρων βάσει πειραματικών δεδομένων ή ληφθείσα από σχετική βιβλιογραφία.

Ο βασικός στόχος της προσομοίωσης είναι η διερεύνηση των μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας μεταξύ των καύσιμων υλικών και η αξιολόγηση της συμπεριφοράς τους σε συνθήκες καύσης (McGrattan, 2018).

Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζονται οι αντίστοιχοι ρυθμοί έκλυσης θερμότητας (HRR) που έχουν προσδιοριστεί πειραματικά από το Σουηδικό Ινστιτούτο (βλ. Κεφάλαιο 3) για το υλικό που εξετάζεται στο παρόν πείραμα. Η ανάλυση περιλαμβάνει τη διαφοροποίηση του HRR βάσει του πάχους των χάρτινων κουτιών, καθώς η γεωμετρία και η δομή των υλικών επιδρούν καθοριστικά στη συμπεριφορά της καύσης. Στόχος είναι ο υπολογισμός της μέγιστης δυνατής τιμής του HRR για τις καύσιμες επιφάνειες σε κάθε δοκιμή, λαμβάνοντας υπόψη τρεις διαφορετικές κατηγορίες πάχους κουτιών (Babrauskas, 2003).



Σχήμα 5.5: Ρυθμός έκλυσης θερμότητας για κουτιά με διαφορετικό πάχος (Lönnermark & Ingason, 2005)

5.5.1 Διαδικασία Εύρεσης Επιφάνειας Καύσης

5.5.1.1 Υπολογισμός Συνολικού Εμβαδού ενός Κουτιού

Αρχικά, υπολογίζεται το εμβαδόν της καύσιμης ύλης, η οποία έχει σχήμα ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου. Με αυτόν τον τρόπο προσδιορίζονται τα εμβαδά των επιφανειών του παραλληλεπίπεδου που θα τεθούν σε καύση, και στη συνέχεια καθορίζεται το συνολικό εμβαδόν καύσης. Οι διαστάσεις του παραλληλογράμμου είναι:

$$\text{Μήκος (l)} = 0.24 \text{ m}$$

$$\text{Πλάτος (w)} = 0.20 \text{ m}$$

$$\text{Ύψος (h)} = 0.195 \text{ m}$$

Για τον υπολογισμό του συνολικού εμβαδού, λαμβάνονται υπόψη οι επιφάνειες των έξι πλευρών του σχήματος. Το παραλληλεπίπεδο διαθέτει τρία ζεύγη αντίθετων πλευρών, και κάθε ζεύγος έχει συγκεκριμένο εμβαδόν, το οποίο υπολογίζεται ως το γινόμενο των αντίστοιχων διαστάσεων. Συνεπώς, τα επιμέρους εμβαδά είναι τα εξής:

Επιφάνειες με διαστάσεις l x w (δύο όψεις):

$$2 \times (l \times w) = 2 \times (0.24\text{m} \times 0.20\text{m}) = 2 \times 0.048 \text{ m}^2 = 0.096 \text{ m}^2$$

Επιφάνειες με διαστάσεις l x h (δύο αντίστοιχες όψεις) :

$$2 \times (l \times h) = 2 \times (0.24\text{m} \times 0.195\text{m}) = 2 \times 0.0468 \text{ m}^2 = 0.0936 \text{ m}^2$$

Επιφάνειες με διαστάσεις w x h (δύο αντίστοιχες όψεις) :

$$2 \times (w \times h) = 2 \times (0.20\text{m} \times 0.195\text{m}) = 2 \times 0.039 \text{ m}^2 = 0.078 \text{ m}^2$$

Για τον υπολογισμό του συνολικού εμβαδού ενός παραλληλεπίπεδου, προστίθενται τα εμβαδά των έξι πλευρών του:

$$\text{Συνολικό εμβαδόν} = 0.096 \text{ m}^2 + 0.0936 \text{ m}^2 + 0.078 \text{ m}^2 = 0.2676 \text{ m}^2$$

5.5.1.2 Υπολογισμός Ρυθμού έκλυσης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (HRRPA)

Το συνολικό εμβαδόν των καιόμενων επιφανειών, βάσει μίας εκ των δοκιμών με πέντε ενεργές επιφάνειες καύσης, υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{Συνολικό εμβαδόν} = 0.0936 \text{ m}^2 + 0.078 \text{ m}^2 + 0.048 \text{ m}^2 = 0.2196 \text{ m}^2$$

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζονται τα εμβαδά και για τις υπόλοιπες δοκιμές, ανάλογα με το πόσες επιφάνειες καίγονται κάθε φορά.

Οι υπολογισμοί συνεχίζονται με την εύρεση του μέγιστου ρυθμού έκλυσης θερμότητας (Heat Release Rate, HRR) από το Σχήμα 5.5. Για τα κουτιά με πάχος 7mm, η μέγιστη έκλυση θερμότητας, σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα είναι 380 kW. Όταν το πάχος του κουτιού είναι 14mm, τότε ο μέγιστος HRR ανέρχεται στα 295 kW, και για κουτιά πάχους 21mm ο ρυθμός είναι 250 kW.

Η καύσιμη ύλη αποτελείται από δεκαέξι ορθογώνια παραλληλεπίπεδα. Επομένως, το συνολικό εμβαδόν καύσης για την καύσιμη ύλη του πειράματος είναι:

$$\text{Συνολικό εμβαδόν καύσης} = 0.22 \text{ m}^2 \times 16 = 3.52 \text{ m}^2$$

Η ποσότητα HRRPA (Heat Release Rate per Area) εκφράζει τον ρυθμό έκλυσης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας και υπολογίζεται με τη εξής σχέση:

$$\text{HRRPA} = \frac{\text{Μέγιστος Ρυθμός Έκλυσης Θερμότητας (HRR)}}{\text{Εμβαδόν Καύσιμης Επιφάνειας (Area)}}$$

Για κουτιά πάχους 7mm :

$$\text{HRRPA} = \frac{380 \text{ kW}}{3.52 \text{ m}^2} = 108.15 \text{ kW/m}^2$$

Για κουτιά πάχους 14mm :

$$\text{HRRPA} = \frac{295 \text{ kW}}{3.52 \text{ m}^2} = 83.96 \text{ kW/m}^2$$

Για κουτιά πάχους 21mm :

$$\text{HRRPA} = \frac{250 \text{ kW}}{3.52 \text{ m}^2} = 71.2 \text{ kW/m}^2$$

Οι υπολογισμένες ποσότητες εισάγονται ως δεδομένα στην καρτέλα επιφανειών Burner και ορίζουν την επιφάνεια καύσης που απελευθερώνει θερμότητα με ρυθμό 108.15 kW/m², 83.96 kW/m² και 71.2 kW/m², αντίστοιχα, για τα τρία πειράματα. Τα αποτελέσματα των υπόλοιπων δοκιμών υπολογίστηκαν με τον ίδιο τρόπο και παρατίθενται παρακάτω σε μορφή πίνακα.

Πίνακας 5.5.1.2	Ρυθμός έκλυσης θερμότητας ανά τετραγωνικό μέτρο (HRRPA)		
	7mm	14mm	21mm
Πάχος κουτιών	7mm	14mm	21mm
Καύση 4 πλαισίων επιφανειών	138 kW/m ²	108 kW/m ²	91 kW/m ²
Καύση της πάνω επιφάνειας	495 kW/m ²	384 kW/m ²	326 kW/m ²
Καύση όλων των επιφανειών	89 kW/m ²	69 kW/m ²	59 kW/m ²

5.5.1.3 Προσαρμοσμένη Καμπύλη Ρυθμού Μεταβολής Θερμότητας

Στο Pyrosim, ο ρυθμός μεταβολής θερμότητας (HRR) δεν είναι πάντα σταθερός, αλλά μεταβάλλεται σε σχέση με το χρόνο. Ο χρήστης εισάγει μια σειρά τιμών που περιγράφουν πως αλλάζει το HRR σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές, δηλαδή με ποια συχνότητα καίγονται τα χαρτόκουτα ανάλογα με το πάχος τους κατά τη διάρκεια του πειράματος. Δημιουργείται, λοιπόν, μια προσαρμοσμένη καμπύλη (custom καμπύλη) με στόχο να προσομοιωθούν τα πειράματα όσο το δυνατόν πιο κοντά στις πραγματικές συνθήκες που επικρατούν στην αποθήκη ραφιών. Ο πίνακας της custom καμπύλης περιέχει δύο στήλες:

- Time (sec): Αναπαριστά συγκεκριμένες χρονικές στιγμές
- Fraction: Κανονικοποιημένες τιμές μεταξύ 0 και 1, που υπολογίζονται διαιρώντας τη μέγιστη τιμή του HRR (HRRmax) με τις υπόλοιπες τιμές του HRR για κάθε πάχος ξεχωριστά, όπως περιγράφονται στο Σχήμα 5.5.

Επομένως, ορίζεται το ποσοστό θερμότητας που θα καίγεται στον αντίστοιχο χρόνο για τα τρία πάχη ξεχωριστά. Παρακάτω παρατίθενται οι αντίστοιχοι πίνακες:

Πίνακας 5.5.1.3(α)	Custom (sec)	Fraction
	0	0
	60	0.07895
Custom καμπύλη	150	1
για κουτιά πάχους 7mm	180	0.5
	300	0.10526
	384	0.02632
	600	0

Πίνακας 5.5.1.3(b)	Custom (sec)	Fraction
	0	0
	40	0.03636
	60	0.18182
	100	0.54545
	140	0.81818
	180	0.77273
	220	0.81818
Custom καμπύλη	260	0.90909
για κουτιά πάχους 14mm	280	1.07273
	300	0.90909
	340	0.77273
	380	0.54545
	420	0.45455
	460	0.36364
	500	0.27273
	540	0.18182
	580	0.13636
	600	0.09091
	630	0.0000

Πίνακας 5.5.1.3(c)	Custom (sec)	Fraction
	0	0
	40	0.1
	60	0.2
	90	0.60
	120	0.80
	150	0.95
	160	0.92
Custom καμπύλη	180	1
για κουτιά πάχους 21mm	210	0.92
	240	0.95
	270	0.88
	325	0.88
	360	0.9
	390	0.85
	450	0.65
	505	0.45
	570	0.384
	600	0.3
	675	0.0000

5.6 Συσσκευές (Devices)

Απλές συσκευές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση ποσοτήτων σε αέρια ή στερεά φάση. Στο παρόν πείραμα προστίθενται οι συσκευές που ονομάζονται θερμομετρητές (Thermocouples) για τη μέτρηση ποσοτήτων σε αέρια φάση (Gas Phase Devices). Οι θερμομετρητές είναι συσκευές που λειτουργούν με συγκεκριμένο τρόπο, ανάλογα με τις ιδιότητες που τους ανατίθενται. Από τη γραμμή μενού επιλέγεται η εντολή Device (συσκευή) και στη συνέχεια New device (Νέα συσκευή) (McGrattan, 2018).

Ο στόχος είναι η καταγραφή της θερμοκρασίας σε δύο σημεία του προσομοιωμένου περιβάλλοντος, ανάμεσα στις δύο συστοιχίες της καύσιμης ύλης. Οι φυσικές συντεταγμένες του πρώτου θερμομετρητή είναι (0.36, 0.3, 0.6525)m στις διευθύνσεις (XYZ), ενώ οι συντεταγμένες του δεύτερου θερμομετρητή είναι (0.36, 0.3, 0.9025)m στις διευθύνσεις (XYZ), με τις συσκευές να διαφέρουν γεωμετρικά μόνο στη διεύθυνση Z (Drysdale, 2011).

Στην καρτέλα των συσκευών υπάρχει η παράμετρος Orientation (προσανατολισμός). Αυτή η παράμετρος εμφανίζεται μόνο σε μετρήσεις αέριας φάσης για να καθορίσει την κατεύθυνση της συσκευής (π.χ. ψεκαστήρας). Έχει προεπιλεγμένες τιμές (0,0,-1), που αντιστοιχούν στα συστατικά του διευθυντικού διανύσματος. Συγκεκριμένα, η τιμή -1 υποδεικνύει τη διεύθυνση την οποία δείχνει ο θερμομετρητής και είναι παράλληλη στον άξονα X. Αν στη θέση του -1 υπήρχε το ± 2 , η συσκευή θα ήταν παράλληλη στον άξονα Y, ενώ αν ο αριθμός ήταν ± 3 , τότε η συσκευή θα ήταν παράλληλη στον άξονα Z (Babrauskas, 2002).

Επιπλέον, ο προσανατολισμός μιας συσκευής μπορεί να καθοριστεί με τις παραμέτρους Ior (δείκτης προσανατολισμού) ή Rotation (περιστροφή). Ο δείκτης Ior χρησιμοποιείται για συσκευές που βρίσκονται στην επιφάνεια στερεών, ενώ η περιστροφή, στο παρόν πείραμα, επιλέγεται να είναι μηδενική, όπως έχει οριστεί ήδη από το ίδιο το πρόγραμμα.

Αφότου έχει ολοκληρωθεί η ρύθμιση των συσκευών, η προσομοίωση ξεκινά και τρέχει. Μόλις τελειώσει η προσομοίωση, τα αποτελέσματα των μετρήσεων εξάγονται σε μορφή διαγραμμάτων που απεικονίζουν τη χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας για κάθε θερμομετρητή ξεχωριστά. Στη συνέχεια, δημιουργείται ένα τελικό διάγραμμα που συσχετίζει τις μετρήσεις των θερμοκρασιών του παρόντος μοντέλου με τις μετρήσεις των θερμοκρασιών του πρότυπου πειράματος, για περαιτέρω ανάλυση και σύγκριση των αποτελεσμάτων (Karlsson & Quintiere, 2000).

6. Επιλογή Κατάλληλου Αριθμού Κελιών Πλέγματος

6.1 Ανάλυση Ευαισθησίας Πλέγματος (Grid Sensitivity Analysis)

Η ανάλυση ευαισθησίας εξετάζει σε ποιο βαθμό η αβεβαιότητα στις εισόδους του μοντέλου επηρεάζει τα αποτελέσματα του (Saltelli, 2008). Οι παράμετροι που επηρεάζουν ένα μοντέλο είναι ποικίλες, όπως η γεωμετρία της καύσιμης ύλης, οι αρχικές συνθήκες ή οι επιφάνειες που επιλέγεται να καούν. Επιπλέον, οι παράμετροι μπορεί να είναι καθαρά αριθμητικοί, όπως το μέγεθος των κελιών του αριθμητικού πλέγματος. Το μέγεθος του πλέγματος αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές αποφάσεις που καλείται να λάβει ο ερευνητής, καθώς καθορίζει τη χωρική και χρονική ακρίβεια των διακριτοποιημένων μερικών διαφορικών εξισώσεων. Όπως έχει προαναφερθεί, τα υπολογιστικά μοντέλα CFD επιλύουν μια προσεγγιστική μορφή των εξισώσεων διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας (Anderson, 1995).

Η ανάλυση ευαισθησίας πλέγματος αφορά την έρευνα για τον καθορισμό του κατάλληλου κανάβου και περιγράφεται εκτενώς σε αυτό το κεφάλαιο. Αρχικά, για το συγκεκριμένο πείραμα πραγματοποιούνται οι καλύτερες εκτιμήσεις των αριθμητικών παραμέτρων και εκτελείται μια βασική προσομοίωση. Στη συνέχεια, οι παράμετροι τροποποιούνται κατά ένα συγκεκριμένο ποσοστό και καταγράφονται οι διαφορές στα αποτελέσματα των νέων προσομοιώσεων. Στην παρούσα περίπτωση, αποφασίστηκε να πραγματοποιηθούν τρεις προσομοιώσεις. Μετά την πρώτη προσομοίωση, ο αριθμός των κελιών αυξάνεται κατά 30% και στην τρίτη προσομοίωση αυξάνεται κατά 60%.

Γενικά, όσο πιο πυκνό είναι το αριθμητικό πλέγμα, τόσο καλύτερη είναι η αριθμητική ακρίβεια των λύσεων των εξισώσεων (Versteeg & Malalasekera, 2007). Για το λόγο αυτό, οι υπολογισμοί συνήθως ξεκινούν με την κατασκευή ενός αραιού πλέγματος, το οποίο στη συνέχεια πυκνώνει σταδιακά. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι η απόδοση της μεθόδου ενδέχεται να αρχίσει να μειώνεται όταν πυκνώνει το πλέγμα, γεγονός που εξαρτάται από την εφαρμογή στην οποία πραγματοποιείται το πείραμα, το υπολογιστικό κόστος και τις μετρούμενες ποσότητες. Επίσης, οι θερμομετρητές απαιτούν πυκνότερο πλέγμα για να επιτευχθούν ακριβείς μετρήσεις (Patankar, 1980). Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων συγκρίνονται με τα πειραματικά αποτελέσματα προκειμένου να εκτιμηθεί η εγκυρότητα των υπολογισμών.

Στην παρούσα μελέτη πραγματοποιήθηκαν τρεις δοκιμές με διαφορετικά μεγέθη κελιών προκειμένου να αξιολογηθεί η ευαισθησία του υπολογιστικού πλέγματος στην προσομοίωση καύσης με το λογισμικό FDS. Στην πρώτη δοκιμή χρησιμοποιήθηκαν κελιά διαστάσεων $0.04\text{m} \times 0.04\text{m} \times 0.04\text{m}$, με κατανομή $15 \times 18 \times 31$ (κατά $X \times Y \times Z$) και συνολικό αριθμό 8.640

κελιών, αποτελώντας τη βασική αναφορά. Στη δεύτερη δοκιμή, το μέγεθος των κελιών μειώθηκε σε $0.03\text{m} \times 0.03\text{m} \times 0.03\text{m}$, με κατανομή $24 \times 20 \times 42$ κελιών (κατά $X \times Y \times Z$) και συνολικό αριθμό 20.160 κελιών, παρουσιάζοντας αύξηση κατά 30% σε σχέση με την αρχική. Στην τρίτη δοκιμή, τα κελιά είχαν διαστάσεις $0.02\text{m} \times 0.02\text{m} \times 0.02\text{m}$, με κατανομή $31 \times 26 \times 55$ (κατά $X \times Y \times Z$) και συνολικό αριθμό 44.330 κελιών, δηλαδή αύξηση κατά 60% σε σύγκριση με την πρώτη δοκιμή.

Τέλος, για την προσομοίωση της καύσης, πραγματοποιήθηκαν τρεις δοκιμές με αντίστοιχα πάχη χαρτόκουτου 7mm, 14mm και 21mm. Η γεωμετρία του πειράματος καθορίζεται με τις τέσσερις πλαϊνές επιφάνειες και την άνω επιφάνεια του κουτιού να είναι εύφλεκτες ενώ τα εξωτερικά όρια του χώρου ορίζονται ως ανοιχτά.

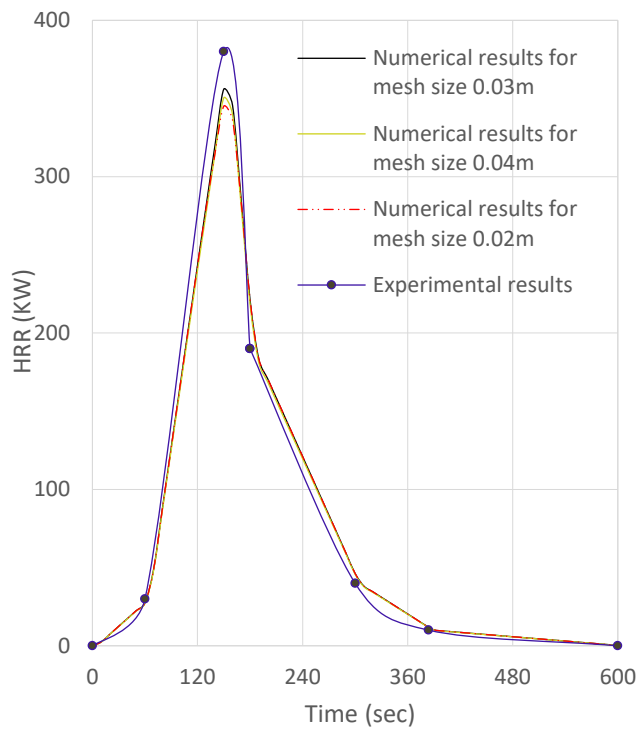
6.2 Παρουσίαση Διαγραμμάτων HRR και Θερμοκρασίας

Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, πραγματοποιήθηκε συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών πλεγμάτων μέσω διαγραμμάτων ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας και θερμοκρασίας σε σχέση με το χρόνο.

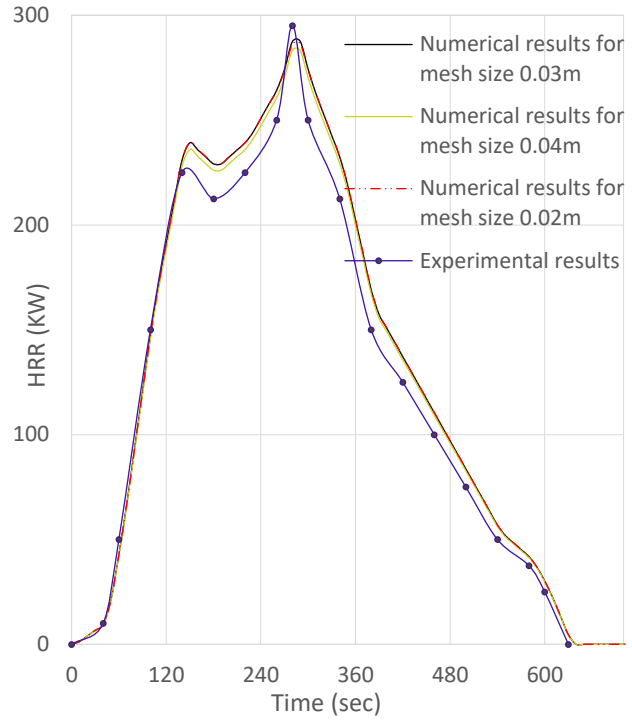
Τα διαγράμματα HRR παρουσιάζουν τρεις διαφορετικές καμπύλες που απεικονίζουν τα αποτελέσματα των αριθμητικών προσομοιώσεων με βάση το πάχος των κελιών του πλέγματος. Συγκεκριμένα, η προσομοίωση με πάχος 0.03m απεικονίζεται με μαύρη γραμμή, η αντίστοιχη με πάχος 0.04m με κίτρινη γραμμή και η προσομοίωση με πάχος 0.02m με διακεκομμένη κόκκινη γραμμή. Φαίνεται, λοιπόν, πως η μοναδική μεταβλητή που διαφοροποιείται μεταξύ των σεναρίων προσομοίωσης είναι το μέγεθος των κελιών. Επίσης, υπάρχει και μία τέταρτη καμπύλη με μπλε χρώμα που αναπαριστά τα πειραματικά δεδομένα, παρέχοντας σημείο αναφοράς για την αξιολόγηση της ακρίβειας κάθε προσομοίωσης.

Οι καμπύλες που περιλαμβάνονται στα διαγράμματα θερμοκρασίας ακολουθούν την ίδια μορφή. Η γαλάζια και μωβ καμπύλη αναπαριστά τα αριθμητικά αποτελέσματα για πλέγμα πάχους 0.03m, η κίτρινη και πράσινη καμπύλη για πλέγμα πάχους 0.04m, η κόκκινη και ροζ διακεκομμένη καμπύλη για πλέγμα πάχους 0.02m. Επιπλέον, η μαύρη και μπλε καμπύλη αντιπροσωπεύει τα πειραματικά δεδομένα που συγκεντρώθηκαν κατά τις μετρήσεις. Τα δεδομένα θερμοκρασίας προέρχονται από θερμομετρικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν μέσω καταγραφικών συσκευών και τοποθετήθηκαν σε δύο διαφορετικά ύψη εντός του δοκιμαστικού θαλάμου, συγκεκριμένα στα $z = 0.65 \text{ m}$ και $z = 0.90 \text{ m}$.

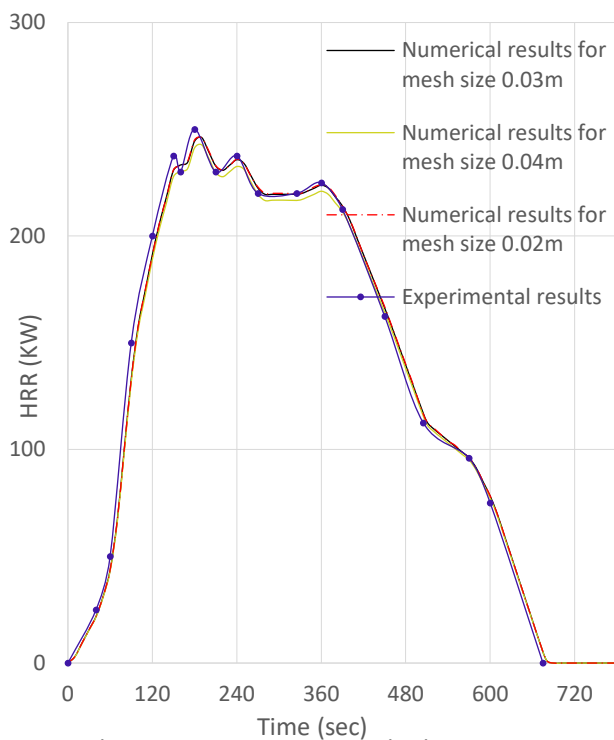
Αξίζει να σημειωθεί, πως τα διαγράμματα μετρούν αυτές τις δύο ποσότητες, διότι είναι η πλέον αντιπροσωπευτικές για την εξέλιξη του πειράματος και για τον σχολιασμό της εξέλιξης αυτής.



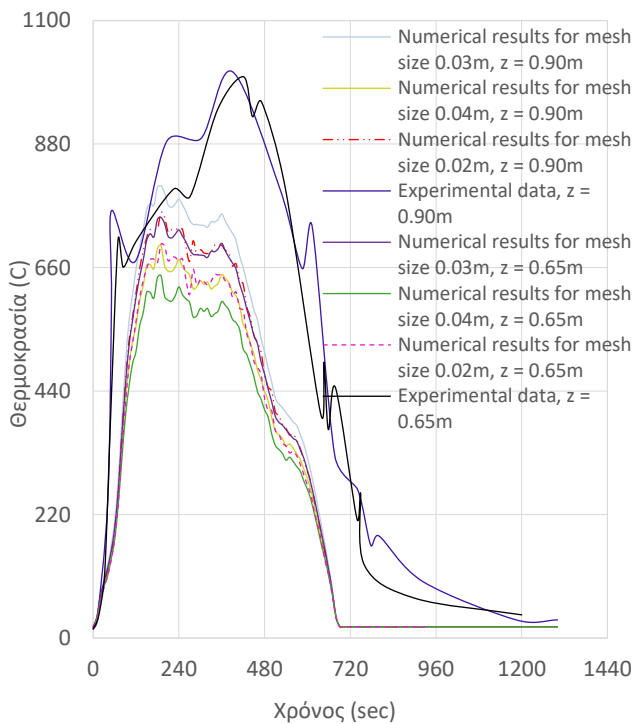
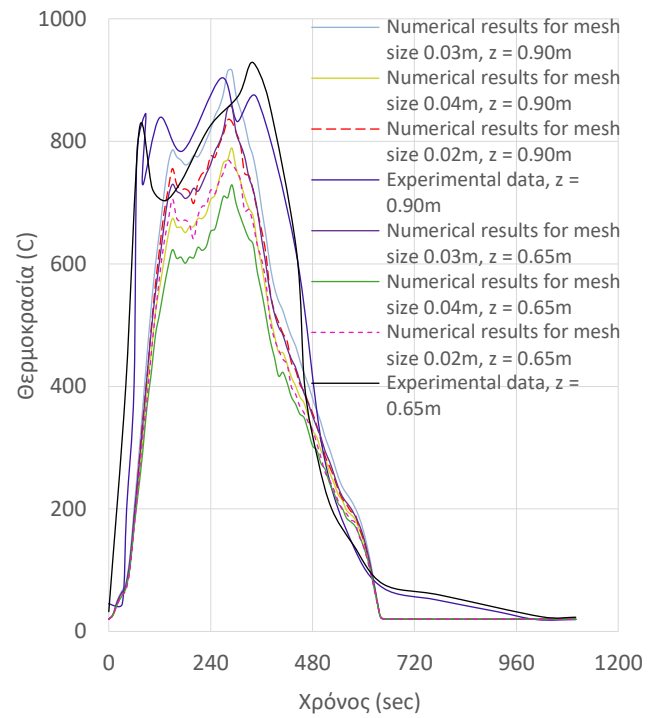
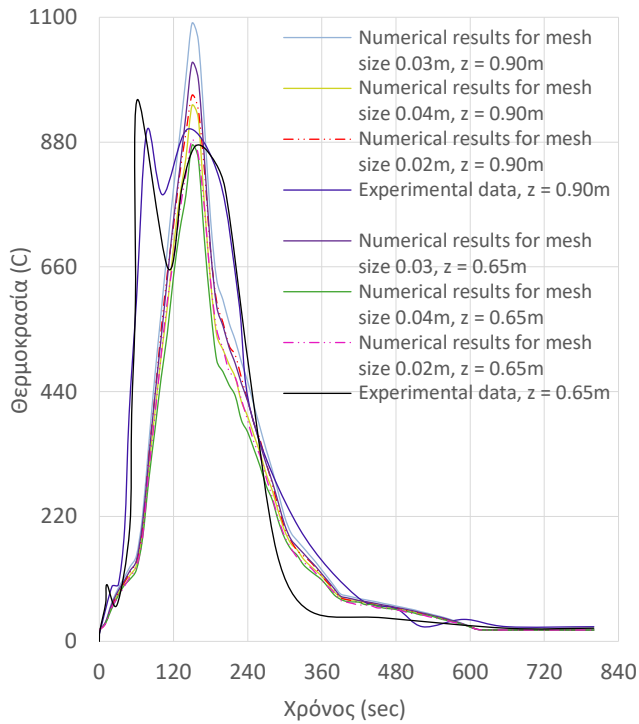
Διάγραμμα α : HRR για κουτιά πάχους 7mm



Διάγραμμα β : HRR για κουτιά πάχους 14mm



Διάγραμμα γ : HRR για κουτιά πάχους 21mm



6.3.1 Βέλτιστη Διακριτοποίηση Πλέγματος για Προσομοιώσεις Καύσης

Συγκρίνοντας τις καμπύλες ρυθμού έκλυσης θερμότητας των διαγραμμάτων α, β και γ, αλλά και τα τρία αυτά διαγράμματα μεταξύ τους προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

Για κουτιά πάχους 7mm, οι μέγιστες τιμές ρυθμού έκλυσης θερμότητας (HRR) που καταγράφηκαν ήταν 350.4 kW για πλέγμα 0.04m, 356 kW για πλέγμα 0.03m και 345.1 kW για πλέγμα 0.02m την στιγμή των 150 sec. Την ίδια χρονική στιγμή παρατηρείται η αντίστοιχη μέγιστη πειραματική τιμή 380 kW. Η προσομοίωση με πλέγμα 0.03m εμφάνισε τη μικρότερη απόκλιση, καθιστώντας την πλέον αξιόπιστη επιλογή για αυτή την περίπτωση των χαρτόκουτών πάχους 7mm.

Για κουτιά πάχους 14mm, οι αντίστοιχες μέγιστες τιμές HRR ήταν 283.16 kW για πλέγμα 0.04m, 287.57 kW για πλέγμα 0.03m και 286.34 kW για πλέγμα 0.02m. Η πειραματική τιμή ήταν 295 kW στα 280 sec, ενώ οι αριθμητικές προσομοιώσεις εμφάνισαν τις μέγιστες τιμές τους στα 290 sec. Σε αυτή την περίπτωση, η μικρότερη απόκλιση παρατηρήθηκε στο πλέγμα 0.03m, το οποίο προσεγγίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια τα πειραματικά δεδομένα, καθώς οι τιμές του συγκλίνουν περισσότερο από τις υπόλοιπες καμπύλες.

Για κουτιά πάχους 21mm, οι αριθμητικές προσομοιώσεις έδωσαν μέγιστες τιμές 242.72 kW για πλέγμα 0.04m, 246.14 kW για πλέγμα 0.03m και 246 kW για πλέγμα 0.02m. Η αντίστοιχη πειραματική τιμή ήταν 250 kW στα 180 sec, ενώ οι αριθμητικές προσομοιώσεις εμφάνισαν μέγιστο στα 190 sec. Η προσομοίωση με πλέγμα 0.03m παρουσίασε την καλύτερη σύγκλιση με τα πειραματικά δεδομένα.

Συνολικά, η σύγκριση των διαφορετικών διακριτοποιήσεων υποδεικνύει ότι το πλέγμα 0.03m αποτελεί την βέλτιστη επιλογή για την προσομοίωση της καύσης σε όλα τα πάχη κουτιών. Εμφανίζει τη μικρότερη απόκλιση στις μέγιστες τιμές HRR, ενώ οι χρονικές διαφοροποιήσεις στις κορυφές των καμπυλών είναι ελάχιστες, επιβεβαιώνοντας την αξιοπιστία του μοντέλου. Συνεπώς, προτείνεται η χρήση του πλέγματος 0.03m ως η καταλληλότερη διακριτοποίηση για την προσομοίωση της καύσης κουτιών διαφορετικών παχών όσον αφορά τα διαγράμματα ρυθμού έκλυσης θερμότητας. Για την τελική επιλογή πλέγματος μένει να αναλυθούν και τα διαγράμματα θερμοκρασίας του χώρου.

6.4.1 Η Επίδραση του Πλάτους Πλέγματος στις Θερμοκρασιακές Προσομοιώσεις

Η θερμοκρασιακή συμπεριφορά των κουτιών πάχους 7mm (Διάγραμμα δ) παρουσιάζει σημαντικές διαφορές ανάλογα με το πλάτος των κελιών του πλέγματος. Στη θέση μέτρησης ύψους 0.65m, η μέγιστη θερμοκρασία για τα πειραματικά δεδομένα φτάνει τους 871°C στα 153 sec. Οι αριθμητικές προσομοιώσεις δίνουν τιμές 874.5°C για πλέγμα 0.04m, 1019.8°C για πλέγμα 0.03m, 883.8°C για πλέγμα 0.02m την ίδια χρονική στιγμή. Παρατηρείται ότι η προσομοίωση με πλέγμα 0.04m προσεγγίζει καλύτερα την πειραματική τιμή, ενώ το πλέγμα 0.03m παρουσιάζει σημαντική υπερεκτίμηση (159.8°C). Το πλέγμα 0.02m, τέλος, παραμένει σχετικά κοντά στα πειραματικά δεδομένα. Στη θέση ύψους 0.90m, η μέγιστη θερμοκρασία των πειραματικών μετρήσεων είναι 903.2°C στα 144 sec, ενώ οι αριθμητικές προσομοιώσεις δίνουν 944.9°C (0.04m), 1089.5°C (0.03m), 962.6°C (0.02m). Συνεπώς, για πάχος 7mm, το πλέγμα 0.04m αποδεικνύεται πιο ακριβές.

Για τα κουτιά πάχους 14mm (Διάγραμμα ε), οι αριθμητικές προσομοιώσεις ακολουθούν γενικά την τάση των πειραματικών δεδομένων, αν και παρουσιάζουν μικρές χρονικές αποκλίσεις. Στη θέση 0.65m, η μέγιστη πειραματική θερμοκρασία είναι 929°C στα 339 sec, ενώ οι προσομοιώσεις δίνουν 729°C (0.04m), 856.2°C (0.03m), 769°C (0.02m). Το πλέγμα 0.03m προσεγγίζει καλύτερα τη μέγιστη θερμοκρασία με διαφορά -72.85°C από την πειραματική τιμή, ενώ τα υπόλοιπα δύο πλέγματα την υποεκτιμούν σημαντικά. Στη θέση 0.90m, η μέγιστη θερμοκρασία των πειραματικών δεδομένων είναι 903.2°C στα 265 sec, με τις προσομοιώσεις να δίνουν 789°C (0.04m), 915.7°C (0.03m), 835°C (0.02m). Εδώ, το πλέγμα 0.03m παρουσιάζει μικρότερη απόκλιση (12.46°C), ενώ το πλέγμα 0.04m υποεκτιμά σημαντικά τη θερμοκρασία.

Για το μεγαλύτερο πάχος των 21mm (Διάγραμμα ζ), οι αριθμητικές προσομοιώσεις παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις από τα πειραματικά δεδομένα. Στη θέση 0.65m, η μέγιστη πειραματική θερμοκρασία είναι 1000°C στα 421 sec, ενώ οι προσομοιώσεις δίνουν 645.6°C (0.04m), 749.4°C (0.03m), 701.5°C (0.02m). Στη θέση 0.90m, η μέγιστη θερμοκρασία των πειραματικών δεδομένων είναι 1009°C στα 390 sec, ενώ οι αριθμητικές προσομοιώσεις δίνουν 699.3°C (0.04m), 805.7°C (0.03m), 758.1°C (0.02m). Παρατηρούνται παρόμοια μοτίβα, με το πλέγμα 0.03m να προσεγγίζει καλύτερα τα πειραματικά δεδομένα, αν και με σημαντική απόκλιση.

Συνολικά, η επιλογή του κατάλληλου πλέγματος εξαρτάται σημαντικά από το πάχος του υλικού. Το πλέγμα 0.03m αναδεικνύεται ως η πιο αξιόπιστη επιλογή, καθώς πλησιάζει περισσότερο τα πειραματικά δεδομένα στις περισσότερες περιπτώσεις, ειδικά για τα

μεγαλύτερα πάχη. Συγκεκριμένα, για πάχος 7mm, το πλέγμα 0.04m είναι πιο ακριβές, ενώ το 0.03m υπερεκτιμά τη θερμοκρασία. Αντίθετα, για πάχη 14mm και 21mm, το 0.03m είναι η βέλτιστη επιλογή. Καταλήγοντας, το πλέγμα 0.03m προτιμάται ως ενιαίο μέγεθος κελιού για τις τελικές αναλύσεις τόσο στα διαγράμματα ρυθμού έκλυσης θερμότητας όσο και στα διαγράμματα θερμοκρασίας, καθώς παρέχει τις πιο ακριβείς πειραματικές προσεγγίσεις, το κύριο ζητούμενο της έρευνας.

7. Ανάλυση και Αποτελέσματα Βασικής Σειράς Πειραμάτων

Στην παρούσα ανάλυση εξετάζεται η βασική σειρά πειραμάτων καύσης που περιγράφονται στον Πίνακα 4.1 με πάχος κουτιών 7mm, 14mm και 21mm και πλέγμα κανάβου 0.03m. Τα διαγράμματα που αναλύονται αφορούν τον ρυθμό έκλυσης θερμότητας (HRR) και τη μετρούμενη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της καύσης σε ύψος $z = 0.65\text{m}$ και $z = 0.90\text{m}$. Επίσης, περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο καίει η φωτιά κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, οι διαφορές κλειστών και ανοιχτών ορίων και ο λόγος για τον οποίο έχει επιλεγθεί αυτή η γεωμετρία.

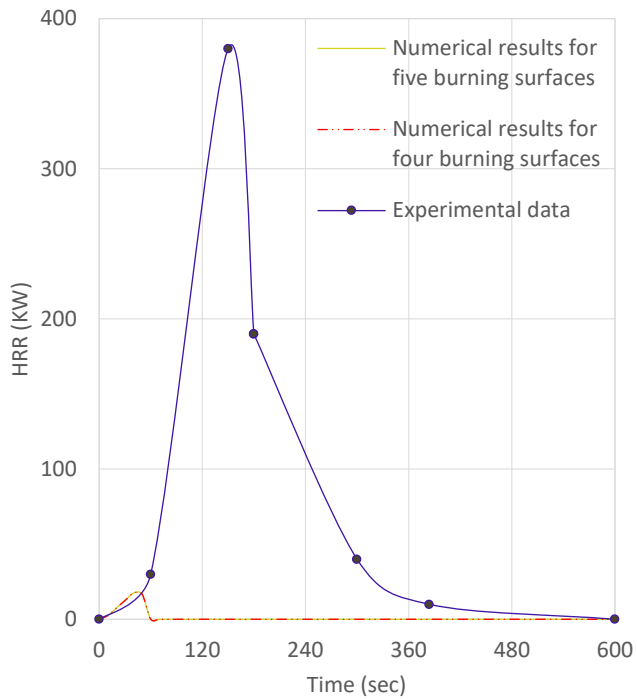
7.1 Ανάλυση και Αποτελέσματα Πειραμάτων Κλειστών Ορίων Κανάβου

Τα διαγράμματα που παρατίθενται παρακάτω είναι σε συνάρτηση με τον Χρόνο. Κατά τον άξονα (X) ορίζεται ο χρόνος, μετρούμενος σε δευτερόλεπτα (sec) και κατά τον άξονα (Y) ορίζεται ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας μετρούμενος σε κιλοβάτ (kW). Υπάρχουν τρεις διαφορετικές καμπύλες που αντιπροσωπεύουν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων Συγκεκριμένα:

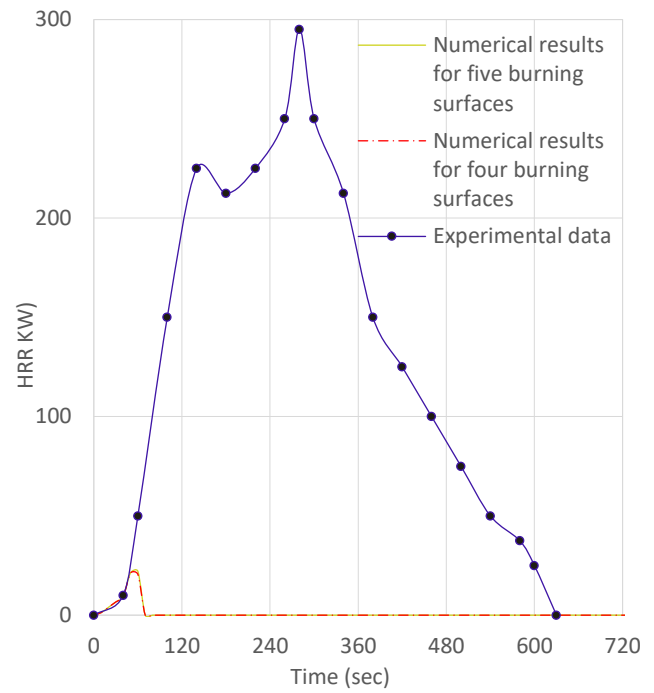
- Κίτρινη γραμμή: Καύση όλων των πλευρών και της άνω επιφάνειας (Αριθμητικά Δεδομένα)
- Κόκκινη διακεκομμένη γραμμή: Καύση των τεσσάρων πλευρών (Αριθμητικά Δεδομένα)
- Μπλέ γραμμή: Πειραματικά δεδομένα

Στα επόμενα διαγράμματα, ο οριζόντιος άξονας (άξονας X) αναπαριστά τον χρόνο σε δευτερόλεπτα (sec) ενώ ο κατακόρυφος άξονας (άξονας Y) αναπαριστά τη θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου ($^{\circ}\text{C}$). Υπάρχουν τρεις καμπύλες που αναπαριστούν διαφορετικά δεδομένα, συγκεκριμένα:

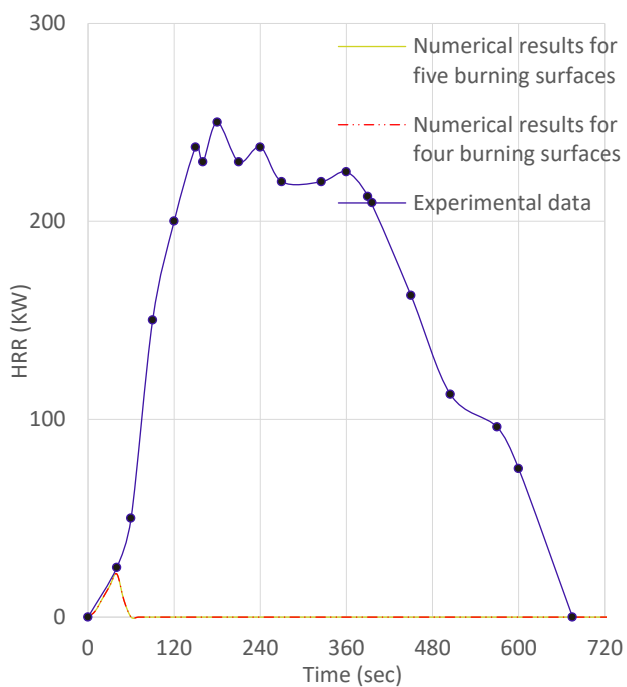
- Κίτρινη και ροζ καμπύλη: Καύση 4 πλευρών και άνω επιφάνειας (Αριθμητικά Δεδομένα)
- Κόκκινη και πράσινη διακεκομμένη καμπύλη: Καύση 4 πλευρών (Αριθμητικά Δεδομένα)
- Μπλέ και μαύρη καμπύλη: Πειραματικά δεδομένα



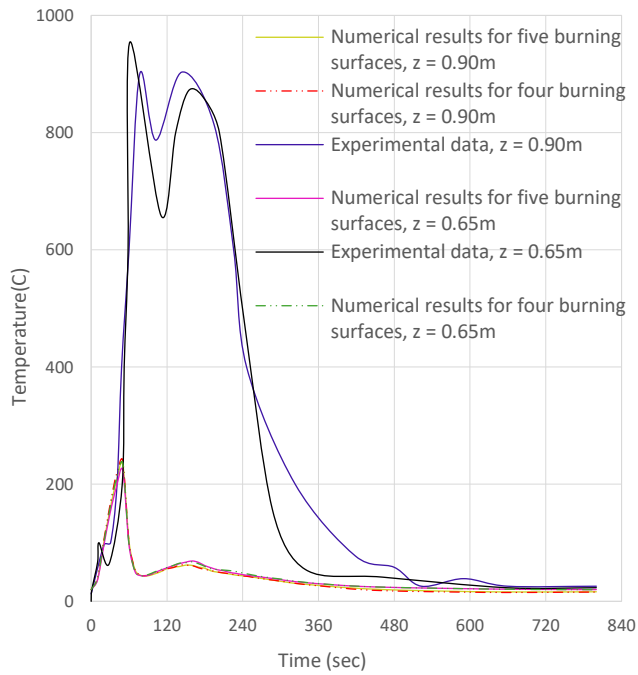
Διάγραμμα 1: HRR για κουτιά πάχους 7mm με κλειστά όρια κανάβου



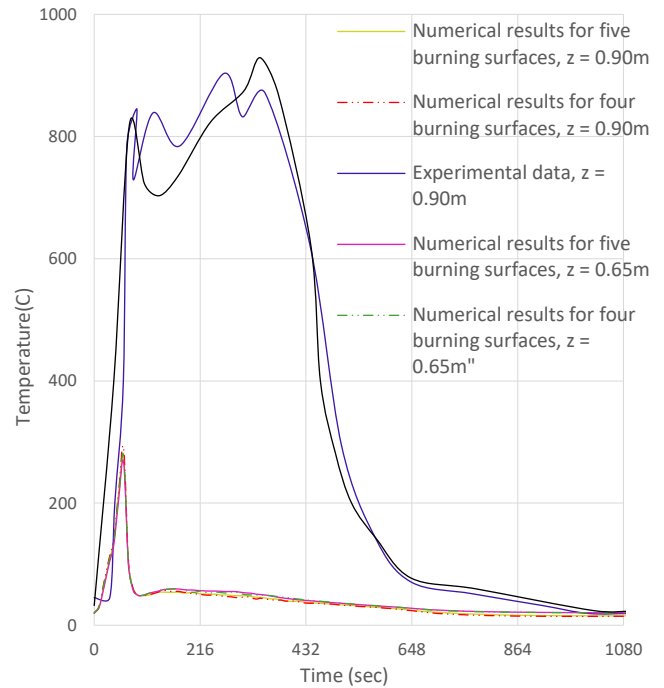
Διάγραμμα 2: HRR για κουτιά πάχους 14mm με κλειστά όρια κανάβου



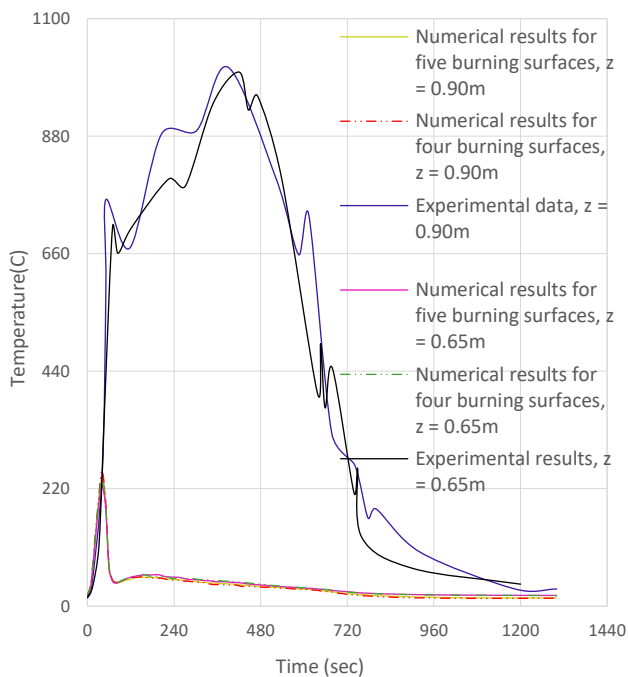
Διάγραμμα 3: HRR για κουτιά πάχους 21mm με κλειστά όρια κανάβου



Διάγραμμα 4: Καύση κουτιών 7mm με κλειστά όρια κανάβου για 840sec



Διάγραμμα 5: Καύση κουτιών 14mm με κλειστά όρια κανάβου για 1080sec



Διάγραμμα 6: Καύση κουτιών 21mm με κλειστά όρια κανάβου για 1200sec

7.1.1 Επιρροή Κλειστών Ορίων Κανάβου στις Προσομοιώσεις Καύσης

Η σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων εμφανίζει σημαντικές αποκλίσεις στις θερμοκρασιακές κατανομές και τη δυναμική της καύσης. Στο Διάγραμμα 1, που αφορά κουτί πάχους 7mm, παρατηρείται ότι η συνολική διάρκεια της αριθμητικής προσομοίωσης είναι μόλις 60 sec, ενώ στις πειραματικές δοκιμές η καύση εξελίσσεται σε 600 sec. Στις προσομοιώσεις, η φωτιά αναπτύσσεται ταχύτατα, φθάνει στη μέγιστη έντασή της σε πολύ σύντομο χρόνο και σβήνει απότομα. Αντίθετα, στα πειραματικά δεδομένα η καύση ακολουθεί μια πιο ομαλή και ρεαλιστική καμπύλη ανάπτυξης και απόσβεσης. Παρόμοια συμπεριφορά καταγράφεται και στα κουτιά πάχους 14mm και 21mm, γεγονός που υποδηλώνει ότι η μεταβολή του πάχους επηρεάζει περιορισμένα την εξέλιξη της καύσης. Η σύγκριση των μέγιστων τιμών από τα διαγράμματα αποτυπώνει τα εξής:

Διάγραμμα 1 (7mm): Στα πειραματικά δεδομένα, η μέγιστη τιμή καταγράφεται στα 380 kW τη στιγμή των 150 sec. Αντίστοιχα, στις αριθμητικές προσομοιώσεις, η μέγιστη τιμή περιορίζεται στις 17.5 kW στα 40 sec, τόσο για την καύση τεσσάρων πλευρών όσο και για την καύση τεσσάρων πλευρών με την άνω επιφάνεια.

Διάγραμμα 2 (14mm): Η πειραματική μέγιστη τιμή φτάνει τα 295 kW στα 280 sec. Στις προσομοιώσεις, καταγράφονται 22.1 kW στα 60 sec για την καύση τεσσάρων πλευρών και της άνω επιφάνειας και 20.5 kW για την καύση τεσσάρων πλευρών.

Διάγραμμα 3 (21mm): Η μέγιστη πειραματική τιμή είναι 240 kW στα 237.5 sec, ενώ οι αριθμητικές τιμές ανέρχονται σε 21.8 kW στα 40 sec, ανεξάρτητα της επιφάνειας καύσης.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι, σε όλες τις περιπτώσεις, η φωτιά στις αριθμητικές προσομοιώσεις εξελίσσεται με χαμηλότερη ένταση και σε συντομότερο χρονικό διάστημα σε σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα. Η κύρια αιτία αυτής της απόκλισης αποδίδεται στις περιοριστικές συνθήκες των κλειστών ορίων κανάβου, δηλαδή, στους τοίχους που οριοθετούν τη γεωμετρία του μοντέλου. Η απουσία επαρκούς αερισμού εντός του προσομοιωμένου χώρου παρεμποδίζει την ομαλή κυκλοφορία των θερμών αερίων και την πλήρη ανάπτυξη της καύσης.

Καθώς η φωτιά εξελίσσεται στο ψηφιακό μοντέλο, τα θερμά αέρια που παράγονται ανυψώνονται και σχηματίζουν ένα στρώμα θερμού καπνού κοντά στην οροφή. Όταν το

στρώμα αυτό έρχεται σε επαφή με τους περιμετρικούς τοίχους, τα αέρια που βρίσκονται πλησίον των επιφανειών αυτών δεν θερμαίνονται με τον ίδιο ρυθμό, λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας των τοίχων. Ως αποτέλεσμα, τα αέρια ψύχονται σταδιακά. Η ψύξη αυτή οδηγεί σε αύξηση της πυκνότητάς τους και σε μείωση της ικανότητάς τους να ανυψώνονται προς την οροφή ή σε υψηλότερα σημεία του χώρου. Αντιθέτως, τα θερμά και ελαφρύτερα αέρια συνεχίζουν να κινούνται ανοδικά. Τα ψυχρότερα, πλέον πυκνότερα αέρια τείνουν να κινούνται καθοδικά, εξαιτίας της αυξημένης πυκνότητάς τους. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται συνεχώς κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, με αποτέλεσμα η καύση να διακόπτεται πρόωρα. Επομένως, γεωμετρικές παράμετροι όπως το ύψος της οροφής ή η απόσταση μεταξύ των κουτιών αποκτούν μικρότερη σημασία, καθώς η εξέλιξη της καύσης διακόπτεται προτού αναπτυχθεί πλήρως (Cooper, 1984; Jaluria).

7.1.2 Ανάλυση Θερμοκρασιακής Συμπεριφοράς Πειραμάτων

Η ανάλυση επικεντρώνεται αρχικά στο Διάγραμμα 4, το οποίο αφορά κουτιά πάχους 7mm με σημεία μέτρησης σε ύψος $z = 0.65\text{m}$ και $z = 0.90\text{m}$. Από την παρατήρηση των καμπυλών διαπιστώνεται ότι, και στην περίπτωση των θερμοκρασιών, τα αριθμητικά αποτελέσματα παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις από τα πειραματικά δεδομένα. Οι διαφορές αυτές παραμένουν έντονες ακόμη και κατά τη φάση μέγιστης θερμοκρασίας. Συνεπώς, καθίσταται αναγκαία μια περαιτέρω διερεύνηση της συμπεριφοράς των αριθμητικών προσομοιώσεων. Η διερεύνηση αυτή πραγματοποιείται μέσω της αναλυτικής περιγραφής της εξέλιξης των θερμοκρασιών καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης για το Διάγραμμα 4.

Κατά το αρχικό στάδιο της καύσης (0 – 50 sec), παρατηρείται ήπια κορύφωση στις αριθμητικές καμπύλες, με τη θερμοκρασία να φτάνει τους 220°C στα 50 sec και για τις δύο θέσεις μέτρησης. Αντίστοιχα, στα πειραματικά δεδομένα καταγράφεται θερμοκρασία 500°C την ίδια χρονική στιγμή, με τη μέγιστη τιμή των 870°C να εμφανίζεται στα 150 sec, επίσης και για τις δύο θέσεις, με μικρές μεταξύ τους αποκλίσεις. Παρατηρείται, επομένως, ότι οι θερμοκρασίες στα αριθμητικά δεδομένα είναι σημαντικά χαμηλότερες, ενώ η σύγκλιση των καμπυλών στις δύο θέσεις υποδηλώνει πως η φωτιά δεν προλαβαίνει να αναπτυχθεί επαρκώς ώστε να δημιουργηθούν θερμοκρασιακές διαφοροποιήσεις ανάλογα με το ύψος. Το εύρημα αυτό συμφωνεί με τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα διαγράμματα ρυθμού έκλυσης θερμότητας. Επιπλέον, η σχεδόν πλήρης ταύτιση των δύο αριθμητικών καμπυλών δείχνει ότι η προσθήκη της άνω επιφάνειας στο μοντέλο δεν επηρεάζει ουσιαστικά την εξέλιξη της θερμοκρασίας.

Κατά τη δεύτερη φάση της καύσης (50 – 100 sec), είναι αναμενόμενο, λόγω των κλειστών ορίων του υπολογιστικού κανάβου, η θερμοκρασία να μειώνεται έως ότου μηδενιστεί. Οι αποκλίσεις σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα παραμένουν έντονες, γεγονός που παρατηρείται και στα υπόλοιπα διαγράμματα, ανεξαρτήτως πάχους κουτιού ή θέσης μέτρησης.

7.2 Παρουσίαση και Ανάλυση Πειραμάτων Ανοιχτών Ορίων Κανάβου

Τα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζουν την εξέλιξη του Ρυθμού Έκλυσης Θερμότητας (Heat Release Rate, HRR) και της Θερμοκρασίας του χώρου (Temperature) σε συνάρτηση με τον χρόνο (Time).

Διαγράμματα HRR

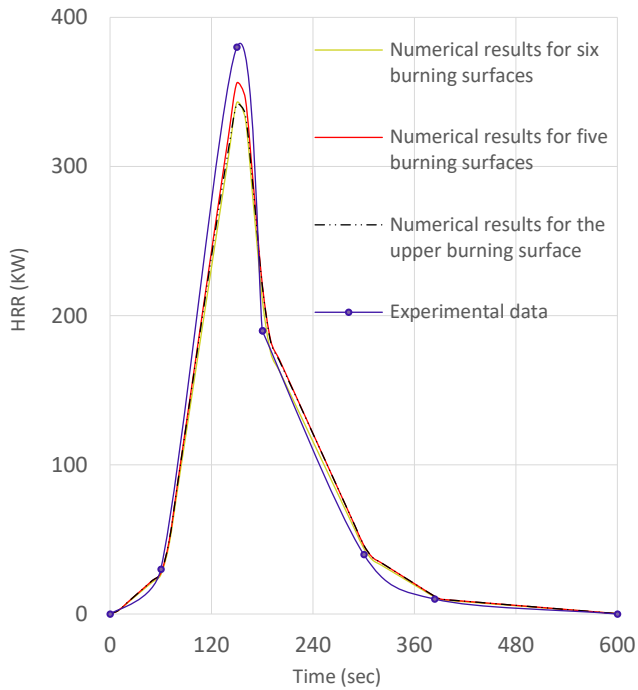
Η πρώτη σειρά διαγραμμάτων αφορά το HRR και περιλαμβάνει τέσσερις καμπύλες, καθεμία από τις οποίες αντιπροσωπεύει ένα διαφορετικό σενάριο καύσης:

- Κίτρινη καμπύλη: Ολική καύση κουτιού (Αριθμητικά Δεδομένα)
- Κόκκινη καμπύλη: Καύση τεσσάρων πλευρών και άνω επιφάνειας (Αριθμητικά Δεδομένα)
- Μαύρη διακεκομμένη καμπύλη: Καύση άνω επιφάνειας (Αριθμητικά Δεδομένα)
- Μπλέ καμπύλη: Πειραματικά δεδομένα

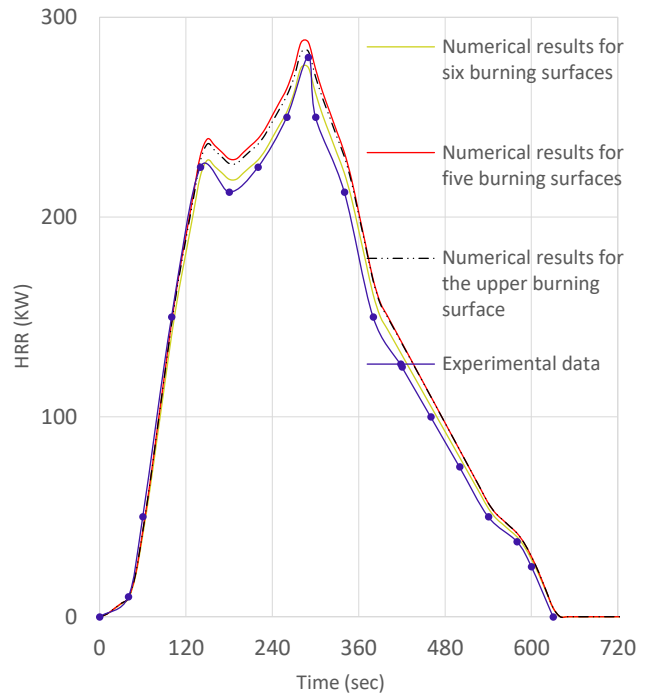
Διαγράμματα Θερμοκρασίας

Η δεύτερη σειρά διαγραμμάτων αφορά τη θερμοκρασιακή εξέλιξη της προσομοίωσης σε ύψη $z = 0.65\text{m}$ και $z = 0.90\text{m}$. Κάθε διάγραμμα καταγράφει τη θερμοκρασία του χώρου, λαμβάνοντας υπόψη ότι υπάρχει ροή αέρα εκτός του υπολογιστικού πλέγματος (συνθήκη ανοιχτών ορίων). Οι καμπύλες αντιπροσωπεύουν τις ακόλουθες συνθήκες:

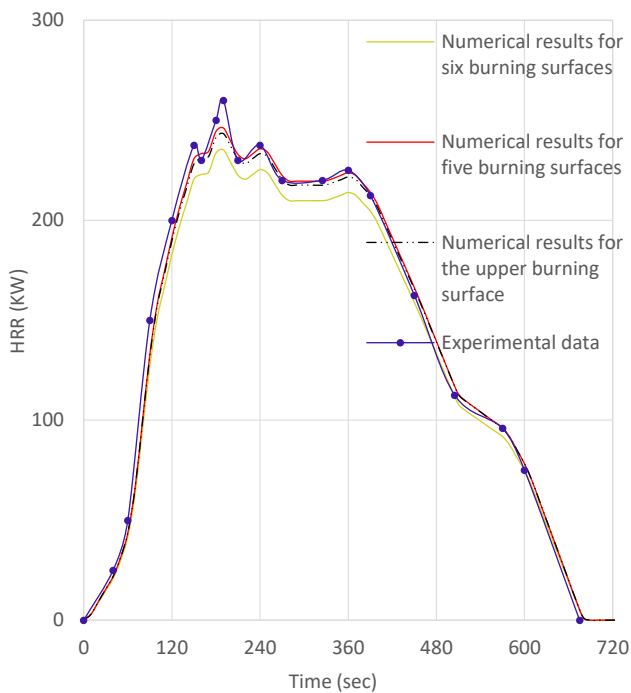
- Κίτρινη και γαλάζια καμπύλη: Ολική καύση κουτιού (Αριθμητικά Δεδομένα)
- Κόκκινη και πράσινη καμπύλη: Καύση τεσσάρων πλευρών και άνω επιφάνειας (Αριθμητικά Δεδομένα)
- Μπλέ και Μόβ διακεκομμένη καμπύλη: Καύση άνω επιφάνειας (Αριθμητικά Δεδομένα)
- Μαύρη και γκρί καμπύλη: Πειραματικά δεδομένα



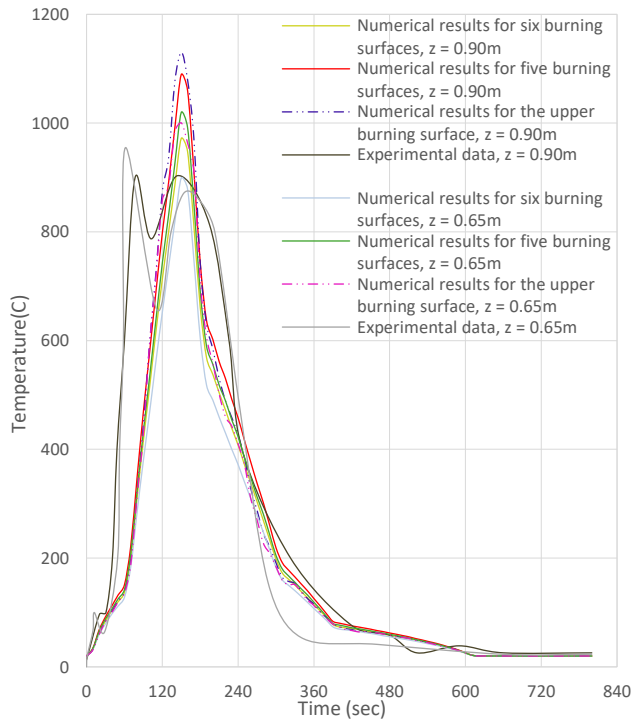
Διάγραμμα 7: HRR για κουτιά πάχους 7mm με ανοιχτά όρια καννάβου



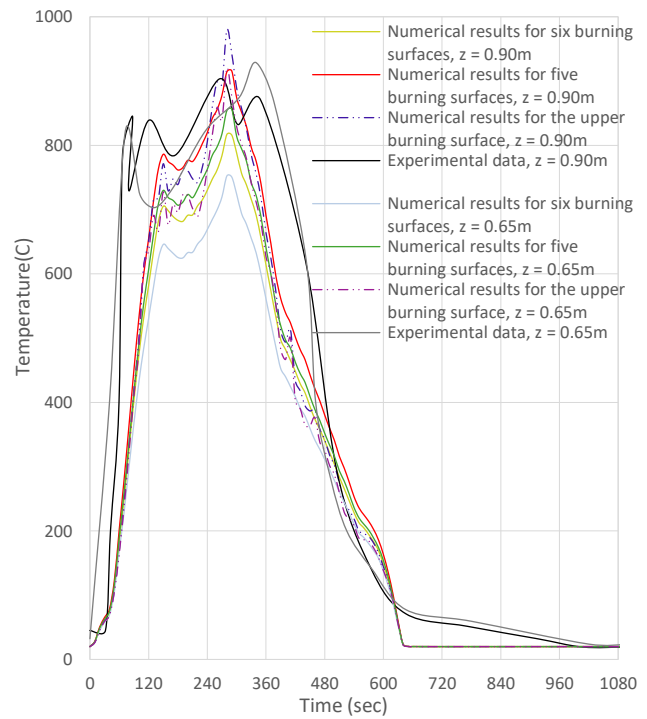
Διάγραμμα 8: HRR για κουτιά πάχους 14mm με ανοιχτά όρια καννάβου



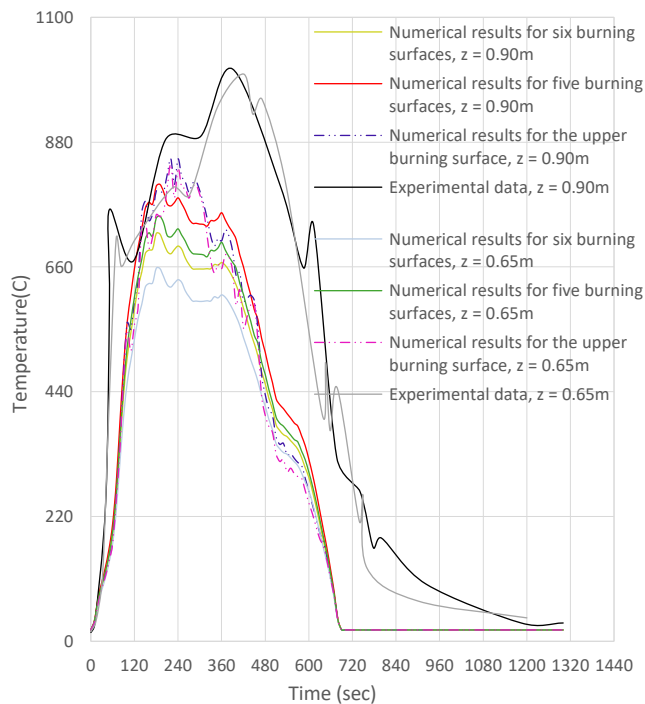
Διάγραμμα 9: HRR για κουτιά πάχους 21mm με ανοιχτά όρια καννάβου



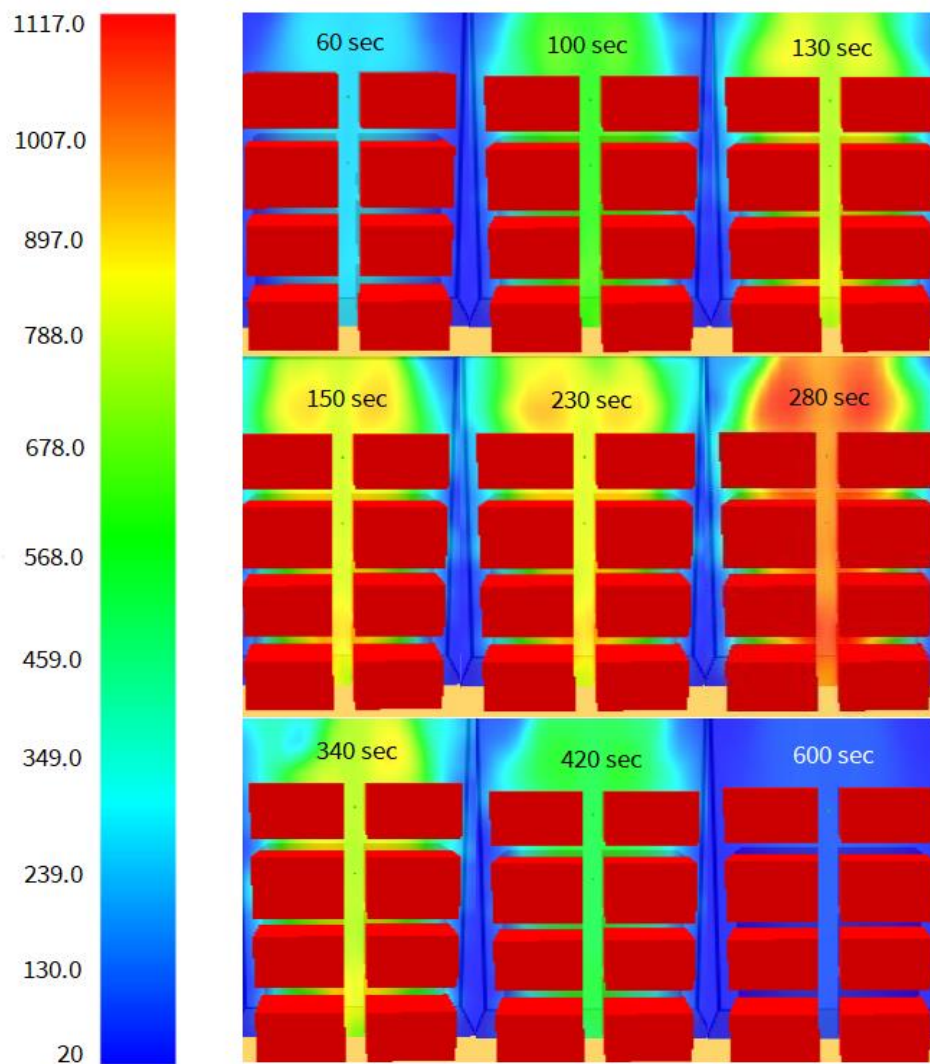
Διάγραμμα 10: Καύση κουτιών 7mm με ανοιχτά όρια κανάβου για 840sec



Διάγραμμα 11: Καύση κουτιών 14mm με ανοιχτά όρια κανάβου για 1080sec



Διάγραμμα 12: Καύση κουτιών 21mm με ανοιχτά όρια κανάβου για 1200sec



Εικόνα 7.2: Καύση κουτιών 14mm σε εικονική αναπαράσταση μέσω Smokeview

7.2.1 Ανάλυση Ρυθμού Έκλυσης Θερμότητας ανά Πάχους Κουτιών

Παρατηρώντας τα τρία διαγράμματα ρυθμού έκλυσης θερμότητας, διαπιστώνεται ότι αρχικά η καύση εξελίσσεται ομαλά, ενώ στη συνέχεια γίνεται εντονότερη. Η ποσότητα θερμότητας που εκλύεται διαφέρει σε κάθε πείραμα, κυρίως λόγω της διαφορετικής τιμής του πάχους των χαρτόκουτων. Στα κουτιά με μικρό πάχος (7 mm), η φωτιά καίει τη μονή στρώση χαρτιού πολύ γρήγορα, με αποτέλεσμα η φλόγα να διαδίδεται ταχύτερα στον χώρο και να προκαλεί υψηλότερες θερμοκρασίες κατά την καύση. Αντίθετα, στα κουτιά με διπλό πάχος (14 mm), η θερμότητα διαπερνά το υλικό πιο αργά, λόγω των δύο στρώσεων, γεγονός που οδηγεί σε καθυστέρηση της καύσης. Αντίστοιχο φαινόμενο παρατηρείται και στα κουτιά με πάχος 21 mm. Η φωτιά διαπερνά ακόμα πιο δύσκολα το παχύτερο υλικό, με αποτέλεσμα η καύση να είναι πιο αργή. Ενδεικτικά, τη χρονική στιγμή των 120 sec, η εκλυόμενη θερμότητα για τα κουτιά πάχους 7mm φτάνει τα 250 kW, ενώ για τα κουτιά με πάχος 14mm και 21mm η αντίστοιχη τιμή κυμαίνεται γύρω στα 200 kW.

Μετά την παρέλευση των 120 sec, παρατηρείται η μέγιστη έκλυση θερμότητας στο πείραμα, γεγονός που υποδηλώνει την πλήρη εξάπλωση της φωτιάς και την κορύφωση της καύσης. Σε αυτό το στάδιο, οι διαφορές ανάμεσα στα αριθμητικά μοντέλα και τα πραγματικά δεδομένα γίνονται πιο εμφανείς, καθώς οι πραγματικές συνθήκες είναι πιο δυναμικές και επηρεάζονται από παράγοντες που δεν περιλαμβάνονται πλήρως στην προσομοίωση. Όπως φαίνεται και από τα Διαγράμματα 8 και 9 σε σύγκριση με το Διάγραμμα 7, το αυξημένο πάχος των χαρτόκουτων οδηγεί σε χαμηλότερες μέγιστες τιμές έκλυσης θερμότητας. Η καύση είναι πιο αργή και απαιτεί περισσότερο χρόνο.

Μετά την κορύφωση, ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας (HRR) αρχίζει να μειώνεται, καθώς έχει ήδη επιτευχθεί η μέγιστη τιμή και η φωτιά εισέρχεται στη φάση της εξασθένησης. Η μείωση είναι αρχικά απότομη, γεγονός που υποδηλώνει ότι μεγάλο μέρος του καυσίμου καταναλώνεται γρήγορα. Στη συνέχεια, η ένταση της φωτιάς μειώνεται πιο σταδιακά, με τις καμπύλες να ακολουθούν παρόμοια πορεία και τελικά να συγκλίνουν. Σε αυτό το τελικό στάδιο της καύσης, η διαθεσιμότητα τόσο του καυσίμου όσο και του οξυγόνου έχει περιοριστεί σημαντικά, με αποτέλεσμα το HRR να φθίνει σταδιακά και τελικά να μηδενίζεται.

7.2.2 Ανάλυση Θερμικής Συμπεριφοράς κατά την Καύση Χαρτόκουτων

Κατά την καύση των χαρτόκουτων, η διαδικασία ξεκινά με την αρχική ανάφλεξη, όπου σημειώνεται η έναρξη της καύσης. Το μικρό πάχος των κουτιών επιτρέπει τη γρήγορη θέρμανση του εσωτερικού τους, οδηγώντας σε απότομη αύξηση της θερμοκρασίας. Αντιθέτως, για τα μεγαλύτερα πάχη, η θέρμανση στο εσωτερικό τους συμβαίνει πιο αργά, διότι η φωτιά δυσκολεύεται να περάσει τις στρώσεις χαρτονιού· επομένως, το υλικό αναφλέγεται πιο δύσκολα και πιο αργά, όπως έχει παρατηρηθεί παραπάνω. Η σταδιακή εξάπλωση της φλόγας στις στοιβάδες του υλικού ενισχύει τη θερμική απόκριση. Η περιορισμένη ροή αέρα, εξαιτίας των μικρών αποστάσεων ανάμεσα στη γεωμετρία του υλικού και το υπολογιστικό πλέγμα, συμβάλλει στην αύξηση της τοπικής θερμοκρασίας ενώ τα ανοιχτά όρια του κανάβου επιτρέπουν την παροχή νωπού αέρα, ενισχύοντας την καύση και αποτρέποντας την πρόωρη κατάσβεση της φωτιάς. Στο τέλος της αρχικής φάσης, περίπου στα 120 sec, οι θερμοκρασίες που καταγράφονται στα πειράματα με πάχος 7mm είναι υψηλότερες σε σύγκριση με εκείνες των πειραμάτων με πάχος 14mm και 21mm.

Καθώς η διαδικασία συνεχίζεται, η φωτιά εξαπλώνεται σε κάθε κουτί και σε όλες τις επιλεγμένες καιγόμενες επιφάνειες, προκαλώντας έντονη μεταφορά θερμότητας. Η ταχεία κατανάλωση της καύσιμης ύλης και η επάρκεια οξυγόνου οδηγούν σε απότομη αύξηση της θερμοκρασίας, που έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μεγίστου σε όλες τις καταγεγραμμένες καμπύλες. Αυτές οι συνθήκες δημιουργούν το φαινόμενο της καμινάδας (chimney effect). Πρόκειται για ένα φυσικό φαινόμενο ροής αέρα που οφείλεται στη διαφορά θερμοκρασίας και πυκνότητας μεταξύ θερμού και ψυχρού αέρα. Κατά την πλήρη εξάπλωση της φωτιάς στο χώρο, ο αέρας που θερμαίνεται γίνεται ελαφρύτερος και τείνει να ανέλθει προς τα πάνω, ενώ ο ψυχρότερος και βαρύτερος αέρας κατεβαίνει για να τον αντικαταστήσει. Αυτή η φυσική κυκλοφορία δημιουργεί μια κάθετη ροή αέρα που μπορεί να ενισχύσει την εξάπλωση της φλόγας και την καύση (Drysdale, 2011). Λόγω του φαινομένου της καμινάδας και της μικρής απόστασης της καύσιμης ύλης από την οροφή (0,30 m), η θερμότητα παγιδεύεται τοπικά και ενισχύεται η ένταση της καύσης σε αυτή την περιοχή. Η τοπική αυτή αύξηση της θερμότητας προκαλεί θερμοκρασιακή στρωμάτωση, με τις υψηλότερες θερμοκρασίες να συγκεντρώνονται στο ανώτερο τμήμα του χώρου, κοντά στην οροφή όπως παρατηρείται στην Εικόνα 7.2, ειδικά, τη στιγμή των 280 sec. Παράλληλα, τα κενά ανάμεσα στην καύσιμη ύλη και το υπολογιστικό πλέγμα επιτρέπουν την ελεύθερη κίνηση του αέρα, ενισχύοντας περαιτέρω την καύση.

Καθώς εξαντλείται η καύσιμη ύλη, η ένταση της φωτιάς αρχίζει να μειώνεται και η θερμοκρασία πέφτει απότομα, αν και παραμένει υψηλότερη από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος λόγω της συσσωρευμένης θερμότητας στο σύστημα. Η ελεύθερη ροή αέρα στα ανοιχτά όρια βοηθά στην απομάκρυνση του θερμού αέρα, καθώς κινείται προς την οροφή και αντικαθίσταται από ψυχρότερο αέρα του περιβάλλοντος. Η διαδικασία αυτή επιταχύνει την ψύξη της καύσιμης ύλης. Ωστόσο, οι περιορισμένοι χώροι ανάμεσα στις στοιβάδες των κουτιών διατηρούν τη θερμότητα τοπικά, καθυστερώντας την πλήρη ψύξη.

Τελικά, η θερμοκρασία συνεχίζει να μειώνεται σταδιακά, φτάνοντας τα επίπεδα του περιβάλλοντος (περίπου 30–40°C). Η ενεργή καύση έχει ολοκληρωθεί, καθώς η καύσιμη ύλη έχει εξαντληθεί. Η ελεύθερη κυκλοφορία του αέρα κοντά στα ανοιχτά όρια επιταχύνει την ψύξη, ενώ περιοχές με περιορισμένο αερισμό διατηρούν τη θερμότητα για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

7.2.3 Η Επίδραση των Επιφανειών Καύσης στην Θερμοκρασιακή Εξέλιξη του Χώρου

Η ανάλυση της θερμοκρασιακής εξέλιξης για διαφορετικές επιφάνειες καύσης φανερώνει τη σημασία της έκτασης της φλόγας και της θερμικής διάχυσης εντός των ορίων που θέτει ο τρισδιάστατος χώρος. Στο σενάριο καύσης μόνο της άνω επιφάνειας των κουτιών, η θερμογόνος επιφάνεια είναι περιορισμένη και η φλόγα αναπτύσσεται κυρίως προς τα πάνω. Η μετάδοση θερμότητας περιορίζεται συνεπώς σε κατακόρυφη κατεύθυνση προς την οροφή, χωρίς ουσιαστική διάχυση της φλόγα προς τα γειτονικά κουτιά. Παρόλα αυτά, η μικρή εσωτερική απόσταση των κουτιών οδηγεί σε ταχεία θέρμανση του συνόλου του συστήματος. Η θερμοκρασία στο ύψος 0,65 m καταγράφεται αισθητά χαμηλότερη από το ύψος 0,90 m, εξαιτίας της ασθενούς θερμικής στήλης που αναπτύσσεται στα μικρότερα ύψη (βλ. Εικόνα 7.2).

Στην περίπτωση καύσης τεσσάρων πλαϊνών πλευρών και της άνω επιφάνειας, η φλόγα αναπτύσσεται περιμετρικά και προς τα πάνω, αυξάνοντας τη θερμική ισχύ και την έκταση της πυρκαγιάς. Οι πλευρικές φλόγες θερμαίνουν αποτελεσματικά τα γειτονικά κουτιά, οδηγώντας σε αλυσιδωτή εξάπλωση της καύσης. Η θερμοκρασία αυξάνεται ταχύτερα και διατηρείται σε υψηλά επίπεδα κοντά στα πειραματικά δεδομένα, καθώς αναπτύσσεται μια ισχυρή ανοδική ροή θερμών αερίων, που υποστηρίζει την πλήρη ανάπτυξη της πυρκαγιάς.

Στο σενάριο ολικής καύσης του κουτιού, καίγονται όλες οι επιφάνειες, αξιοποιώντας πλήρως την καύσιμη ύλη. Η θερμοκρασία αυξάνεται σταθερά και φτάνει τοπικά σε υψηλές τιμές. Ωστόσο, η αντίστοιχη θερμοκρασιακή καμπύλη εμφανίζεται ελαφρώς χαμηλότερη από εκείνες των υπόλοιπων αριθμητικών δεδομένων σε όλα τα διαγράμματα. Το φαινόμενο αυτό ενδέχεται να οφείλεται σε καθυστέρηση της ανάφλεξης του εσωτερικού του κουτιού, λόγω της έντονης καύσης και της περιορισμένης πρόσβασης οξυγόνου που αυτή προκαλεί. Η γεωμετρική διάταξη των κουτιών, καθώς και η μικρή απόσταση μεταξύ τους και από τα τοιχώματα του γεωμετρικού χώρου, πιθανόν να περιορίζουν την ελεύθερη κυκλοφορία του αέρα, μειώνοντας την ταχύτητα εξάπλωσης της φλόγας.

Οι πειραματικές τιμές για τα τρία διαγράμματα θερμοκρασιών είναι υψηλότερες στη θέση 0.90m σε σύγκριση με τη θέση 0.65m, όπως είναι αναμενόμενο, καθώς η θερμοκρασία όσο ανεβαίνει γίνεται πιο έντονη. Η μόνη διαφοροποίηση εμφανίζεται στο μέγιστο του Διαγράμματος 11 (14mm), όπου οι τιμές στη θέση 0.65m για ορισμένα δευτερόλεπτα, υπερβαίνουν εκείνες της θέσης 0.90m. Αναφορικά με τα αριθμητικά δεδομένα, παρατηρείται η ίδια τάση, κάτι που αποτελεί εύλογο συμπέρασμα, δεδομένου ότι όσο πιο ψηλά

τοποθετείται ο μετρητής, τόσο αυξάνεται ο αριθμός των χαρτόκουτών που συμβάλλουν στην καύση. Αυτή η αύξηση οδηγεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες στην περιοχή του ύψους 0.90m. Συμπερασματικά, η θερμοκρασία του χώρου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την έκταση της στερεάς ύλης που επιλέγεται να καεί και τη γεωμετρική θέση των καιγόμενων επιφανειών. Ένα λογικό συμπέρασμα θα ήταν πώς όσο περισσότερες επιφάνειες καίγονται τόσο πιο έντονη είναι η καύση. Φαίνεται, λοιπόν, πως στο ψηφιακό περιβάλλον αυτό το συμπέρασμα δεν ισχύει, διότι η καύση μόνο της πάνω επιφάνεια δημιουργεί μεγαλύτερες θερμοκρασίες στο σύστημα. Η περιορισμένη καύση εμφανίζεται στην καύση όλου του κουτιού και οδηγεί σε χαμηλές θερμοκρασίες λόγω ασθενούς μετάδοσης θερμότητας, ενώ η καύση των πέντε επιφανειών αποδίδει θερμικά αποτελέσματα αντιπροσωπευτικά της πραγματικής πυρκαγιάς.

7.2.4 Ο Ρόλος των Γεωμετρικών Παραμέτρων στη Συμπεριφορά της Φωτιάς

Η γεωμετρική απεικόνιση των πειραμάτων περιλαμβάνει συγκεκριμένες αποστάσεις μεταξύ της καύσιμης ύλης και του περιβάλλοντα χώρου, οι οποίες επηρεάζουν ουσιαστικά τη διαδικασία της καύσης. Στην παρούσα ενότητα, αναλύονται οι λόγοι που οδήγησαν στην επιλογή αυτών των ορίων, ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζουν την εξάπλωση της φωτιάς και πώς η τροποποίησή τους μπορεί να επιφέρει διαφορετικά αποτελέσματα.

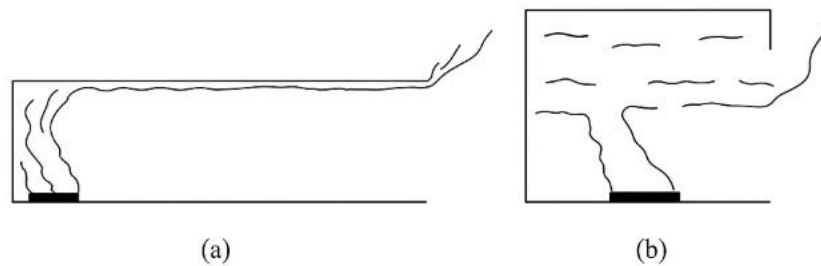
Στο φυσικό περιβάλλον, ακόμη και σε κλειστούς χώρους όπως ένα δωμάτιο ή ένας ανελκυστήρας, υφίσταται φυσικός αερισμός. Αυτό επιτρέπει στην εστία καύσης να συνεχίσει να τροφοδοτείται με οξυγόνο και, κατά συνέπεια, να διατηρείται ενεργή. Αντιθέτως, στο ψηφιακό περιβάλλον της προσομοίωσης, οι συνθήκες αερισμού δεν υφίστανται εκ των προτέρων, αλλά ορίζονται αποκλειστικά από τον χρήστη. Όπως φάνηκε στην Ενότητα 7.1, η επιλογή κλειστών ορίων στο πείραμα οδήγησε σε πρόωρη κατάσβεση της φωτιάς, μόλις στα 60 δευτερόλεπτα. Αν δεν οριστούν κατάλληλα ανοίγματα ή συνθήκες αερισμού (βλ. Ενότητα 7.2), η προσομοίωση θεωρεί ότι δεν υπάρχει εξωτερική πηγή οξυγόνου, με αποτέλεσμα η φωτιά να σβήνει ή να μην εξελίσσεται ομαλά, σε αντίθεση με ό,τι θα συνέβαινε στην πραγματικότητα, όπου ακόμα και σε περιορισμένο χώρο, η καύση θα συνεχιζόταν. Αυτή η διαφορά καθιστά κρίσιμη τη σωστή διαμόρφωση των συνθηκών αερισμού στα ψηφιακά μοντέλα, ώστε να επιτυγχάνεται υψηλός βαθμός ρεαλισμού και αξιοπιστίας στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

Κατά τη σχεδίαση της προσομοίωσης επιλέχθηκε περιορισμένος υπολογιστικός χώρος με αρχικά κλειστά όρια, αποφεύγοντας την προσομοίωση ενός ολόκληρου δωματίου. Η προσομοίωση μεγάλου, κλειστού χώρου μπορεί να οδηγήσει σε ανεπαρκή παροχή οξυγόνου λόγω ψηφιακών συνθηκών, ενώ αντίθετα, τα μεγάλα ανοιχτά όρια μπορεί να προκαλέσουν υπερβολική εξάπλωση της φωτιάς, μη ρεαλιστική σε σχέση με την επιλεγμένη γεωμετρία. Η χρήση μικρού, ελεγχόμενου πλέγματος με συγκεκριμένα όρια επιτρέπει καλύτερο έλεγχο τόσο της ροής των αερίων όσο και της ίδιας της καύσης. Παράλληλα, διευκολύνεται η μελέτη κρίσιμων παραμέτρων όπως η θερμοκρασία, ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας και οι αποστάσεις μεταξύ της καύσιμης ύλης και των ορίων του χώρου.

Οι αποστάσεις που ορίστηκαν στη γεωμετρία του πειράματος είναι 0,075m και 0,095m στα πλευρικά όρια, καθώς και 0,3m μεταξύ της ανώτερης στοιβάδας κουτιών και της οροφής. Οι διαστάσεις αυτές επιλέχθηκαν έτσι ώστε να εξισορροπούν την παροχή οξυγόνου και τον έλεγχο της φλόγας. Ειδικά στην περίπτωση των ανοιχτών ορίων, η απόσταση από την οροφή επιτρέπει τη συσσώρευση θερμών αερίων, δημιουργώντας θερμοκρασιακή στρωμάτωση, η

οποία συμβάλλει στην πιο ρεαλιστική αναπαράσταση της φωτιάς στο ψηφιακό περιβάλλον. Τα πλευρικά όρια, από την άλλη πλευρά, συμβάλλουν στη διατήρηση ενός θερμού στρώματος. Αν οι αποστάσεις ήταν μικρότερες θα περιόριζαν την κυκλοφορία του αέρα, με αποτέλεσμα τη δυσκολία στην τροφοδότηση της φωτιάς με οξυγόνο.

Σε μια γενικότερη θεωρητική προσέγγιση του προβλήματος παρουσιάζεται η παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 7.2.4: Αλληλεπίδραση στήλης καπνού με την οροφή ενός διαμερίσματος (An Introduction to Fire Dynamics)

Στο πρώτο σενάριο καύσης (α) απεικονίζεται ένας διάδρομος, όπου η φωτιά αναπτύσσεται κάθετα και στη συνέχεια εκτρέπεται οριζόντια όταν φτάνει στην οροφή, ρέοντας ανεμπόδιστα προς τα δεξιά. Στο δεύτερο σενάριο (β) απεικονίζεται ένα διαμέρισμα που καίγεται, με τη φωτιά να αναπτύσσεται κατακόρυφα προς την οροφή, σχηματίζοντας ένα στρώμα καπνού ακριβώς κάτω από αυτή σε συνθήκες επαρκούς αερισμού. Παρατηρώντας τα δύο σενάρια φαίνεται πως ένα παρόμοιο μοτίβο, όπως της Εικόνας 7.2.4(b), ακολουθείται και στα παρόντα μοντέλα (βλ. Εικόνα 7.2).

Αν τα πλευρικά όρια ήταν μεγαλύτερα, η φωτιά πιθανόν θα ακολουθούσε αρχικά κατακόρυφη πορεία και στη συνέχεια θα εκτρέπεται οριζόντια (βλ. σενάριο καύσης α). Με αυτόν τον τρόπο εξάπλωσης, η καύση θα ήταν άναρχη και δεν θα μπορούσε να μελετηθεί αποτελεσματικά. Παράλληλα, αν η απόσταση μεταξύ της ανώτερης στοιβάδας και της οροφής ήταν μεγαλύτερη, η κάθετη ανάπτυξη της φωτιάς θα ήταν εντονότερη, με αποτέλεσμα να μην σχηματιστεί θερμό στρώμα αερίων κάτω από την οροφή και, κατά συνέπεια, να μην είναι εφικτή η μελέτη της καύσης. Συνολικά, το πείραμα προσπαθεί να αναπαραστήσει τις πραγματικές συνθήκες φωτιάς, όπου η θερμότητα και τα καυσαέρια συσσωρεύονται στην οροφή, δημιουργώντας θερμοκρασιακή στρωμάτωση. Η απόσταση από την οροφή και οι διαστάσεις του χώρου επιτρέπουν τη διατήρηση αυτών των συνθηκών, προσομοιώνοντας την εξέλιξη μιας φωτιάς σε ελεγχόμενο περιβάλλον.

7.3 Συμπεράσματα

Σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε, η θερμοκρασιακή εξέλιξη των πειραμάτων εξαρτάται από τέσσερις βασικούς παράγοντες: το πάχος των κουτιών, τα όρια του κανάβου (ανοιχτά ή κλειστά), τις επιφάνειες που συμμετέχουν στην καύση και τις συνολικές διαστάσεις του χώρου που περιβάλλει τη γεωμετρία.

Διαπιστώνεται ότι όσο μικρότερο είναι το πάχος των κουτιών, τόσο πιο έντονη και ταχεία είναι η καύση, γεγονός που επιβεβαιώνει τον καθοριστικό ρόλο της θερμοχωρητικότητας στην εξέλιξη της φωτιάς. Επιπλέον, στο ψηφιακό περιβάλλον, η επιλογή μεταξύ ανοιχτών και κλειστών ορίων έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς δεν υφίστανται φυσικές συνθήκες αερισμού, όπως συμβαίνει σε πραγματικό περιβάλλον. Κατά συνέπεια, απαιτείται τεχνητή εισαγωγή αερισμού, ώστε να διασφαλίζεται η ομαλή καύση.

Αναφορικά με τις επιφάνειες καύσης, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η επιλογή καύσης μίας μόνο επιφάνειας οδήγησε σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες, σε σύγκριση με δοκιμές που περιλάμβαναν πολλαπλές επιφάνειες. Οι διαστάσεις του υπολογιστικού χώρου αποδείχθηκαν κατάλληλες, καθώς συνέβαλαν στη διαμόρφωση συνθηκών ελεγχόμενης καύσης. Η κατακόρυφη γεωμετρία ενίσχυσε το φαινόμενο της καμινάδας, ενώ τα περιορισμένα πλευρικά όρια περιόρισαν την ανεξέλεγκτη διασπορά των καυσαερίων, αποτρέποντας την υπέρμετρη εξάπλωση της φωτιάς.

Επιπλέον, παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα της ψηφιακής προσομοίωσης συγκλίνουν αριθμητικά με τα δεδομένα της πραγματικής πειραματικής προσομοίωσης σε ικανοποιητικό βαθμό. Η διαπίστωση αυτή ενισχύει την άποψη ότι η ψηφιακή προσομοίωση αποτελεί κατάλληλο εργαλείο για μελλοντική έρευνα. Η καταλληλότητά της εδράζεται τόσο στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων όσο και στην ασφάλεια που προσφέρει. Δεν ενέχει φυσικό κίνδυνο, δεν προκαλεί υλικές φθορές και εξαλείφει την ανάγκη για φυσική κατασκευή πειραματικών διατάξεων. Παράλληλα, μειώνει σημαντικά το κόστος και την απαιτούμενη σωματική προσπάθεια που θα απαιτούνταν στον πραγματικό χώρο, καθώς όλα τα στάδια διεξάγονται αποκλειστικά μέσω υπολογιστή.

Τέλος, το υλικό που επιλέχθηκε για την καύση, το χαρτί, θεωρείται ιδιαίτερα κατάλληλο. Χάρη στην εύφλεκτη φύση του, αναφλέγεται γρήγορα, παράγει υψηλές θερμοκρασίες και αποτελεί κοινή επιλογή σε σχεδόν όλες τις πειραματικές εφαρμογές αυτού του τύπου. Η υψηλή του επικινδυνότητα το καθιστά ιδανικό για την προσομοίωση ρεαλιστικών και κρίσιμων σεναρίων πυρκαγιάς.

Βιβλιογραφία

Quintiere, J. G. (2006). Principles of Fire Behavior. Delmar Cengage Learning

Drysdale, D. (2011). An Introduction to Fire Dynamics. Wiley

DiNenno, P. J., & Beyler, C. L. (2008). SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Springer

Karlsson, B., & Quintiere, J. G. (1999). Enclosure Fire Dynamics. CRC Press

Bryant, R. A. (2022). Fire Dynamics. Wiley

Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2008). Thermodynamics: An Engineering Approach. McGraw-Hill Education.

Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2007). Introduction to Heat Transfer. Wiley.

Schroeder, D. V. (2000). An Introduction to Thermal Physics. Addison-Wesley.

Babrauskas, V. (2003). "Heat Release Rate: The Key to Fire Hazard Assessment." Fire Safety Journal.

Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2024). Εισαγωγή στην Υπολογιστική Ρευστοδυναμική. Εκδόσεις Τζιόλα.

Μαρκάτος, Ν., & Ασημακόπουλος, Δ. (1995). Υπολογιστική Ρευστοδυναμική. Εκδόσεις Παπασωτηρίου.

NIST. (2018). Fire Dynamics Simulator (FDS) Technical Reference Guide. National Institute of Standards and Technology.

Thunderhead Engineering. (2018). PyroSim User Manual. Thunderhead Engineering.

McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., Baum, H., Rehm, R., Mell, W., & McDermott, R. (2016). Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide. National Institute of Standards and Technology.

Patankar, S. V. (1980). Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Hemisphere Publishing Corporation.

Forney, G. P. (2018). Smokeview (Version 6) - A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data. National Institute of Standards and Technology

Sagaut, P., & Meneveau, C. (2006). "Large Eddy Simulation for Incompressible Flows: An Introduction".

Moin, P. (1997). "Direct Numerical Simulation: A Tool in Turbulence Research"

Wilcox, D.C. (2006). "Turbulence Modeling for CFD"

Turns, S.R. (2012). "An Introduction to Combustion: Concepts and Applications"

Lönnermark, A., & Ingason, H. (2005). Fire Spread in Large Industrial Premises and Warehouses. SP REPORT 2005:21. SP Fire Technology, Swedish National Testing and Research Institute.

Anderson, J. D. (1995). Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications. McGraw-Hill.

Saltelli, A., Tarantola, S., & Chan, K. P. S. (2008). Sensitivity Analysis in Practice: A Guide to Assessing Scientific Models. Wiley-Interscience.