



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Δ.Π.Μ.Σ. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Υπολογιστική Προσομοίωση
Διάδοσης Φωτιάς σε Κτίριο με
Συστήματα Ξηράς Δόμησης και με
Υλικά Αλλαγής Φάσης**

Συγγραφέας:
Ελενη-Μαρίνα
Ασημακοπούλου

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:
Μαρία Φούντη

Φεβρουάριος 2011

Υπολογιστική Προσομοίωση Διάδοσης
Φωτιάς σε Κτίριο με Συστήματα Ξηράς
Δόμησης και με Υλικά Αλλαγής Φάσης

Ελένη-Μαρίνα Ασημακοπούλου

Φεβρουάριος 2011

Ευχαριστίες

Κατ' αρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την καθηγήτριά μου, κυρία Μαρία Φούντη για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας και για την ενθάρρυνσή της. Τον κύριο Διονύση Κολαΐτη, μετα-διδασκατορικό συνεργάτη, για την πολύτιμη βοήθειά του, την καθοδήγησή του, τον χρόνο που μου αφιέρωσε αλλά και τις γόνιμες διορθώσεις του κατά την εκπόνηση και αυτής της διπλωματικής εργασίας. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω όλους τους συναδέλφους στο εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης για την βοήθειά τους αλλά και το ευχάριστο κλίμα που επικρατεί στον χώρο εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, τον υποψήφιο διδάκτορα Ιωάννη Μανδηλαρά για τον χρόνο που μου αφιέρωσε αλλά και την βοήθεια που μου παρείχε για τις πειραματικές μετρήσεις που διεξάχθηκαν στο εργαστήριο. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά την επίκουρη καθηγήτρια Ταραντίλη Πετρούλα και τον κ. Δημήτρη Κορρέ από το εργαστήριο Τεχνολογίας Πολυμερών στη Σχολή Χημικών Μηχανικών για τις μετρήσεις TGA που ολοκληρώθηκαν στο εργαστήριο τους. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους αγαπημένους μου ανθρώπους που με στηρίζουν όλα αυτά τα χρόνια.

Πρόλογος

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ, στο πλαίσιο του Διατμηματικού Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών (Δ.Π.Μ.Σ.) "Υπολογιστικής Μηχανικής" κατά το έτος 2010-2011.

Η ενσωμάτωση υλικών αλλαγής φάσης (Phase Change Materials, PCMs) στον όγκο ενός δομικού στοιχείου αποτελεί μία σύγχρονη τεχνική προκειμένου να αυξηθεί η θερμική του μάζα. Η ενέργεια που απορροφάται (ή εκλύεται) κατά την διάρκεια της μετάβασής του PCM από την στερεή στην υγρή φάση (ή και αντίθετα) συντελεί στην μείωση των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας στο εσωτερικό ενός κτιρίου. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας για σκοπούς ψύξης και θέρμανσης. Πρόσφατα έγιναν εμπορικά διαθέσιμες γυψοσανίδες με ενσωματωμένα PCM, παραφίνες μορφοποιημένες μέσα σε σφαιρίδια, κλίμακας χιλιοστών, κατασκευασμένες από πολυμερή υλικά. Η μετάβαση τους από την στερεή στην υγρή φάση συμβαίνει σε τυπικό θερμοκρασιακό εύρος που συναντάται σε εσωτερικούς χώρους κτιρίων (20-26°C). Παρόλα αυτά, στην περίπτωση μιας φωτιάς, τα δομικά υλικά μπορεί να εκτεθούν σε μακράν ψηλότερες θερμοκρασίες (πάνω από 800°C). Σε μια τέτοια περίπτωση, οι παραφίνες, εξατμίζονται και αν τα μικροσφαιρίδια που τις περιβάλλουν αστοχήσουν, οι παραγόμενοι ατμοί παραφίνης (οι οποίες έχουν σημείο βρασμού κάτω από τους 350°C) θα απελευθερωθούν μέσα από την πορώδη δομή της γυψοσανίδας. Ειδικά στην περίπτωση που κατευθυνθούν προς την εστία της φωτιάς, είναι πολύ πιθανό να αναφλεγούν και κατά συνέπεια να επηρεάσουν δυσμενώς τα χαρακτηριστικά πυρασφάλειας του κτιρίου.

Μελετάται, λοιπόν, με λεπτομερή υπολογιστική προσομοίωση, η επίδραση της προσθήκης PCM σε κτίριο κατασκευασμένο από γυψοσανίδες το οποίο εκτίθεται σε συνθήκες φωτιάς, με ιδιαίτερη έμφαση στο ροϊκό και θερμικό πεδίο που αναπτύσσεται. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιείται ο κώδικας Fire Dynamics Simulator (FDS) για την πρόλεξη της τυρβώδους, πολυσυστατικής και αντιδρώσας ροής που δημιουργείται μέσα σε ένα πρότυπο κτίσμα στην Αμφιλοχία.

Το υπό μελέτη κτίριο κατασκευάσθηκε με μια διάταξη χαλύβδινου σκελετού σε συνδυασμό με συστήματα ξηράς δόμησης. Η εσωτερική και εξωτερική τοιχοποιία αποτελείται από πληθώρα υλικών όπως γυψοσανίδα, τσιμεντοσανίδα και μονωτικά υλικά. Όταν η γυψοσανίδα εκτεθεί σε υψηλό θερμοκρασιακό περιβάλλον, τα δεσμευμένα στην κρυσταλλική της δομή μόρια του νερού, που απελευθερώνονται, μεταφέρονται δια μέσω της γυψοσανίδας απορροφώντας ενέργεια και μειώνοντας έτσι την μέση θερμοκρασία του τοίχου. Η παραπάνω διαδικασία είναι γνωστό ότι ενισχύει την πυραντοχή της κατασκευής. Προκειμένου να περιγραφεί με ακρίβεια η θερμική συμπεριφορά της κατασκευής, χρησιμοποιήθηκαν οι πραγματικές θερμο-φυσικές ιδιότητες των υλικών κατασκευής και επίπλωσης του κτιρίου. Η διώροφη κατοικία που προσομοιώθηκε θεωρήθηκε πλήρως επιπλωμένη σύμφωνα με τα πρότυπα μιας ελληνικής κατοικίας. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές μελέτες όσον αφορά στα σενάρια εξαερισμού αλλά και στις διαφορετικές τεχνικές δόμησης με γνώμονα πάντα την πυρασφάλεια του κτιρίου. Παρουσιάζεται λοιπόν η χρονική εξέλιξη μιας πληθώρας παραμέτρων όπως για παράδειγμα η ταχύτητα του αέρα, η θερμοκρασία των τοίχων, η συγκέντρωση των προϊόντων της καύσης και η κίνηση του καπνού για όλο το χώρο που αντιπροσωπεύει το εσωτερικό του κτιρίου. Χρησιμοποιούνται μάλιστα οι προλέξεις της ταχύτητας των αερίων και η θερμοκρασία τους προκειμένου να εκτιμηθεί η ροή θερμότητας στην οποία εκτίθεται το κάθε στοιχείο της κατασκευής. Οι προλέξεις της θερμοκρασίας των τοίχων επιτρέπουν την αξιολόγηση της μεθόδου κατασκευής με χρήση χαλύβδινου σκελετού και συστημάτων ξηράς δόμησης σε σχέση με την πυραντοχή τους.

Η θερμοκρασιακή διακύμανση των θερμο-φυσικών ιδιοτήτων για τα διάφορα υλικά λαμβάνεται υπόψιν μέσω της χρήσης μετρήσεων Διαφορικής Θερμιδομετρίας Σάρωσης (Differential Scanning Calorimetry, DSC). Μοντελοποιείται η εξάτμιση της παραφίνης και οι παραγόμενοι ατμοί της εισάγονται στο ροϊκό πεδίο σαν επιπλέον πηγή αέριου καυσίμου. Η εγκυρότητα του κώδικα CFD ελέγχεται χρησιμοποιώντας διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα από μια φωτιά επτανίου μέσα σε ένα πρότυπο δωμάτιο ISO9705 ¹.

¹Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε κατά σύμβαση το αμερικάνικο σύστημα γραφής των αριθμών, για λόγους συμβατότητας με γραφήματα που χρησιμοποιήθηκαν από ξενόγλωσσες μελέτες.

Abstract

A contemporary technique to increase the thermal mass of a building element is to incorporate a Phase Change Material (PCM) into its volume; in this case, the thermal energy absorbed (or released) during the PCM's transition from solid to liquid phase (or vice-versa) results in a reduction of the indoor temperature fluctuations, thus affecting favourably the required total energy consumption for heating and air-conditioning purposes. Recently, gypsum plasterboards incorporating paraffin-based PCMs, encapsulated in millimetre scale polymer spheres, have become commercially available. The solid-liquid phase change occurs in the temperature range typically found in indoor environments (20-26°C). However, in the event of a fire, building materials may be exposed to substantially higher temperatures (over 800°C). In this case, the paraffins, exhibiting boiling points below 350°C, are expected to evaporate; if the encapsulation spheres fail, the produced paraffin vapours will be released to the porous structure of the gypsum plasterboard and, through mass diffusion, will emerge to the fire region, where they will ignite, thus adversely affecting the fire resistance characteristics of the building.

The effect of PCM addition is investigated by performing detailed numerical simulations of the developing flow and thermal fields in a building constructed using gypsum plasterboards and exposed to fire conditions. The FDS code is used to simulate the turbulent, multicomponent and reactive flow-field developing inside a prototype building in Amfilohia.

The examined building is constructed using a structural steel frame configuration with dry-wall systems. The internal and external walls consist of various layers of gypsumboard, cementboard and insulating materials. When a gypsumboard is subjected to a high temperature environment, water molecules bound in its crystal lattice are released and transferred through the board, absorbing energy and thus reducing the mean wall temperature; this process is known to enhance the fire resistance characteristics of the structure. The actual thermo-physical properties of all the construction and furniture house materials are taken into account, in order to accurately describe their thermal behaviour. The simu-

lated two-storey building is considered to be completely furnished according to a standard residential configuration. The fire resistance behaviour of the building is further evaluated by considering two realistic alternative ventilation scenarios and three different technique methods. Numerical predictions of the temporal evolution of various parameters such as gas velocity, gas and wall temperatures, toxic gas concentrations and smoke movement are obtained for the entire domain that represents the interior of the building. Gas velocity and temperature predictions are used to visualize the developing flow-field and to estimate the heat flux that each building element is exposed to. Predicted wall temperatures allow the assessment of the steel frame – dry-wall construction technique in terms of fire resistance.

The temperature variation of the various materials' thermo-physical properties is taken into account by using information obtained by means of Differential Scanning Calorimetry. A conjugate heat transfer model is used to calculate the dynamically varying wall temperature; the paraffin evaporation process is modelled and the produced vapours are introduced to the flow-field as an additional gaseous "fuel" source. The CFD code is validated by utilizing available experimental data, obtained in a standard ISO 9705 fire room exposed to an n-heptane pool fire.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	1
1.1	Φωτιές σε κτίρια	1
1.2	Φωτιά στην κουζίνα	2
1.3	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	4
1.3.1	Υπολογιστικά Μοντέλα	4
1.3.2	Υπολογιστικοί Κώδικες Προσομοίωσης Φωτιάς	7
1.3.3	Υπολογιστική Προσομοίωση Φωτιάς σε Κτίρια	11
2	Μαθηματική Θεμελίωση	19
2.1	Κώδικας Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής FDS	19
2.1.1	Ο ρόλος της Μεθόδου Προσομοίωσης Μεγάλων Δινών στην μοντελοποίηση της τύρβης	27
2.2	Μοντέλο Κλάσματος Μείγματος	30
2.3	Η εξίσωση αγωγής θερμότητας στο στερεό	32
2.3.1	Αριθμητικό μοντέλο	33
2.3.2	Ροή θερμότητας λόγω ακτινοβολίας σε στερεά	35
2.3.3	Ροή θερμότητας λόγω συναγωγής σε στερεά	36
2.4	Θερμικές ιδιότητες δομικών υλικών	37
2.5	Μοντέλο πυρόλυσης στερεών υλικών	38

2.5.1	Προκαθορισμένος ρυθμός έκλυσης θερμότητας	39
2.5.2	Στέρεα καύσιμα	39
2.5.3	Μοντέλο υπολογισμού ρυθμού πυρόλυσης	42
	Ο μηχανισμός αντίδρασης	43
	Ο ρυθμός αντίδρασης	43
	Θερμότητα αντίδρασης	46
2.5.4	Υγρά καύσιμα	46
2.6	Διαδικασία Επίλυσης	47
2.7	Επαλήθευση προλέξεων	49
3	Συστήματα ξηράς δόμησης	53
3.1	Συμπεριφορά γυψοσανίδας σε υψηλές θερμοκρασίες	55
3.1.1	Εισαγωγή	55
3.1.2	Γυψοσανίδα	60
3.1.3	Θερμοχημικές ιδιότητες της γυψοσανίδας	61
3.1.4	Θερμικές ιδιότητες	62
	Πυκνότητα	62
	Θερμική αγωγιμότητα	63
	Ειδική θερμοχωρητικότητα	63
3.2	Πειραματικές μετρήσεις	64
3.2.1	Μάζα δείγματος	68
3.2.2	Ρυθμός θέρμανσης	68
3.2.3	Μέτρηση της θερμοχωρητικότητας	69
3.3	Υλικά αλλαγής φάσης	71
3.4	Μετρήσεις DSC σε γυψοσανίδες με ενσωματωμένα PCM	75

3.5	Θερμοβαρμετρική ανάλυση	80
4	Δομικά Υλικά	83
4.1	Προσομοίωση Δομικών Υλικών και Λοιπών Υλικών	83
4.1.1	Καύση ξύλου και πυρόλυση	84
4.1.2	Θέρμο-φυσικές ιδιότητες υλικών δόμησης	86
4.1.3	Κινητικές παράμετροι της αντίδρασης αφυδάτωσης δύο βημάτων της γυψοσανίδας και φυσικές ιδιότητες	89
5	Υπολογιστική προσομοίωση φωτιάς σε δωμάτιο ISO9705	95
5.1	Περιγραφή της Γεωμετρίας	95
5.2	Στοιχεία Υπολογιστικής Προσομοίωσης	99
5.2.1	Υπολογιστικό πλέγμα	99
5.2.2	Αρχικές και οριακές συνθήκες	99
5.3	Πειραματικά Δεδομένα και Προλέξεις Θερμοκρασίας, O ₂ , CO ₂ , CO101	
5.4	Παραμετρική Μελέτη	109
5.4.1	Επίδραση της τεχνικής δόμησης	109
5.4.2	Περιγραφή ροϊκού πεδίου	112
5.4.3	Περιγραφή πεδίων θερμοκρασίας και συγκεντρώσεων	116
5.4.4	Προλέξεις θερμοκρασίας στους τοίχους	122
5.4.5	Προλέξεις O ₂ , CO ₂ και CO	129
5.5	Αξιολόγηση αποτελεσμάτων	131
6	Υπολογιστική προσομοίωση φωτιάς σε πρότυπη κατοικία	137
6.1	Εισαγωγή	138
6.1.1	Περιγραφή της γεωμετρίας	138
6.2	Λεπτομέρειες Υπολογιστικής Προσομοίωσης	140

6.2.1	Υπολογιστικό πλέγμα	140
6.2.2	Αρχικές και οριακές συνθήκες	141
6.3	Υπολογιστική Προσομοίωση	144
6.3.1	Παρουσίαση του Ροϊκού Πεδίου	144
6.3.2	Παρουσίαση του Θερμοκρασιακού Πεδίου	149
6.4	Παραμετρικές μελέτες	159
6.4.1	Επίδραση της τεχνικής δόμησης	161
6.4.2	Επίδραση του αερισμού	165
6.4.3	Όρια Επικινδυνότητας	169
	Παρουσίαση Διασποράς CO, CO ₂ και O ₂	173
	Επιδράσεις του CO στον ανθρώπινο οργανισμό	182
6.5	Αξιολόγηση αποτελεσμάτων	189
7	Συμπεράσματα	191

Κατάλογος σχημάτων

1.1	Οικιακές πυρκαγιές που ξεκίνησαν από κουζίνες σε σχέση με τον τύπο του περιστατικού και την έκταση της ζημιάς για την χρονική περίοδο 1999-2003 [Ahrens et al., 2007].	3
1.2	Ποσοστό των οικιακών πυρκαγιών που ξεκίνησαν σε κουζίνες σε σχέση με τον τύπο του εξοπλισμού κουζίνας για την χρονική περίοδο 1999-2003 [Ahrens et al., 2007].	3
1.3	Τροφές που αναφλέγονται από μια μελέτη φωτιάς σε οικιακό εξοπλισμό που διεξάχθηκε από την U.S. Consumer Product Safety Commission [Ahrens et al., 2007].	4
1.4	Μοντέλα πεδίου.	6
1.5	Γεωμετρική απεικόνιση του δωματίου στην μελέτη [Merci and Maele, 2008].	12
1.6	Γεωμετρική απεικόνιση του δωματίου και το αντίστοιχο υπολογιστικό πλέγμα στην μελέτη [Hasib et al., 2007].	12
1.7	Γεωμετρική απεικόνιση του δωματίου και το αντίστοιχο υπολογιστικό πλέγμα στην μελέτη [Rein et al., 2006].	13
1.8	Γεωμετρική απεικόνιση του διαμερίσματος στην μελέτη [Yeoh et al., 2003a].	14
1.9	Γεωμετρική απεικόνιση του δωματίου στην μελέτη [Fu and Hadjisophocleous, 2000].	14
1.10	Γεωμετρική απεικόνιση του διαδρόμου και δωματίου στην μελέτη [Shigunov, 2005].	15

1.11	Γεωμετρική απεικόνιση του διαμερίσματος στην μελέτη [Yeoh et al., 2003b].	16
1.12	Απεικόνιση του κτιρίου στην μελέτη [Su et al., 2008].	16
2.1	Οι τρεις διαφορετικές μεθοδολογίες προσομοίωσης της τύρβης αναπαριστώμενες στο ενεργειακό φάσμα Kolmogorov όπου η ενέργεια $E(k)$ σχετίζεται με τον κυματαριθμό k της κάθε μεταβλητής [Gravemeier, 2007].	29
2.2	Απλή αναπαράσταση του μοντέλου πυρόλυσης. Η μπλε καμπύλη απεικονίζει την κανονικοποιημένη μάζα, $Y = \rho_s / \rho_{s0}$, ενός στερεού υλικού το οποίο θερμαίνεται με ρυθμό 5 K/min. Η πράσινη καμπύλη απεικονίζει τον ρυθμό της αντίδρασης, $-dY/dt$. Η εξίσωση που περιγράφει την αντίδραση φαίνεται στην δεξιά πλευρά. Οι παράμετροι T_p , r_p , και ν_s απεικονίζουν την θερμοκρασία αναφοράς, τον ρυθμό αντίδρασης στις συνθήκες αναφοράς και το βαθμό παραγωγής του Υπολοίπου. Έτσι χρησιμοποιώντας τα παραπάνω μεγέθη μπορούν να υπολογιστούν οι κινητικές παράμετροι A και E	45
2.3	Γραφική απεικόνιση της συνδυασμένης αβεβαιότητας	50
3.1	Εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για τις δοκιμές της ακαυστότητας και του προσδιορισμού της θερμαντικής αξίας.	58
3.2	Εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για τις δοκιμές της προσβολής από μεμονωμένο καιγόμενο αντικείμενο (SBI-test).	58
3.3	Εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για τις δοκιμές αναφλεξιμότητας και της συμπεριφοράς δαπέδων σε καύση.	58
3.4	Πυκνότητα συναρτήσει της θερμοκρασίας της γυψοσανίδας όπου και φαίνονται τα δύο βήματα της αφυδάτωσης [Wakili et al., 2007].	62
3.5	Θερμική αγωγιμότητα συναρτήσει της θερμοκρασίας της γυψοσανίδας όπου και φαίνονται τα δύο βήματα της αφυδάτωσης [Wakili et al., 2007].	63
3.6	Όργανο διαφορικής θερμιδομετρίας σάρωσης της εταιρίας METTLER TOLEDO.	65

3.7	Θερμοσυστοιχία συνδεσμολογίας τεθλασμένου αστέρα στην βάση του σημείου τοποθέτησης του δείγματος και του σημείου αναφοράς.	65
3.8	Αισθητήρες και διάταξη θερμαντήρων στο όργανο διαφορικής θερμιδομετρίας σάρωσης.	66
3.9	Γραφική απεικόνιση της μετρούμενης ροής θερμότητας και η θερμοχωρητικότητα που υπολογίζεται.	70
3.10	Ενσωμάτωση υλικών αλλαγής φάσης σε συστήματα ξηράς δόμησης.	72
3.11	Κατηγοριοποίηση των υλικών αλλαγής φάσης [Sharma et al., 2009].	73
3.12	Πυράντοχες μικροκάψουλες PCM διαμέτρου 15-20 μ m [Kosny et al., 2009].	74
3.13	Καμπύλη θερμικής ανάλυσης για δείγμα γυψοσανίδας με PCM 10 mg σε ρυθμό θέρμανσης 0.5 βαθμούς ανά λεπτό.	75
3.14	Καμπύλη θερμικής ανάλυσης για δείγμα γυψοσανίδας με PCM 6.82 mg σε ρυθμό θέρμανσης 0.5 °C/min.	77
3.15	Καμπύλη θερμικής ανάλυσης για δείγμα γυψοσανίδας με PCM 14.11 mg σε ρυθμό θέρμανσης 2 °C/min.	77
3.16	Καμπύλη θερμικής ανάλυσης για δείγμα γυψοσανίδας με PCM 7.05 mg σε ρυθμό θέρμανσης 10 °C/min.	78
3.17	Καμπύλη θερμικής ανάλυσης για δείγμα γυψοσανίδας με PCM 5.21 mg σε ρυθμό θέρμανσης 40 °C/min.	78
3.18	Καμπύλη θερμικής ανάλυσης για δείγμα γυψοσανίδας με PCM 5.3 mg σε ρυθμό θέρμανσης 80 °C/min.	79
3.19	Καμπύλες θερμικής ανάλυσης για δείγμα γυψοσανίδας με PCM σε ρυθμούς θέρμανσης 2, 10, 40 και 80 °C/min.	80
3.20	Καμπύλη θερμοβαρυμετρικής ανάλυσης για δείγμα απλής γυψοσανίδας (GB), γυψοσανίδας Smartboard (SB) και Micronal DS5039X (PCM) σε ρυθμό θέρμανσης 80 °C/min.	81
4.1	Φυσικές ιδιότητες του αλουμινίου και του τούβλου συναρτήσει της θερμοκρασίας.	86

4.2	Φυσικές ιδιότητες του τσιμέντου και του πετροβάμβακα συναρτήσει της θερμοκρασίας.	86
4.3	Θερμική αγωγιμότητα της γυψοσανίδας συναρτήσει της θερμοκρασίας.	90
4.4	Ειδική θερμοχωρητικότητα της γυψοσανίδας συναρτήσει της θερμοκρασίας [Ang and Wang, 2009].	91
4.5	Συγκέντρωση μάζας χημικών συστατικών της γυψοσανίδας συναρτήσει της θερμοκρασίας.	92
4.6	Τα δύο βήματα της αντίδρασης αφυδάτωσης της γυψοσανίδας συναρτήσει της θερμοκρασίας.	93
4.7	Πυκνότητα γυψοσανίδας συναρτήσει της θερμοκρασίας.	93
5.1	Απεικόνιση της γεωμετρίας του πρότυπου δωματίου ISO9705. . .	97
5.2	Ρυθμός έκλυσης θερμότητας για κάθε ένα από τα τέσσερα σενάρια και για καθε μια από τις συνθήκες αερισμού.	98
5.3	Πειραματικά δεδομένα και προλέξεις θερμοκρασίας στην θέση μέτρησης E (πάνω εικόνα) και στην θέση Π (κάτω εικόνα).	103
5.4	Πειραματικά δεδομένα και προλέξεις συγκέντρωσης O ₂ στην θέση μέτρησης E (πάνω εικόνα) και στην θέση Π (κάτω εικόνα).	104
5.5	Πειραματικά δεδομένα και προλέξεις συγκέντρωσης CO ₂ στην θέση μέτρησης E (πάνω εικόνα) και στην θέση Π (κάτω εικόνα). . .	105
5.6	Πειραματικά δεδομένα και προλέξεις συγκέντρωσης CO στην θέση μέτρησης E (πάνω εικόνα) και στην θέση Π (κάτω εικόνα).	106
5.7	Απεικόνιση της γεωμετρίας του πρότυπου δωματίου ISO9705 και τοποθέτηση μετρητικών οργάνων.	109
5.8	Απεικόνιση της διαστρωμάτωσης των θερμών αερίων και της αιθάλης που εξέρχονται από δωμάτιο, πείραμα που διεξάχθηκε στο NIST.	110
5.9	Απεικόνιση του ροϊκού πεδίου σε μήκος 1.3 m τα πρώτα 1 s, 2 s, 3 s, 4 s, 8 s, 30 s, 1 min και 5 min της προσομοίωσης.	114
5.10	Γραφική απεικόνιση της Εξίσωσης (??).	115

- 5.11 Μεταβολή του χρονικού βήματος της προσομοίωσης συναρτήσει του χρόνου. 115
- 5.12 Απεικόνιση του θερμοκρασιακού πεδίου σε μήκος 1.3 m τα πρώτα 1 s, 2 s, 3 s, 4 s, 8 s, 30 s, 1 min, 2 min, 3 min, 4 min και 5 min της προσομοίωσης, για την περίπτωση της απλής γυψοσανίδας. . . . 118
- 5.13 Απεικόνιση του θερμοκρασιακού πεδίου σε μήκος 1.3 m τα πρώτα 1 s, 2 s, 3 s, 4 s, 8 s, 30 s, 1 min, 2 min, 3 min, 4 min και 5 min της προσομοίωσης, για την περίπτωση της γυψοσανίδας με PCM. . . . 119
- 5.14 Απεικόνιση της συγκέντρωσης κ.ο. υδρατμού σε μήκος 1.3 m τα πρώτα 1 s, 2 s, 3 s, 4 s, 8 s, 30 s, 1 min, 2 min, 3 min, 4 min και 5 min της προσομοίωσης, για την περίπτωση της απλής γυψοσανίδας. . . 120
- 5.15 Απεικόνιση της συγκέντρωσης κ.ο. υδρατμού σε μήκος 1.3 m τα πρώτα 1 s, 2 s, 3 s, 4 s, 8 s, 30 s, 1 min, 2 min, 3 min, 4 min και 5 min της προσομοίωσης, για την περίπτωση της γυψοσανίδας με PCM. 121
- 5.16 Προλέξεις θερμοκρασίας αέρα (πάνω εικόνα), θερμοκρασίας τοίχου (ΤΟΙΧΟΣ 1) στην εκτεθειμένη στην φωτιά πλευρά (αριστερή εικόνα) και θερμοκρασίας της πίσω πλευράς του τοίχου (δεξιά εικόνα) για απλή γυψοσανίδα και γυψοσανίδα PCM σε ύψος 1.2 m. 122
- 5.17 Προλέξεις θερμοκρασίας αέρα (πάνω εικόνα), θερμοκρασίας τοίχου (ΤΟΙΧΟΣ 2) στην εκτεθειμένη στην φωτιά πλευρά (αριστερή εικόνα) και θερμοκρασίας της πίσω πλευράς του τοίχου (δεξιά εικόνα) για απλή γυψοσανίδα και γυψοσανίδα με PCM σε ύψος 1.2 m. 124
- 5.18 Προλέξεις θερμοκρασίας αέρα (πάνω εικόνα), θερμοκρασίας τοίχου (ΤΟΙΧΟΣ 3) στην εκτεθειμένη στην φωτιά πλευρά (αριστερή εικόνα) και θερμοκρασίας της πίσω πλευράς του τοίχου (δεξιά εικόνα) για απλή γυψοσανίδα και γυψοσανίδα με PCM σε ύψος 1.2 m. 125
- 5.19 Προλέξεις θερμοκρασίας αέρα (πάνω εικόνα), θερμοκρασίας τοίχου (ΤΟΙΧΟΣ 4) στην εκτεθειμένη στην φωτιά πλευρά (αριστερή εικόνα) και θερμοκρασίας της πίσω πλευράς του τοίχου (δεξιά εικόνα) για απλή γυψοσανίδα και γυψοσανίδα με PCM σε ύψος 1.2 m. 126

- 5.20 Προλέξεις θερμοκρασίας αέρα (πάνω εικόνα), θερμοκρασίας τοίχου (ΤΟΙΧΟΣ 5) στην εκτεθειμένη στην φωτιά πλευρά (αριστερή εικόνα) και θερμοκρασίας της πίσω πλευράς του τοίχου (δεξιά εικόνα) για απλή γυψοσανίδα και γυψοσανίδα με PCM σε ύψος 1.2 m. 127
- 5.21 Προλέξεις θερμοκρασίας τοίχου (ΤΟΙΧΟΣ 1) στην εκτεθειμένη στην φωτιά πλευρά (αριστερή εικόνα) και θερμοκρασίας της πίσω πλευράς του τοίχου (δεξιά εικόνα) για απλή γυψοσανίδα και γυψοσανίδα με PCM σε ύψος 0.6 m. 128
- 5.22 Προλέξεις θερμοκρασίας τοίχου (ΤΟΙΧΟΣ 1) στην εκτεθειμένη στην φωτιά πλευρά (αριστερή εικόνα) και θερμοκρασίας της πίσω πλευράς του τοίχου (δεξιά εικόνα) για απλή γυψοσανίδα και γυψοσανίδα με PCM σε ύψος 1.8m. 129
- 5.23 Προλέξεις θερμοκρασίας τοίχου στο κέντρο της οροφής στην εκτεθειμένη στην φωτιά πλευρά (αριστερή εικόνα) και θερμοκρασίας της πίσω πλευράς του τοίχου (δεξιά εικόνα) για απλή γυψοσανίδα και γυψοσανίδα με PCM. 129
- 5.24 Προλέξεις συγκέντρωσης O_2 στην θέση μέτρησης E (αριστερή εικόνα) και στην θέση Π (δεξιά εικόνα) για απλή γυψοσανίδα και γυψοσανίδα με PCM. 130
- 5.25 Προλέξεις συγκέντρωσης CO_2 στην θέση μέτρησης E (αριστερή εικόνα) και στην θέση Π (δεξιά εικόνα) για απλή γυψοσανίδα και γυψοσανίδα με PCM. 130
- 5.26 Προλέξεις συγκέντρωσης CO στην θέση μέτρησης E (αριστερή εικόνα) και στην θέση Π (δεξιά εικόνα) για απλή γυψοσανίδα και γυψοσανίδα με PCM. 131
- 5.27 Προλέξεις θερμοκρασίας της εκτεθειμένης πλευράς του Τοίχου 2 και απεικόνιση της φωτιάς για την περίπτωση της απλής γυψοσανίδας (δεξιά) και γυψοσανίδας με PCM (αριστερά), για το 1, 2, 3, 4 και 5 min. 133
- 5.28 Προλέξεις θερμοκρασίας της μη εκτεθειμένης στην φωτιά πλευρά των Τοίχων 4-5 για την περίπτωση της απλής γυψοσανίδας (δεξιά) και γυψοσανίδας με PCM (αριστερά), για το 1, 2, 3, 4 και 5 min. 134

5.29	Κατανομή συγκέντρωσης αέριας παραφίνης στην περίπτωση της γυψοσανίδας με PCM, για το 30s, 31s, 32s, 33s, 1, 1.5, 2, 3, 4 και 5min.	135
6.1	Φωτορεαλιστική και πραγματική απεικόνιση της πρότυπης κατοικίας στην Αμφιλοχία.	138
6.2	Κάτοψη και βασικές διαστάσεις της πρότυπης κατοικίας στην Αμφιλοχία.	139
6.3	Απεικόνιση της γεωμετρίας στον FDS και της εσωτερικής διαρρύθμισης της κατοικίας.	139
6.4	Υπολογιστικό πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση φωτιάς στην πρότυπη κατοικία στην Αμφιλοχία.	140
6.5	Επιφάνεια της ηλεκτρικής κουζίνας στην κουζίνα όπου επιλέχθηκε για την προσομοίωση της φωτιάς λόγω ανάφλεξης μαγειρικού λαδιού σε τηγάνι και κάτοψη της πρότυπης κατοικίας.	142
6.6	Τομή κατά μήκος του εξωτερικού τοίχου.	142
6.7	Τομή κατά μήκος του εσωτερικού τοίχου.	143
6.8	Τομή κατά μήκος του δαπέδου του ισογείου.	143
6.9	Διανυσματική απεικόνιση του ροϊκού πεδίου της Περίπτωσης Γ1,σε μήκος 5.9 m τα πρώτα 30 δευτερόλεπτα της προσομοίωσης (ανά πέντε δευτερόλεπτα).	146
6.10	Διανυσματική απεικόνιση του ροϊκού πεδίου της Περίπτωσης Γ1, σε μήκος 5.9 m τα πρώτα 8 λεπτά της προσομοίωσης (ανά ένα λεπτό).	147
6.11	Διανυσματική απεικόνιση του ροϊκού πεδίου της Περίπτωσης Γ1, κατά μήκος της κουζίνας τα πρώτα 8 λεπτά της προσομοίωσης (ανά ένα λεπτό).	148
6.12	Απεικόνιση του θερμοκρασιακού πεδίου σε μήκος 5.9 m τα πρώτα 8 λεπτά της προσομοίωσης (ανά ένα λεπτό).	150
6.13	Απεικόνιση του θερμοκρασιακού πεδίου σε πλάτος 11.9 m τα πρώτα 8 λεπτά της προσομοίωσης (ανά ένα λεπτό).	151

- 6.14 Θερμοκρασία αέρα στην μέση της κουζίνας, σε διαφορετικά ύψη, συναρτήσει του χρόνου (Περίπτωση Γ1). 152
- 6.15 Προλέξεις της θερμοκρασίας επιφανείας των τοίχων της κουζίνας τα πρώτα 8 λεπτά της προσομοίωσης (ανά ένα λεπτό). 154
- 6.16 Θερμοκρασία εξωτερικού νότιου τοίχου της κουζίνας, για την εσωτερική και εξωτερική διάταξη του, συναρτήσει του χρόνου (Περίπτωση Γ1). 155
- 6.17 Προλέξεις του ρυθμού καύσης τα πρώτα 40 δευτερόλεπτα της προσομοίωσης (ανά 5 s). 157
- 6.18 Προλέξεις του ρυθμού καύσης τα πρώτα 8 λεπτά της προσομοίωσης (ανά ένα λεπτό). 158
- 6.19 Θερμοκρασία εξωτερικού νότιου τοίχου της κουζίνας, για την εσωτερική και εξωτερική διάταξη του, συναρτήσει του χρόνου (Περίπτωση Γ1 και Γ3). 162
- 6.20 Θερμοκρασία αέρα στο μέσο της κουζίνας σε ύψος 1.6m, συναρτήσει του χρόνου (Περίπτωση Γ1 και Γ3). 162
- 6.21 Θερμοκρασία εξωτερικού νότιου τοίχου της κουζίνας, για την εσωτερική και εξωτερική διάταξη του, συναρτήσει του χρόνου (Περίπτωση Γ2 και Γ4). 163
- 6.22 Θερμοκρασία εξωτερικού νότιου τοίχου της κουζίνας, για την εσωτερική και εξωτερική διάταξη του, συναρτήσει του χρόνου (Περίπτωση Γ1 και Τ1). 164
- 6.23 Θερμοκρασία αέρα στο μέσο της κουζίνας σε ύψος 1.6m, συναρτήσει του χρόνου (Περίπτωση Γ1 και Τ1). 164
- 6.24 Θερμοκρασία αέρα στο μέσο της κουζίνας σε ύψος 1.6m, συναρτήσει του χρόνου (Περίπτωση Γ1 και Γ2). 166
- 6.25 Θερμοκρασία εξωτερικού νότιου τοίχου της κουζίνας, για την εσωτερική και εξωτερική διάταξη του, συναρτήσει του χρόνου (Περίπτωση Γ1 και Γ2). 166
- 6.26 Διανυσματική απεικόνιση του ροϊκού πεδίου της Περίπτωσης Γ2, σε μήκος 5.9 m τα πρώτα 30 δευτερόλεπτα της προσομοίωσης (ανά πέντε δευτερόλεπτα). 167

- 6.27 Διανυσματική απεικόνιση του ροϊκού πεδίου της Περίπτωσης Γ2, σε μήκος 5.9 m τα πρώτα 8 λεπτά της προσομοίωσης (ανά ένα λεπτό). 168
- 6.28 Σχηματική απεικόνιση των παραγόντων που εμπλέκονται στην αξιολόγηση του κινδύνου όσον αφορά στην τοξικότητα μιας φωτιάς [Stec and Hull, 2011]. 169
- 6.29 Χρόνοι ανοχής για την έκθεση σε θερμό αέρα, [DiNenno et al., 2002]. 170
- 6.30 Θερμοκρασία αέρα στο μέσο της κουζίνας σε ύψος 1.6m, συναρτήσει του χρόνου (Περίπτωση Γ1, Γ2, Γ3, και Γ4). 171
- 6.31 Προλέξεις της συγκέντρωσης κ.ο. CO₂ σε τρία δωμάτια της κατοικίας σε ύψος 1.6m (Περίπτωση Γ1). 173
- 6.32 Απεικόνιση της περιεκτικότητας O₂ σε πλάτος 11.9 m τα πρώτα 8 λεπτά της προσομοίωσης (ανά ένα λεπτό), Περίπτωση Γ1. . . . 175
- 6.33 Απεικόνιση της περιεκτικότητας O₂ σε μήκος 5.9 m τα πρώτα 8 λεπτά της προσομοίωσης (ανά ένα λεπτό), Περίπτωση Γ1. 176
- 6.34 Προλέξεις της συγκέντρωσης κ.ο. O₂ στην κουζίνα της κατοικίας σε ύψος 1.6m (Περίπτωση Γ1, Γ2, Γ3 και Γ4). 177
- 6.35 Προλέξεις της συγκέντρωσης κ.ο. O₂ στο καθιστικό της κατοικίας σε ύψος 1.6m (Περίπτωση Γ1, Γ2, Γ3 και Γ4). 177
- 6.36 Προλέξεις της συγκέντρωσης κ.ο. CO₂ σε τρία δωμάτια της κατοικίας σε ύψος 1.6m (Περίπτωση Γ1). 178
- 6.37 Απεικόνιση της περιεκτικότητας CO₂ σε πλάτος 11.9 m τα πρώτα 6 λεπτά της προσομοίωσης (ανά ένα λεπτό), Περίπτωση Γ1. . . . 179
- 6.38 Απεικόνιση της περιεκτικότητας CO₂ σε μήκος 5.9 m τα πρώτα 8 λεπτά της προσομοίωσης (ανά ένα λεπτό), Περίπτωση Γ1. 180
- 6.39 Προλέξεις της συγκέντρωσης κ.ο. CO₂ στην κουζίνα της κατοικίας σε ύψος 1.6m (Περίπτωση Γ1, Γ2, Γ3 και Γ4). 181
- 6.40 Προλέξεις της συγκέντρωσης κ.ο. CO₂ στο καθιστικό της κατοικίας σε ύψος 1.6m (Περίπτωση Γ1, Γ2, Γ3 και Γ4). 181
- 6.41 Περιεκτικότητα COHb στο αίμα 87 θυμάτων πυρκαγιάς. 183

- 6.42 Εξάρτηση του χρόνου μέχρι την αδιαθεσία συναρτήσει του ρυθμού αναπνοής. 184
- 6.43 Προλέξεις της συγκέντρωσης κ.ο. CO σε τρία δωμάτια της κατοικίας σε ύψος 1.6m (Περίπτωση Γ1). 185
- 6.44 Απεικόνιση της περιεκτικότητας CO σε πλάτος 11.9 m τα πρώτα 8 λεπτά της προσομοίωσης (ανά ένα λεπτό), Περίπτωση Γ1. . . . 186
- 6.45 Απεικόνιση της περιεκτικότητας CO σε μήκος 5.9 m τα πρώτα 8 λεπτά της προσομοίωσης (ανά ένα λεπτό), Περίπτωση Γ1. 187
- 6.46 Προλέξεις της συγκέντρωσης κ.ο. CO στην κουζίνα της κατοικίας σε ύψος 1.6m (Περίπτωση Γ1, Γ2, Γ3 και Γ4). 188
- 6.47 Προλέξεις της συγκέντρωσης κ.ο. CO στο καθιστικό της κατοικίας σε ύψος 1.6m (Περίπτωση Γ1, Γ2, Γ3 και Γ4). 188

Κατάλογος πινάκων

1.1	Υπολογιστικοί κώδικες που χρησιμοποιούν μοντέλα πεδίου [Olenick and Carpenter, 2003]	10
3.1	Κλάσεις πυραντοχής για τα υλικά κατασκευής.	59
4.1	Χρήση κινητικών παραμέτρων στην αντίδραση πυρόλυσης του ξύλου.	84
4.2	Θέρμο-φυσικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση.	87
4.3	Βιβλιογραφική ανασκόπηση συμπεριφοράς υαλοπινάκων σε συνθήκες φωτιάς	88
4.4	Χρήση κινητικών παραμέτρων στην αντίδραση αφυδάτωσης δύο βημάτων της γυψοσανίδας.	89
5.1	Χαρακτηριστικά των τεσσάρων σεναρίων φωτιάς που πραγματοποιήθηκαν από τους [Hwang et al., 2010].	98
5.2	Θερμική αγωγιμότητα της πυράντοχης κουβέρτας k-Lite HTZ.	100
5.3	Θερμοχημικές ιδιότητες επτανίου, που χρησιμοποιήθηκε ως καύσιμο στις προσομοιώσεις [Turns, 2000].	100
5.4	Πειραματικές τιμές και προλέξεις των μέσω τιμών της θερμοκρασίας και κατ' όγκον συγκεντρώσεων O ₂ , CO ₂ και CO στις θέσεις E και Π, για ρυθμό έκλυσης θερμότητας 1080 kW (ΣΣ=Σχετικό Σφάλμα).107	

5.5	Πειραματικές τιμές και προλέξεις των μέσω τιμών της θερμοκρασίας θερμοκρασίας και κατ' όγκο συγκεντρώσεων O ₂ , CO ₂ και CO στις θέσεις E και Π, για ρυθμό έκλυσης θερμότητας 2070 kW από 3300 s έως 3700 s.	108
6.1	Περιπτώσεις που μελετήθηκαν συνολικά και στις δύο παραμετρικές μελέτες.	159
6.2	Χρόνοι ανοχής για την έκθεση σε θερμό αέρα, [DiNenno et al., 2002].	172
6.3	Όρια επικινδυνότητας για την έκθεση σε τοξικά προϊόντα της καύσης, [DiNenno et al., 2002].	172

Πίνακας Συμβόλων

\mathcal{H}	Η διαταραχή της πίεσης [Pa]
\dot{m}'''_F	Ρυθμός μεταβολής μάζας καυσίμου ανά μονάδα όγκου [$kg/s/m^3$]
\dot{m}'''	Ρυθμός μεταβολής μάζας οξειδωτικού ανά μονάδα όγκου [$kg/s/m^3$]
\dot{m}_1	Παροχή μάζας του ρεύματος καυσίμου [kg/s]
\dot{m}_2	Παροχή μάζας του ρεύματος οξειδωτικού [kg/s]
\dot{m}'''_α	Ρυθμός παραγωγής αερίου συστατικού α ανά μονάδα όγκου [$kg/s/m^3$]
$\dot{m}'''_{b,\alpha}$	Ρυθμός παραγωγής αερίου συστατικού α από εξατμιζόμενες σταγόνες ή σωματίδια ανά μονάδα όγκου [$kg/s/m^3$]
\dot{m}'''_γ	Ο ρυθμός παραγωγής του πτητικού αερίου ανά μονάδα όγκου [$kg/s/m^3$]
\dot{q}'''_c	Ρυθμός παραγωγής θερμότητας στο στερεό λόγω συναγωγής ανά μονάδα όγκου [$kJ/s/m^3$]
\dot{q}'''_r	Ρυθμός παραγωγής θερμότητας στο στερεό λόγω ακτινοβολίας ανά μονάδα όγκου [$kJ/s/m^3$]
\dot{q}'''_s	Ρυθμός παραγωγής θερμότητας στο στερεό [kJ/s]
\dot{T}	Ρυθμός θέρμανσης [K/s]
\dot{V}'''_i	Η αρχική ροή όγκου του υγρού [$m^3/(sm^2)$]
κ_s	Συντελεστής απορρόφησης [kW/m^2]
y_{CO}	Ποσοστό παραγωγής CO
y_{soot}	Ποσοστό παραγωγής αιθάλης
y_{H_2}	Ποσοστό παραγωγής υδρογόνου

H_{frac}	Ποσοστό υδρογόνου στην αιθάλη
μ	Δυναμικό ιξώδες [$Pa \cdot s$]
ν_s	Ρυθμός παραγωγής Υπολοίπου
ν_s	Συντελεστής παραγωγής στερεών υπολοίπων στις αντιδράσεις στερεής φάσης
$\nu_{g,\gamma}$	Συντελεστής αερίων συστατικών γ στις αντιδράσεις στερεής φάσης
$\nu_{s,i'j}$	Απόδοση στον μηχανισμό αντίδρασης για την συμμετοχή των υπολοίπων υλικών από τα οποία παράγεται το i -οστό υλικό σαν Υπόλοιπο
\vec{f}_b	Διάνυσμα εξωτερικών δυνάμεων (εκτός της βαρύτητας)
\vec{u}	Διάνυσμα ταχύτητας
ρ	Πυκνότητα [kg/m^3]
$\rho_{\alpha'}$	Πυκνότητα υλικού α μετά την θέρμανση του [kg/m^3]
ρ_{α}	Πυκνότητα υλικού α στην αρχική του μορφή [kg/m^3]
$\rho_{s,\alpha'}$	Πυκνότητα δομικού στοιχείου α του στερεού υλικού μετά την θέρμανση του [kg/m^3]
$\rho_{s,\alpha}$	Πυκνότητα δομικού στοιχείου α του στερεού υλικού στην αρχική του μορφή [kg/m^3]
ρ_s	Πυκνότητα στερεού υλικού [kg/m^3]
σ	Σταθερά Stefan-Boltzmann
τ_{ij}	Τανυστής των τάσεων [Pa]
ε	Συντελεστής εκπομπής
$A_{\alpha\beta}$	Σταθερά αντίδρασης [s^{-1}]
C_p	Ειδική θερμοχωρητικότητα [kJ/kgK]
C_s	Σταθερά Smagorinsky
c_s	Ειδική θερμοχωρητικότητα στερεού [kJ/kgK]
D_{α}	Συντελεστής διάχυσης [m^2/s]

$E_{\alpha\beta}$	Ενέργεια ενεργοποίησης [$kJ/kmol$]
f	Κλάσμα μείγματος του αερίου ρεύματος του καυσίμου
h	Ενθαλπεία [kJ/kg]; Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας [W/m^2K]
h_v	Θερμότητα ατμοποίησης των ατμών του καυσίμου [kJ]
I	Ένταση ακτινοβολίας [kW/m^2]
I^b	Ένταση ακτινοβολίας μελανού σώματος [kW/m^2]
k_s	Θερμική αγωγιμότητα [$W/m/K$]
L	Χαρακτηριστικό μήκος [m]
M	Μάζα [kg]
$N_{r,\alpha}$	Αριθμός ξεχωριστών αντιδράσεων που συμμετέχει το συστατικό α
p	Πίεση [Pa]
p_o	Ατμοσφαιρική πίεση [Pa]
Pr	Αριθμός Prandtl
\dot{q}'''	Ρυθμός έκλυσης θερμότητας ανά μονάδα όγκου [kJ/m^3]
R	Παγκόσμια σταθερά των αερίων [$J/mol \cdot K$]
r_p	Ρυθμός αντίδρασης στις συνθήκες αναφοράς
$r_{\alpha\beta}$	Ο ρυθμός της αντίδρασης β [$1/s$]
Re	Αριθμός Reynolds
S_α	Ο ρυθμός παραγωγής του κάθε συστατικού α σαν αποτέλεσμα των αντιδράσεων με άλλα συστατικά
S_s	Παράγοντας μεγέθους του υπολογιστικού κελιού
T	Θερμοκρασία [$^\circ C$]
t	Χρόνος [s]
T_b	Θερμοκρασία βρασμού του καυσίμου [$^\circ C$]

T_p	Θερμοκρασία αναφοράς για τις κινητικές παραμέτρους της αντίδρασης [°C]
T_g	Θερμοκρασία αερίου [°C]
T_s	Θερμοκρασία στερεού υλικού [°C]
$T_{thr,\alpha\beta}$	Οριακή τιμή θερμοκρασίας [°C]
T_w	Θερμοκρασία στερεού τοιχώματος [°C]
v_α	Στοιχειομετρικός συντελεστής για το συστατικό α
W_f	Μοριακό βάρος των ατμών του καυσίμου [g/mol]
W_α	Μοριακό βάρος του συστατικού α [g/mole]
X_f	Κλάσμα όγκου των ατμών του καυσίμου πάνω από την επιφάνειά του [mol/mol]
X_α	Κλάσμα όγκου συστατικού α
Y_α	Κλάσμα μάζας του αερίου συστατικού α [kg ^{α} /kg ^{mix}]
Φ	Ρυθμός με τον οποίο η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμική λόγω της συνεκτικότητας του ρευστού

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Φωτιές σε κτίρια	1
1.2 Φωτιά στην κουζίνα	2
1.3 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	4
1.3.1 Υπολογιστικά Μοντέλα	4
1.3.2 Υπολογιστικοί Κώδικες Προσομοίωσης Φωτιάς	7
1.3.3 Υπολογιστική Προσομοίωση Φωτιάς σε Κτίρια	11

1.1 Φωτιές σε κτίρια

Η φωτιά θεωρείται ένα από τα πλέον πολύπλοκα φαινόμενα όσον αφορά στην επιστήμη της καύσης, μιας και περιλαμβάνει όλα τα φαινόμενα που μπορεί να παρατηρηθούν σε υποχημικά χημικά αντιδρώσες ροές. Προκειμένου να υπάρξει αυτό το φυσικά και χημικά πολύπλοκο φαινόμενο πρέπει να συνδυαστούν ρευστοδυναμική, καύση, χημική κινητική, ακτινοβολία και πολυφασικές ροές. Εξαιτίας αυτής της πολυπλοκότητας καθυστέρησε και η ανάπτυξη της επιστημονικής έρευνας σε αυτό το αντικείμενο μέχρι και την δεκαετία του 1950. Οι φωτιές συνδέονται με πολλούς κινδύνους που σχετίζονται με τον άνθρωπο, την ιδιοκτησία του αλλά και το φυσικό περιβάλλον. Μεταξύ της πληθώρας των συμβάντων που σχετίζονται με μη ελεγχόμενες πυρκαγιές, οι φωτιές σε κτίρια είναι το πιο συχνό [Yeoh and Yuen, 2009]. Στις φωτιές εντός κτιρίων, ο περιορισμός χώρου μπορεί να επηρεάσει τόσο την παροχή αέρα όσο και το ίδιο το θερμικό περιβάλλον έχοντας αντίκτυπο στην ταχύτητα, ανάπτυξη, μέγιστο ρυθμό καύσης

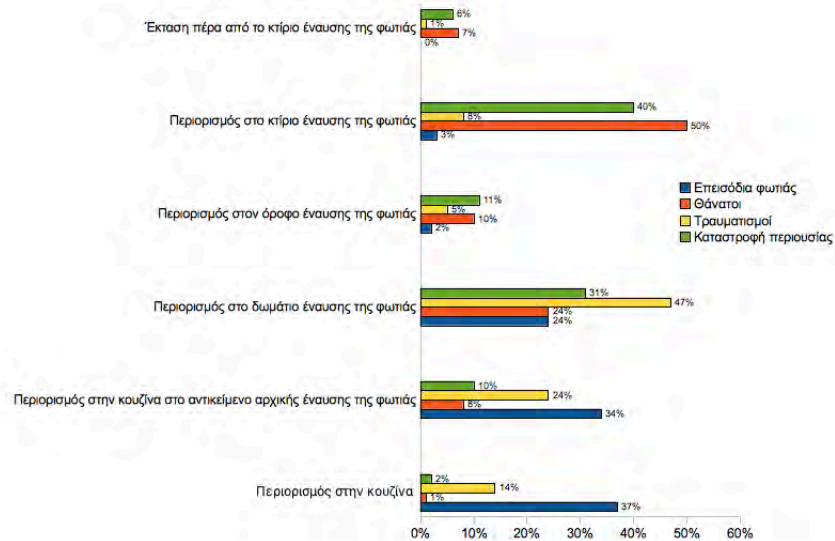
και διάρκεια της ίδιας της φωτιάς. Για αυτό το λόγο η εφαρμογή των κανονισμών πυρασφάλειας είναι απαραίτητη για τον ασφαλή σχεδιασμό ενός κτιρίου. Η σημασία των οικιακών πυρκαγιών γίνεται εμφανής από το γεγονός ότι σύμφωνα με την NFPA (National Fire Protection Association) στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής κατά το 2008 εκδηλώθηκαν 1,451,500 φωτιές με ανθρώπινες απώλειες και τραυματισμούς, εκ των οποίων το 84% αφορούσε κατοικίες μονόροφες και διόροφες, αλλά και διαμερίσματα [Karter, 2009]. Τα πιο επικίνδυνα σημεία για ξεκίνημα φωτιάς σε κατοικίες είναι η κουζίνα (34%), η κρεβατοκάμαρα (12%) και το καθιστικό (6%) [Madrzykowski and Hamins, 2007]. Οι φωτιές που ξεκινούν από αναμμένα τσιγάρα ή προϊόντα τους, προκύπτουν κυρίως στην κρεβατοκάμαρα.

1.2 Φωτιά στην κουζίνα

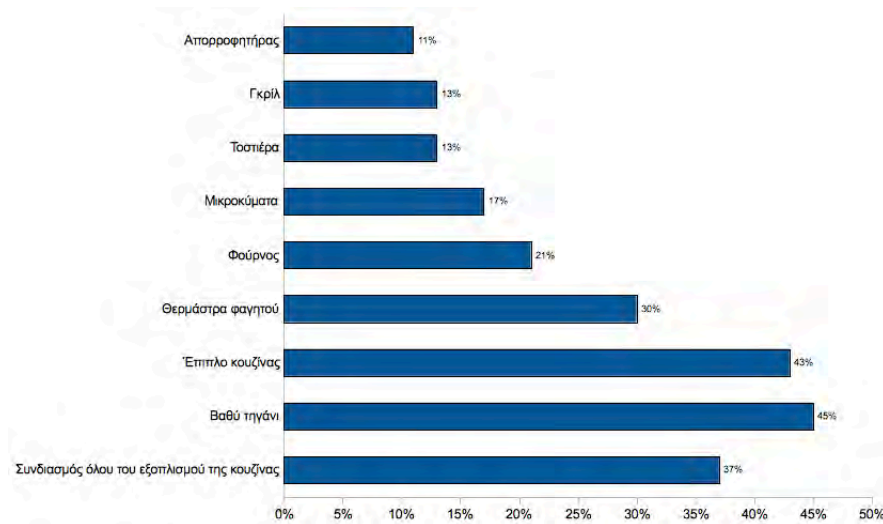
Οι φωτιές στην κουζίνα (Σχήμα 1.1) οφείλονται συχνά σε ανάφλεξη υφασμάτων ή άλλων κοντινών εύφλεκτων υλικών, έπειτα από ανάφλεξη μαγειρικού ελαίου κατά την απουσία ανθρώπου από τον χώρο της εστίας. Το 2003, καταγράφηκαν 118,700 πυρκαγιές που προκλήθηκαν σε κουζίνες των ΗΠΑ και οι οποίες οδήγησαν σε 250 θανάτους, 3,880 τραυματισμούς και κόστος 512 εκατομμυρίων δολαρίων ή διαφορετικά αποτέλεσαν το 9% των άμεσα προκαλούμενων ζημιών σε περιουσίες [Hall, 2006]. Η πλειονότητα των πυρκαγιών στην κουζίνα αντιμετωπίζεται από τους ίδιους τους ενοίκους και δεν αναφέρεται ποτέ στις αντίστοιχες πυροσβεστικές υπηρεσίες, δηλαδή οι διαθέσιμες στατιστικές δεν είναι πλήρως αντιπροσωπευτικές. Από το 1999 μέχρι το 2003, το 71% των αναφερόμενων φωτιών στην κουζίνα χαρακτηρίστηκαν είτε ως περιορισμένες είτε ως φωτιές που προκάλεσαν βλάβη αλλά περιορίστηκαν στο αντικείμενο έναυσης. Παρόλα αυτά, το 38% των τραυματισμών που αναφέρθηκαν και το 8% των θανάτων προκλήθηκαν από φωτιές τέτοιου μεγέθους [Ahrens et al., 2007].

Μεταξύ 1999 και 2003 στις ΗΠΑ, ατυχήματα σχετικά με τον εξοπλισμό κουζίνας προκάλεσαν το 12% των πυρκαγιών σε κουζίνες κατοικιών, το 8% των θανάτων πολιτών και το 11% των άμεσων καταστροφών ιδιοκτησίας (Σχήμα 1.2). Το ποσοστό των φωτιών, που προκαλούνται από εξοπλισμό κουζίνας, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το είδος των αντικειμένων, ενώ απ'αυτές, το 45%, οφείλεται σε βαθιά τηγάνια.

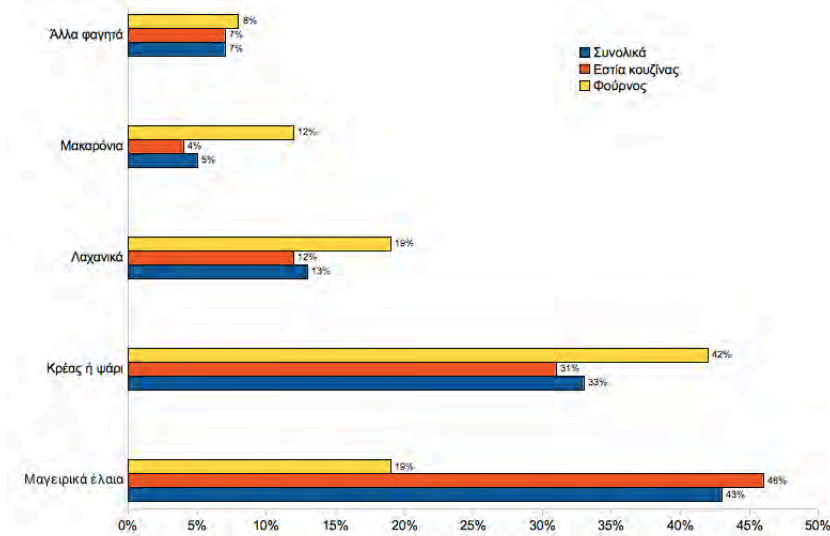
Το μαγειρικά έλαια (Σχήμα 1.3), που αναφλέγονται σε εστίες κουζίνας, αποτελεί τη σημαντικότερη αιτία φωτιών στην κουζίνα και γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις που ακολουθούν. Παρόλο που σε πάνω από 40% των περιπτώσεων η φωτιά ξεκίνησε αφού προστέθηκε τροφή στο έλαιο, οι μαγειρι-



Σχήμα 1.1: Οικιακές πυρκαγιές που ξεκίνησαν από κουζίνες σε σχέση με τον τύπο του περιστατικού και την έκταση της ζημιάς για την χρονική περίοδο 1999-2003 [Ahrens et al., 2007].



Σχήμα 1.2: Ποσοστό των οικιακών πυρκαγιών που ξεκίνησαν σε κουζίνες σε σχέση με τον τύπο του εξοπλισμού κουζίνας για την χρονική περίοδο 1999-2003 [Ahrens et al., 2007].



Σχήμα 1.3: Τροφές που αναφλέγονται από μια μελέτη φωτιάς σε οικιακό εξοπλισμό που διεξάχθηκε από την U.S. Consumer Product Safety Commission [Ahrens et al., 2007].

κές φωτιές συχνά ξεκινούν πριν προστεθεί οτιδήποτε στο ζεστό έλαιο [Ahrens et al., 2007].

1.3 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

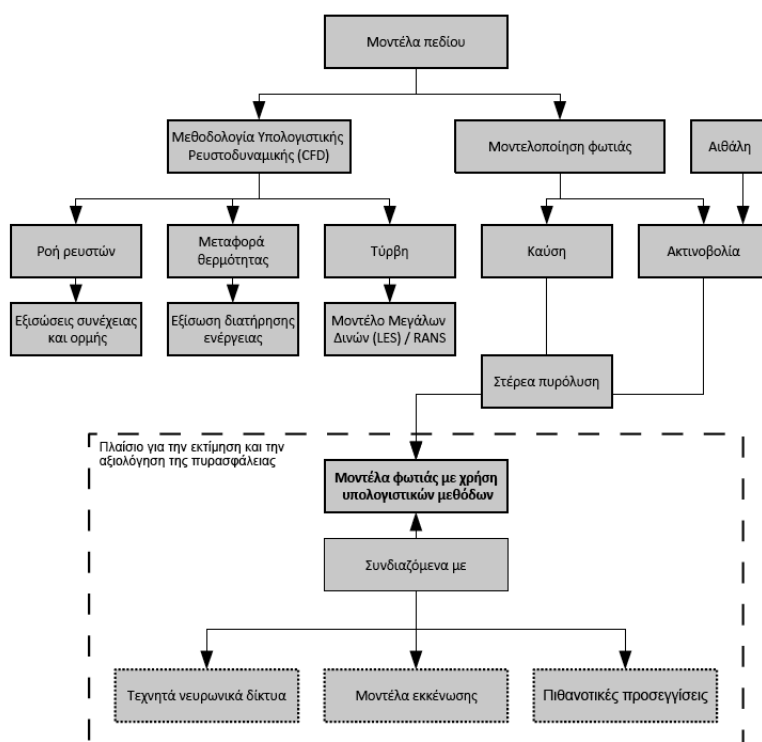
1.3.1 Υπολογιστικά Μοντέλα

Στις μέρες μας, κατά τον σχεδιασμό πυροπροστασίας (Fire Safety Engineering) υπάρχει η τάση για εφαρμογή πιο αποδοτικών κανονισμών, όσον αφορά στην πυραντοχή, και τούτο λόγω της περιοριστικής φύσης των παλαιότερα θεσμοθετημένων κανονισμών. Η αξιολόγηση της αποδοτικότητας, επιτρέπει την στάθμιση μεταξύ πολλών εναλλακτικών σχεδιαστικών επιλογών προκειμένου να επιτευχθεί το απαιτούμενο επίπεδο ασφαλείας. Υπό αυτό το νέο καθεστώς, οι σχεδιαστές και οι επαγγελματίες που ασχολούνται με πυροπροστασία χρησιμοποιούν ευρέως σχεδιαστικά εργαλεία για την μοντελοποίηση της φωτιάς, προκειμένου να επιτευχθεί η συμμόρφωση στους προαναφερθέντες κανονισμούς. Τα τελευταία χρόνια η επιστήμη της πυροπροστασίας παρουσιάζει ραγδαία ανάπτυξη και πιο συγκεκριμένα, η μαθηματική μοντελοποίηση της φωτιάς αναπτύσσεται γρήγορα, αν και τα εμπλεκόμενα φαινόμενα είναι εξαιρετικά περίπλοκα. Τα υπάρχο-

να προβλήματα δυναμικής ρευστών, τύρβης και καύσης δεν έχουν ακόμα επιλυθεί και αποτελούν σημαντικές προκλήσεις από μόνα τους. Ο συνδυασμός όλων των διεργασιών σε ένα ενιαίο υπολογιστικό μοντέλο αποτελεί ένα δύσκολο έργο. Με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών, η χρήση υπολογιστικών μεθόδων στην μοντελοποίηση της φωτιάς προσφέρει στους χρήστες την ευελιξία της εύστοχης προσομοίωσης της συμπεριφοράς της φωτιάς σε διαφορετικούς κλειστούς χώρους και ως εκ τούτου δίνεται η δυνατότητα να ξεπεραστούν οι περιορισμοί που προκύπτουν στις πειραματικές τεχνικές και στις θεωρητικές προσεγγίσεις.

Τα τελευταία χρόνια αναπτύχθηκε πληθώρα υπολογιστικών εργαλείων για την πρόβλεψη της ανάπτυξης φωτιάς σε διαμερίσματα. Υπάρχουν ουσιαστικά δύο μεγάλες κατηγορίες στα υπολογιστικά εργαλεία, που αναπτύσσονται, για την ανάλυση της ανάπτυξης φωτιάς σε κλειστούς χώρους. Στοχαστικές ή πιθανοτικές προσεγγίσεις θεωρούν την ανάπτυξη της φωτιάς μια διεργασία, όπου η διάδοση της (non-propagating to propagating fire) περιγράφεται σαν φαινόμενο αλλαγής φάσης [Beer, 1990]. Τίθενται μαθηματικοί κανόνες, που διέπουν την μετάβαση από ένα συμβάν σε ένα άλλο και κάθε σημείο μεταφοράς χαρακτηρίζεται βάσει πιθανοτήτων προερχόμενων από ανάλυση πειραματικών δεδομένων, ιστορικών αρχείων γεγονότων φωτιάς και προλέξεις υπολογιστικών μοντέλων.

Από την άλλη πλευρά, τα αιτιοκρατικά μοντέλα μπορούν να καταταχθούν σε μοντέλα φυσικών ζωνών (zone models) ή όγκων ελέγχου (control volume), τα οποία επιτρέπουν την εύρεση των διαφόρων παραμέτρων της φωτιάς, επιλύοντας ένα σύνολο πρωτοβάθμιων συνήθων διαφορικών εξισώσεων σε συνδυασμό με ημι-εμπειρικά φυσικά μοντέλα [Mittler, 1985], και μοντέλα πεδίου (field models). Η βασική παραδοχή που χρησιμοποιείται για τον σχηματισμό μιας ζώνης φωτιάς είναι ότι το διαμέρισμα μπορεί να χωριστεί σε έναν αριθμό ζωνών, όπου σε κάθε ζώνη οι φυσικές παράμετροι, όπως η θερμοκρασία του αέρα και η συγκέντρωση χημικών συστατικών, είναι ενιαίες. Αυτές οι ζώνες αλληλεπιδρούν μέσω της συναλλαγής μάζας και ενέργειας. Τα μοντέλα ζώνης μπορούν να χωριστούν σε δύο τύπους όγκων ελέγχου σε κάθε διαμέρισμα: μοντέλα μιας ζώνης (one-zone model), που συνήθως χρησιμοποιούνται μετά την καθολική ανάφλεξη (post-flashover), και μοντέλα δύο ζωνών (two-zone models), που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της φωτιάς πριν από την καθολική ανάφλεξη (pre-flashover). Παραδείγματα τέτοιων φαινομένων περιλαμβάνουν πλούμια φωτιάς, ροές μέσω πορτών και παραθύρων, μεταφορά με ακτινοβολία ή συναγωγή και πυρόλυση στερεών καυσίμων. Παρά την ευκολία χρήσης των μοντέλων ζώνης, είναι πολύ πιθανό να είναι ανακριβή στην πρόβλεψη σεναρίων πυρκαγιάς, όπου οι εμπειρικές σχέσεις δεν είναι έγκυρες, όπως για παράδειγμα φωτιές σε μεγάλο ύψους αίθρια, όπου οι διαστρωματώσεις καπνού σχηματίζονται πριν αυ-



Σχήμα 1.4: Μοντέλα πεδίου.

τός φτάσει στο ταβάνι ή κατασκευές ακανόνιστης γεωμετρίας. Λόγω των ολικών υπολογισμών μέσω των μεταβλητών σε κάθε ζώνη στο υπολογιστικό χώρο, αυτά τα μοντέλα δεν είναι δυνατόν να προβλέψουν τοπικές φυσικές ποσότητες που μπορεί να απαιτούνται για κάποιες περιπτώσεις.

Τα μοντέλα πεδίου, Σχήμα 1.4, σαν εναλλακτική επιλογή αιτιοκρατικής προσομοίωσης, βελτιώνουν την χωρική διακριτοποίηση με περαιτέρω διαχωρισμό του υπολογιστικού χώρου με χρήση πυκνού τρισδιάστατου πλέγματος. Αυτή η διαδικασία επίλυσης των θεμελιωδών δυναμικών εξισώσεων με χρήση υπολογιστών αναφέρεται συνήθως ως Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics, CFD). Ένας CFD κώδικας βασίζεται στην προσέγγιση ότι ένας κλειστός χώρος χωρίζεται σε έναν μεγάλο αριθμό στοιχειωδών όγκων. Ο κώδικας επιλύει τις θεμελιώδεις εξισώσεις οι οποίες περιγράφουν την μεταφορά μάζας, ορμής και ενέργειας μεταξύ των στοιχειωδών αυτών όγκων προκειμένου να προβλεφθεί η ανάπτυξη της φωτιάς σε αυτόν τον χώρο.

Είναι γεγονός ότι η δυνατότητα προσομοίωσης μιας πληθώρας σεναρίων περιστατικών φωτιάς χωρίς τους περιορισμούς που τίθενται λόγω των εμπειρικών σχέσεων και η ικανότητα επίλυσης προβλημάτων πολύπλοκης γεωμετρίας αντι-

προσωπεύουν κάποια από τα πολλά πλεονεκτήματα των μοντέλων πεδίου σε σχέση με τα πεδία ζώνης. Υπό αυτό το πρίσμα, τα μοντέλα πεδίου έχουν αποδειχθεί πιο επιτυχημένα σε πολυάριθμα προβλήματα πυρασφάλειας και η σημασία τους στην έρευνα της ίδιας της φωτιάς είναι συνεχώς αυξανόμενη καθώς τα μοντέλα αυτά γίνονται όλο και πιο αξιόπιστα και εκδίδονται διάφορες μελέτες που επαληθεύουν την εγκυρότητά τους. Η CFD προσέγγιση θεωρείται θεμελιώδης για την μελλοντική εξέλιξη των μοντέλων φωτιάς και μπορεί να αποτελέσει την βάση για μια περαιτέρω ανάπτυξη των κανονισμών πυρασφάλειας. Ωστόσο, η φωτιά αποτελεί ένα τόσο πολύπλοκο φαινόμενο και περιλαμβάνει τόσο πολύπλοκα φυσικά και χημικά προβλήματα, που πρέπει να μελετηθούν ακόμα πολλά σημεία προκειμένου ένας κώδικας υπολογιστικής προσομοίωσης της φωτιάς να μπορεί να εκτελεστεί χωρίς καμία επιφύλαξη [Novozhilov, 2001].

1.3.2 Υπολογιστικοί Κώδικες Προσομοίωσης Φωτιάς

Το 2003 ολοκληρώθηκε μια μελέτη [Olenick and Carpenter, 2003] καταγραφής των υπολογιστικών μοντέλων πεδίου/λογισμικών που είχαν αναπτυχθεί μέχρι τότε για την μελέτη των φαινομένων φωτιάς.

Τα σημαντικότερα μοντέλα μιας ζώνης και δύο ζωνών είναι τα εξής:

- **Consolidated Model of Fire and Smoke Transport (CFAST):** Δημιουργήθηκε από το ινστιτούτο NIST (National Institute of Standards and Technology) και αρχικά χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση πυρκαγιάς στα πλαίσια ενός κτιρίου [Peacock et al., 2005]. Το μοντέλο αυτό αναπτύσσεται πάνω από είκοσι χρόνια και τα τελευταία χρόνια γίνονται προσπάθειες συνδυασμού του με μοντέλα ανάλυσης ρίσκου (risk analysis), όπως είναι για παράδειγμα το Probabilistic Fire Simulator (PFS). Με τη βοήθειά του μπορεί κανείς να καθορίσει την προκύπτουσα από μια πυρκαγιά κατανομή αερίων και θερμοκρασιών.
- **Consolidated Compartment Fire Model (CCFM.VENTS):** Πρόκειται για ένα μοντέλο, το οποίο δημιουργήθηκε από το NIST με στόχο τη συγκέντρωση όλης της προηγούμενης εμπειρίας και την ευελιξία ως προς την ενσωμάτωση μελλοντικών επιτευγμάτων [Cooper and Forney, 2005]. Σε σχέση με τα προηγούμενα, είναι πιο φιλικό προς το χρήστη και αριθμητικά πιο ευσταθές.
- **Fire Simulation Technique (FIRST):** Αναπτύχθηκε από το NIST και χρησιμοποιείται στην εξέταση της ανάπτυξης μιας φωτιάς σε ένα μόνο διαμέρισμα

[Mitler and Rocket, 1987]. Περιγράφει φαινόμενα όπως η κίνηση των αερίων μέσα και έξω από το διαμέρισμα, η ανάπτυξη θερμού στρώματος, η θέρμανση και η ενδεχόμενη ανάφλεξη τριών στόχων κ.ά.

- **OZone:** Δημιουργήθηκε από στο Πανεπιστήμιο της Λιέγης (University of Liege, Institute de Mecanique et genie Civil) και εστιάζει κυρίως στην πρόληξη των θερμοκρασιών σε ένα διαμέρισμα προκειμένου να αξιολογηθεί η πυραντίσταση του, [Remesh and Tan, 2006]. Πρόκειται για ένα μοντέλο μίας ζώνης όπου οι βασικές εξισώσεις του μοντέλου χρησιμοποιούν χρονικά μεταβλητή ειδική θερμοχωρητικότητα για τα αέρια που υπάρχουν μέσα στο διαμέρισμα. Το μοντέλο επίλυσης της θερμότητας στους τοίχους χρησιμοποιεί μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Τέλος υπάρχει δυνατότητα χρήσης διαφόρων μοντέλων καύσης ανάλογα με τις περιπτώσεις χρήσης του κώδικα.
- **FIERAsystem:** Αναπτύχθηκε από το NRC (National Research Council Canada) και έχει ως στόχο την μελέτη συστημάτων πυρασφάλειας σε χώρους αποθήκευσης και μεταλλικά υπόστεγα αεροδρομίων, [Kashef et al., 2003]. Τα υπομοντέλα που περιλαμβάνονται στο FIERAsystem μπορούν να υπολογίσουν την εξέλιξη της φωτιάς, την κίνηση του καπνού μέσα στο κτίριο, τον χρόνο αστοχίας στοιχείων της κατασκευής καθώς και την εκκένωση των εργαζομένων σε αυτά. Επιπλέον μπορεί να αξιολογήσει την αποτελεσματικότητα των συστημάτων κατάσβεσης και την απόκριση των πυροσβεστικών δυνάμεων που μπορεί να σπεύσουν στον χώρο.

Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποιοι από τους κώδικες που χρησιμοποιούνται στον τομέα των μοντέλων πεδίου. Μια επισκόπηση των σημαντικότερων εξ'αυτών παρουσιάζεται στην συνέχεια:

- **CFX:** Μοντέλο υπολογιστικής ρευστομηχανικής της εταιρείας ANSYS που χρησιμοποιείται εδώ και είκοσι χρόνια. Μπορεί να προσομοιώσει ροές σε πλήθος εφαρμογών και επιτρέπει στους μηχανικούς να προσομοιώσουν διάφορα σενάρια σε εικονικό περιβάλλον.
- **JASMINE:** Μοντέλο που αναπτύχθηκε από το Building Research Establishment. Μπορεί να προσομοιώσει περισσότερα από ένα διαμερίσματα με ύπαρξη ανοιγμάτων (πχ. πόρτες, παράθυρα), εξαερισμού και εστιών φωτιάς ή θέρμανσης.
- **Simulation of Fire in Enclosures (SOFIE):** Είναι αποτέλεσμα της συνεργασίας ορισμένων ευρωπαϊκών εργαστηρίων που ασχολούνται με τη φωτιά

[Baroudi, 2007]. Το μοντέλο αυτό ενσωματώνει διαφορετικά μοντέλα εξάπλωσης της φλόγας.

- **SMARTFIRE:** Δημιουργήθηκε από το πανεπιστήμιο του Greenwich, προσφέρει τη δυνατότητα αυτόματης γένεσης του καταλληλότερου για κάθε εφαρμογή πλέγματος, αρκεί ο χρήστης να εισάγει την επιθυμητή γεωμετρία [Galea et al., 1999]. Το πλεονέκτημά του σε σχέση με τα δύο μοντέλα που περιγράφηκαν παραπάνω είναι η γένεση πλέγματος και για πολύπλοκες γεωμετρίες.
- **Fire Dynamics Simulator (FDS):** Αναπτύχθηκε από το NIST σε συνεργασία με το τεχνολογικό ερευνητικό κέντρο VTT της Φιλανδίας. Πρόκειται για μοντέλο υπολογιστικής ρευστομηχανικής το οποίο λύνει αριθμητικά τις εξισώσεις ροής Navier-Stokes για ροές μικρής ταχύτητας, με έμφαση στον καπνό και τη μεταφορά θερμότητας από μια φωτιά. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με το περιβάλλον PyroSim, το οποίο προσφέρει ένα πιο φιλικό προς το χρήστη τρόπο εισαγωγής των δεδομένων και παρουσίασης των αποτελεσμάτων.

Το CFAST και το FDS συνοδεύονται από το λογισμικό Smokeview το οποίο χρησιμεύει στην οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων.

Λόγω του ότι στα παραπάνω μοντέλα υπεισέρχονται συχνά στοιχεία που προκύπτουν από παραδοχές, υπάρχει αβεβαιότητα. Για να ελεγχθεί η αβεβαιότητα αυτή απαιτείται επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων (validation). Σύμφωνα με τον κανονισμό ASTM E1355 (American Society for Testing and Materials, [AST, 2004a], τεκμηρίωση ονομάζεται η διαδικασία καθορισμού του βαθμού στον οποίο μια μέθοδος υπολογισμού είναι ακριβής αντιπροσώπευση του πραγματικού κόσμου και επιτυγχάνεται μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τη χρήση του εκάστοτε μοντέλου με τα αντίστοιχα πειραματικά. Η επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων ενός μοντέλου συνοδεύεται από την πιστοποίησή του (verification), κατά την οποία ελέγχεται εάν το μαθηματικό μοντέλο ανταποκρίνεται στην ιδέα για την οποία αναπτύχθηκε.

Λογισμικό	Χώρα προέλευσης	Περιγραφή
ALOFT	ΗΠΑ	Κίνηση καπνού σε μεγάλες εξωτερικές φωτιές
CFX	Ηνωμένο Βασίλειο (ΗΒ)	Γενικής χρήσης CFD κώδικας, με δυνατότητα εφαρμογής σε φωτιά και έκρηξη
FDS	ΗΠΑ	Μικρών αριθμών Mach CFD κώδικας εξειδικευμένος σε ροές σχετικές με φωτιά
FIRE	Αυστραλία	Μοντελοποίηση CFD για καταιονιστήρες
FLUENT	ΗΠΑ	Γενικής χρήσης CFD κώδικας
JASMINE	ΗΒ	CFD κώδικας για την πρόβλεψη των αποτελεσμάτων μιας φωτιάς και αξιολόγηση ζητημάτων σχεδιασμού
KAMELON FireEx	Νορβηγία	CFD κώδικας για την θερμική αντίδραση των κτιρίων σε φωτιά
MEFE	Πορτογαλία	CFD κώδικας για ένα ή δύο δωμάτια
PHOENICS	ΗΒ	Γενικής χρήσης CFD κώδικας
SMARTFIRE	ΗΒ	Μοντέλο ζώνης για φωτιά
SOFIE	ΗΒ/Σουηδία	Μοντέλο ζώνης για φωτιά
SOLVENT	ΗΠΑ	CFD κώδικας για την κίνηση του καπνού σε τούνελ
STAR-CD	ΗΒ	Γενικής χρήσης CFD κώδικας

Πίνακας 1.1: Υπολογιστικοί κώδικες που χρησιμοποιούν μοντέλα πεδίου [Olenick and Carpenter, 2003]

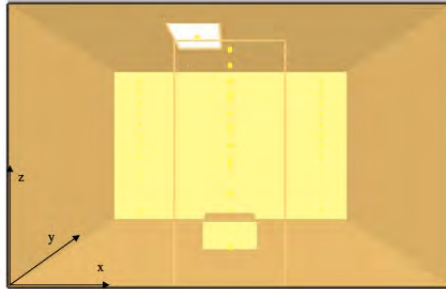
1.3.3 Υπολογιστική Προσομοίωση Φωτιάς σε Κτίρια

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί μια πληθώρα υπολογιστικών εργαλείων που επιτρέπουν την πρόβλεψη ανάπτυξης της φωτιάς σε κλειστούς χώρους. Με την χρήση CFD εργαλείων επιτυγχάνεται η αριθμητική επίλυση των θεμελιωδών εξισώσεων που περιγράφουν την μεταφορά μάζας, ορμής και ενέργειας σε ένα κλειστό περιβάλλον φωτιάς. Τα συγκεκριμένα εργαλεία έχουν εφαρμοστεί επιτυχώς σε περιοχές με ενδιαφέρον σε σχέση με την πυρασφάλεια, όπως η σχεδίαση πυρασφάλειας από μηχανικούς (π.χ. η πρόλεξη και οπτικοποίηση της φωτιάς και της κίνησης του καπνού), η αρχιτεκτονική σχεδίαση κάποιου χώρου (προβλέποντας την συμπεριφορά της φωτιάς μπορούν να προβλεφθούν οι θέσεις των εξόδων σε περίπτωση φωτιάς ή η βέλτιστη τοποθέτηση και σωστή λειτουργία των καταιονιστήρων), η αυτοψία ατυχημάτων, ο επανασχεδιασμός κτιρίων και άλλα. Όμως ενώ υπάρχει πληθώρα μελετών CFD για γεωμετρίες ενός ή δύο δωματίων, δεν υπάρχουν αντίστοιχες μελέτες για την συμπεριφορά ολόκληρων σπιτιών σε συνθήκες φωτιάς.

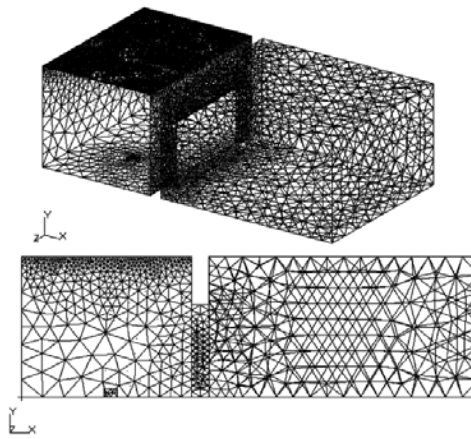
Σε αυτό το πλαίσιο, η ανάπτυξη CFD εργαλείων είναι απαραίτητο να εξαπλωθεί σε πιο πολύπλοκες γεωμετρίες προκειμένου να χρησιμοποιηθούν σε πραγματικές πυρκαγιές [Yeoh and Yuen, 2009]. Το 2001 πραγματοποιήθηκε μια μελέτη βιβλιογραφικής ανασκόπησης [Novozhilov, 2001] σχετικά με την CFD μοντελοποίηση των σύγχρονων τάσεων στις φωτιές στα κτίρια. Παρόλα αυτά, οι περισσότερες διαθέσιμες μελέτες που παρουσιάστηκαν αναφέρονται κυρίως σε μοντελοποιήσεις ενός ή δύο δωματίων.

Στην μελέτη [Merci and Maele, 2008], πραγματοποιήθηκε υπολογιστική προσομοίωση εξάπλωσης φωτιάς με χρήση τόσο μοντέλων ζώνης (δύο ζωνών με χρήση του προγράμματος OZONE) όσο και πεδίου (με χρήση του λογισμικού FDS), η οποία συμφωνούσε σε μεγάλο βαθμό με τις διαθέσιμες πειραματικές μετρήσεις. Στην παραμετρική μελέτη τους διερευνήθηκε η επίδραση διαφορετικών ρυθμών έκλυσης θερμότητας, περιοχών αρχικής έναυσης της φωτιάς και συνθηκών εξαερισμού (Σχήμα 1.5).

Σε μια άλλη μελέτη [Hasib et al., 2007] που αφορά φωτιά σε διαμέρισμα, η πρόλεξη των θερμοκρασιών σε διάφορα σημεία του πραγματοποιήθηκε με κώδικα CFD (με το εμπορικό λογισμικό CFX έκδοσης 5.7.1 (Σχήμα 1.6)). Πρόκειται ένα κτίριο του ενός δωματίου με μια κεντρικά τοποθετημένη ανοιχτή πόρτα. Η ίδια η γεωμετρία του χώρου επηρεάζει σημαντικά το πως μπορεί να αναμειχθούν, θερμανθούν και αντιδράσουν το καύσιμο και ο αέρας [Hwang et al., 2010]. Έτσι λοιπόν η παραπάνω μελέτη κατέδειξε ότι οι μεταβολές στην γεωμετρία του δωματίου προκαλούν σημαντικές αλλαγές στην συμπεριφορά της φωτιάς, στο



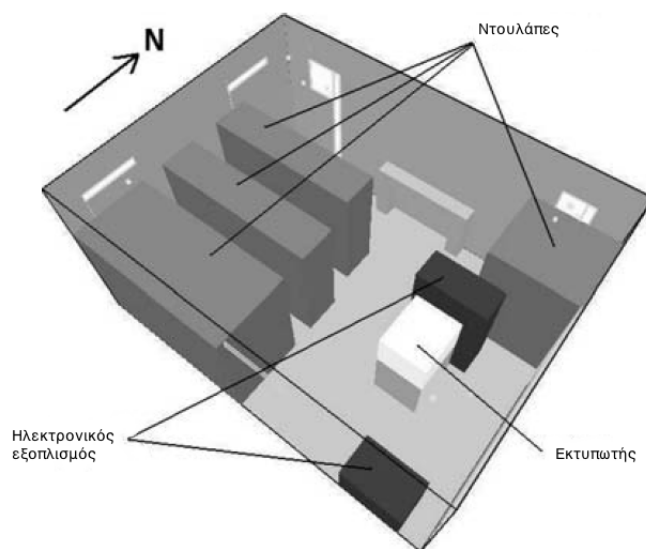
Σχήμα 1.5: Γεωμετρική απεικόνιση του δωματίου στην μελέτη [Merci and Maele, 2008].



Σχήμα 1.6: Γεωμετρική απεικόνιση του δωματίου και το αντίστοιχο υπολογιστικό πλέγμα στην μελέτη [Hasib et al., 2007].

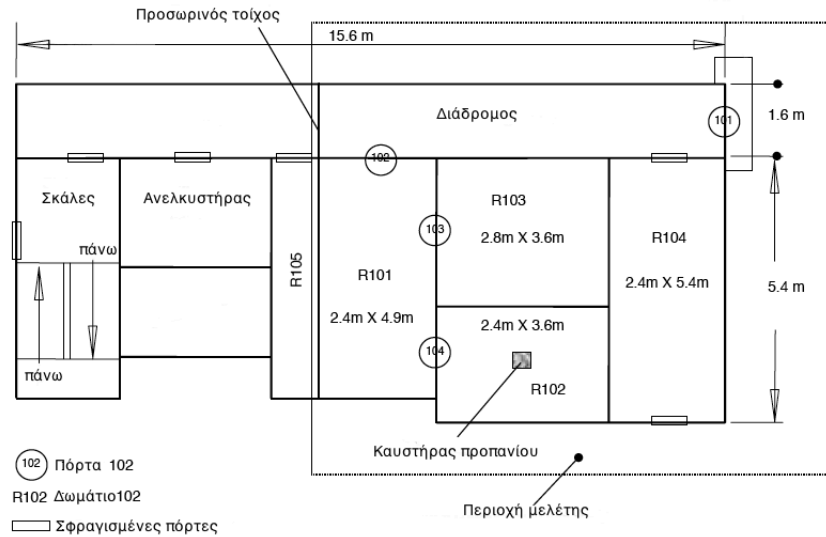
θερμοχημικό περιβάλλον και στη ρευστοδυναμική μέσα στον χώρο. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, είναι επιβεβλημένη μια πιο διεξοδική μελέτη σε αυτήν την γεωμετρία των δύο δωματίων.

Στην βιβλιογραφία υπάρχει μικρός αριθμός μελετών που αναφέρονται σε προσομοιώσεις φωτιάς για κτίρια πολλών δωματίων, εκ των οποίων οι περισσότερες αφορούν την διερεύνηση ατυχημάτων [Rein et al., 2006]. Οι [Yeoh et al., 2003a] διεξήγαγαν μια πλήρη μελέτη ενός κτιρίου με ένα, δύο και πολλά δωμάτια χρησιμοποιώντας κώδικα CFD για την ανάπτυξη φωτιάς (Σχήμα 1.8). Οι προλέξεις που υπολογίστηκαν προσέγγισαν σε πολύ καλό βαθμό τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα.

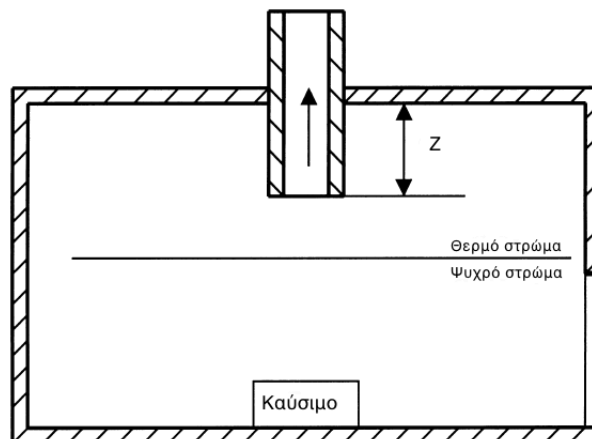


Σχήμα 1.7: Γεωμετρική απεικόνιση του δωματίου και το αντίστοιχο υπολογιστικό πλέγμα στην μελέτη [Rein et al., 2006].

Σε κτίριο με πολλά δωμάτια διεξήχθη επίσης μια μελέτη από το Εθνικό Ινστιτούτο Έρευνας του Καναδά (National Research Council of Canada) [Fu and Hadjisophocleous, 2000] έχοντας ως στόχο την γενικότερη αξιολόγηση κινδύνου σε περιπτώσεις φωτιάς σε κτίρια. Χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο FIERAsystem, το οποίο ανήκει στην κατηγορία μοντέλων ζώνης, και το σύστημα των εξισώσεων που διέπουν το πρόβλημα έχει την δυνατότητα να επιλυθεί ταυτόχρονα για όλα τα δωμάτια ή ανά δωμάτιο (σε περιπτώσεις που ο αριθμός τους είναι μεγάλος). Για την πιστοποίηση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις που έγιναν σε κτίρια ενός ή δύο δωματίων (Σχήμα 1.9). Και στις δύο περιπτώσεις, επιτεύχθηκε ικανοποιητική σύγκλιση.

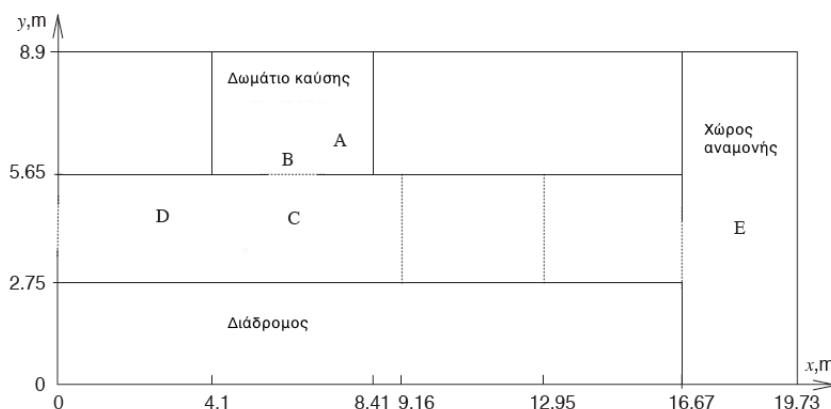


Σχήμα 1.8: Γεωμετρική απεικόνιση του διαμερίσματος στην μελέτη [Yeoh et al., 2003a].



Σχήμα 1.9: Γεωμετρική απεικόνιση του δωματίου στην μελέτη [Fu and Hadjisophocleous, 2000].

Μια ακόμα μελέτη με χρήση μοντέλου ζώνης [Shigunov, 2005] προτάθηκε για μελέτη διαμερισμάτων σε πλοίο. Η συγκεκριμένη μέθοδος βελτιώνει τον τρόπο αντιμετώπισης των ενδιάμεσων τοίχων και χρησιμοποιεί έναν νέο αλγόριθμο για τον υπολογισμό της πίεσης, επιτρέποντας πιο γρήγορες λύσεις για μεγάλου μεγέθους προβλήματα (Σχήμα 1.10).

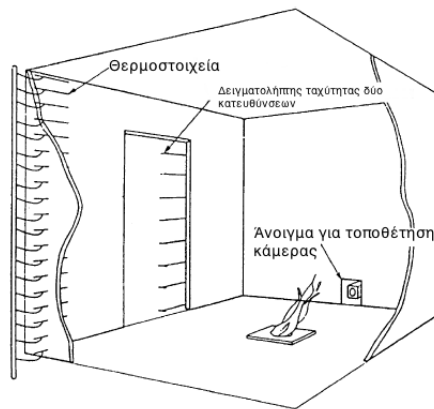


Σχήμα 1.10: Γεωμετρική απεικόνιση του διαδρόμου και δωματίου στην μελέτη [Shigunov, 2005].

Το 2003 ολοκληρώθηκε μια μελέτη, [Yeoh et al., 2003b], για την αξιολόγηση της επίδοσης μιας CFD προσομοίωσης φωτιάς σε περιορισμένο χώρο, σε μονώροφο κτίριο. Πιο συγκεκριμένα αξιολογήθηκε η εφαρμογή φλογών διάχυσης στην διεργασία της καύσης και βελτιώθηκε το μοντέλο παραγωγής αιθάλης σε κατασκευή με πολλά δωμάτια (Σχήμα 1.11). Επιπλέον, με την μελέτη [Luo and Beck, 1994] έγινε μια προσπάθεια πρόλεξης της πλήρους ανάπτυξης της φωτιάς σε ένα πολυώροφο κτίριο με πολλά διαμερίσματα. Ο κύριος σκοπός της εργασίας ήταν η μελέτη της ικανότητας υπαρχόντων εργαλείων CFD να προσομοιώσουν τα ροϊκά και θερμικά πεδία που αναπτύσσονται κατά την διάρκεια μιας πυρκαγιάς σε ρεαλιστικής γεωμετρίας κτίριο έχοντας πλήρως ορισμένες τις ιδιότητες των υλικών που το απαρτίζουν.

Μια μελέτη που ολοκληρώθηκε πρόσφατα αποκάλυψε τις δυσκολίες μοντελοποίησης της δυναμικής της φωτιάς σε πολύπλοκα σενάρια φωτιάς χρησιμοποιώντας CFD εργαλεία, υπονοώντας ότι η ακρίβεια των προλέξεων της ανάπτυξης της φωτιάς είναι ακόμα μη επαρκής [Rein et al., 2009].

Όταν χρησιμοποιείται ανάλυση CFD, χρησιμοποιούνται συχνά πειραματικά δεδομένα από την ανοιχτή βιβλιογραφία προκειμένου να αξιολογηθούν οι εκάστοτε προλέξεις. Τέτοιες πειραματικές μετρήσεις [Su et al., 2008] μπορούν να



Σχήμα 1.11: Γεωμετρική απεικόνιση του διαμερίσματος στην μελέτη [Yeoh et al., 2003b].

αναβαθμίσουν τις μελέτες που στοχεύουν στην εισαγωγή τεχνολογικών αλλαγών και καινοτομιών στα υλικά κατασκευής κτιρίων προκειμένου να βελτιωθεί η πυρασφάλεια τους (Σχήμα 1.12).



Σχήμα 1.12: Απεικόνιση του κτιρίου στην μελέτη [Su et al., 2008].

Σε αυτό το πλαίσιο, χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας FDS προκειμένου να μελετηθούν τα φαινόμενα που αναπτύσσονται λόγω της φωτιάς σε μια πλήρως επιπλωμένη διώροφη κατοικία. Προκειμένου να υπάρξει μια ρεαλιστική προσέγγιση των φαινομένων, χρησιμοποιήθηκαν πραγματικές θερμό-χημικές ιδιότητες τόσο για τα υλικά δόμησης όσο και για τα υλικά της επίπλωσης. Κύριος στόχος είναι η αξιολόγηση διαφορετικών τεχνικών δόμησης αναφορικά με την πυρασφάλεια αλλά και την διάδοση της φωτιάς. Για αυτό το λόγο, πραγματοποιήθηκαν μια σειρά από παραμετρικές μελέτες σε σχέση με τον αερισμό της κατοικίας αλλά και την χρήση διαφορετικών τεχνικών δόμησης. Σαν υλικά δόμησης χρη-

σιμοποιήθηκαν η γυψοσανίδα, η γυψοσανίδα με ενσωματωμένα υλικά αλλαγής φάσης αλλά και το τούβλο. Στην γυψοσανίδα με ενσωματωμένα υλικά αλλαγής φάσης, παραφίνες, πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις προκειμένου να προσδιοριστεί η συμπεριφορά της όταν εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίας λόγω της φωτιάς. Έτσι λοιπόν στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται ο κώδικας υπολογιστικής ρευστομηχανικής FDS που χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις. Στην συνέχεια στο Κεφάλαιο 3 αναλύονται τα συστήματα ξηράς δόμησης ενώ στο Κεφάλαιο 4 γίνεται μια εκτενής αναφορά στις ιδιότητες όλων των δομικών υλικών της υπό μελέτης κατοικίας. Πριν την υπολογιστική προσομοίωση της κατοικίας που ήδη αναφέρθηκε (Κεφάλαιο 6), προηγείται μια παραμετρική μελέτη που ολοκληρώθηκε σε ένα πρότυπο δωμάτιο ISO 9705 στα πλαίσια της πιστοποίησης του κώδικα FDS με χρήση διαθέσιμων από την βιβλιογραφία πειραματικών δεδομένων.

Κεφάλαιο 2

Μαθηματική Θεμελίωση

2.1	Κώδικας Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής FDS	19
2.1.1	Ο ρόλος της Μεθόδου Προσομοίωσης Μεγάλων Δι- νών στην μοντελοποίηση της τύρβης	27
2.2	Μοντέλο Κλάσματος Μείγματος	30
2.3	Η εξίσωση αγωγής θερμότητας στο στερεό	32
2.3.1	Αριθμητικό μοντέλο	33
2.3.2	Ροή θερμότητας λόγω ακτινοβολίας σε στερεά	35
2.3.3	Ροή θερμότητας λόγω συναγωγής σε στερεά	36
2.4	Θερμικές ιδιότητες δομικών υλικών	37
2.5	Μοντέλο πυρόλυσης στερεών υλικών	38
2.5.1	Προκαθορισμένος ρυθμός έκλυσης θερμότητας	39
2.5.2	Στέρεα καύσιμα	39
2.5.3	Μοντέλο υπολογισμού ρυθμού πυρόλυσης	42
2.5.4	Υγρά καύσιμα	46
2.6	Διαδικασία Επίλυσης	47
2.7	Επαλήθευση προλέξεων	49

2.1 Κώδικας Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής FDS

Ο κώδικας υπολογιστικής ρευστοδυναμικής FDS υπολογίζει τα μεγέθη της ροής ρευστού που οφείλονται στην ύπαρξη φωτιάς. Στον κώδικα επιλύονται αριθμη-

τικά οι εξισώσεις Navier-Stokes, δίνοντας έμφαση στις θερμικές ροές χαμηλών ταχυτήτων, στην παραγωγή καπνού και την μεταφορά θερμότητας και μάζας [McGrattan et al., 2010]. Στον κώδικα FDS επιλύονται οι απλοποιημένες εξισώσεις καύσης χαμηλού αριθμού Mach. Οι κινήσεις που λαμβάνονται υπόψιν στην παρούσα εργασία είναι αυτές που προκύπτουν λόγω της τοπικής προσθήκης πηγής θερμότητας σε ένα χώρο που αρχικά περιέχει ρευστό σε ηρεμία. Η βασική εφαρμογή αυτών των εξισώσεων είναι στις περιπτώσεις κίνησης του καπνού και των θερμών ρευμάτων που προκαλούνται λόγω της ύπαρξης φωτιάς.

Για την αριθμητική προσέγγιση των μερικών παραγώγων των εξισώσεων διατήρησης της μάζας, της ορμής και της ενέργειας χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών. Ο υπολογιστικός χώρος διακριτοποιείται με την χρήση τρισδιάστατου πλέγματος. Ο αλγόριθμος επίλυσης του ροϊκού πεδίου είναι τύπου πρόβλεψης-διόρθωσης (predictor-corrector) και χρησιμοποιούνται πεπερασμένες διαφορές δεύτερης τάξης τόσο για τις χωρικές όσο και για τις χρονικές παραγώγους του. Με τη μέθοδο πρόβλεψης διόρθωσης υπολογίζεται το επόμενο σημείο της λύσης βασιζόμενο σε περισσότερα από ένα προηγούμενα σημεία και στη συνέχεια γίνεται διόρθωση των προβλέψεων με την χρήση κατάλληλης σχέσης. Αναλυτικότερα, γίνεται αρχικά μια υπόθεση για την πρώτη λύση του πεδίου ροής δίνοντας τιμές στα βαθμωτά μεγέθη του πεδίου, όπως η θερμοκρασία, η πυκνότητα και η πίεση και άλλα. Στην συνέχεια, επιλύονται οι εξισώσεις Navier-Stokes, οι οποίες είναι εκφρασμένες υπό μορφή πεπερασμένων διαφορών, για το πεδίο των ταχυτήτων, με χρήση του πεδίου των πιέσεων και προκύπτουν οι νέες τιμές του πεδίου ταχυτήτων. Έπειτα, με χρήση των εξισώσεων διατήρησης υπολογίζονται οι διορθώσεις στις πιέσεις και λαμβάνονται έτσι νέες τιμές πίεσης και νέες τιμές ταχυτήτων. Τα παραπάνω βήματα επαναλαμβάνονται μέχρι την επίτευξη σύγκλισης των τιμών των ταχυτήτων.

Πιο αναλυτικά οι θεμελιώδεις εξισώσεις που επιλύονται στον κώδικα FDS παρουσιάζονται παρακάτω:

Εξίσωση διατήρησης μάζας

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{u} = \dot{m}_b''' \quad (2.1)$$

ή σε όρους για κάθε ξεχωριστό αέριο χημικό συστατικό, Y_α :

$$\frac{\partial(\rho Y_\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot \rho Y_\alpha \vec{u} = \nabla \cdot \rho D_\alpha \nabla Y_\alpha + \dot{m}_{b,\alpha}''' + \dot{m}_\alpha''' \quad (2.2)$$

όπου στην συγκεκριμένη περίπτωση $\dot{m}_b''' = \sum \dot{m}_{b,\alpha}'''$ είναι ο ρυθμός παραγωγής συστατικών από εξατμιζόμενες σταγόνες ή σωματίδια. Στο εσωτερικό ενός όγκου ελέγχου που περιέχει ένα μείγμα αερίων, μπορεί να οριστεί το κλάσμα μείγματος (Z) ως το πηλίκο της μάζας ενός υποσυνόλου κάποιων από τα συστατικά που υπάρχουν στον χώρο, προς την ολική μάζα όλων των συστατικών που υπάρχουν στον όγκο ελέγχου. Αντίστοιχα, το κλάσμα μάζας (Y) ορίζεται ως το πηλίκο της μάζας m_i των μορίων του συστατικού i (που υπολογίζεται από το γινόμενο του αριθμού των γραμμομορίων n_i επί το μοριακό βάρος W_i του συστατικού) προς την συνολική μάζα των μορίων του μείγματος.

Από τον ορισμό του κλάσματος μάζας είναι προφανές ότι το άθροισμα όλων των κλασμάτων μάζας ενός μείγματος ισούται με την μονάδα, δηλαδή $\sum_{i=1}^n Y_i = 1$, όπου n ο συνολικός αριθμός των i συστατικών του μείγματος. Επίσης ισχύει και ότι $\sum_{i=1}^n \dot{m}_i''' = 1$ και $\dot{m}_b''' = \sum \dot{m}_{b,\alpha}'''$ εξ'ορισμού, επειδή έχει υποτεθεί ότι $\sum \rho D_\alpha \nabla Y_\alpha$. Αυτός ο τελευταίος ισχυρισμός δεν είναι σωστός για κάθε περίπτωση. Παρόλα αυτά, οι εξισώσεις μεταφοράς επιλύονται για την συνολική μάζα και για όλα (εκτός από ένα) τα συστατικά, υπονοώντας ότι ο όρος διάχυσης των χημικών ειδών επιλέγεται έτσι ώστε το άθροισμα όλων των όρων διάχυσης να είναι μηδέν.

Εξίσωση διατήρησης ορμής

$$\frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{u} \vec{u} + \nabla \cdot p = \rho g + \vec{f}_b + \nabla \cdot \tau_{ij} \quad (2.3)$$

όπου ο όρος δύναμης f_b αντιπροσωπεύει τις εξωτερικές δυνάμεις όπως για παράδειγμα η οπισθέλκουσα δύναμη που εφαρμόζεται σε υγρές σταγόνες. Ο όρος τ_{ij} αναφέρεται στον τανυστή των τάσεων που δίνεται από την σχέση:

$$\tau_{ij} = \mu \left(2\vec{S}_{ij} - \frac{2}{3}\delta_{ij}(\nabla \cdot \vec{u}) \right) \quad (2.4)$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j, \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad (2.5)$$

και ο συμμετρικός τανυστής παραμόρφωσης:

$$\vec{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (2.6)$$

Εξίσωση διατήρησης ενέργειας

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot \rho h \vec{u} = \frac{Dp}{Dt} + q''' - \nabla \cdot \vec{q} + \vec{\Phi} \quad (2.7)$$

Καταστατική εξίσωση τέλειου αερίου

$$p = \frac{\rho RT}{M} \quad \text{όπου} \quad M = \sum \frac{M_i}{Y_i} \quad (2.8)$$

Η συνάρτηση Φ εκφράζει τον ρυθμό με τον οποίο η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμική λόγω της συνεκτικότητας του ρευστού και δίνεται από την εξής σχέση:

$$\vec{\Phi} \equiv \tau_{ij} \cdot \nabla \vec{u} \equiv \mu \left(2\vec{S}_{ij} S_{ij} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{u})^2 \right) \quad (2.9)$$

Οι συναγωγικοί ή μεταφορικοί όροι των εξισώσεων μεταφοράς της μάζας, δηλαδή οι όροι που εκφράζουν την αλλαγή στο εκάστοτε μεταβαλλόμενο μέγεθος σαν αποτέλεσμα της μεταφοράς του υλικού στοιχείου από ένα σημείο σε ένα άλλο, είναι γραμμένοι σε μορφή εμπρός διαφόρισης στο βήμα πρόβλεψης και πίσω διαφόρισης για το βήμα διόρθωσης. Η διάχυση θερμότητας και μάζας είναι γραμμένη στη μορφή κεντρικών διαφορών. Η θερμοκρασία προκύπτει από την πυκνότητα μέσω των καταστατικών εξισώσεων και ο ρυθμός παραγωγής θερμότητας προκύπτει από την κλίση του κλάσματος μείγματος στην πορεία της φλόγας.

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

$$h = \int_{T_o}^T C_p(T) dT \quad (2.10)$$

Το χρονικό βήμα καθορίζεται από μία συνθήκη η οποία εξασφαλίζει ότι η λύση των εξισώσεων δεν μπορεί να προσεγγίζεται με βήμα μεγαλύτερο από την χρονική περίοδο που χρειάζεται ένα οποιοδήποτε σωματίο του ρευστού για να διασχίσει ένα οποιοδήποτε κελί του πλέγματος (συνθήκη Courant). Όσον αφορά την πίεση χρησιμοποιούνται η εξίσωση Poisson η οποία προκύπτει χρησιμοποιώντας την απόκλιση των εξισώσεων της ορμής. Αυτή η εξίσωση, η οποία κατατάσσεται στις διαφορικές εξισώσεις παραβολικής μορφής, επιλύεται στην συνέχεια χρησιμοποιώντας Ταχύ Μετασχηματισμό Fourier (Fast Fourier Transform, FFT), [Salley et Kassawara, 2007].

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

$$p = p_o - \rho_\infty g z + \tilde{p} \quad (2.11)$$

Στην παραπάνω σχέση, η πίεση p_o είναι σταθερή και οι άλλοι δύο όροι σχετικά μικροί, οπότε αμελούνται ($\rho_\infty g z = 0, \tilde{p} = 0$). Έτσι, για ροές μικρού αριθμού Mach μπορεί να υποθεθεί ότι η θερμοκρασία και η πυκνότητα είναι ποσά αντιστρόφως ανάλογα και συνδέονται μέσω της καταστατικής Εξίσωσης (2.8).

Η προσομοίωση της τύρβης επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας την μέθοδο Προσομοίωσης Μεγάλων Δινών (Large Eddy Simulation, LES), κάνοντας χρήση του μοντέλου Smagorinsky. Οι δίνες μεγάλου μήκους περιέχουν την τυρβώδη κινητική ενέργεια ενώ οι δίνες μικρού μήκους είναι υπεύθυνες για την καταστροφή της. Βασικά, οι δίνες μεγάλου μήκους είναι αυτές που επιδρούν στην ανάπτυξη του πεδίου ροής ή του θερμοκρασιακού πεδίου και κατά συνέπεια είναι αυτές που η μελέτη τους παρουσιάζει μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Στην περίπτωση λοιπόν της LES προσομοίωσης, εισάγεται ένα χωρικό φίλτρο στις κυριαρχούσες εξισώσεις κατά τέτοιο τρόπο ώστε να επιλύονται οι κινήσεις μόνο των δινών μεγάλης κλίμακας, ενώ για τις μικρότερες κλίμακες, λαμβάνονται μέσες τιμές. Αυτή η μέθοδος προϋποθέτει την χρήση υποπλεγματικών μοντέλων (SGS: Subgrid Scale) για την μοντελοποίηση τόσο της τύρβης μικρής κλίμακας όσο και των μέσων ρυθμών αντίδρασης, καθώς οι χημικές αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα σε μοριακή κλίμακα. Η τύρβη υποπλεγματικής κλίμακας υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το μοντέλο Smagorinsky, με τιμή της σταθεράς Smagorinsky C_s ίση με 0.2. Το αριθμητικό χρονικό βήμα είναι συνεχώς προσαρμοζόμενο προκειμένου να ικανοποιείται το κριτήριο CFL (Courant-Friedrichs-Lewy condition). Λόγω της χρήσης της μεθόδου LES, το δυναμικό ιξώδες ορίζεται στο κέντρο του κάθε κελιού ως εξής:

$$\mu_{ijk} = \rho_{ijk}(C_s\Delta)^2|S| \quad \text{όπου} \quad \Delta = (\delta x\delta y\delta z)^{\frac{1}{3}} \quad (2.12)$$

$$|S|^2 = 2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 - \frac{2}{3}(\nabla \cdot \vec{u})^2 \quad (2.13)$$

Με την μέθοδο LES είναι εφικτός ο καθορισμός της στιγμιαίας θέσης του κινούμενου μετώπου φλόγας μεγάλης κλίμακας, ενώ για τις μικρές τυρβώδεις κλίμακες χρησιμοποιείται το μοντέλο υποπλέγματος το οποίο είναι πολύ ακριβές. Συνοψίζοντας για το μοντέλο LES είναι φανερό ότι είναι δαπανηρό διότι απαιτεί την επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes σε χρονικά μεταβαλλόμενη μορφή και από άποψη μνήμης υπολογιστή γιατί η επίλυση των εξισώσεων N-S απαιτεί πολύ πυκνό αριθμητικό πλέγμα λόγω της μικρότερης διάστασης των δινών που επιλύονται. Το μοντέλο έχει να ξεπεράσει αρκετά εμπόδια σχετικά με τις οριακές συνθήκες κοντά σε στερεό όριο [Μπεργελές, 2006]. Πιο συγκεκριμένα σχετικά με τις φωτιές σε κτίρια, με την μέθοδο LES παρέχεται η καλύτερη ισορροπία μεταξύ υπολογιστικού κόστους και αριθμητικής ακρίβειας συγκριτικά με άλλα μοντέλα. Έτσι αποτελεί μια συνήθη προσέγγιση για την επίλυση ασταθών τρισδιάστατων φαινομένων που μπορεί να συμπεριλαμβάνουν διαφόρων ειδών μεταβατικά φαινόμενα όπως η έναυση, ανάπτυξη, καθολική ανάφλεξη (flashover), εκτόνωση (backdraft) και απόσβεση (extinction) της φωτιάς [Hwang et al., 2010].

Σε όλες τις στέρεες επιφάνειες επιβάλλονται οριακές θερμικές συνθήκες λαμβάνοντας υπόψιν πληροφορίες σχετικά με την συμπεριφορά σε καύση των δεδομένων υλικών. Η θερμική ακτινοβολία υπολογίζεται με μια τεχνική παρόμοια με τη μέθοδο πεπερασμένων όγκων για μεταφορά μέσω συναγωγής η οποία ονομάζεται μέθοδος πεπερασμένων όγκων (Finite Volume Method, FVM) και χρησιμοποιείται το ίδιο πλέγμα όπως και κατά την επίλυση της ροής. Για την προσομοίωση της κίνησης του καπνού, της λειτουργίας των καταιονιστήρων και των ακροφυσίων ψεκασμού του καυσίμου γίνεται χρήση της μεθοδολογίας επίλυσης διφασικών ροών κατά Lagrange. Όσον αφορά την παρουσίαση και οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων του κώδικα FDS χρησιμοποιείται το συνοδευτικό πρόγραμμα Smokeview.

Η διατύπωση των εξισώσεων και οι αριθμητικοί αλγόριθμοι περιγράφονται στον τεχνικό οδηγό του κώδικα FDS (TRG, Technical Reference Guide) ενώ οδηγίες

για την χρήση και την εκτέλεση του προγράμματος παρέχονται από τον Οδηγό Χρήσης του κώδικα FDS (UG, User's Guide).

Το κυρίως πρόγραμμα είναι γραμμένο σε Fortran 90 και σε C και δημιουργήθηκε από το Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων και Τεχνολογίας των Η.Π.Α. (NIST, National Institute of Standards and Technology). Η πρώτη κανονική έκδοση του προγράμματος έγινε διαθέσιμη στους χρήστες το Φεβρουάριο του 2000. Έκτοτε, το πρόγραμμα ανανεώνεται και βελτιώνεται συνεχώς. Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε χρησιμοποιώντας την έκδοση 5.5.3 η οποία παρουσιάστηκε το Νοέμβριο του 2010.

Οι υπολογιστικές λεπτομέρειες οι οποίες καθορίζουν τα χαρακτηριστικά του προς επίλυση προβλήματος εισάγονται σε ένα αρχείο εισόδου, το οποίο κατά περίπτωση, περιλαμβάνει τα εξής στοιχεία:

1. Ακριβή περιγραφή της γεωμετρίας του χώρου που γίνεται η προσομοίωση. Ο χρήστης ορίζει ένα τρισδιάστατο ορθογώνιο πλέγμα στο μέγεθος που επιθυμεί ανάλογα με την ακρίβεια που θέλει να επιτύχει. Τα επιπλέον αντικείμενα που θα τοποθετηθούν στον χώρο πρέπει να έχουν τέτοια γεωμετρία ώστε να προσαρμόζονται στο υπολογιστικό πλέγμα. Σε κάθε κελί του πλέγματος γίνεται επίλυση της ροής δίνοντας έτσι την δυνατότητα στον χρήστη να γνωρίζει για κάθε χρονικό βήμα την θερμοκρασία, την ταχύτητα, την πίεση, την πυκνότητα και την χημική σύσταση σε κάθε υπολογιστικό κελί.
2. Πληροφορίες για τις φυσικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται (κυρίως οι θερμικές ιδιότητές τους) καθώς και πληροφορίες που αφορούν την καύση τους. Σε κάθε στέρεα επιφάνεια υπολογίζονται η θερμοκρασία καθώς και ο ρυθμός απώλειας μάζας και θερμότητας.
3. Πληροφορίες για το μέγεθος της φωτιάς, τον ρυθμό έκλυσης θερμότητας, την παραγωγή καπνού. Ορίζονται επίσης τα φυσικά χαρακτηριστικά του καυσίμου (θερμική αγωγιμότητα, θερμογόνος ικανότητα κλπ).
4. Πληροφορίες για τις εξωτερικές οριακές συνθήκες (θερμοκρασία, ταχύτητα ροής κλπ), οι οποίες είναι απαραίτητες για τους υπολογισμούς.
5. Πληροφορίες για τα ενεργά στοιχεία του συστήματος όπως για παράδειγμα καταιονιστήρες και ανιχνευτές (εάν υπάρχουν) καθώς και οι χρόνοι ενεργοποίησής τους.
6. Πληροφορίες για τις θέσεις καταγραφής σε αρχεία εισόδου, των τιμών των απαιτούμενων υπολογιστικών μεγεθών, όπως: Θερμοκρασία (αερίων και

στερεών), ταχύτητα, ροή θερμότητας, συγκεντρώσεις επιλεγμένων αερίων (όπως CO, CO₂, O₂) και ορατότητα.

2.1.1 Ο ρόλος της Μεθόδου Προσομοίωσης Μεγάλων Δινών στην μοντελοποίηση της τύρβης

Ακόμα και ο ορισμός της "τύρβης" είναι δύσκολος. Οι πολλές ομοιότητες που παρατηρούνται σε διαφορετικές χαοτικές ροές πολλαπλών κλιμάκων ομαδοποιούνται ως τύρβη, αν και δεν υπάρχει ισχυρή θεωρητική βάση ώστε να προταθεί η τύρβη ως κάποια "παγκόσμια" φυσική κατάσταση [Μαρκάτος, 1998]. Κάποιες από τις πρώτες προσπάθειες ορισμού του φαινομένου παρατίθενται στην συνέχεια:

Ορισμός 1. *Οι μεγάλες σπείρες περιέχουν τις μικρές σπείρες, οι οποίες τροφοδοτούνται με την ταχύτητά τους και οι μικρές σπείρες περιέχουν μικρότερες σπείρες οι οποίες τροφοδοτούνται από το ιξώδες [Richardson, 1922].*

Ορισμός 2. *Η τύρβη είναι μια μη κανονική κίνηση που κάνει την εμφάνιση της σε ρευστά, τόσο υγρά όσο και αέρια, όταν αυτά διέρχονται από στερεές επιφάνειες ή όταν γειτονικά στρώματα του ρευστού διέρχονται το ένα από το άλλο [Karman and Taylor, 1938].*

Ορισμός 3. *Μια ροή καλείται τυρβώδης όταν τα σωματίδια του ρευστού κινούνται με εξαιρετικά μη κανονικό, τυχαίο και τρισδιάστατο τρόπο σε μια συνεχή κλίμακα μήκους και χρόνου [Hinze, 1959].*

Η τύρβη είναι ιδιότητα της ροής και όχι του ίδιου του ρευστού. Σε ροές που αρχικά είναι στρωτές, η ανάπτυξη της τύρβης προκύπτει λόγω ασταθειών που αναπτύσσονται όσο αυξάνεται ο αριθμός Reynolds. Δεν υπάρχει ακριβής ορισμός της τύρβης στα ρευστά, ούτε και υπάρχει κάποια γενικότερη θεωρία πάνω στην τύρβη. Έτσι η ίδια η τύρβη χαρακτηρίζεται από διάφορες παρατηρήσιμες ιδιότητές της. Οι πιο σημαντικές από αυτές παρατίθενται στην συνέχεια:

- Η τυρβώδης ροή χαρακτηρίζεται από μεγάλους αριθμούς Reynolds.
- Περιστροφική κίνηση τριών διαστάσεων.
- Μη μόνιμη και ισχυρά τυχαία στον χώρο και στον χρόνο.
- Σκεδαστική (η ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα λόγω των ιξωδών τάσεων).
- Καταναλώνει ενέργεια.

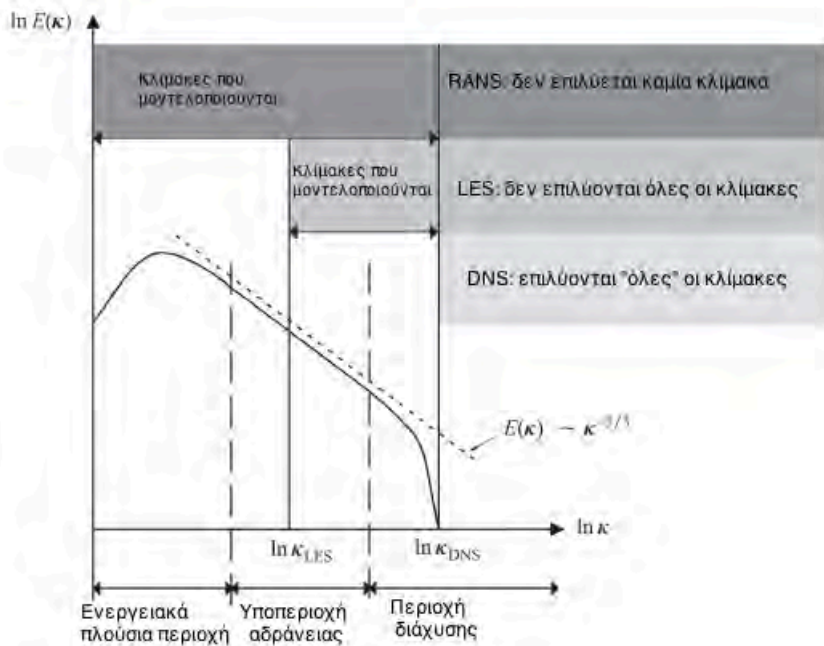
Αν αποδεχθεί κανείς την υπόθεση ότι η λεπτομερής κίνηση μιας τυρβώδους ροής χαρακτηρίζεται από τις εξισώσεις Navier-Stokes, τότε οι θεμελιώδεις εξισώσεις της τύρβης μπορούν να θεωρηθούν γνωστές και με αυτόν τον τρόπο να αποτελέσουν την βάση για οποιαδήποτε στατιστική θεωρία για την περιγραφή του τυρβώδους πεδίου [Schiestel, 2006]. Ο χαστικός χαρακτήρας της τύρβης είναι λοιπόν άμεση συνέπεια των μη-γραμμικών όρων που εμφανίζονται στις εξισώσεις Navier-Stokes.

Βάσει μελετών [Lesieur et al., 2005] είναι ασφαλές να υποτεθεί ότι αριθμητική προσομοίωση της τύρβης μπορεί να χαρακτηριστεί κάθε αριθμητική προσέγγιση που επιτρέπει την πρόβλεψη της δημιουργίας των στιγμιαίων ή μέσων όρων των ποσοτήτων που σχετίζονται με την τύρβη και μπορούν να εφαρμοστούν σε συνεκτικές ροές.

Η πρώτη προσέγγιση είναι η Άμεση Αριθμητική Προσομοίωση (**Direct Numerical Simulation, DNS**), η οποία παρέχει στιγμιαίες και στατιστικές προλέξεις. Το ρευστό θεωρείται συνεχές σε σχέση με την μοριακή κλίμακα, έτσι οι εξισώσεις Navier-Stokes μπορούν να λυθούν με άμεσο τρόπο. Όμως πρέπει να επιλυθούν όλες οι κλίμακες της τύρβης από την μεγαλύτερη δίνη μέχρι και την μικρότερη κλίμακα Kolmogorov, οπότε η χωρική και χρονική διακριτοποίηση είναι πολύ μικρή (της τάξης του 1 mm ή και μικρότερη). Είναι ακριβής αλλά με μεγάλο κόστος και περιορίζεται σε ροές με χαμηλούς αριθμούς Reynolds και σε απλές γεωμετρίες.

Η δεύτερη προσέγγιση είναι η μέθοδος **Προσομοίωσης Μεγάλων Δινών (Large Eddy Simulation, LES)**, το οποίο έχει παρόμοια λογική με την μέθοδο DNS (παρέχοντας και τόσο στιγμιαίες όσο και στατιστικές προλέξεις) αλλά εφαρμόζόμενο σε μεγάλη κλίμακα. Η τεχνική αυτή παρότι έχει σημαντικό υπολογιστικό κόστος, δεν είναι απαγορευτική για τρισδιάστατους αριθμητικούς υπολογισμούς σε μη σταθερή ροή. Η βασική ιδέα στηρίζεται στην παρατήρηση ότι οι μεγάλες δίνες διαφοροποιούνται σε μεγάλο βαθμό ανάλογα με την γεωμετρία της ροής, η δομή τους είναι ανισότροπη και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο της ροής ενώ οι μικρές δίνες έχουν έναν πιο καθολικό και ισότροπο χαρακτήρα [Schiestel, 2006].

Η τρίτη προσέγγιση εμπλέκει την επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes (με κάποιες επιπλέον τάσεις οι οποίες δημιουργούνται λόγω της ύπαρξης των τάσεων Reynolds) και είναι ευρέως γνωστή ως **RANS, (Reynolds-averaged Navier-Stokes)**. Ενώ οι περιορισμοί της DNS προσομοίωσης είναι κοινώς αποδεκτοί, υπάρχει μεγάλη συζήτηση για το ποιά από τις άλλες δύο προσεγγίσεις πρέπει να χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της φωτιάς. Η επιλογή εξαρτάται κυρίως από τον τύπο του υπό μελέτη προβλήματος, Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Οι τρεις διαφορετικές μεθοδολογίες προσομοίωσης της τύρβης αναπαριστώμενες στο ενεργειακό φάσμα Κολμογορον όπου η ενέργεια $E(k)$ σχετίζεται με τον κυματαριθμό k της κάθε μεταβλητής [Gravemeier, 2007].

Σε πολλές βιομηχανικές διεργασίες - και ειδικά σε αυτές που ενδιαφέρει η "μόνιμη" λύση και στις οποίες η τύρβη θεωρείται "ομογενής" - ο χειρισμός τους θα μπορούσε να γίνει με ικανοποιητικό τρόπο χρησιμοποιώντας μοντέλα RANS, όπου σημειωτέον σε τέτοια βασίζονται και τα περισσότερα εμπορικά πακέτα CFD. Στον κώδικα FDS που βασίζεται στην μελέτη των Howard Baum και Ronald Rehm [Rehm and Baum, 1978], όπου υπάρχει ο στόχος να διατηρηθεί η δομή τόσο των πλουμίων φωτιάς όσο και άλλων ροών επηρεασμένων από την ύπαρξη φωτιάς, η τεχνική LES μπορεί να εξυπηρετήσει καλύτερα αυτό το στόχο. Υπάρχει η άποψη ότι όσο αναπτύσσονται εξεζητημένα μοντέλα καύσης μέσα στην ίδια την φωτιά, δεν θα υπάρχει άλλη εναλλακτική εκτός του LES επειδή η υπόθεση ότι η φωτιά μπορεί να προσεγγιστεί με χρονικά βήματα τα οποία θα πρέπει να υπακούουν στις απαιτήσεις RANS μοντέλων, δεν θα επιτρέψει την πιο ακριβή περιγραφή την δυναμικής της φωτιάς [McGrattan, 2005].

2.2 Μοντέλο Κλάσματος Μείγματος

Υπάρχουν δύο τρόποι για να καθοριστεί μια φωτιά στον κώδικα FDS:

- Ο πρώτος τρόπος είναι ο ορισμός του επιθυμητού ρυθμού έκλυσης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (Heat Release Rate Per Unit Area, HRRPUA). Εάν οριστεί ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας, τότε δεν απαιτείται ορισμός της μορφής της αντίδρασης καύσης στο αρχείο εισόδου.
- Ο δεύτερος τρόπος είναι ο ορισμός της θερμογόνου δύναμης, μαζί με άλλες θερμικές παραμέτρους που καθορίζουν τις ιδιότητες των υλικών. Σ' αυτήν την περίπτωση ο ρυθμός καύσης του καυσίμου εξαρτάται από την συνολική ροή θερμότητας στην επιφάνεια.

Και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις, για την προσομοίωση του φαινομένου της καύσης στην αέρια φάση χρησιμοποιείται το μοντέλο κλάσματος μείγματος.

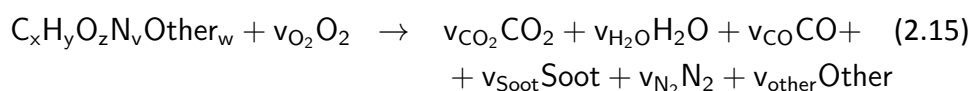
Με την θεώρηση ενός συστήματος που χαρακτηρίζεται από την ροή ενός ρεύματος καυσίμου που αναμειγνύεται με ένα ρεύμα οξειδωτικού, το κλάσμα μείγματος του αερίου ρεύματος του καυσίμου ορίζεται ως [Φούντη, 2005]:

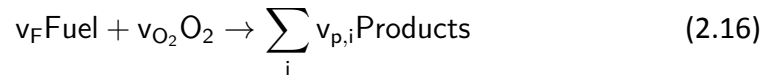
$$f = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} \quad (2.14)$$

όπου \dot{m}_1 και \dot{m}_2 είναι η παροχή μάζας του ρεύματος καυσίμου και οξειδωτικού αντίστοιχα.

Στον κώδικα FDS για τον καθορισμό των παραμέτρων του μοντέλου κλάσματος μείγματος απαιτείται ο ορισμός του καυσίμου που θα χρησιμοποιηθεί. Σε περίπτωση που παραληφθεί αυτή η πληροφορία, χρησιμοποιείται αυτομάτως το προπάνιο σαν υποκατάστατο καύσιμο.

Χρησιμοποιώντας το μοντέλο κλάσματος μείγματος, κάθε αντίδραση θεωρείται ότι είναι της μορφής της Εξίσωσης (2.15) η οποία μπορεί να παρασταθεί και σε μια πιο γενική μορφή όπως φαίνεται στην Εξίσωση (2.16):





Οι συντελεστές v_i είναι οι στοιχειομετρικοί συντελεστές για την συνολική διεργασία καύσης, στην οποία αντιδρά το καύσιμο (Fuel) με το οξυγόνο (O_2) για να παραχθούν τα προϊόντα (Products), Εξίσωση (2.16).

Στον κώδικα FDS απαιτείται να προσδιοριστεί ο χημικός τύπος του καυσίμου καθώς και το ποσοστό παραγωγής CO (y_{CO}), αιθάλης (y_{soot}), H_2 και το ποσοστό υδρογόνου στην αιθάλη (H_{frac}), προκειμένου να είναι δυνατός ο πλήρης προσδιορισμός των στοιχειομετρικών συντελεστών της χημικής αντίδρασης που θα λάβει χώρα. Για περισσότερη ακρίβεια μπορεί να προσδιοριστεί το ποσοστό αζώτου τόσο στο καύσιμο όσο και στα υπόλοιπα παράγωγα της χημικής εξίσωσης. Όταν αναφέρεται η έννοια **παραγωγή** στον κώδικα FDS, ο χρήστης είναι αυτός που ορίζει τι ποσοστό από τα προϊόντα της καύσης θα μετατραπεί σε παραδείγματος χάριν CO, αιθάλη κ.ο.κ. Αντίστοιχα, οι ρυθμοί κατανάλωσης μάζας για το καύσιμο και το οξειδωτικό σχετίζονται μέσω της Εξίσωσης (2.17), όπου W_F και W_O τα μοριακά βάρη του καυσίμου και του οξειδωτικού αντίστοιχα:

$$\frac{\dot{m}_F'''}{v_F W_F} = \frac{\dot{m}_O'''}{v_O W_O} \quad (2.17)$$

Οι πληροφορίες αυτές χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της ποσότητας των προϊόντων της καύσης χρησιμοποιώντας τις Εξισώσεις (2.18) ως (2.26) για τον υπολογισμό των στοιχειομετρικών συντελεστών, όπου το μοριακό βάρος της εκάστοτε ένωσης i , και Z το κλάσμα μείγματος όπως αυτό θα οριστεί παρακάτω:

$$v_{O_2} = v_{CO_2} + \frac{v_{CO}}{2} + \frac{v_{H_2O}}{2} + \frac{Z}{2} \quad (2.18)$$

$$v_{CO_2} = x + v_{CO} - (1 - H_{frac})v_{soot} \quad (2.19)$$

$$v_{H_2O} = \frac{y}{2} - \frac{H_{frac}}{2}v_{soot} - v_{H_2} \quad (2.20)$$

$$v_{CO} = \frac{W_F}{W_{CO}} y_{CO} \quad (2.21)$$

$$v_{H_2} = \frac{W_F}{W_{H_2}} y_{H_2} \quad (2.22)$$

$$v_{soot} = \frac{W_F}{W_s} y_s \quad (2.23)$$

$$v_{N_2} = \frac{v}{2} \quad (2.24)$$

$$v_{other} = W \quad (2.25)$$

$$W_s = H_{frac} W_H + (1 - H_{frac}) W_C \quad (2.26)$$

2.3 Η εξίσωση αγωγής θερμότητας στο στερεό

Για την εκτίμηση της θερμοκρασίας του στερεού τοιχώματος εφαρμόζεται μονοδιάστατη εξίσωση αγωγής θερμότητας, για παράδειγμα κατά την x διεύθυνση μέσα στο στερεό (όπου για $x = 0$ νοείται η επιφάνεια του στερεού), για την θερμοκρασία $T_s(x, t)$ ισχύει:

$$\rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} + \dot{q}_s''' \quad (2.27)$$

όπου για τις φυσικές ιδιότητες του υλικού k_s, ρ_s, C_s θα γίνει αναφορά στην συνέχεια. Ο όρος πηγής \dot{q}_s''' αποτελείται από δύο συνισταμένες, αυτή των χημικών αντιδράσεων και αυτή της απορρόφησης ακτινοβολίας:

$$\dot{q}_s''' = \dot{q}_{s,c}''' + \dot{q}_{s,r}''' \quad (2.28)$$

ο όρος $\dot{q}_{s,c}'''$ αναφέρεται ουσιαστικά στον ρυθμό παραγωγής θερμότητας λόγω αγωγής η οποία υπολογίζεται από το μοντέλο πυρόλυσης διαφόρων υγρών και στερεών καυσίμων.

2.3.1 Αριθμητικό μοντέλο

Σε κάθε υπολογιστικό κελί (το οποίο αποτελείται από στερεό υλικό και στο οποίο ο χρήστης έχει περιγράψει τις θερμικές του ιδιότητες), επιλύεται μονοδιάστατα η μεταφορά θερμότητας. Κάθε υπολογιστικό κελί το οποίο θεωρείται ότι αποτελείται από στερεό υλικό μπορεί να περιλαμβάνει και παραπάνω του ενός στρώματα υλικών. Κάθε στρώμα αποτελείται από μη-ομοιόμορφα κελιά, τα οποία συσσωρεύονται σε μεγαλύτερο βαθμό κοντά στην εμπρόσθια και πίσω όψη. Τα μικρότερα κελιά επιλέγονται βάση του κριτηρίου:

$$\delta x < S_s \sqrt{\frac{k_s}{\rho_s C_s}} \quad (2.29)$$

όπου ο όρος S_s αναφέρεται, στον ορισμένο από τον χρήστη, παράγοντα μεγέθους του υπολογιστικού κελιού (η τιμή εξ'ορισμού ισούται με 1). Τα εσωτερικά στο στερεό τοίχωμα μεγέθη των κελιών αυξάνονται κατά έναν παράγοντα επιμήκυνσης κατά την διεύθυνση του εσωτερικού του τοιχώματος (η τιμή εξ'ορισμού ισούται με 2). Τα όρια των κελιών ορίζονται σημειακά (x_i) ενώ η θερμοκρασία ορίζεται στο κέντρο κάθε i -οστού κελιού και συμβολίζεται ως $T_{s,i}$. Η θερμική αγωγιμότητα (εξαρτώμενη από την θερμοκρασία) του κάθε υλικού καθορίζεται και αυτή στο κέντρο κάθε κελιού και συμβολίζεται ως $k_{s,i}$. Οι θερμοκρασίες υπολογίζονται σε κάθε χρονικό βήμα με χρήση του σχήματος Crank-Nicolson:

$$\begin{aligned} \frac{T_{s,i}^{n+1} - T_{s,i}^n}{\delta t} = & \frac{1}{2(\rho_s C_s)_i \delta x_i} \left(k_{s,i+\frac{1}{2}} \frac{T_{s,i+1}^n - T_{s,i}^n}{\delta x_{s,i+\frac{1}{2}}} - k_{s,i-\frac{1}{2}} \frac{T_{s,i}^n - T_{s,i-1}^n}{\delta x_{s,i-\frac{1}{2}}} + \right. \\ & \left. + k_{s,i+\frac{1}{2}} \frac{T_{s,i+1}^{n+1} - T_{s,i}^{n+1}}{\delta x_{i+\frac{1}{2}}} - k_{s,i-\frac{1}{2}} \frac{T_{s,i}^{n+1} - T_{s,i-1}^{n+1}}{\delta x_{i-\frac{1}{2}}} \right) + \frac{\dot{q}_s'''}{\rho_s C_s} \quad (2.30) \end{aligned}$$

Το μήκος του κάθε κελιού είναι δx_i . Η απόσταση από το κέντρο του κάθε κελιού i στο κέντρο του κελιού $i+1$ είναι $\delta x_{i+\frac{1}{2}}$. Παρόλα αυτά, οι ιδιότητες του υλικού k_s, ρ_s, C_s και οι όροι πηγής \dot{q}_s''' ανανεώνονται με ρητό τρόπο χρησιμοποιώντας τις πληροφορίες της θερμοκρασίας από το χρονικό βήμα n . Η οριακή συνθήκη στην εμπρός επιφάνεια ορίζεται ως:

$$k_s \frac{\partial T_s}{\partial x}(0, t) = \dot{q}_c''' + \dot{q}_r''' \quad (2.31)$$

Αν επιλύεται η ακτινοβολία εσωτερικά για ένα στερεό, τότε η οριακή συνθήκη για την ακτινοβολία \dot{q}_r''' δεν χρησιμοποιείται. Για την πίσω επιφάνεια υπάρχουν δύο τύποι οριακών συνθηκών που μπορεί να χρησιμοποιηθούν. Αν η πίσω επιφάνεια θεωρείται ότι επικοινωνεί με το εξωτερικό περιβάλλον ή με κάποια άλλη περιοχή του υπολογιστικού χωρίου, η οριακή συνθήκη που εφαρμόζεται είναι ίδια με αυτήν την μπροστινής επιφάνειας. Αν θεωρηθεί όμως ότι η πίσω επιφάνεια είναι πλήρως μονωμένη, χρησιμοποιείται η αδιαβατική οριακή συνθήκη:

$$-k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} = 0 \quad (2.32)$$

Η οριακή συνθήκη διακριτοποιείται λοιπόν ως εξής:

$$\dot{q}_c''^{(n+1)} = h \left(T_g - 0.5 \left(T_{s,\frac{1}{2}}^n + T_{s,\frac{1}{2}}^{n+1} \right) \right) \quad (2.33)$$

ενώ η ροή ακτινοβολίας και αγωγής στο επόμενο χρονικό βήμα υπολογίζονται αντίστοιχα ως εξής:

$$\dot{q}_r''^{(n+1)} \approx \dot{q}_r''^n - 4 \varepsilon \sigma T_{s,\frac{1}{2}}^{n3} \left(T_{s,\frac{1}{2}}^{n+1} - T_{s,\frac{1}{2}}^n \right) \quad (2.34)$$

$$\dot{q}_c''^{(n+1)} = h \left(T_g - 0.5 \left(T_{s,\frac{1}{2}}^n + T_{s,\frac{1}{2}}^{n+1} \right) \right) \quad (2.35)$$

ενώ η θερμοκρασία των τοιχωμάτων ορίζεται ως:

$$T_w = T_{s,\frac{1}{2}} = \frac{(T_{s,0} + T_{s,1})}{2} \quad (2.36)$$

Ο αριθμός και το μέγεθος των κελιών για στερεά υλικά μπορεί να αλλάξει κατά την διάρκεια των υπολογισμών καθώς κάποιο στέρεο υλικό μετατρέπεται σε αέριο. Το μέγεθος του κάθε κελιού μειώνεται με τέτοιο τρόπο ώστε η πυκνότητα του κελιού να παραμένει ίση με αυτή του παρθένου υλικού. Αν το μέγεθος ενός κελιού μειωθεί κάτω από μια προκαθορισμένη οριακή τιμή ($1 \mu m$), το κελί αφαιρείται εντελώς. Ακολουθώντας τις μεταβολές όσον αφορά στο μέγεθος ή και στην αφαίρεση κελιών, το πλέγμα για τα στερεά υλικά ορίζεται ξανά από την αρχή και οι τιμές της μάζας και της ενθαλπίας υπολογίζονται με παρεμβολή μεταξύ των τιμών του παλιού και του νέου πλέγματος.

2.3.2 Ροή θερμότητας λόγω ακτινοβολίας σε στερεά

Η θερμότητα μεταφέρεται και μέσω της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Αναλόγως με τη θερμοκρασία και το μήκος κύματος κάθε σώμα εκπέμπει θερμότητα διαφορετικής έντασης. Υποθέτοντας ότι η θερμική ακτινοβολία από τα αέρια που υπάρχουν στον χώρο απορροφάται από ένα απείρως λεπτό στρώμα επιφανείας του στερεού, τότε η καθαρή ροή θερμότητας λόγω ακτινοβολίας είναι το άθροισμα των εισερχομένων και εξερχομένων συνιστωσών:

$$\dot{q}_r''' = \dot{q}_{r,in}''' - \dot{q}_{r,out}''' \quad (2.37)$$

όπου η κάθε συνιστώσα αναλύεται ως εξής:

$$\dot{q}_{r,in}''' = \varepsilon \int_{s' \cdot n_w < 0} I_w(s') |s' \cdot n_w| \partial\Omega \quad (2.38)$$

$$\dot{q}_{r,out}''' = \varepsilon \sigma T_w^4 \quad (2.39)$$

Παρόλα αυτά, τα περισσότερα κοινά υλικά δεν έχουν άπειρο οπτικό πάχος. Αντιθέτως, η ακτινοβολία διεισδύει κάθε υλικό μέχρι κάποιο συγκεκριμένο βάθος. Η μεταφορά της ακτινοβολίας μέσα σε ένα στερεό (ή υγρό) μπορεί να περιγραφεί σαν ένας όρος πηγής στην Εξίσωση (2.27). Στον κώδικα FDS, χρησιμοποιείται ένα μοντέλο "δύο ροών", βασιζόμενο στην προσέγγιση των Schuster-Schwarzschild [Siegel and Howell, 2002], στο οποίο γίνεται η υπόθεση ότι η ένταση της ακτινοβολίας είναι σταθερή μέσα στο "εμπρός" και "πίσω" ημισφαίριο. Η εξίσωση μεταφοράς για την ένταση κατά την "εμπρός" και "πίσω" κατεύθυνση ($I^+(x)$ και $I^-(x)$ αντίστοιχα) είναι:

$$\frac{1}{2} \frac{\partial I^+(x)}{\partial x} = \kappa_s (I^b - I^+(x)) \quad (2.40)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial I^-(x)}{\partial x} = \kappa_s (I^b - I^-(x)) \quad (2.41)$$

όπου κ_s ο συντελεστής απορρόφησης (absorption coefficient), I^b η ένταση της ακτινοβολίας από μέλαν σώμα, σ ο συντελεστής διασποράς και x η απόσταση από τη επιφάνεια του στερεού υλικού:

$$\kappa_s = \sum_{\alpha=1}^{N_m} X_\alpha \kappa_{s,\alpha} \quad (2.42)$$

Για την θερμορροή στο εσωτερικό του υλικού οι Εξισώσεις (2.40) και (2.41) πολλαπλασιάζονται με τον αριθμό π και προκύπτει:

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \dot{q}^+(x)}{\partial x} = \kappa_s \left(\sigma T^4 - \dot{q}^+(x) \right) \quad (2.43)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \dot{q}^-(x)}{\partial x} = \kappa_s \left(\sigma T^4 - \dot{q}^-(x) \right) \quad (2.44)$$

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

$$\dot{q}_r^+(0) = \dot{q}_{r,in}'' + (1 - \varepsilon) \dot{q}_r^-(0) \quad (2.45)$$

όπου ο συντελεστής θερμικής ακτινοβολίας ε και η εσωτερική απορρόφηση $\dot{q}_{r,in}'$ θεωρούνται ανεξάρτητες παράμετροι σε σχέση με το υλικό.

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

$$\dot{q}_{s,r}'''(x) = \frac{\partial \dot{q}^+(x)}{\partial x} + \frac{\partial \dot{q}^-(x)}{\partial x} \quad (2.46)$$

2.3.3 Ροή θερμότητας λόγω συναγωγής σε στερεά

Κατά την προσέγγιση LES χρησιμοποιείται ο ακόλουθος τύπος για τον υπολογισμό της ροής θερμότητας λόγω συναγωγής:

$$\dot{q}_c''' = h(T_g - T_w) \quad [W/m^2] \quad (2.47)$$

όπου ο συντελεστής μεταφοράς υπολογίζεται:

$$h = \max\left[C|T_g - T_w|^{\frac{1}{3}}, \frac{k}{L}0.037Re^{\frac{4}{5}}Pr^{\frac{1}{3}}\right] \quad [W/m^2/K] \quad (2.48)$$

όπου C είναι ο συντελεστής φυσικής συναγωγής (1.52 για οριζόντια επιφάνεια και 1.31 για κάθετη επιφάνεια), L είναι το χαρακτηριστικό μήκος σχετιζόμενο με το μέγεθος του φυσικού εμποδίου, k είναι η θερμική αγωγιμότητα του αερίου, και οι αδιάστατοι αριθμοί Re και Pr βασίζονται στην ροή του αερίου γύρω από το κάθε εμπόδιο. Αφού ο αριθμός Re είναι ανάλογος του χαρακτηριστικού μήκους L , ο συντελεστής μεταφοράς της θερμότητας είναι ασθενώς εξαρτώμενος από το L .

2.4 Θερμικές ιδιότητες δομικών υλικών

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

$$k_s = \sum_{\alpha=1}^{N_m} X_{\alpha} k_{s,\alpha} \quad ; \quad c_s = \frac{\sum_{\alpha=1}^{N_m} \rho_{s,\alpha} c_{s,\alpha}}{\rho_s} \quad (2.49)$$

όπου N_m είναι ο αριθμός των υλικών που αποτελούν το στερεό. Η μεταβλητή $\rho_{s,\alpha}$ είναι η πυκνότητα του κάθε δομικού στοιχείου και ορίζεται ως:

$$\rho_{s,\alpha} = \rho_s Y_{\alpha} \quad (2.50)$$

όπου ρ_s είναι η πυκνότητα του κάθε υλικού και Y_{α} το κλάσμα μάζας του κάθε δομικού στοιχείου α . Οπότε η πυκνότητα του στερεού είναι το άθροισμα των πυκνοτήτων του κάθε στοιχείου.

$$\rho_s = \sum_{\alpha=1}^{N_m} \rho_{s,\alpha} \quad (2.51)$$

όπου X_{α} είναι το κλάσμα όγκου του κάθε στοιχείου α και ορίζεται:

$$X_{\alpha} = \frac{\rho_{s,\alpha}}{\rho_{\alpha}} \bigg/ \sum_{\alpha'=1}^{N_m} \frac{\rho_{s,\alpha'}}{\rho_{\alpha'}} \quad (2.52)$$

όπου ρ_α είναι η πυκνότητα του υλικού α στην αρχική του μορφή. Στερεά που αποτελούνται από πολλά υλικά ορίζονται εισάγοντας το κλάσμα μάζας, Y_α , και την πυκνότητα, ρ_α , του κάθε στοιχείου του σύνθετου υλικού που ορίζει ο χρήστης.

2.5 Μοντέλο πυρόλυσης στερεών υλικών

Σε αυτό το σημείο θα αναλυθεί ο τρόπος μοντελοποίησης των αντιδράσεων πυρόλυσης της στερεάς φάσης και ο όρος πηγής λόγω χημικών αντιδράσεων, $\dot{q}_{s,c}'''$, που υπάρχουν στην εξίσωση μεταφοράς θερμότητας λόγω αγωγής στην στερεά φάση. Ο γενικός ορισμός αυτών των διεργασιών μπορεί να ενταχθεί στην γενικότερη έννοια του "μοντέλου πυρόλυσης", αλλά στην ουσία μπορεί να αντιπροσωπεύει έναν αριθμό αντιδρώντων διεργασιών, που συμπεριλαμβάνουν την ατμοποίηση, την απανθράκωση και την εσωτερική θέρμανση ενός υλικού.

Ως πυρόλυση μπορεί να οριστεί η θερμικό-χημική διάσπαση ενός σύνθετου οργανικού υλικού σε υψηλές θερμοκρασίες (πάνω από 430°C) απουσία οξυγόνου. Η πυρόλυση οποιασδήποτε οργανικής ουσίας απαιτεί υδρογόνο και όσο πιο πολύ υδρογόνο περιέχει, τόσο περισσότερους υδρογονάνθρακες μπορεί να αποδώσει όταν πυρολυθεί.

Κατά την πυρόλυση των στερεών αποβλήτων, τα προϊόντα που παράγονται είναι:

- **Αέρια:** Αποτελούνται κυρίως από υδρογόνο, μεθάνιο, μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του άνθρακα και διάφορα άλλα αέρια, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των στερεών αποβλήτων
- **Υγρά:** Το υγρό κλάσμα, είναι ελαιώδες με υψηλή πυκνότητα και ιξώδες και περιέχει απλά καρβοξυλικά οξέα (π.χ. οξικό οξύ), κετόνες (π.χ. ακετόνη), αλκοόλες (π.χ. μεθανόλη) καθώς και σύνθετους οξυγονωμένους υδρογονάνθρακες. Με περαιτέρω επεξεργασία το κλάσμα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συνθετικό καύσιμο.
- **Στερεά:** Το στερεό υπόλειμμα περιέχει σχεδόν καθαρό άνθρακα και τυχόν αδρανή υλικά που υπάρχουν στα στερεά απόβλητα.

Οι φλόγες ενός ξύλου που καίγεται προκαλούνται από την καύση των αερίων που απελευθερώνονται από την πυρόλυση, όχι από την καύση του ίδιου του

ξύλου. Συνεπώς, η πυρόλυση κοινών υλικών όπως ξύλο, πλαστικό και ύφασμα είναι πολύ σημαντική σε θέματα πυρασφάλειας και πυρόσβεσης.

2.5.1 Προκαθορισμένος ρυθμός έκλυσης θερμότητας

Πολύ συχνά ο στόχος μιας προσομοίωσης πυρκαγιάς είναι μόνο η πρόλεξη της μεταφοράς της αιθάλης και της θερμότητας από μια ορισμένη φωτιά. Με άλλα λόγια, ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας είναι ένα στοιχείο που εισάγει ο ίδιος ο χρήστης και δεν απαιτείται ο υπολογισμός του. Σε τέτοιες περιπτώσεις, ο επιθυμητός ρυθμός έκλυσης θερμότητας μεταφράζεται σε παροχή μάζας αερίου καυσίμου από μια δεδομένη στέρεη επιφάνεια, που μπορεί να θεωρηθεί και σαν η επιφάνεια ενός καυστήρα:

$$\dot{m}_f'' = \frac{f(t) \dot{q}_{user}''}{\Delta H} \quad (2.53)$$

Συνήθως, ο χρήστης ορίζει τον επιθυμητό ρυθμό έκλυσης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας, \dot{q}_{user}'' , καθώς και μια γραμμική συνάρτηση του χρόνου (time ramp), $f(t)$, οπότε με την χρήση αυτών των στοιχείων υπολογίζεται αναλόγως ο ρυθμός απώλειας μάζας.

2.5.2 Στέρεα καύσιμα

Τα στερεά μπορούν να συμμετέχουν ταυτόχρονα σε διάφορες αντιδράσεις με την προϋπόθεση ότι ισχύουν οι ακόλουθες υποθέσεις:

- η έκλυση πτητικών ουσιών κατά την μετατροπή της στερεάς σε αέρια φάση θεωρείται στιγμιαία,
- υπάρχει τοπική θερμική ισορροπία μεταξύ στερεού και πτητικών ουσιών,
- δεν υπάρχει συμπύκνωση των αέριων προϊόντων και
- δεν υπάρχουν πορώδη υλικά¹

¹Αν και δεν υπάρχουν πορώδη υλικά και δεν συμπεριλαμβάνονται άμεσα στο μοντέλο, είναι εφικτό να συμπεριληφθούν στους υπολογισμούς μέσω του κλάσματος όγκου (το οποίο δεν πρέπει αναγκαστικά να ισούται με την μονάδα και έτσι με αυτόν τον έμμεσο τρόπο η θερμική αγωγιμότητα και ο συντελεστής απορρόφησης μειώνονται αναλογικά)

Κατά την καύση ενός στερεού υπάρχουν γενικά τρία στάδια: η θέρμανση, η θερμική υποβάθμιση και η ανάφλεξη. Οι βασικές έννοιες που περιγράφουν αυτά τα τρία στάδια είναι [Rowell, 2005]:

Θερμική υποβάθμιση Ορίζεται ως η χημική αντίδραση κατά την οποία μια χημική ουσία όταν θερμαίνεται διασπάται σε τουλάχιστον δύο ουσίες. Η αντίδραση αυτή είναι συνήθως ενδόθερμη, καθώς απαιτείται ενέργεια για να διασπαστούν οι χημικοί δεσμοί στο υλικό.

Πυρόλυση Όταν η θερμοκρασία ενός υλικού αυξάνεται, οι χημικοί δεσμοί διασπώνται. Απουσία οξυγόνου, ή σε παρουσία πολύ μικρών ποσοτήτων, αυτή η θερμική υποβάθμιση ονομάζεται πυρόλυση. Κατά την διάρκεια αυτής παράγονται πτητικά αέρια που διαχέονται στον χώρο, πυρολυτικά υγρά και στερεό υπόλοιπο.

Καύση Η εξώθερμη καύση ξεκινάει όταν τα πτητικά αέρια αναμειγνύονται με το οξυγόνο και θερμαίνονται μέχρι την θερμοκρασία ανάφλεξης τους. Αυτές οι εξώθερμες αντιδράσεις συμβαίνουν στην αέρια φάση. Η θερμότητα από αυτές τις αντιδράσεις ακτινοβολείται ξανά στο αρχικό υλικό και για αυτό το λόγο ξεκινάει η αντίδραση πυρόλυσης στην στερεά επιφάνεια. Το φαινόμενο χαρακτηρίζεται ως καύση με φλόγα εάν το καιγόμενο μείγμα συσσωρεύει αρκετή θερμότητα ώστε να εκπέμπει ακτινοβολία στο ορατό φάσμα.

Ταχεία οξείδωση Μετά το τέλος της καύσης με φλόγα, πολλά υλικά (όπως για παράδειγμα το ξύλο) μπορεί να οξειδωθούν. Η οξείδωση είναι μια εξώθερμη αντίδραση η οποία συμβαίνει στην επιφάνεια και για την συντήρησή της απαιτείται οξυγόνο. Επιταχύνει την αντίδραση της πυρόλυσης του αρχικού υλικού.

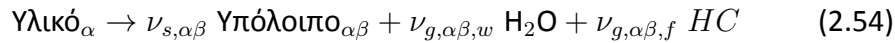
Η μοντελοποίηση στερεών καυσίμων υλικών είναι μια πολύπλοκη διαδικασία επειδή η συμπεριφορά τους απέναντι στην φωτιά εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η μορφή του αντικειμένου, ο προσανατολισμός του, οι χημικές του ιδιότητες και οι περιβαλλοντικές συνθήκες. Η ροή θερμότητας στην επιφάνεια και η συγκέντρωση οξυγόνου είναι οι δύο πιο σημαντικοί παράγοντες.

Στον κώδικα FDS εκτελούνται μονοδιάστατοι υπολογισμοί μεταφοράς θερμότητας σε κάθε επιφάνεια των στερεών ορίων που ορίζονται στο αρχείο εισόδου,

όπως αναφέρεται αναλυτικά στην συνέχεια. Τα στερεά όρια μπορούν να αποτελούνται είτε από ένα είτε από πολλά στρώματα υλικών και κάθε στρώμα μπορεί να αποτελείται από πολλά υλικά. Για να επιλυθεί η μεταφορά μάζας διαμέσου των στερεών ορίων απαιτείται αυτά να έχουν πάχος το πολύ όσο ένα υπολογιστικό κελί, γι'αυτό το λόγο οι εσωτερικοί και οι εξωτερικοί τοίχοι του σπιτιού αντιμετωπίστηκαν σαν γεωμετρικά αντικείμενα πάχους ενός υπολογιστικού κελιού. Ο κώδικας FDS υπολογίζει την αγωγή θερμότητας δια μέσω του στερεού τοιχώματος και χρησιμοποιεί σαν οριακές συνθήκες την θερμοκρασία του αέρα και την ροή θερμότητας εκατέρωθεν του τοίχου.

Κάθε δομικό υλικό μπορεί να συμμετέχει πολλές αντιδράσεις κατ'εξακολούθηση και κάθε μία από αυτές τις αντιδράσεις μπορεί να παράγει κάποια άλλα στερεά συστατικά-υπόλοιπα (residue) και πτητικά αέρια, σύμφωνα με τους συντελεστές αποδοτικότητας ν_s και $\nu_{g,\gamma}$. Αυτοί οι συντελεστές πρέπει να ικανοποιούν την συνθήκη $\nu_s + \sum_{\gamma} \nu_{g,\gamma} = 1$, αλλά υπάρχουν αντίστοιχα και άλλοι μικρότεροι συντελεστές προκειμένου να οριστούν απ'τον χρήστη και άλλα αέρια προϊόντα.

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



Σε αυτήν την συγκεκριμένη αντίδραση παράγονται στερεά υπόλοιπα, ατμός νερού και καύσιμα με βάση υδρογονάνθρακα. Η πυκνότητα του συστατικού α αλλάζει με την πάροδο του χρόνου χρόνο σύμφωνα με την εξίσωση διατήρησης των στερεών ουσιών σύμφωνα:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\rho_{s,\alpha}}{\rho_{s0}} \right) = - \sum_{\beta=1}^{N_{r,\alpha}} r_{\alpha\beta} + S_{\alpha} \quad (2.55)$$

το οποίο σημαίνει ότι η μάζα του συστατικού α καταναλώνεται από την αντίδραση στερεάς φάσης $r_{\alpha\beta}$ και παράγεται από άλλες αντιδράσεις. $r_{\alpha\beta}$ είναι ο ρυθμός της αντίδρασης β με μονάδες μέτρησης (1/s) και ρ_{s0} είναι η αρχική πυκνότητα του στρώματος του υλικού. S_{α} είναι ο ρυθμός παραγωγής του κάθε συστατικού α σαν αποτέλεσμα των αντιδράσεων με άλλα συστατικά. Οι ρυθμοί αντίδρασης είναι συνάρτηση της συγκέντρωσης μάζας και της θερμοκρασίας και υπολογίζονται βάσει της εξίσωσης Arrhenius, όπως θα οριστεί στην συνέχεια.

Ο όρος παραγωγής S_α είναι το άθροισμα όλων των αντιδράσεων όπου το υπόλοιπο είναι το υλικό α :

$$S_\alpha = \sum_{\alpha'=1}^{N_m} \sum_{\beta=1}^{N_{r,\alpha'}} \nu_{s,\alpha'\beta} r_{\alpha'\beta} \quad (\text{όπου Υπόλοιπο}_{\alpha'\beta} = \text{Υλικό}_\alpha) \quad (2.56)$$

Ο ογκομετρικός ρυθμός παραγωγής κάθε πτητικού αερίου ορίζεται:

$$\dot{m}_\gamma''' = \rho_{s0} \sum_{\alpha=1}^{N_m} \sum_{\beta=1}^{N_{r,\alpha}} \nu_{g,\alpha\beta,\gamma} r_{\alpha\beta} \quad (2.57)$$

Έχει υποτεθεί ότι τα αέρια μεταφέρονται απευθείας από την επιφάνεια, όπου η παροχή μάζας ορίζεται ως:

$$\dot{m}_\gamma'' = \int_0^L \dot{m}_\gamma'''(x) dx \quad (2.58)$$

όπου L είναι το πάχος της επιφάνειας.

Ο χημικός όρος πηγής στην εξίσωση μεταφοράς θερμότητας λόγω αγωγής ισούται με:

$$\dot{q}_{s,c}'''(x) = -\rho_{s0} \sum_{\alpha=1}^{N_m} \sum_{\beta=1}^{N_{r,\alpha}} r_{\alpha\beta}(x) H_{r,\alpha\beta} \quad (2.59)$$

2.5.3 Μοντέλο υπολογισμού ρυθμού πυρόλυσης

Πιο συγκεκριμένα αναλύονται οι παράμετροι που περιγράφουν τις αντιδράσεις που προκύπτουν μέσα στα στερεά υλικά όταν καίγονται. Ο ρυθμός πυρόλυσης του καυσίμου υπολογίζεται βάση της εξίσωσης Arrhenius πρώτου βαθμού. Υπάρχει άμεση σύνδεση του ρυθμού πυρόλυσης με την θερμοκρασία επιφανείας του καυσίμου. Στην προσομοίωση του σπιτιού στην Αμφιλοχία (όπως αναλύεται στο Κεφάλαιο 6) θεωρήθηκε ότι στην κουζίνα υπάρχουν κυρίως ξύλινα έπιπλα (πάγκοι, καρέκλες και τραπέζια). Οι φλόγες ενός ξύλου που καίγεται

προκαλούνται από την καύση των αερίων που απελευθερώνονται από την πυρόλυση, όχι από την καύση του ίδιου του ξύλου. Για αυτό το λόγο ο ακριβής ορισμός τόσο του μηχανισμού αντίδρασης όσο και του ρυθμού πυρόλυσης είναι πολύ σημαντικός για την ανάλυση των σεναρίων φωτιάς που θα μελετηθούν. Τα ξύλα πυκνότητας μικρότερης από 400 kg/m^3 (π.χ. έλατο, πεύκο) κατατάσσονται στα "κανονικά αναφλέξιμα υλικά", όταν το πάχος τους υπερβαίνει τα 2 mm. Τα ξύλα μεγαλύτερης πυκνότητας είναι λιγότερο εύφλεκτα και επομένως μπορούν να υπαχθούν ακόμη και στην κατηγορία των δύσκολα αναφλέξιμων υλικών. Γενικά το ξύλο δεν είναι τόσο επικίνδυνο υλικό όσο πιστεύεται. Όταν καίγεται, δημιουργείται ένα επιφανειακό απανθρακωμένο στρώμα, μικρής αγωγιμότητας, που καθυστερεί την πυρόλυση του υποκειμένου υλικού. Η απανθράκωση αυτή προχωρεί με ρυθμό 0,6 έως 0,7 mm/min. Το ξύλο που καίγεται παράγει μεγάλες ποσότητες καπνού, που η πυκνότητα του εξαρτάται από το ρυθμό καύσης, τη θερμοκρασία και την ποσότητα του προσαγόμενου αέρα.

Ο μηχανισμός αντίδρασης

Όπως ήδη έχει αναφερθεί ένα στερεό στον FDS μπορεί να αποτελείται από πολλά στρώματα διαφορετικών υλικών. Κάθε υλικό μπορεί να υποστεί πολλές αντιδράσεις που μπορεί να συμβαίνουν σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Μπορεί ακόμα και να μην συμμετέχει σε καμία αντίδραση, απλά να αρχίσει να θερμαίνεται. Μέχρι στιγμής ο μέγιστος αριθμός των αντιδράσεων για κάθε υλικό είναι 10 και η αλυσίδα των αντιδράσεων μπορεί να περιέχει μέχρι και 20 βήματα.

Ο ρυθμός αντίδρασης

Για κάθε αντίδραση του κάθε υλικού πρέπει να προσδιοριστούν οι κινητικές παράμετροι του κάθε ρυθμού αντίδρασης. Η εξίσωση για κάθε υλικό που συμμετέχει σε μία ή και παραπάνω αντιδράσεις παρουσιάζεται ακολούθως:

$$\frac{\partial Y_{s,i}}{\partial t} = - \sum_{j=1}^{N_{r,i}} r_{ij} + \sum_{i'=1}^{N_m} \sum_{j=1}^{N_{r,i'}} \nu_{s,i'j} r_{i'j} \quad (i' \neq i) \quad (2.60)$$

όπου,

$$r_{ij} = A_{ij} Y_{s,i}^{n_{s,ij}} \exp\left(-\frac{E_{ij}}{RT_s}\right) \quad \text{και} \quad Y_{s,i} = \left(\frac{\rho_{s,i}}{\rho_{s0}}\right) \quad (2.61)$$

Ο όρος, r_{ij} , καθορίζει τον ρυθμό της αντίδρασης στην θερμοκρασία, T_s , του i -οστού υλικού που συμμετέχει στην j -οστή αντίδραση. Ο δεύτερος όρος στο δεξί μέλος της εξίσωσης αντιπροσωπεύει την συμμετοχή των υπολοίπων υλικών από τα οποία παράγεται το i -οστό υλικό σαν Υπόλοιπο με απόδοση $\nu_{s,i'j}$. $\rho_{s,i}$ είναι η πυκνότητα του i -οστού υλικού του στρώματος, και ορίζεται ως η μάζα του διαιρεμένη με τον όγκο που καταλαμβάνει αυτό το στρώμα. ρ_{s0} είναι η αρχική πυκνότητα του στρώματος. Για αυτό το λόγο η ποσότητα, $Y_{s,i} = \rho_{s,i}/\rho_{s0}$ αυξάνεται όταν αυτό το υλικό παράγεται σαν Υπόλοιπο από κάποια άλλη αντίδραση και μειώνεται αντίστοιχα όταν καταναλώνεται. Αν το στρώμα αποτελείται από μόνο ένα υλικό, τότε η ποσότητα $\rho_{s,i}/\rho_{s0}$ είναι αρχικά μοναδιαία. Η τιμή $n_{s,ij}$ είναι η τάξη της αντίδρασης. Ο παράγοντας A_{ij} εξαρτάται από τις συνθήκες της αντίδρασης, το σχήμα και το μέγεθος των αντιδρώντων και έχει μονάδες s^{-1} . Η ενέργεια ενεργοποίησης E_{ij} έχει μονάδες $kJ/kmol$. Τυπικά αυτές οι παράμετροι έχουν νόημα αν και προκύπτουν και οι δύο μέσω πειραμάτων όπως η μέθοδος θερμοβαρυμετρικής ανάλυσης, TGA (Thermo-Gravimetric Analysis).

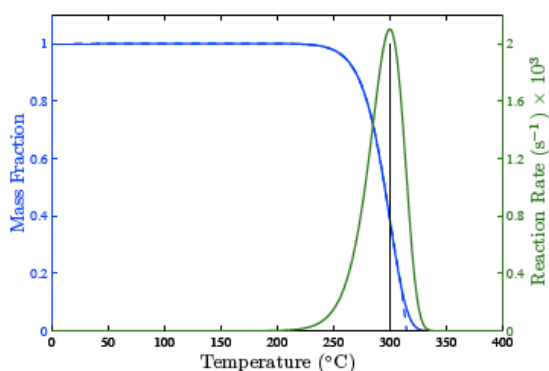
Πολλές φορές οι ποσότητες A και E δεν είναι διαθέσιμες για τα περισσότερα υλικά. Αν αυτές δεν είναι γνωστές, υπάρχουν άλλες παράμετροι μέσω των οποίων μπορούν να καθοριστούν έμμεσα αυτά τα μεγέθη. Η πιο σημαντική παράμετρος είναι η θερμοκρασία αναφοράς. Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ενός υποθετικού πειράματος TGA. Το κλάσμα μάζας (μπλε καμπύλη) μειώνεται καθώς το δείγμα σταδιακά θερμαίνεται (στην περίπτωση που φαίνεται στο διάγραμμα ο ρυθμός θέρμανσης είναι 5 K/min). Ο ρυθμός αντίδρασης (πράσινη καμπύλη) είναι ο ρυθμός μεταβολής του κλάσματος μάζας συναρτήσει του χρόνου ($-dY/dt$). Το μέγιστο της καμπύλης αναφέρεται στον κώδικα FDS ως θερμοκρασία αναφοράς, η οποία δεν πρέπει να συγχέεται με την θερμοκρασία ανάφλεξης, ούτε και με την θερμοκρασία επιφανείας του στερεού που καίγεται. Είναι απλά η θερμοκρασία στην οποία το κλάσμα μάζας του υλικού μειώνεται με μέγιστο ρυθμό όπως αυτός καθορίζεται από πειράματα τύπου TGA ή από κάποια ανάλογη πειραματική διάταξη. Οι κινητικές παράμετροι της αντίδρασης προσδιορίζονται μέσω των παρακάτω σχέσεων ²:

$$E = \frac{e r_p}{Y_0} \frac{R T_p^2}{T} \quad ; \quad A = \frac{e r_p}{Y_0} e^{E/R T_p} \quad (2.62)$$

όπου T_p και r_p είναι οι θερμοκρασία και ο ρυθμός αντίδρασης στις συνθήκες αναφοράς αντίστοιχα. Ο μέγιστος ρυθμός αντίδρασης (s^{-1}) αναφέρεται σε μια δεδομένη θερμοκρασία αναφοράς. Για κάποιο στερεό που αποτελείται μόνο από ένα υλικό και υπόκειται μόνο σε μία αντίδραση ισχύει ότι, $Y_0 = 1$. Ο ρυθ-

²Οι σχέσεις αυτές έχουν εξαχθεί θεωρώντας αντίδραση πρώτης τάξης. Όταν χρησιμοποιείται αυτή η μέθοδος δεν πρέπει να προσδιορίζεται και η τάξη της αντίδρασης.

μός θέρμανσης είναι ο ρυθμός με τον οποίο αυξάνεται η θερμοκρασία κατά την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Στο Σχήμα 2.2, η περιοχή κάτω από την πράσινη καμπύλη του ρυθμού αντίδρασης ισούται με τον ρυθμό θέρμανσης (σε μονάδες K/s).



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

$$Y(0) = 1$$

$$T_p = 300 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$r_p = 0.002 \text{ s}^{-1}$$

$$\dot{T} = 5 \text{ K/min}$$

$$\nu_s = 0$$

Σχήμα 2.2: Απλή αναπαράσταση του μοντέλου πυρόλυσης. Η μπλε καμπύλη απεικονίζει την κανονικοποιημένη μάζα, $Y = \rho_s/\rho_{s0}$, ενός στερεού υλικού το οποίο θερμαίνεται με ρυθμό 5 K/min. Η πράσινη καμπύλη απεικονίζει τον ρυθμό της αντίδρασης, $-dY/dt$. Η εξίσωση που περιγράφει την αντίδραση φαίνεται στην δεξιά πλευρά. Οι παράμετροι T_p , r_p , και ν_s απεικονίζουν την θερμοκρασία αναφοράς, τον ρυθμό αντίδρασης στις συνθήκες αναφοράς και το βαθμό παραγωγής του Υπολοίπου. Έτσι χρησιμοποιώντας τα παραπάνω μεγέθη μπορούν να υπολογιστούν οι κινητικές παράμετροι A και E .

Υπάρχουν πολλές περιπτώσεις όπου είναι εφικτή μόνο η εκτίμηση της θερμοκρασίας αναφοράς μιας συγκεκριμένης αντίδρασης αφού δεν υπάρχουν πάντα διαθέσιμα δεδομένα θερμοδομετρίας μικρής κλίμακας. Σε τέτοιες περιπτώσεις απαιτείται να οριστεί μια επιπλέον παράμετρος προκειμένου να μπορέσει να καθοριστεί η καμπύλης του ρυθμού αντίδρασης. Αυτή η παράμετρος είναι το εύρος πυρόλυσης (T_p) το οποίο καθορίζεται από την βάση της πράσινης καμπύλης, αν υποθεθεί ότι το σχήμα της είναι τριγωνικό. Χρησιμοποιώντας αυτές τις παραμέτρους σαν δεδομένα εισόδου μπορεί να γίνει μια εκτίμηση του μεγίστου της καμπύλης του ρυθμού της αντίδρασης, r_p , βάση του οποίου μπορούν να καθοριστούν οι κινητικοί παράμετροι της αντίδρασης E και A .

$$\frac{r_p}{Y_0} = \frac{2\dot{T}}{\Delta T} (1 - \nu_s) \quad (2.63)$$

Η παράμετρος, ν_s , είναι το ποσοστό του υλικού που μετατρέπεται σε στερεό

υπόλοιπο (solid residue).

Θερμότητα αντίδρασης

Η Εξίσωση (2.60) περιγράφει τον ρυθμό της αντίδρασης σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας. Οι περισσότερες αντιδράσεις στερεάς φάσης απαιτούν ενέργεια (ενδόθερμες). Το ποσό ενέργειας που καταναλώνεται, ανά μονάδα μάζας αντιδρώντων που μετατρέπονται σε κάτι άλλο, καθορίζεται μέσω της θερμότητας της αντίδρασης. Τεχνικά μπορεί να οριστεί μέσω της διαφοράς ενθαλπίας των προϊόντων και των αντιδρώντων. Αν η τιμή της είναι θετική τότε η αντίδραση είναι ενδόθερμη, δηλαδή η αντίδραση απορροφά ενέργεια από το σύστημα. Συνήθως η θερμότητα αντίδρασης είναι γνωστή μόνο για απλές αντιδράσεις αλλαγής φάσης, όπως η εξάτμιση του νερού. Για τις υπόλοιπες αντιδράσεις αυτή η τιμή πρέπει να οριστεί εμπειρικά.

2.5.4 Υγρά καύσιμα

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

$$X_f = \exp \left[-\frac{h_v W_f}{\mathcal{R}} \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_b} \right) \right] \quad (2.64)$$

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

Στην αρχή της προσομοίωσης, γίνεται μια αρχική υπόθεση για την παροχή μάζας των ατμών του καυσίμου:

$$\dot{m}_i'' = \frac{\dot{V}_i'' W_f}{\mathcal{R} T_a / p_0} \quad (2.65)$$

όπου \dot{V}_i'' είναι η αρχική ροή όγκου του υγρού, η οποία ορίζεται από τον χρήστη (η προεπιλεγμένη τιμή στον κώδικα FDS είναι $\dot{V}_i'' = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/(\text{s m}^2)$). Κατά

την διάρκεια της προσομοίωσης, η ροή εξατμιζόμενης μάζας ανανεώνεται βάση την διαφορά μεταξύ του κλάσματος όγκου κοντά στην επιφάνεια και την τιμή ισορροπίας όπως υπολογίστηκε από την Εξίσωση 2.64.

Για λόγους απλότητας, το υγρό καύσιμο αντιμετωπίζεται σαν να ήταν ένα θερμικά-λεπτό στερεό (στερεό μικρού πάχους) προκειμένου να υπολογιστεί η θερμική αγωγιμότητα. Για τα υγρά καύσιμα μέσα σε δεξαμενές δεν υπολογίζεται η αγωγή.

2.6 Διαδικασία Επίλυσης

Ο κώδικας FDS χρησιμοποιεί ένα ημί-πεπλεγμένο σχήμα επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων για κάθε ένα από τα αριθμητικά πλέγματα που μπορεί να αποτελούν το χωρίο επίλυσης του κάθε προβλήματος. Οι μεταβλητές της ροής ανανεώνονται στο χρόνο χρησιμοποιώντας ένα ρητό σχήμα Runge-Kutta δεύτερης τάξης. Έστω ότι οι μεταβλητές ρ^n , Y_α^n , \mathbf{u}^n , \bar{p}_m^n και \mathcal{H}^n αναπαριστούν την πυκνότητα, τα κλάσματα μάζας των συστατικών, τις συνιστώσες της ταχύτητας, την πίεση και την διαταραχή αυτής στο νιοστό βήμα της προσομοίωσης. Για την πίεση χρησιμοποιείται σχήμα πεπλεγμένων διαφορικών εξισώσεων πρώτης τάξης. Ο αλγόριθμος επίλυσης ακολουθεί τα παρακάτω βήματα:

1. Υπολογισμός του μέσου ροικού πεδίου $\bar{\mathbf{u}}^n$.
2. Εκτίμηση των ρ , Y_α και \bar{p}_m στο επόμενο χρονικό βήμα με χρήση ρητού σχήματος Euler. Για παράδειγμα η πυκνότητα εκτιμάται μέσω της σχέσης:

$$\frac{\rho^* - \rho^n}{\delta t} + \nabla \cdot \rho^n \bar{\mathbf{u}}^n = 0 \quad (2.66)$$

3. Ανταλλαγή³ των τιμών ρ^* και Y_α^* στα όρια των πλεγμάτων.
4. Εφαρμογή οριακών συνθηκών για ρ^* και Y_α^* .
5. Υπολογισμός της απόκλισης, $\nabla \cdot \bar{\mathbf{u}}^*$, με χρήση της εξίσωσης διατήρησης της ενέργειας. Σε αυτό το στάδιο το πεδίο ταχύτητας δεν έχει εκτιμηθεί για το επόμενο χρονικό βήμα, μόνο η απόκλιση της.

³Με τον όρο ανταλλαγή νοείται η μεταφορά της πληροφορίας από το ένα πλέγμα στο άλλο μέσα από υπορουτίνες MPI (Message Passing Interface)

6. Επίλυση της εξίσωσης Poisson για την διαταραχή της πίεσης με έναν άμεσο επιλύτη για κάθε ξεχωριστό πλέγμα:

$$\nabla^2 \mathcal{H}^n = - \left[\frac{\nabla \cdot \mathbf{u}^* - \nabla \cdot \bar{\mathbf{u}}^n}{\delta t} \right] - \nabla \cdot \bar{\mathbf{F}}^n \quad (2.67)$$

Το διάνυσμα $\bar{\mathbf{F}}^n = \mathbf{F}(\rho^n, \bar{\mathbf{u}}^n)$ υπολογίζεται με χρήση των μέσων ταχυτήτων και η απόκλιση αυτού του πεδίου ταχυτήτων υπολογίζεται με ρητό τρόπο.

7. Υπολογισμός της ταχύτητας στο επόμενο χρονικό βήμα

$$\frac{\mathbf{u}^* - \bar{\mathbf{u}}^n}{\delta t} + \bar{\mathbf{F}}^n + \nabla \mathcal{H}^n = 0 \quad (2.68)$$

Η απόκλιση της υπολογιζόμενης ταχύτητας είναι ίση με αυτήν που εκτιμήθηκε ($\nabla \cdot \mathbf{u}^*$) με χρήση των θερμοδυναμικών ποσοτήτων.

8. Έλεγχος του χρονικού βήματος σε αυτό το σημείο προκειμένου να διασφαλιστεί ότι

$$\delta t \max \left(\frac{|u|}{\delta x}, \frac{|v|}{\delta y}, \frac{|w|}{\delta z} \right) < 1 \quad ; \quad 2 \delta t \nu \left(\frac{1}{\delta x^2} + \frac{1}{\delta y^2} + \frac{1}{\delta z^2} \right) < 1 \quad (2.69)$$

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

Στάδιο διόρθωσης σε κάθε χρονικό βήμα: οι τιμές των \mathcal{H}^n και των συνιστωσών της ταχύτητας \mathbf{u}^* ανταλλάσσονται στα όρια των πλεγμάτων.

1. Υπολογισμός του μέσου ροικού πεδίου $\bar{\mathbf{u}}^*$
2. Εφαρμογή του σχήματος Runge-Kutta για τις μεταβλητές μάζας. Για παράδειγμα η πυκνότητα διορθώνεται:

$$\frac{\rho^{n+1} - \frac{1}{2}(\rho^n + \rho^*)}{\delta t/2} + \nabla \cdot \rho^* \bar{\mathbf{u}}^* = 0 \quad (2.70)$$

3. Ανταλλαγή των τιμών των ρ^n και Y_α^n στα όρια των πλεγμάτων.
4. Εφαρμογή των οριακών συνθηκών ρ^n και Y_α^n .

5. Υπολογισμός των αποκλίσεων $\nabla \cdot \mathbf{u}^{n+1}$ από τις διορθωμένες θερμοδυναμικές ιδιότητες. Το πεδίο ταχύτητας δεν έχει ανανεωθεί σε αυτό το σημείο.
6. Υπολογισμός των αποκλίσεων της πίεσης με χρήση των εκτιμημένων ποσοτήτων:

$$\nabla^2 \mathcal{H}^* = - \left[\frac{\nabla \cdot \mathbf{u}^{n+1} - \frac{1}{2} (\nabla \cdot \bar{\mathbf{u}}^* + \nabla \cdot \bar{\mathbf{u}}^n)}{\delta t/2} \right] - \nabla \cdot \bar{\mathbf{F}}^* \quad (2.71)$$

7. Ανανέωση του πεδίου ταχυτήτων με χρήση του σχήματος Runge-Kutta.

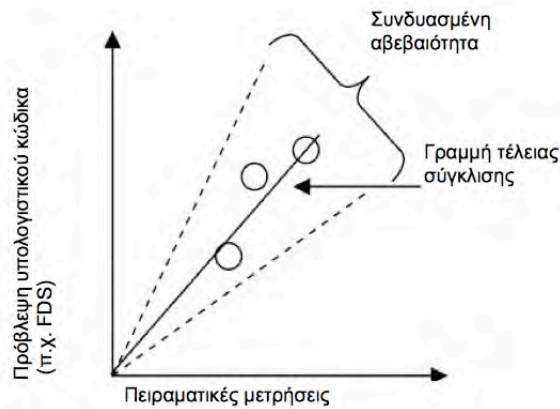
$$\frac{\mathbf{u}^{n+1} - \frac{1}{2} (\bar{\mathbf{u}}^* + \bar{\mathbf{u}}^n)}{\delta t/2} + \bar{\mathbf{F}}^* + \nabla \mathcal{H}^* = 0 \quad (2.72)$$

8. Στο τέλος αυτού του χρονικού βήματος, οι τιμές των \mathcal{H}^* και \mathbf{u}^{n+1} ανταλλάσσονται στα όρια των πλεγμάτων.

2.7 Επαλήθευση προλέξεων

Για την αξιόπιστη χρήση ενός εργαλείου, είναι απαραίτητο να έχει προηγηθεί η επαλήθευση του. Ως **πιστοποίηση**, ορίζεται απλουστευτικά "η διαδικασία προσδιορισμού του βαθμού στον οποίο μια υπολογιστική μέθοδος μπορεί να απεικονίσει τις πραγματικές συνθήκες" [AST, 2004b]. Σύμφωνα με τον Τεχνικό Οδηγό του κώδικα FDS, ως πιστοποίηση ορίζεται "η διαδικασία με την οποία καθορίζεται η καταλληλότητα των εξισώσεων που διέπουν ένα συγκεκριμένο μοντέλο ως μαθηματική θεμελίωση των φυσικών φαινομένων που αυτό μελετά". Τυπικά, η πιστοποίηση συνεπάγεται την σύγκριση των αποτελεσμάτων ενός υπολογιστικού εργαλείου με αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις [MacGrattan et al., 2007]. Οι σχετικές διαφορές μεταξύ των πειραματικών παρατηρήσεων και των προλέξεων συγκρίνονται με προκαθορισμένους όρους συνδυαστικής αβεβαιότητας μέσω των οποίων μπορούν να καθοριστούν τα αποτελέσματα για κάθε μοντελοποίηση φωτιάς. Η συνδυαστική αυτή αβεβαιότητα περιλαμβάνει κυρίως τις παρακάτω δύο πηγές αβεβαιότητας, για αυτό και καλείται συνδυαστική [Salley and Kassawara, 2007].

- **Πειραματική αβεβαιότητα**, πρόκειται για την αβεβαιότητα η οποία σχετίζεται με τα μετρητικά όργανα που χρησιμοποιούνται στις διάφορες πειραματικές διατάξεις.



Σχήμα 2.3: Γραφική απεικόνιση της συνδυασμένης αβεβαιότητας

- **Αβεβαιότητα στα υπολογιστικά δεδομένα εισόδου**, η οποία αναφέρεται στο υπολογιστικό κομμάτι του κώδικα.

Στο Σχήμα 2.3 γίνεται απεικόνιση των όσων προαναφέρθηκαν. Αν τα πειραματικά αποτελέσματα και αυτά που προκύπτουν από τον κώδικα FDS ήταν τα ίδια, τότε οι αντίστοιχες τιμές θα συνέπιπταν στην ευθεία των 45° που φαίνεται στο γράφημα. Επιπλέον, στην περίπτωση που τα πειραματικά δεδομένα συμφωνούν σε μεγάλο βαθμό με τα δεδομένα του μοντέλου, οι τιμές θα βρίσκονται ανάμεσα στις δύο ευθείες των ορίων της συνδυαστικής αβεβαιότητας. Σε κάθε άλλη περίπτωση, που τα δεδομένα βρίσκονται εκτός αυτών των ορίων, τα πειραματικά δεδομένα, δεν είναι συμβατά με αυτά του κώδικα, άρα, είτε η προσομοίωση είτε οι πειραματικές μετρήσεις δεν μπορούν να χαρακτηριστούν έγκυρα. Κατά συνέπεια, από τα κυριότερα προβλήματα που προκύπτουν είναι η εγκυρότητα των πειραματικών δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν για την πιστοποίηση του εργαλείου. Οι κώδικες υπολογιστικής ρευστομηχανικής είναι ικανοί να παρέχουν λεπτομερή αποτελέσματα σχετικά με τις χωροχρονικές μεταβολές της θερμοκρασίας, της ταχύτητας, των συγκεντρώσεων των διαφόρων αερίων κτλ. Όσο αυξάνει η πολυπλοκότητα των επιμέρους υπολογιστικών μοντέλων, τόσο πιο δύσκολο είναι αυτά να πιστοποιηθούν, καθώς απαιτούνται περισσότερο αναλυτικές πειραματικές μετρήσεις.

Ένα ιδανικό πείραμα που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την πιστοποίηση ενός κώδικα υπολογιστικής προσομοίωσης φαινομένων φωτιάς, θα πρέπει να παρέχει έγκυρες πληροφορίες σε σχέση με όλες τις παραμέτρους εισόδου (αρχικές συνθήκες, οριακές συνθήκες) και εξόδου του μοντέλου [Smardz, 2006].

Έτσι, για την εγκυρότητα των δεδομένων εισόδου, θα πρέπει να υπάρχουν τα εξής δεδομένα:

- Λεπτομερής περιγραφή της γεωμετρίας.
- Πληροφορίες για τις φυσικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται.
- Πληροφορίες για το μέγεθος της φωτιάς, τον ρυθμό έκλυσης θερμότητας, την παραγωγή αιθάλης και άλλα σχετικά δεδομένα.
- Πληροφορίες για τις εξωτερικές οριακές συνθήκες (θερμοκρασίες, ταχύτητες ροής και άλλα).
- Πληροφορίες για τα ενεργά μέρη του συστήματος, όπως για παράδειγμα καταιονηστήρες, αν υπάρχουν.

Όσον αφορά στα πειραματικά δεδομένα, τουλάχιστον κάποιες από τις παρακάτω μετρήσεις πρέπει να υπάρχουν σε μέρη σχετικά με αυτά που μελετάται το συγκεκριμένο πρόβλημα:

- Θερμοκρασία (αερίων και στερεών)
- Ταχύτητα ροής
- Ροή θερμότητας
- Συγκεντρώσεις επιλεγμένων χημικών συστατικών όπως O_2 , CO_2 , CO
- Ορατότητα
- Οπτική καταγραφή της φωτιάς και της συμπεριφοράς της αιθάλης (φωτογραφικό αρχείο, μαγνητοσκόπηση)

Κεφάλαιο 3

Συστήματα ξηράς δόμησης

3.1	Συμπεριφορά γυψοσανίδας σε υψηλές θερμοκρασίες . . .	55
3.1.1	Εισαγωγή	55
3.1.2	Γυψοσανίδα	60
3.1.3	Θερμοχημικές ιδιότητες της γυψοσανίδας	61
3.1.4	Θερμικές ιδιότητες	62
3.2	Πειραματικές μετρήσεις	64
3.2.1	Μάζα δείγματος	68
3.2.2	Ρυθμός θέρμανσης	68
3.2.3	Μέτρηση της θερμοχωρητικότητας	69
3.3	Υλικά αλλαγής φάσης	71
3.4	Μετρήσεις DSC σε γυψοσανίδες με ενσωματωμένα PCM . .	75
3.5	Θερμοβαρυστική ανάλυση	80

Η εξέλιξη μιας πυρκαγιάς σε ένα κτίριο εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την πυραντοχή όχι μόνο της εξωτερικής τοιχοποιίας αλλά και των δομικών στοιχείων της κατασκευής. Η προαναφερόμενη πυραντοχή ορίζεται ως η ικανότητα μιας κατασκευής ή ενός δομικού στοιχείου κτιρίου να αντιστέκεται στα θερμικά αποτελέσματα μιας πυρκαγιάς ικανοποιητικά χωρίς να χάνει τη θερμομόνωση ή τη φέρουσα ικανότητα ή την ακεραιότητα του. Υπάρχουν διάφορες Διατάξεις, Κώδικες, Κανονισμοί και Πρότυπα στην ελληνική και στην παγκόσμια νομοθεσία προκειμένου να θεσμοθετηθεί η πυραντοχή των υλικών κατασκευής. Τα κριτήρια ακεραιότητας και θερμομόνωσης ορίζουν μέχρι τότε (υπό αναμενόμενες συνθήκες πυρκαγιάς) η απρόσβλητη από φωτιά μεριά του δομικού στοιχείου δεν

επιτρέπει στα προϊόντα καύσης την δίοδο. Τα κριτήρια αυτά είναι απαραίτητα για εκτίμηση προϋποθέσεων λειτουργικότητας και φραγμών φωτιάς στις δομικές κατασκευές όταν προσβληθούν από πυρκαγιά (πυροδιαμερισματοποίηση, πυροφραγμοί). Η πυραντοχή τοιχωμάτων και δαπέδων εκλέγεται με βάση τα δύο αυτά κριτήρια.

Η ακεραιότητα σε φλόγες και καυσαέρια καθώς και η θερμομόνωση καθορίζουν τη σύνθεση των κυρίων στοιχείων του εξωτερικού περιβλήματος των κτιρίων (εξωτερικών τοιχοποιιών και επιστεγάσεων) καθώς και των αδυνάτων σημείων των δομικών κατασκευών: παραθύρων, θυρών.

Το κριτήριο της ευστάθειας αναφέρεται στην ικανότητα ενός δομικού στοιχείου να μη παραμορφώνεται πέρα από ορισμένο όριο όταν (φορτισμένο σε ένα μέγιστο φορτίο) είναι πιθανό να εκτεθεί σε πυρκαγιά. Όλα, επομένως, τα φέροντα στοιχεία (π.χ. δοκοί, στύλοι, φέρουσες τοιχοποιίες, πλάκες κ.λπ.) πρέπει να διαθέτουν τέτοια ευστάθεια. Κανονισμοί επιβάλλουν απαιτήσεις ενός ελάχιστου βαθμού πυραντοχής για διάφορα δομικά στοιχεία ανάλογα με το μέγεθος και τη χρήση των δομικών κατασκευών.

Η αναζήτηση κριτηρίων πυροπροστασίας των δομικών κατασκευών εξακολουθεί να προβληματίζει τους ερευνητές. Μία αξιοσημείωτη δυσκολία είναι η από τα διάφορα κράτη υιοθέτηση προτύπων (DIN, ASTM κ.α.), που έχουν διαφορές μεταξύ τους, γεγονός που συνηγορεί σε ανάληψη πρωτοβουλιών υπόδειξης εκπόνησης Κανονισμών που να έχουν δυνατότητα ομοιόμορφης εφαρμογής. Η βαθιά γνώση της σπουδαιότητας που έχει η δομική ακεραιότητα, θερμομόνωση και ευστάθεια αποκαλύπτει ότι είναι δυνατό στις δομικές κατασκευές η εξάπλωση της πυρκαγιάς να ελαττωθεί, μειώνοντας το θερμικό φορτίο (πράγμα δύσκολο στη πράξη), εκλέγοντας μικρότερους χώρους (λύση όχι πάντα οικονομικώς εφικτή) και καταφεύγοντας σε ειδικά μέσα (π.χ. αυτόματη ανίχνευση και κατάσβεση πυρκαγιάς, δυνατότητα που αντιμετωπίζεται με αυξανόμενο ενδιαφέρον).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η αντίδραση των συστημάτων ξηράς δόμησης σε συνθήκες πυρκαγιάς. Χρησιμοποιείται υπολογιστική προσομοίωση προκειμένου να διερευνηθούν οι συνθήκες που δημιουργούνται σε ένα συμβάν φωτιάς. Είναι λοιπόν απαραίτητο να παρουσιαστεί το νομοθετικό πλαίσιο προκειμένου να γίνει αντιληπτή η σκοπιμότητα μιας τέτοιας μελέτης.

3.1 Συμπεριφορά γυψοσανίδας σε υψηλές θερμοκρασίες

3.1.1 Εισαγωγή

Εδώ και πολλά χρόνια καταβάλλεται μεγάλη προσπάθεια για την ανάπτυξη υλικών τα οποία θα παρουσιάζουν αντίσταση στην φωτιά. Τέτοια υλικά πρέπει να παρέχουν επαρκή μηχανική αντοχή προκειμένου να αποφευχθεί η κατάρρευση ενός κτιρίου. Συνεπώς αυτός ο τύπος των υλικών πρέπει να μπορεί να αντισταθεί σε έντονη θερμότητας και ταυτόχρονα να διατηρεί την μηχανική του αντοχή. Για την διασφάλιση αυτών των συνθηκών έχουν αναπτυχθεί ανά τον κόσμο πλήθος κριτηρίων που ορίζουν αναλυτικά την ελάχιστη διάρκεια έκθεσης σε υψηλές θερμοκρασίες διαφόρων υλικών κατασκευής προκειμένου να διασφαλιστεί η πυραντοχή ενός κτιρίου.

Ως προς αυτήν την κατεύθυνση έχουν αναπτυχθεί κατάλληλες Ευρωπαϊκές οδηγίες αναφορικά με τα κριτήρια αντοχής που απαιτούνται για την ασφάλεια σε περίπτωση πυρκαγιάς:

- Ευρωπαϊκή Κατευθυντήρια Οδηγία 89/106/ΕΟΚ-CPD (Construction Products Directive), όπου αναλύονται οι βασικές απαιτήσεις για τα δομικά υλικά.
- Ευρωπαϊκή Οδηγία 2000/147/EC, όπου ορίστηκαν οι κλάσεις αντίδρασης στην φωτιά.
- Ευρωπαϊκή Οδηγία 2000/553/EC, όπου δημιουργήθηκε ένας κατάλογος προϊόντων που ικανοποιούν "εξωτερική αντίδραση σε φωτιά" χωρίς περαιτέρω δοκιμές.
- Ευρωπαϊκή Οδηγία 2000/605/EC, όπου δημιουργήθηκε λίστα προϊόντων που ανήκουν στην Α κλάση "μη συμβολής στη φωτιά"

Η συμμόρφωση προς τις οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης απαιτεί πιστοποίηση της καταλληλότητας των στοιχείων του κτιρίου με βάση την συμπεριφορά τους ως προς την αντίδραση στη φωτιά (reaction to fire), την αντίσταση στη φωτιά (fire resistance) και την διάδοση φωτιάς (fire propagation).

Η ταξινόμηση ως προς την πυραντοχή των δομικών υλικών και στοιχείων γίνεται με βάση το πρότυπο EN13501 (CEN, Μάρτιος 2002), το οποίο αποτελείται από τα εξής πέντε μέρη:

- **EN13501.01:** Ταξινόμηση σε 7 κλάσεις βάσει δεδομένων από δοκιμές αντίδρασης σε φωτιά (Πίνακας 3.1).
- **EN13501.02:** Ταξινόμηση βάσει δεδομένων από δοκιμές αντίδρασης σε φωτιά, με εξαίρεση των εγκαταστάσεων αερισμού.
- **EN13501.03:** Ταξινόμηση βάσει δεδομένων από δοκιμές πυραντίστασης σε προϊόντα και στοιχεία που χρησιμοποιούνται σε κτιριακές εγκαταστάσεις (πυράντοχοι αεραγωγοί και πυροδιαφράγματα).
- **EN13501.04:** Ταξινόμηση βάσει δεδομένων από δοκιμές πυραντίστασης σε στοιχεία συστημάτων ελέγχου καπνού.
- **EN13501.05:** Ταξινόμηση στεγών βάσει δεδομένων από δοκιμές έκθεσης σε εξωτερική φωτιά.

Το ευρωπαϊκό πρότυπο (CEN) τον Μάρτιο 2002, όρισε τις ακόλουθες πρότυπες δοκιμές οι οποίες πρέπει να ακολουθούνται για τις διαδικασίες κατηγοριοποίησης σύμφωνα με την οδηγία CPD 89/106:

- Δοκιμή ακαυστότητας (Non-Combustibility test) (Σχήμα 3.1, αριστερά), EN ISO 1182.

Το κυλινδρικό δοκίμιο εισάγεται σε φούρνο 750 °C όπου υπάρχει δυνατότητα καταγραφής των θερμοκρασιακών μεταβολών με χρήση θερμοστοιχείων. Μετά την δοκιμή, μπορεί να καθοριστεί και η απώλεια μάζας του δείγματος.

- Δοκιμή προσδιορισμού θερμογόνου δύναμης (Bomb Calorimeter) (Σχήμα 3.1, δεξιά), EN ISO 1716.

Με αυτήν την δοκιμή μπορεί να προσδιοριστεί η εν δυνάμει μέγιστη ολική έκλυση θερμότητας ενός προϊόντος που έχει καεί πλήρως. Το κονιορτοποιημένο δείγμα που χρησιμοποιείται για την δοκιμή αναφλέγεται σε ατμόσφαιρα οξυγόνου, υπό καθεστώς υψηλής πίεσης, μέσα σε έναν ασάλινο κλειστό σωλήνα (calorimetric bomb) περιμετρικά του οποίου υπάρχει νερό. Αυτό που μετράται σε αυτήν την δοκιμή είναι η αύξηση της θερμοκρασίας του νερού κατά την διάρκεια της καύσης. Η θερμογόνος δύναμη υπολογίζεται βάσει της αύξησης της θερμοκρασίας, την μάζα του δείγματος και τους διορθωτικούς παράγοντες οι οποίοι σχετίζονται με την εκάστοτε πειραματική διάταξη.

- Δοκιμή προσβολής από μεμονωμένο καιγόμενο αντικείμενο (Single Burning Item) (Σχήμα 3.2), SBI test EN 13283.

Η δοκιμή αυτή βασίζεται στην μελέτη σεναρίων φωτιάς για την καύση ενός μεμονωμένου αντικειμένου, το οποίο τοποθετείται στην γωνία που σχηματίζουν δύο κάθετοι τοίχοι με επίστρωση κάποιου συγκεκριμένου υλικού. Η συμπεριφορά των τοίχων κατά την διάρκεια έκθεσής τους σε φωτιά περίπου 40 kW (σε μια περιοχή μέγιστου εμβαδού 300 cm²) μελετάται για χρονικό διάστημα 20 min. Το μεμονωμένο καιγόμενο αντικείμενο στην πραγματικότητα προσομοιώνεται από ένα καυστήρα προπανίου ισχύος 30 kW. Κατά την διάρκεια της δοκιμής μετράται ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας, ο ρυθμός παραγωγής αιθάλης και η εξάπλωση της φωτιάς.

- Συμπεριφορά δαπέδων σε καύση με τη χρήση πηγής ακτινοβολούμενης θερμότητας (Flooring Radiant Panel) (Σχήμα 3.3, αριστερά), EN ISO 9239-1.

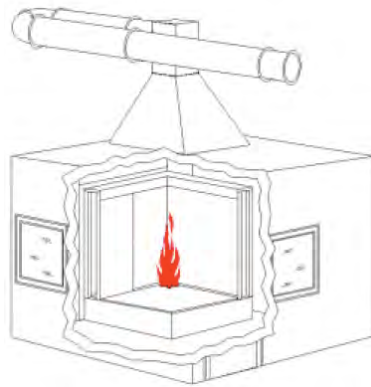
Το δείγμα διαστάσεων 1050 mm x 230 mm τοποθετείται οριζόντια κάτω από μια κεκλιμένη κατά 30° πλάκα που ακτινοβολεί. Το δείγμα εκτίθεται σε 11 kW/m² στην πλευρά έκθεσης και σε ροή θερμότητας 1 kW/m² στην μη εκτεθειμένη πλευρά. Η πιο θερμή πλευρά εκτίθεται σε ένα πιλοτική φλόγα προκειμένου να αναφλεγεί. Η πορεία του μετώπου της φλόγας καταγράφεται προκειμένου να υπολογιστεί ο χρόνος που απαιτείται για να καλυφθούν διάφορες αποστάσεις που ορίζονται σύμφωνα με κάθε διαφορετικό τύπο δοκιμής. Καταγράφεται επίσης η ποσότητα αιθάλης που δημιουργείται κατά την διάρκεια της δοκιμής που διαρκεί 30 min. Το κριτήριο κατηγοριοποίησης είναι η κρίσιμη ροή θερμότητας, η οποία ορίζεται σαν τη ροή ακτινοβολίας κατά την οποία εξαφανίζεται ή φλόγα ή η ροή ακτινοβολίας μετά το πέρας των 30 min, όποια από τις δύο τιμές είναι χαμηλότερη.

- Δοκιμή αναφλεξιμότητας (Ignitability Apparatus) (Σχήμα 3.3, δεξιά), EN ISO 11925-2.

Το δείγμα διαστάσεων 250 mm x 90 mm υπόκειται σε απευθείας επαφή με μια μικρή φλόγα. Μια φλόγα προπανίου με ύψος 20 mm έρχεται σε επαφή με το δείγμα σε γωνία 45°. Χρησιμοποιούνται διαφορετικές θέσεις πρόσκρουσης της φλόγας και χρονικής διάρκειας της δοκιμής ανάλογα με την κλάση των προϊόντων. Κάτω από το δείγμα τοποθετείται χάρτινο φίλτρο για την καταγραφή των κατακρημνισμάτων. Τα κριτήρια κατηγοριοποίησης των υλικών βασίζονται στις εξής δύο παρατηρήσεις: αν η εξάπλωση της φλόγας φτάσει τα 150 mm μέσα σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και αν το χάρτινο φίλτρο κάτω από το δείγμα αναφλέγεται λόγω φλεγόμενων κατακρημνισμάτων.



Σχήμα 3.1: Εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για τις δοκιμές της ακαυστότητας και του προσδιορισμού της θερμαντικής αξίας.



Σχήμα 3.2: Εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για τις δοκιμές της προσβολής από μεμονωμένο καιγόμενο αντικείμενο (SBI-test).



Σχήμα 3.3: Εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για τις δοκιμές αναφλεξιμότητας και της συμπεριφοράς δαπέδων σε καύση.

Κλάση	Ενίσχυση της φωτιάς/ αναμενόμενο επίπεδο ασφαλείας	Κατηγοριοποίηση κατά DIN 4102
F	Προϊόντα για τα οποία δεν μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε καμία από τις κλάσεις A1, A2, B, C, D και E .	B3
E	Προϊόντα ικανά να αντισταθούν, για μια μικρή χρονική περίοδο, σε μια μικρή φωτιά χωρίς να δημιουργηθεί ουσιαστική εξάπλωση της φλόγας.	B2
D	Τα προϊόντα ικανοποιούν τα κριτήρια της κλάσης E και είναι ικανά να αντισταθούν, για μεγαλύτερη χρονική περίοδο, σε μια μικρή φωτιά χωρίς να δημιουργηθεί ουσιαστική εξάπλωση της φλόγας. Επιπλέον, είναι ικανά να υποστούν θερμική επίθεση από ένα φλεγόμενο αντικείμενο με ικανότητα καθυστέρησης και περιορισμού εξάπλωσης της θερμότητας.	B2
C	Αντίστοιχα με την κλάση D αλλά ικανοποιώντας πιο αυστηρές προδιαγραφές. Επιπλέον, κατά την διάρκεια θερμικής επίθεσης από ένα φλεγόμενο αντικείμενο έχουν περιορισμένη οριζόντια εξάπλωση της φλόγας.	B1
B	Αντίστοιχα με την κλάση C αλλά ικανοποιώντας πιο αυστηρές προδιαγραφές.	B1
A2	Ικανοποιούνται τα ίδια κριτήρια όπως και στην κλάση B για το SBI-test σύμφωνα με το πρότυπο EN 13823. Επιπλέον, σε συνθήκες πλήρως ανεπτυγμένης φωτιάς αυτά τα προϊόντα δεν συνεισφέρουν αισθητά στο φορτίο και την ανάπτυξη της φωτιάς.	A2
A1	Τα προϊόντα της κλάσης A1 δεν συνεισφέρουν σε κανένα στάδιο της φωτιάς, συμπεριλαμβανομένου και της περίπτωσης της πλήρως ανεπτυγμένης φωτιάς. Για αυτό το λόγο θεωρούνται ότι ικανοποιούν αυτομάτως όλες τις απαιτήσεις των πιο χαμηλών κλάσεων.	A1

Πίνακας 3.1: Κλάσεις πυραντοχής για τα υλικά κατασκευής.

3.1.2 Γυψοσανίδα

Ένα από τα υλικά που παρουσιάζουν καλή συμπεριφορά σε υψηλές θερμοκρασίες είναι η γυψοσανίδα [Belmiloudi and Meur, 2005].

Οι γυψοσανίδες χρησιμοποιούνται ευρέως ως βασικά υλικά δόμησης λόγω της καλής αισθητικής τους, της εύκολης εφαρμογής τους και της μηχανικής σταθερότητάς τους. Κατασκευάζονται από γύψο και πεπιεσμένο χαρτί σε μορφή πλάκας με λεία επιφάνεια. Η σύσταση της γυψοσανίδας την κάνει ελαφριά και εύκολη στην τοποθέτηση. Στα κενά ανάμεσα στις γυψοσανίδες μπορεί να τοποθετηθεί μόνωση βελτιώνοντας την θερμομόνωση και ηχομόνωση. Επίσης με κατάλληλη επεξεργασία μια γυψοσανίδα μπορεί να συμβάλει στην πυραντοχή και αντισεισμικότητα ενός κτιρίου. Υπάρχουν και ειδικές γυψοσανίδες ανάλογα με την χρήση τους στον χώρο, για παράδειγμα:

- Ανθυγρή γυψοσανίδα
- Ινογυψοσανίδα (σκληρή επιφάνεια, αντοχή στα χτυπήματα)
- Γυψοσανίδα επενδυμένη με ανθρακονήματα για προστασία από ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία
- Γυψοσανίδα με φύλλο μολύβδου σε χώρους που απαιτείται ακτινοπροστασία

Εστιάζοντας στην πυραντοχή, όταν η γυψοσανίδα εκτίθεται σε υψηλή θερμοκρασία λόγω ύπαρξης φωτιάς, το μοριακά δεσμευμένο στην κρυσταλλική της δομή νερό αλλά και η ελεύθερη υγρασία της, απελευθερώνονται και μεταφέρονται διαμέσου αυτής, απορροφώντας ενέργεια και άρα μειώνοντας την μέση θερμοκρασία του τοίχου. Η γυψοσανίδα έχει την ικανότητα να επιβραδύνει την διάδοση της θερμότητας διαμέσου των τοίχων και των δαπέδων, λόγω της ενδόθερμης αφύγρανσης που συμβαίνει σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες, με αποτέλεσμα τη βελτίωση της συνολικής συμπεριφοράς του κτιρίου στην φωτιά [Ang and Wang, 2009]. Το γεγονός αυτό είναι πολύ σημαντικό καθώς, διασφαλίζοντας καλύτερες συνθήκες πυροπροστασίας, υπάρχει περισσότερος χρόνος για την εκκένωση του κτιρίου σε περίπτωση πυρκαγιάς.

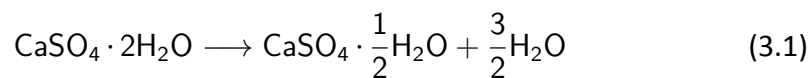
Η ιδιαιτερότητα της γυψοσανίδας έγκειται στο γεγονός ότι περιέχει 21% κατά βάρος κρυσταλλικό νερό (νερό προσκολλημένο σε διάφορες χημικές ουσίες που σχηματίζει ένυδρες ενώσεις, συνήθως κρυσταλλικές, όπως είναι ο ένυδρος θειικός χαλκός, ο γύψος, το θειικό ασβέστιο κ.α.). Όταν η θερμοκρασία αυξάνεται πάνω από του 100°C σε κάποιο σημείο της γυψοσανίδας, τότε ξεκινάει η

αντίδραση της αφυδάτωσης και της εξάτμισης του ελεύθερου νερού, οι οποίες απορροφούν ένα συγκεκριμένο ποσό θερμότητας που επιβραδύνει σημαντικά την θέρμανση του υλικού.

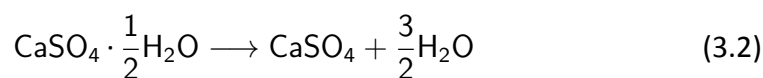
3.1.3 Θερμοχημικές ιδιότητες της γυψοσανίδας

Ο καθαρός γύψος, ο οποίος στην φυσική του κατάσταση βρίσκεται σε πετρώδη μορφή, αποτελείται από διυδρίτη θειικού ασβεστίου ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) με 3% ελεύθερη υγρασία και περίπου 21% κρυσταλλικό νερό. Οι βιομηχανίες παραγωγής γυψοσανίδων προσθέτουν διάφορες χημικές ενώσεις (σε μικρές ποσότητες) για να αυξήσουν την απόδοσή του όταν είναι εκτεθειμένος σε υψηλές θερμοκρασίες [Belmiloudi and Meur, 2005].

Κατά την θέρμανσή της, η γυψοσανίδα υφίσταται δύο ενδόθερμες αντιδράσεις αποσύνθεσης. Η πρώτη αντίδραση αφυδάτωσης λαμβάνει χώρα στους 120°C όταν ο διυδρίτης θειικού ασβεστίου μετατρέπεται σε ημιυδρίτη θειικού ασβεστίου, και ολοκληρώνεται πριν τους 180°C :

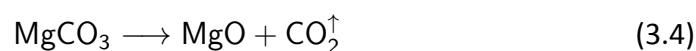
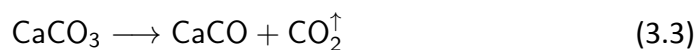


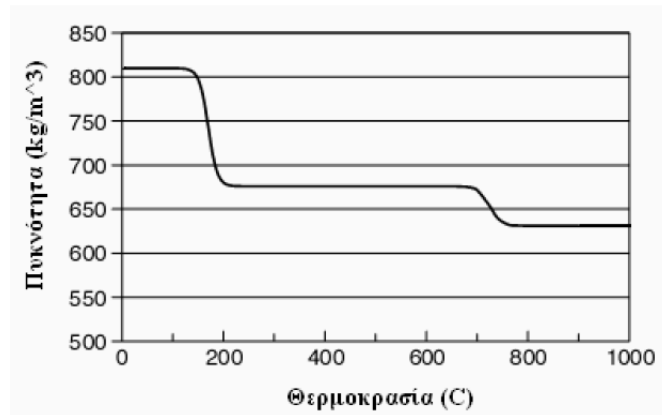
Η ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για αυτήν την αντίδραση είναι 339 kJ/kg γύψου. Η δεύτερη αντίδραση αφυδάτωσης λαμβάνει χώρα στους $155\text{-}195^\circ\text{C}$ όταν ο ημιυδρίτης θειικού ασβεστίου μετατρέπεται σε ανυδρίτη θειικού ασβεστίου:



Η ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για αυτήν την αντίδραση είναι 113 kJ/kg γύψου.

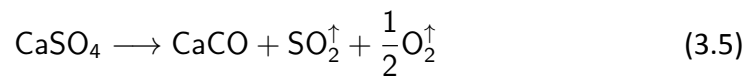
Κοντά στους 800°C λαμβάνει χώρα η αποσύνθεση του ανθρακικού ασβεστίου (CaCO_3) και άλλων ανόργανων χημικών ενώσεων όπως το ανθρακικό μαγνήσιο (MgCO_3), η οποία περιγράφεται από τις αντιδράσεις [Wakili and Hugl, 2009]:





Σχήμα 3.4: Πυκνότητα συναρτήσεως της θερμοκρασίας της γυψοσανίδας όπου και φαίνονται τα δύο βήματα της αφυδάτωσης [Wakili et al., 2007].

Σε θερμοκρασίες περίπου κοντά στους 1250°C, παρατηρείται απώλεια μάζας της γυψοσανίδας λόγω της αποσύνθεσης του ανυδρίτη θειικού ασβεστίου [Wakili and Hugi, 2009].

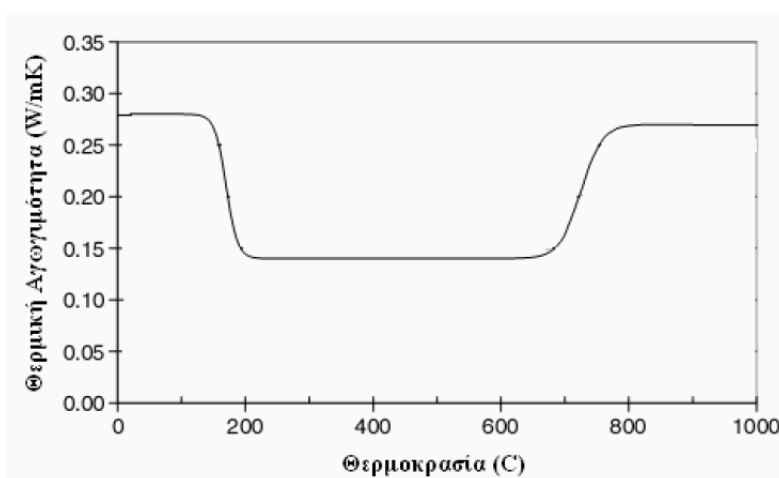


3.1.4 Θερμικές ιδιότητες

Οι θερμικές ιδιότητες της γυψοσανίδας σε υψηλές θερμοκρασίες δεν είναι πλήρως γνωστές. Οι ιδιότητες αυτές είναι δύσκολο να μετρηθούν διότι χρειάζονται εξειδικευμένες πειραματικές εγκαταστάσεις, ελεγχόμενες συνθήκες και μετρητικός εξοπλισμός υψηλής ακριβείας.

Πυκνότητα

Η πυκνότητα της γυψοσανίδας μεταβάλλεται συναρτήσεως της θερμοκρασίας λόγω της εξάτμισης του νερού που περιέχει [Wakili et al., 2007]. Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές της πυκνότητας συναρτήσεως της θερμοκρασίας της γυψοσανίδας. Διακρίνονται και τα δύο βήματα αφυδάτωσης.



Σχήμα 3.5: Θερμική αγωγιμότητα συναρτήσει της θερμοκρασίας της γυψοσανίδας όπου και φαίνονται τα δύο βήματα της αφυδάτωσης [Wakili et al., 2007].

Θερμική αγωγιμότητα

Σύμφωνα με τη μελέτη των [Wakili et al., 2007], η μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας φαίνεται στο Σχήμα 3.5. Σε αυτό το σχήμα, φαίνονται δύο διακριτά βήματα. Το πρώτο βήμα (περίπου στους 200°C) οφείλεται στην αφυδάτωση του διυδρίτη του θειικού ασβεστίου, ενώ το δεύτερο (περίπου στους 700°C) στην αποσύνθεση του ανθρακικού ασβεστίου. Αυτό σημαίνει ότι η πρώτη τιμή στα αριστερά αντιστοιχεί στην γυψοσανίδα στην αρχική της μορφή, δηλαδή διυδρίτη θειικού ασβεστίου και ανθρακικό ασβέστιο ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$ και $CaCO_3$). Οι τιμές μετά το πρώτο βήμα αφορούν το αφυδατωμένο προϊόν, το οποίο αποτελείται από ανυδρίτη θειικού ασβεστίου και ανθρακικό ασβέστιο ($CaSO_4$ και $CaCO_3$) και τέλος, η τιμή μετά το δεύτερο βήμα αφορούν το προϊόν που προκύπτει μετά την αποσύνθεση του ανθρακικού ασβεστίου, το οποίο αποτελείται από ανυδρίτη θειικού ασβεστίου και οξείδιο του ασβεστίου ($CaSO_4$ και Ca).

Ειδική θερμοχωρητικότητα

Μετρήσεις θερμοχωρητικότητας γυψοσανίδας σε υψηλές θερμοκρασίες δεν συναντώνται ευρέως στην βιβλιογραφία. Προκειμένου να καλυφθεί αυτό το κενό πραγματοποιήθηκε σειρά μετρήσεων στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας τα οποία και παρουσιάζονται στην επόμενη παράγραφο. Για να προσδιοριστεί η θερμική αγωγιμότητα συναρτήσει της θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκε Διαφο-

ρική Θερμιδομετρία Σάρωσης (Differential Scanning Calorimetry, DSC).

3.2 Πειραματικές μετρήσεις

Η Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης (Differential Scanning Calorimetry, DSC) είναι μια από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές θερμικής ανάλυσης. Ο όρος DSC περιγράφει την βασική ιδέα της μεθόδου, ότι κατά την διάρκεια μιας γραμμικής μεταβολής της θερμοκρασίας ενός υλικού, μπορούν να εξαχθούν θερμιδομετρικές πληροφορίες. Θερμιδομετρία ονομάζεται η μέτρηση της ποσότητας της θερμότητας που παράγεται ή απορροφάται κατά τις θερμικές μεταβολές των σωμάτων και ειδικότερα η μέτρηση της ειδικής θερμοχωρητικότητας αυτών. Η Θερμιδομετρία θεωρεί τη θερμότητα ως φυσικό μέγεθος και χρησιμοποιεί ορισμένες θερμικές μονάδες που ορίζονται με βάση τη μεταβολή της θερμοκρασίας των διαφόρων σωμάτων και ιδίως του νερού όταν αυτό θερμαίνεται ή ψύχεται. Οι μονάδες αυτές είναι η Θερμίδα (cal) και τα παράγωγά της.

Η μέτρηση των ποσοτήτων της θερμότητας και γενικά η Θερμιδομετρία στηρίζεται σε δύο βασικές αρχές:

1. Το ποσό της θερμότητας που παράγεται ή απορροφάται κατά τη μεταβολή της θερμοκρασίας είναι ανάλογο προς τη μάζα του σώματος και τη μεταβολή της θερμοκρασίας.
2. Το ποσό της θερμότητας που απορροφάται με την ανύψωση της θερμοκρασίας ενός σώματος κατά ορισμένους βαθμούς, είναι ίσο με το ποσό της θερμότητας που αποδίδεται, όταν ψυχθεί το σώμα, κατά ίδιο αριθμό βαθμών.

Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E473, η τεχνική DSC βασίζεται στη μέτρηση της διαφοράς ροής θερμότητας μιας ουσίας και μιας ουσίας αναφοράς σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας, τη στιγμή που το δοκίμιο υπόκειται σε ένα ελεγχόμενο πρόγραμμα μεταβολής της θερμοκρασίας. Αναφέρεται σε δύο παραπλήσιες, αν και διαφορετικές, τεχνικές θερμικής ανάλυσης. Το κύριο χαρακτηριστικό αυτών των τεχνικών είναι ότι οι διάφορες χαρακτηριστικές θερμοκρασίες, η θερμοχωρητικότητα, η θερμότητα τήξης όπως και οι λοιπές θερμικές παράμετροι μιας χημικής αντίδρασης, μπορούν να προσδιοριστούν σε σταθερούς ρυθμούς θέρμανσης και ψύξης. Ουσιαστικά, με την τεχνική DSC μετράται η θερμοκρασία και όλα τα υπόλοιπα μεγέθη υπολογίζονται βάσει της διαφοράς θερμοκρασίας



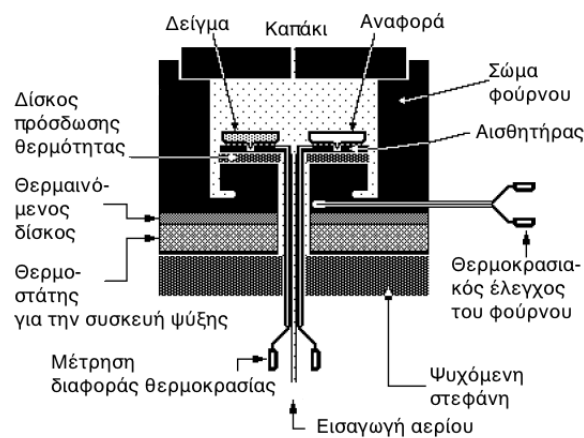
Σχήμα 3.6: Όργανο διαφορικής θερμιδομετρίας σάρωσης της εταιρίας METTLER TOLEDO.



Σχήμα 3.7: Θερμοστοιχία συνδεσμολογίας τεθλασμένου αστέρα στην βάση του σημείου τοποθέτησης του δείγματος και του σημείου αναφοράς.

μεταξύ δείγματος και ουσίας αναφοράς [Menzel and Prime, 2009]. Στο μετρητικό όργανο της εταιρίας METTLER TOLEDO που χρησιμοποιείται στο Εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης (Σχήμα 3.6), αντί να χρησιμοποιείται μόνο ένα θερμοστοιχείο, χρησιμοποιείται μια ομάδα θερμοστοιχείων, που καλείται θερμοστοιχία (thermopile). Τα θερμοστοιχεία στην θερμοστοιχία είναι συνδεδεμένα σε σειρά χρησιμοποιώντας συνδεσμολογία τεθλασμένου αστέρα (Σχήμα 3.7). Η διαφορά μεταξύ της θερμοστοιχίας του δείγματος και της ουσίας αναφοράς είναι ανάλογη της διαφοράς ροής θερμότητας του δείγματος και της ουσίας αναφοράς.

Στο δείγμα αναφοράς τοποθετείται ένα κενό μεταλλικό δοχείο τοποθέτησης δείγματος (καψίδιο), ενώ τοποθετείται και ένα γεμάτο δοχείο με το δείγμα προς μέτρηση προκειμένου το υλικό να μην έρχεται σε απευθείας επαφή με τα θερ-



Σχήμα 3.8: Αισθητήρες και διάταξη θερμαντήρων στο όργανο διαφορικής θερμοδομετρίας σάρωσης.

μοστοιχεία και με αυτόν τον τρόπο να ελαχιστοποιούνται τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας δια μέσω του (δηλαδή να υπάρχει ομογενής θέρμανση του). Τα δύο σφραγισμένα καψίδια τοποθετούνται στη συνέχεια σε δύο θερμαινόμενους υποδοχείς. Το δοχείο είναι κατασκευασμένο από υψηλής θερμικής αγωγιμότητας υλικό, συνήθως καθαρό αλουμίνιο αν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλα υλικά όπως ο χρυσός και η πλατίνα. Στο περιβάλλον των υποδοχέων δημιουργείται αδρανής ατμόσφαιρα με τη ροή αζώτου και ο θερμικός ελεγκτής αρχίζει να θερμαίνει τους υποδοχείς με προκαθορισμένο ρυθμό θέρμανσης. Η θερμοκρασία στους δύο υποδοχείς μετράται με μεγάλη ακρίβεια μέσο θερμοζυγών. Αν υποτεθεί ότι:

- το δοχείο είναι πλήρως συμμετρικό
- οι θερμικές αντιστάσεις είναι σωστά τοποθετημένες κάτω από τα δύο δοχεία (μέτρησης και αναφοράς)
- οι θερμικές αντιστάσεις λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο
- ολόκληρη η βάση των δοχείων ακουμπάει ολόκληρη στην βάση μέτρησης
- οι αισθητήρες και για τα δύο δοχεία λειτουργούν κανονικά
- η μετάδοση θερμότητας στα δύο δοχεία γίνεται με ομοιόμορφο τρόπο

τότε μπορεί να θεωρηθεί ότι η μέτρηση γίνεται με σωστό τρόπο (Σχήμα 3.8). Σε αυτήν την περίπτωση η ροή θερμότητας μπορεί να υπολογιστεί με βάση των

νόμο του Ohm. Έστω ένας αντιστάτης R , στον οποίον εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού V και ο οποίος διαρρέεται από ρεύμα I . Η ένταση του ρεύματος I είναι ανάλογη της διαφοράς δυναμικού με συντελεστή αναλογίας $1/R$. Η θερμική αναλογία της παραπάνω διατύπωσης εκφράζεται μέσα από την εξίσωση (3.6), και αποτελεί την αρχή μέτρησης του οργάνου:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R} \quad (3.6)$$

όπου \dot{Q} είναι η ροή θερμότητας, ΔT η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των αισθητήρων του δείγματος και του δείγματος αναφοράς και R η θερμική αντίσταση του δίσκου θερμοδιαρροής (δίσκος τοποθέτησης των δοχείων μέτρησης). Η θερμοκρασία στο θερμιδόμετρο αυξάνεται γραμμικά σε σχέση με το χρόνο, με ρυθμό θέρμανσης $dT/dt = \beta$ ο οποίος διατηρείται σταθερός. Έτσι λοιπόν η θερμότητα μεταφέρεται μέσα από τα δύο δοχεία με αγωγή. Η ροή θερμότητας μέσα στο δοχείο που περιέχει το δείγμα είναι μεγαλύτερη λόγω της θερμοχωρητικότητας του. Η θερμοκρασιακή διαφορά ΔT που δημιουργείται οφείλεται στην διαφορά της ροής θερμότητας στην πλάκα τοποθέτησης των δοχείων. Έτσι η παραπάνω εξίσωση μπορεί να επαναδιατυπωθεί, εξίσωση (3.7):

$$\Delta T = R \frac{dq}{dt} = RC_p \beta \quad (3.7)$$

Το αποτέλεσμα ενός πειράματος DSC είναι η χάραξη της καμπύλης ροής θερμότητας συναρτήσει είτε της θερμοκρασίας είτε του χρόνου. χρησιμοποιούνται δύο συμβάσεις: οι εξώθερμες αντιδράσεις που συμβαίνουν στο δείγμα μπορούν να αναπαρασταθούν με μια κορυφή είτε προς τα αρνητικά είτε προς τα θετικά του άξονα της ροής θερμότητας, ανάλογα με τον τρόπο διεξαγωγής του πειράματος. Όταν υπάρχει ξαφνική απορρόφηση θερμότητας από το δείγμα (π.χ. όταν το δείγμα τήκεται), υπάρχει αντίδραση στο σήμα που λαμβάνεται και δημιουργείται κορυφή στην καμπύλη της ροής θερμότητας, Σχήμα (3.8). Συγκεκριμένα, τα δυο καψίδια διαφέρουν ως προς το περιεχόμενο και επομένως αυτό με το δείγμα απαιτεί περισσότερη θερμότητα για να διατηρήσει το ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας ίσο με τον αντίστοιχο ρυθμό στο καψίδιο αναφοράς. Συγκεκριμένα, η τήξη είναι μετάπτωση πρώτης τάξης, είναι ενδόθερμη διεργασία και επομένως ο υποδοχέας του δείγματος απορροφάει περισσότερη εξωτερική θερμότητα από ό,τι ο υποδοχέας αναφοράς. Η διαφορά αυτή ανιχνεύεται από αισθητήρα, ο οποίος λαμβάνει μεγαλύτερη ροή ρεύματος μέσω του θερμοστοιχείου. Η αλλαγή αυτή στο ηλεκτρικό ρεύμα εντοπίζεται και οδηγεί σε δημιουργία κορυφής στο αντίστοιχο γράφημα.

$$\frac{dq}{dt} = C_p \beta + f(t, T) \quad (3.8)$$

Ολοκληρώνοντας την περιοχή κάτω από αυτήν την κορυφή που σχηματίζεται μπορεί να προσδιοριστεί η ενθαλπία τήξης και από τα χαρακτηριστικά της ίδιας της καμπύλης η θερμοκρασία τήξης.

3.2.1 Μάζα δείγματος

Πριν αρχίσει το πείραμα DSC, το δείγμα πρέπει να ζυγιστεί με ακρίβεια τουλάχιστον $\pm 0.2\%$, για παράδειγμα ± 0.02 mg για 10 mg δείγμα ή ± 0.002 mg για 1 mg δείγμα. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται ηλεκτρονικός μικροζυγός. Η επιλογή της σωστής μάζας δείγματος είναι εξαιρετικής σημασίας για τις μετρήσεις με DSC. Όπως και με τους ρυθμούς θέρμανσης και ψύξης του δείγματος, πρέπει να επιλεγεί μια βέλτιστη τιμή μάζας δείγματος. Πολύ μεγάλη μάζα μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητη αύξηση της θερμικής καθυστέρησης απόκρισης και κλίσης θερμοκρασίας μέσα στο δείγμα. Αν η μάζα που θα επιλεγεί είναι πολύ μεγαλύτερη, μπορεί να χαθεί η γραμμική αναλογία μεταξύ της μάζας του δείγματος και της μετρούμενης ποσότητας. Από την άλλη πλευρά, πολύ μικρή μάζα δείγματος μπορεί να προκαλέσει ανεπιθύμητη μείωση της ευαισθησίας της μέτρησης. Για τα περισσότερα πειράματα DSC η μάζα του δείγματος πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 3 και 10 mg. Για την μέτρηση της ειδικής θερμοχωρητικότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν και μεγαλύτερα ποσά μάζας (μέχρι και 20 με 30 mg). Για τον προσδιορισμό της καθαρότητας πρέπει να χρησιμοποιούνται μικρότερα ποσά μάζας, όσο το δυνατόν μικρότερα (σίγουρα όμως κάτω από 2 με 3 mg), προκειμένου να διασφαλιστούν συνθήκες ισορροπίας κατά τη διάρκεια πειραμάτων τήξης χαμηλής μοριακής μάζας.

3.2.2 Ρυθμός θέρμανσης

Με την αύξηση του ρυθμού θέρμανσης αυξάνεται η ευαισθησία του οργάνου ενώ αντίστοιχα με την μείωση του ρυθμού θέρμανσης βελτιώνεται η διακριτική του ικανότητα. Συνεπώς, η επιλογή του ρυθμού θέρμανσης εξαρτάται κάθε φορά από την ίδια την συμπεριφορά του υλικού που μετράται αλλά και τις διεργασίες που επιθυμείτε να μελετηθούν.

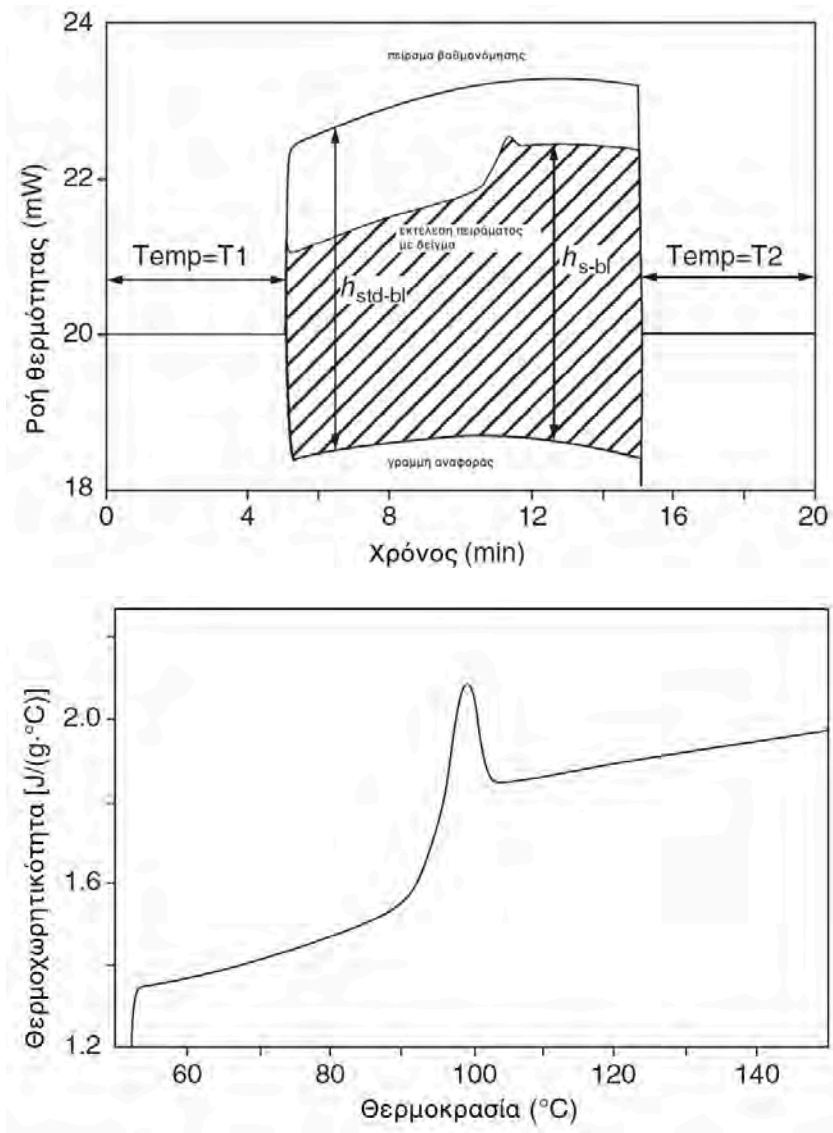
3.2.3 Μέτρηση της θερμοχωρητικότητας

Σε ένα τυπικό πείραμα DSC, ο καθορισμός της θερμοχωρητικότητας γίνεται όπως εξηγείται στην συνέχεια. Όπως παρουσιάζεται ταυτόχρονα και στο Σχήμα 3.9 πρέπει να διεξαχθούν τρία πειράματα: ένα πείραμα χωρίς δείγμα (blank run, που ουσιαστικά λειτουργεί η συσκευή DSC με δύο κενά δοχεία και συχνά το αποτέλεσμα του καλείται γραμμή αναφοράς), ένα πείραμα βαθμονόμησης και ένα πείραμα με δείγμα. Και στις τρεις περιπτώσεις το κελί DSC είναι σε αρχική σταθερή θερμοκρασία T_1 και στην συνέχεια αρχίζει να θερμαίνεται με σταθερό ρυθμό παροχής θερμότητας. Αφού αρχίσει η θέρμανση το σήμα του DSC κινείται εκθετικά και αυτό συνεχίζεται μέχρι να επιτευχθούν σταθερές συνθήκες. Στην θερμοκρασία T_2 η θέρμανση σταματάει και το κελί παραμένει σε αυτή την θερμοκρασία όπου συμβαίνει ξανά μια εκθετική μεταβολή (από την σταθερή κατάσταση στην ισοθερμοκρασιακή γραμμή αναφοράς). Εφόσον η περιοχή που περιλαμβάνεται μεταξύ του πειράματος με δείγμα και με κενά δοχεία (η σκιαγραφημένη περιοχή στο Σχήμα 3.9) είναι ανάλογη των δεδομένων εισόδου θερμότητας στο δείγμα, μπορεί να υπολογιστεί μια μέση θερμοχωρητικότητα για το θερμοκρασιακό εύρος T_1 - T_2 χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3.9):

$$\bar{C}_p = \frac{Q}{T_2 - T_1} \quad (3.9)$$

Με αυτόν τον τρόπο προσδιορισμού της θερμοχωρητικότητας θα χρειαζόταν πολύ χρόνο για να προσδιοριστεί η εξάρτηση της θερμοχωρητικότητας από την θερμοκρασία. Όμως, οι καμπύλες από την θερμοκρασία T_1 στην σταθερή κατάσταση και από την σταθερή κατάσταση στην θερμοκρασία T_2 έχουν παραπλήσιο σχήμα. Για αυτόν το λόγο η διαφορά h_{s-bl} είναι ανάλογη της θερμοχωρητικότητας σε κάθε θερμοκρασία και δεν είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της γραμμοσκιασμένης περιοχής S_{s-bl} . Έτσι αν η συσκευή βαθμονομηθεί με χρήση ενός συγκεκριμένου προτύπου υλικού για το οποίο είναι γνωστή η εξάρτηση της θερμοχωρητικότητας από την θερμοκρασία, η θερμοχωρητικότητα του δείγματος μπορεί να μετρηθεί σε κάθε θερμοκρασία. Για αυτό το σκοπό, πρέπει να χρησιμοποιηθεί η διαφορά h_{sap-bl} . Το πιο σύνηθες πρότυπο υλικό είναι ο σάπφειρος (Sapphire, Al_2O_3). Στο εργαστήριο ΕΜΣΚ χρησιμοποιείται ο ψευδάργυρος και το ίνδιο. Αν υποθεθεί ότι χρησιμοποιείται σάπφειρος για την βαθμονόμηση του οργάνου, και αφού έχει γίνει το κενό τρέξιμο μπορεί να υπολογιστεί η σταθερά K_{DSC} του οργάνου χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3.10):

$$K_{DSC} = C_{p,sap}(T) \cdot \frac{m_{sap} \cdot \dot{q}}{h_{sap-bl}(T)} \quad (3.10)$$



Σχήμα 3.9: Γραφική απεικόνιση της μετρούμενης ροής θερμότητας και η θερμοχωρητικότητα που υπολογίζεται.

όπου $C_{p,sap}(T)$ είναι η θερμοχωρητικότητα του πρότυπου υλικού με το οποίο γίνεται η βαθμονόμηση του οργάνου σε θερμοκρασία T , m_{sap} είναι η μάζα του πρότυπου υλικού, \dot{q} ο ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας και $h_{sap-bl}(T)$ είναι η διαφορά μεταξύ σταθερής κατάστασης και θερμοκρασίας T .

Στην συνέχεια, γίνεται τρέξιμο με το προς μελέτη δείγμα και η θερμοχωρητικότητά του υπολογίζεται βάση της ακόλουθης εξίσωσης (3.11):

$$C_{p,s}(T) = K_{DSC} \cdot \frac{h_{s-bl}(T)}{m_s \cdot q} \quad (3.11)$$

όπου $C_{p,s}(T)$ η θερμοχωρητικότητα του δείγματος, $h_{s-bl}(T)$ είναι η διαφορά μεταξύ της καμπύλης του δείγματος και της κενής καμπύλης και m_s είναι η μάζα του δείγματος.

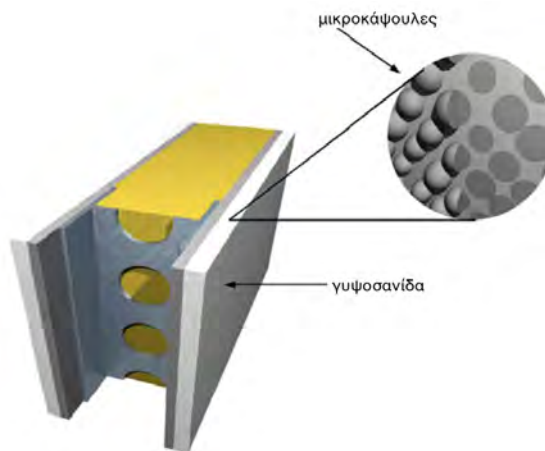
Η ακρίβεια της μέτρησης της θερμοχωρητικότητας μπορεί να είναι μικρότερη του $\pm 1\%$, αν η διαδικασία ολοκληρωθεί σωστά [Menzel and Prime, 2009]

3.3 Υλικά αλλαγής φάσης

Τα δομικά υλικά που αλλάζουν φάση στο εύρος των θερμοκρασιών της εφαρμογής που χρησιμοποιούνται, είτε αποθηκεύοντας θερμότητα σε μορφή λανθάνουσας θερμότητας είτε εκλύοντας θερμότητα σε μορφή αισθητής θερμότητας, ονομάζονται υλικά αλλαγής φάσης (PCM, Phase Change Materials). Οι αλλαγές φάσης μπορεί να αφορούν μεταβάσεις μεταξύ στερεής, υγρής και αέριας φάσης λόγω αλλαγών στις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας ή σε μετάβαση μεταξύ διαφορετικών μοριακών δομών (ιδίως στα στερεά) όπως για παράδειγμα τη μετάβαση από μια άμορφη δομή σε μια κρυσταλλική ή μετάβαση μεταξύ δύο διαφορετικών κρυσταλλικών δομών. Οι αλλαγές αυτές προκύπτουν μέσω αποβολής ή απορρόφησης λανθάνουσας θερμότητας.

Ως υποψήφια υλικά δομικά αλλαγής φάσης θεωρούνται συνήθως υλικά που αλλάζουν μεταξύ στερεής και υγρής φάσης, αν και έχουν χρησιμοποιηθεί σε ερευνητικό επίπεδο και υλικά που μεταβαίνουν από τη μια φάση στην άλλη με όλους τους δυνατούς συνδυασμούς. Τα υλικά που μεταπίπτουν σε αέρια κατάσταση κατά την αλλαγή φάσης δεν ενδιαφέρουν λόγω των πρακτικών δυσκολιών που παρουσιάζει η μεγάλη αλλαγή της πυκνότητας αλλά και της ίδιας της φύσης των αερίων.

Τα χαρακτηριστικά των υλικών αλλαγής φάσης, τα καθιστούν αυτόματα κα-

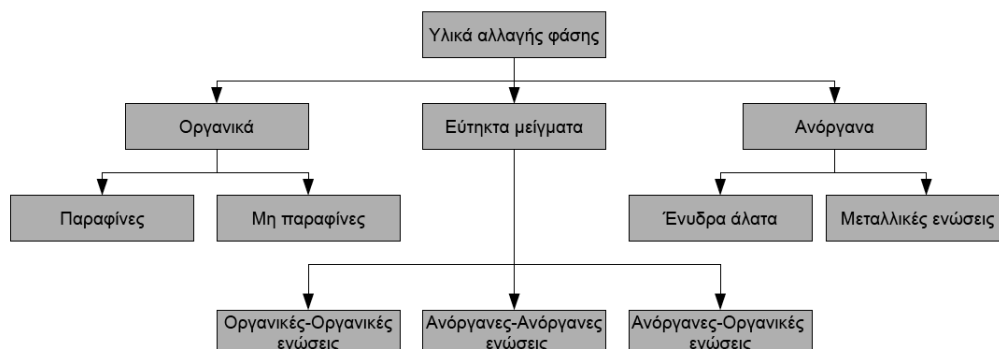


Σχήμα 3.10: Ενσωμάτωση υλικών αλλαγής φάσης σε συστήματα ξηράς δόμησης.

τάλληλα για χρήση σε δομικά υλικά με στόχο τη βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς του κτιρίου. Κατά την τήξη ή στερεοποίηση των υλικών αλλαγής φάσης αποθηκεύεται ή απελευθερώνεται ποσότητα λανθάνουσας θερμότητας. Κατά την μεταφορά της λανθάνουσας θερμότητας η θερμοκρασία των υλικών αλλαγής φάσης μπορεί να διατηρείται σταθερή. Για αυτό το λόγο η χρησιμοποίηση τους ως δομικά υλικά είναι μια πολλά υποσχόμενη επιλογή. Αν και οι αρχές αποθήκευσης της λανθάνουσας θερμότητας μπορούν να εφαρμοστούν σε οποιοδήποτε πορώδες υλικό, η έρευνα για τα υλικά αλλαγής φάσης έχει κινηθεί γύρω από την ενσωμάτωσή τους σε γυψοσανίδες και στο σκυρόδεμα, λόγω του τρόπου παραγωγής τους. Έχει αποδειχθεί πως η ενσωμάτωση τους στην τοιχοποιία (Σχήμα 3.10) μπορεί να μειώσει τη μέγιστη εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου σε ένα παθητικά σχεδιασμένο κτίριο μέχρι και $4.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ κατά την διάρκεια της ημέρας και επίσης να μειώσει αισθητά το θερμικό φορτίο τη νύχτα. Αποτέλεσμα της ενσωμάτωσης υλικών αλλαγής φάσης σε δομικά υλικά είναι η σταθεροποίηση των θερμοκρασιακών συνθηκών που επικρατούν στον χώρο του κτιρίου καθώς και η μετατόπιση των θερμικών φορτίων [Lai et al., 2010].

Το ιδανικό υλικό αλλαγής φάσης θα ήταν ένα υλικό που θα παρουσίαζε μεγάλη τιμή λανθάνουσας θερμότητας, υψηλή αγωγιμότητα, θερμοκρασία τήξεως σύμφωνη με το θερμοκρασιακό εύρος της εφαρμογής του, θα ήταν χημικά σταθερό, φθινό στην παραγωγή του, μη τοξικό, μη διαβρωτικό, μη εύφλεκτο και μη εκρηκτικό για λόγους ασφαλείας.

Υπάρχει πληθώρα υλικών αλλαγής φάσης (οργανικά, ανόργανα και εύτηκτα) διαθέσιμα για κάθε θερμοκρασιακή κλίμακα. Μια κατηγοριοποίηση αυτών δίνεται στο Σχήμα 3.11. Υπάρχει μεγάλος αριθμός οργανικών ενώσεων που μπο-

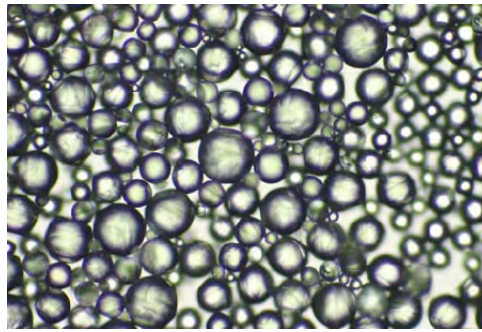


Σχήμα 3.11: Κατηγοριοποίηση των υλικών αλλαγής φάσης [Sharma et al., 2009].

ρούν να χαρακτηριστούν ως υλικά αλλαγής φάσης από άποψη θερμοκρασίας τήξης και λανθάνουσας θερμότητας τήξης. Παρόλα αυτά, η πλειονότητα αυτών δεν πληροί τα απαιτούμενα κριτήρια για την χρήση τους ως αποθηκευτικά μέσα [Sharma et al., 2009]. Καθώς κανένα μεμονωμένο υλικό δεν διαθέτει όλες τις απαιτούμενες ιδιότητες για τον σχηματισμό ενός ιδεατού αποθηκευτικού μέσου, συνήθως χρησιμοποιούνται συνδυασμοί αυτών.

Οι παραφίνες αποτελούν υλικά αλλαγής φάσης που επιτρέπουν την αποθήκευση μεγάλων ποσών θερμότητας κατά την τήξη τους. Πρόκειται για μια ομάδα κορεσμένων υδρογονανθράκων (αλκάνια, C_nH_{2n+2}) με μεγάλο πλήθος ατόμων άνθρακα στην αλυσίδα τους. Όσο περισσότερα άτομα άνθρακα υπάρχουν στην αλυσίδα, τόσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία τήξης της παραφίνης. Αυτό ισχύει μόνο για τα *n*-αλκάνια με γραμμική μη διακλαδωμένη ανθρακική αλυσίδα. Για να χρησιμοποιηθούν οι παραφίνες σαν υλικά αλλαγής φάσης για θερμική αποθήκευση, ειδικά σε υγρή μορφή, είναι απαραίτητο να αποφευχθεί η συσσώρευση της τηγμένης παραφίνης. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα επιτυγχάνεται με την χρήση μικρο-κάψουλας για την ενσωμάτωση τους σε δομικά υλικά [Gschwander et al., 2005]. Οι παραφίνες είναι χημικά σταθερές κάτω από τους 500 °C, παρουσιάζουν μικρές αλλαγές όγκου κατά την τήξη τους, χαμηλή πίεση ατμών μετά την τήξη, είναι ανθεκτικές στην διάβρωση και λιγότερο ακριβές σε σχέση με τα υπόλοιπα υλικά.

Τα PCM δοκιμάζονται εδώ και 40 χρόνια ως μέσα θερμικής αποθήκευσης στις κατασκευές. Οι περισσότερες μελέτες αποδεικνύουν ότι η εφαρμογή τους σε καλά μονωμένα κτίρια μπορεί να συντελέσει στην εξοικονόμηση μέχρι και 25% στις ενεργειακές απαιτήσεις θέρμανσης και ψύξης. Δυστυχώς, έχουν παρατηρηθεί τεχνικά προβλήματα, όπως για παράδειγμα διαρροή του PCM στην επιφάνεια τοίχων. Μερική λύση στο πρόβλημα αυτό έχει δοθεί με τον μικροσκοπικό



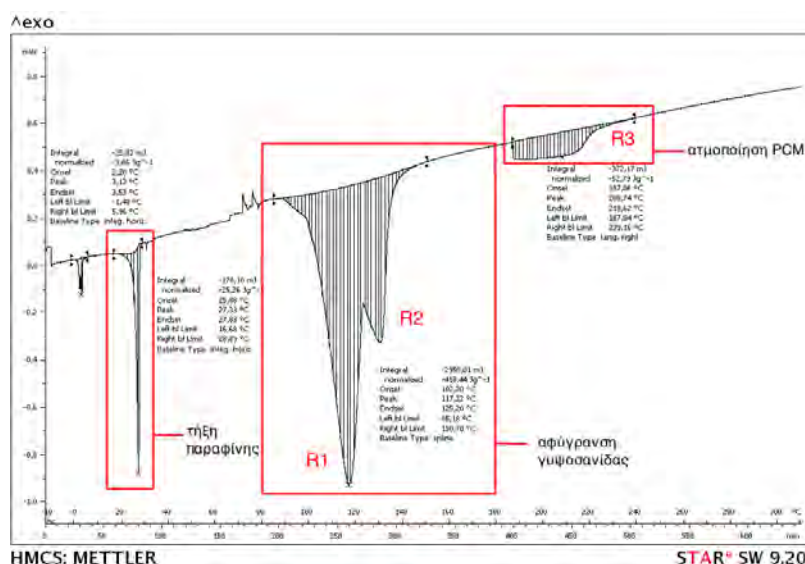
Σχήμα 3.12: Πυράντοχες μικροκάψουλες PCM διαμέτρου 15-20 μm [Kosny et al., 2009].

εγκλωβισμό τους σε μικρο-κάψουλες, κατασκευασμένες από προστατευτικά περιβλήματα. Το μεγαλύτερο όμως πρόβλημα για την ευρεία χρήση τους παραμένει η αυξημένη αναφλεξιμότητα των παραφινών που χρησιμοποιούνται τις περισσότερες φορές σαν PCM. Σαν αποτέλεσμα δεν έχει διαδοθεί η χρήση αυτής της τεχνολογίας στην βιομηχανία κατασκευής κτιρίων στις ΗΠΑ [Kosny et al., 2009].

Το πρόβλημα αυτό δεν έχει επιλυθεί ακόμα καθώς οι κατασκευαστές PCM δεν έχουν ακόμα αναπτύξει PCM σε μικροκάψουλες με αυξημένη πυραντοχή. Τα τελευταία χρόνια στο εργαστήριο ORNL (Oak Ridge National Laboratory) σε συνεργασία με τα εργαστήρια Microtek, αναπτύχθηκαν οργανικά PCM σε μικροκάψουλες, Σχήμα 3.12, που ενσωματωμένα σε μονωτικά υλικά κατάφεραν να ξεπεράσουν τα κατώτερα όρια στα κριτήρια αναφλεξιμότητας τα οποία αναπτύσσονται από τον Αμερικανικό Οργανισμό Δοκιμών και Υλικών (American Society for Testing and Materials, ASTM).

3.4 Μετρήσεις DSC σε γυψοσανίδες με ενσωματωμένα PCM

Στο πλαίσιο της μελέτης συμπεριφοράς δομικών υλικών με PCM σε συνθήκες φωτιάς, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις των θερμικών τους ιδιοτήτων με χρήση συσκευών Διαφορικής Θερμιδομετρίας Σάρωσης (DSC) και Θερμοβαρυμετρικής Ανάλυσης (TGA). Στο Σχήμα 3.13 απεικονίζεται η συμπεριφορά της γυψοσανίδας με PCM παραφίνης, καθώς αυτό εκτίθεται σε συνθήκες φωτιάς. Σταδιακά κατά την θέρμανση του αρχικά τήκεται η παραφίνη (σε ένα εύρος θερμοκρασιών 15-40°C), στην συνέχεια λαμβάνει χώρα η αφύγρυνση της γυψοσανίδας (μεταξύ 80 και 160°C) και τέλος μετά τους 180°C ξεκινά η ατμοποίηση της παραφίνης.

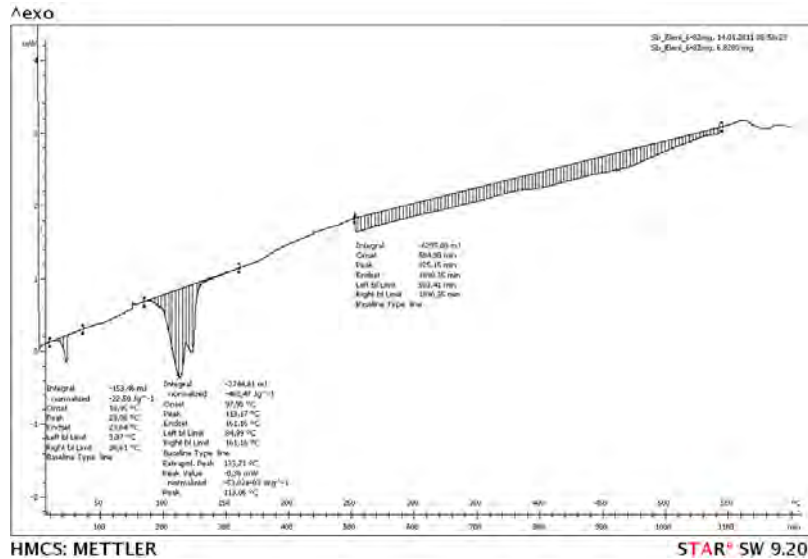


Σχήμα 3.13: Καμπύλη θερμικής ανάλυσης για δείγμα γυψοσανίδας με PCM 10 mg σε ρυθμό θέρμανσης 0.5 βαθμούς ανά λεπτό.

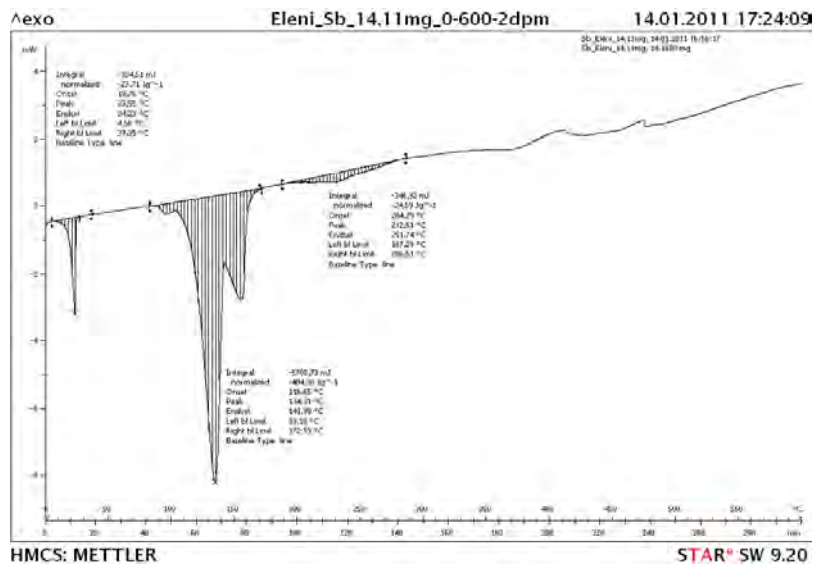
Οι μετρήσεις στη συσκευή DSC έγιναν σε δείγματα της τάξης των 4-10 mg με χρήση αδρανούς περιβάλλοντος αζώτου (N_2). Η κατά μάζα περιεκτικότητα του ενσωματωμένου υλικού αλλαγής φάσης στην γυψοσανίδα που χρησιμοποιήθηκε ήταν 18 % (από την εταιρία Micronal-BASF). Σε μετρήσεις DSC με μικρούς ρυθμούς θέρμανσης (0.5 K/min), παρατηρήθηκε ότι η τήξη της παραφίνης που χρησιμοποιήθηκε ξεκινάει στους 25.33 °C και ολοκληρώνεται στους 27.65 °C. Αυτή η θερμοκρασία που αντιστοιχεί στην θερμοκρασία τήξης του δεκαοκτανίου ($C_{18}H_{38}$ με θερμοκρασία τήξης 27.85 °C), οπότε και για τις προσομοιώσεις γυψοσανίδας με ενσωματωμένες μικρο-κάψουλες PCM χρησιμοποιήθηκε το δεκαοκτάνιο ως αντιπροσωπευτικό υλικό αλλαγής φάσης. Όπως φαίνεται και στο

Σχήμα 3.13, η ατμοποίηση της παραφίνης φαίνεται να ξεκινά στους 187°C. Όμως παρατηρήθηκε ότι αυτή η θερμοκρασία μεταβάλλεται σε μεγάλο βαθμό συναρτήσει του ρυθμού θέρμανσης. Οι παραπάνω μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν για να επιλεγεί η αντιπροσωπευτική παραφίνη που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις με τον υπολογιστικό κώδικα FDS. Για την θερμοκρασία που εκλύεται αυτή η παραφίνη από την γυψοσανίδα χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις TGA όπως θα αναλυθεί στην συνέχεια.

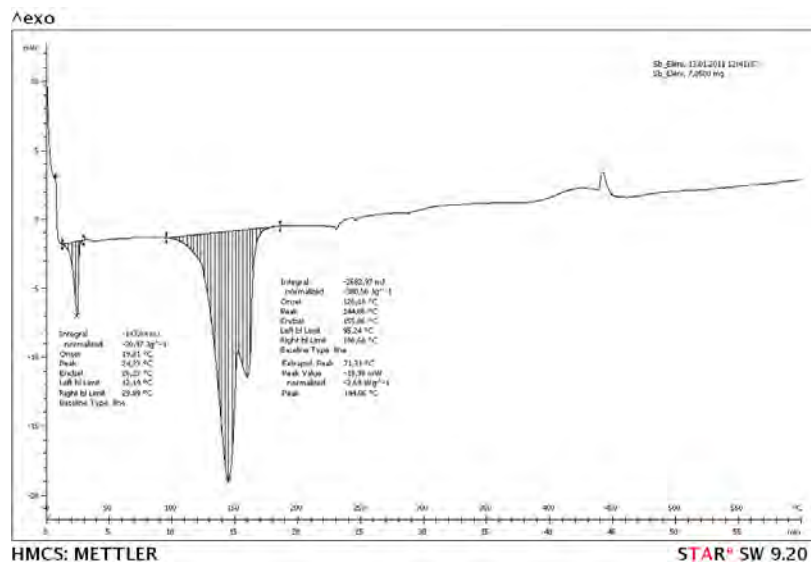
Τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε χαμηλότερους ρυθμούς πρόσδοσης θερμότητας (0.5 K/min και 2 K/min), απεικονίζονται στα Σχήματα 3.14 και 3.15. Αντίστοιχα τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε υψηλότερους ρυθμούς πρόσδοσης θερμότητας (10 K/min, 40 K/min και 80 K/min), απεικονίζονται στα Σχήματα 3.16, 3.17 και 3.18.



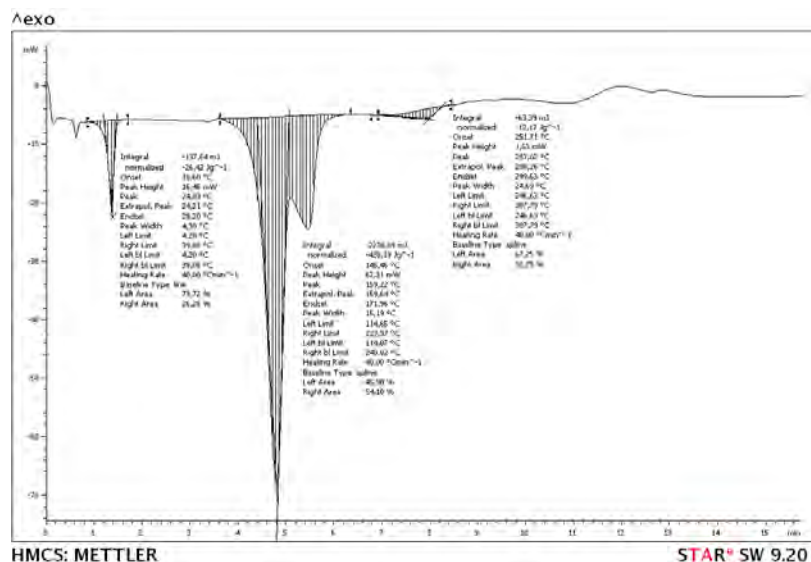
Σχήμα 3.14: Καμπύλη θερμικής ανάλυσης για δείγμα γυψοσανίδας με PCM 6.82 mg σε ρυθμό θέρμανσης 0.5 °C/min.



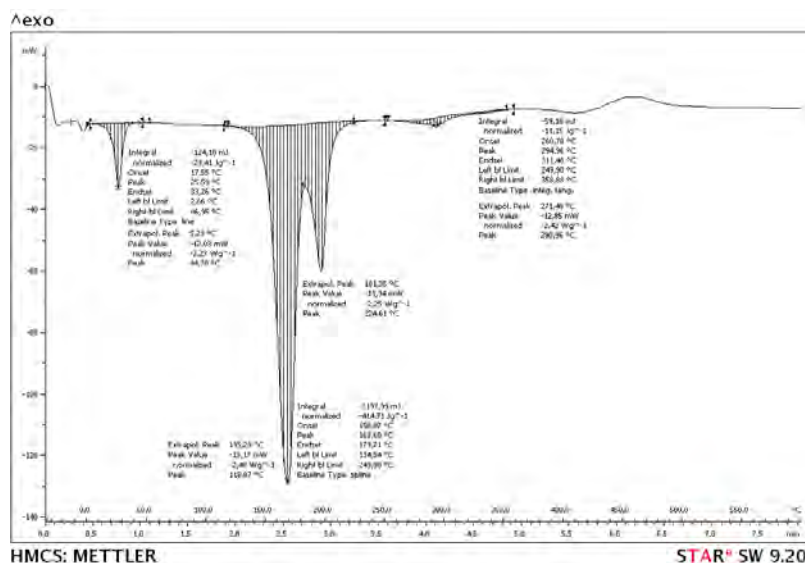
Σχήμα 3.15: Καμπύλη θερμικής ανάλυσης για δείγμα γυψοσανίδας με PCM 14.11 mg σε ρυθμό θέρμανσης 2 °C/min.



Σχήμα 3.16: Καμπύλη θερμικής ανάλυσης για δείγμα γυψοσανίδας με PCM 7.05 mg σε ρυθμό θέρμανσης 10 °C/min.



Σχήμα 3.17: Καμπύλη θερμικής ανάλυσης για δείγμα γυψοσανίδας με PCM 5.21 mg σε ρυθμό θέρμανσης 40 °C/min.

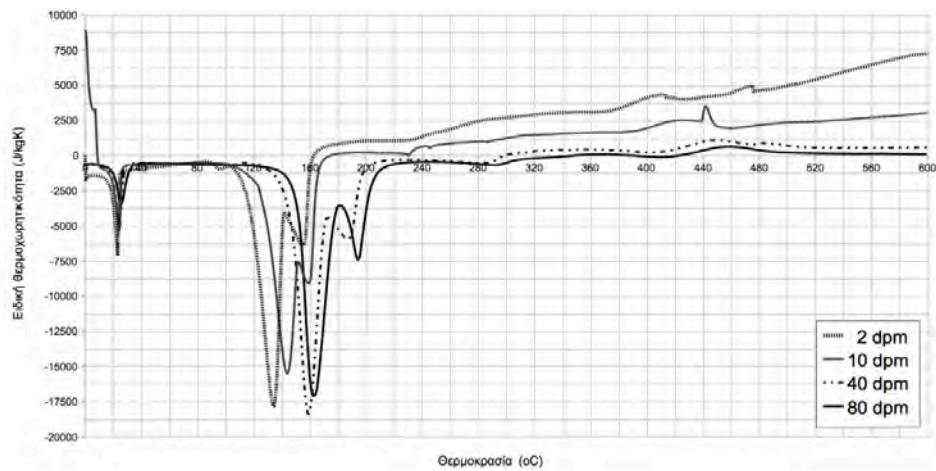


Σχήμα 3.18: Καμπύλη θερμικής ανάλυσης για δείγμα γυψοσανίδας με PCM 5.3 mg σε ρυθμό θέρμανσης 80 °C/min.

Στο Σχήμα 3.19 απεικονίζονται συνολικά οι καμπύλες της ειδικής θερμοχωρητικότητας για το δείγμα γυψοσανίδας με PCM, όπως προέκυψαν από τις DSC μετρήσεις για ρυθμούς θέρμανσης 2, 10, 40 και 80 °C/min. Όταν τοποθετείται το δείγμα μέσα στο καψίδιο και πριν την τοποθέτηση του στην μετρητική διάταξη, διανοίγεται μια οπή στο καπάκι του δοχείου προκειμένου να εκτονώνεται η πίεση που δημιουργείται στο εσωτερικό του. Με την αύξηση του ρυθμού θέρμανσης αναπτύσσεται μεγαλύτερη πίεση μέσα στο δοχείο. Η πίεση αυτή δεν εκτονώνεται με τον ίδιο ρυθμό κατά την διάρκεια κάθε μέτρησης σε διαφορετικούς ρυθμούς θέρμανσης, με αποτέλεσμα ο μηχανισμός των αντιδράσεων που προκύπτουν να μεταβάλλεται αντίστοιχα κατά περίπτωση. Για αυτό το λόγο δεν είναι δυνατή η άμεση σύγκριση των διαγραμμάτων που απεικονίζονται στο Σχήμα 3.19 καθώς η μορφή τους μεταβάλλεται τόσο λόγω της αύξησης της πίεσης μέσα στο δοχείο όσο και λόγω της αύξησης του ρυθμού θέρμανσης.

Με την αύξηση του ρυθμού θέρμανσης οι καμπύλες έχουν την τάση να μετακινούνται προς μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Σε σχετικά μικρότερες θερμοκρασίες υπάρχει μια τάση μη διαχωρισμού των διεργασιών που πραγματοποιούνται ενώ παρατηρείται αντίθετο φαινόμενο, του περαιτέρω δηλαδή διαχωρισμού των αντιδράσεων, σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες.

Στα πλαίσια της μελέτης συμπεριφοράς δομικών υλικών με ΥΑΦ σε συνθήκες φωτιάς, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν οι μετρήσεις σε υψηλούς ρυθμούς θέρμανσης προκειμένου να γίνει μια πιο ρεαλιστική προσομοίωση των πραγμα-



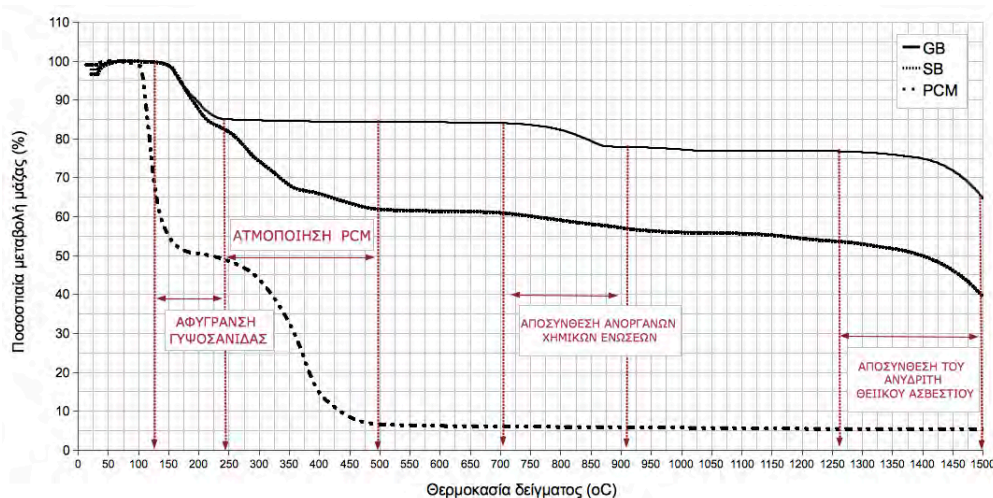
Σχήμα 3.19: Καμπύλες θερμικής ανάλυσης για δείγμα γυψοσανίδας με PCM σε ρυθμούς θέρμανσης 2, 10, 40 και 80 °C/min.

τικών συνθηκών που κυριαρχούν σε μια πυρκαγιά.

3.5 Θερμοβαρουμετρική ανάλυση

Η θερμοβαρουμετρική ανάλυση (thermogravimetric analysis , TGA) είναι ένα είδος μέτρησης, το οποίο πραγματοποιείται για την μέτρηση των αλλαγών της μάζας των υλικών σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία. Μία τέτοια ανάλυση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ακρίβεια στη μέτρηση τριών μεταβλητών: της μάζας , της θερμοκρασίας και του ρυθμού μεταβολής της θερμοκρασίας. Η μέθοδος χρησιμοποιείται στην έρευνα για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων υλικών όπως τα πολυμερή, στον προσδιορισμό του ποσοστού υγρασίας που απορροφάται από διάφορα υλικά, το επίπεδο ανόργανων και οργανικών συστατικών των υλικών, καθώς και στην εκτίμηση του μηχανισμού διάβρωσης στην οξείδωση υψηλών θερμοκρασιών. Η διάταξη της μέτρησης συνήθως αποτελείται από μια ζυγαριά υψηλής ακρίβειας με μια πλατφόρμα στην οποία τοποθετείται το δείγμα. Το δείγμα εισάγεται σε έναν ηλεκτρικό φούρνο στον οποίο υπάρχει και ένα θερμοστοιχείο για την ακριβή μέτρηση της θερμοκρασίας. Η θερμοκρασία αυξάνεται σταδιακά και η μάζα του υλικού καταγράφεται ως συνάρτηση της θερμοκρασίας. Οι μετρήσεις TGA έγιναν στο Εργαστήριο τεχνολογίας Πολυμερών της Σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ, σε μετρητικό όργανο TGA της εταιρίας METTLER TOLEDO. Τα δεδομένα που προέκυψαν χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της συμπεριφοράς γυψοσανίδας με PCM, προκειμένου να γίνει προσομοίωση της ατμοποίησης της παραφίνης σε θερμοκρασία 375.0°C με εύ-

ρος 250°C. Οι μετρήσεις TGA έγιναν με υψηλό ρυθμό θέρμανσης (80 °C *min*), προκειμένου να μπορέσει να προσομοιωθεί με τον καλύτερο δυνατό τρόπο η συμπεριφορά των υλικών αυτών σε συνθήκες φωτιάς όπου ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας είναι ιδιαίτερος υψηλός (επιτυγχάνονται πολύ ψηλές θερμοκρασίες σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα). Από το Σχήμα 3.20 φαίνεται καθαρά ότι ο ρυθμός απώλειας μάζας της απλής γυψοσανίδας (GB) είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο της γυψοσανίδας με ενσωματωμένο PCM (SB). Και για τους δύο τύπους γυψοσανίδας η αφύγρανση τους ξεκινάει περίπου στους 125°C και ολοκληρώνεται κοντά στους 250°C. Η ατμοποίηση της παραφίνης, για την γυψοσανίδα με PCM, ξεκινάει περίπου στους 250°C και ολοκληρώνεται κοντά στους 500°C. Μετά τους 700°C αρχίζει, και για τους δύο τύπους γυψοσανίδας, η αποσύνθεση των ανόργανων χημικών ενώσεων που περιέχουν στο μείγμα τους. Τέλος σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, μετά τους 1250°C, αρχίζει η αποσύνθεση του ανυδρίτη του θειικού ασβεστίου, σύμφωνα με τις αντιδράσεις της γύψου που αναφέρθηκαν παραπάνω. Όσο για το "καθαρό" PCM, παρατηρείται ότι ενώ περίπου 50% της μάζας του μειώνεται στο ίδιο θερμοκρασιακό εύρος που συμβαίνει και η αφύγρανση της γυψοσανίδας, το 55% της μάζας του μειώνεται σε ένα εύρος θερμοκρασιών μεταξύ 250°C και 500°C. Τα αποτελέσματα με χρήση TGA συμβαδίζουν με τα αντίστοιχα DSC αποτελέσματα.



Σχήμα 3.20: Καμπύλη θερμοβαρυμετρικής ανάλυσης για δείγμα απλής γυψοσανίδας (GB), γυψοσανίδας Smartboard (SB) και Micronal DS5039X (PCM) σε ρυθμό θέρμανσης 80 °C/min.

Κεφάλαιο 4

Δομικά Υλικά

4.1 Προσομοίωση Δομικών Υλικών και Λοιπών Υλικών	83
4.1.1 Καύση ξύλου και πυρόλυση	84
4.1.2 Θέρμο-φυσικές ιδιότητες υλικών δόμησης	86
4.1.3 Κινητικές παράμετροι της αντίδρασης αφυδάτωσης δύο βημάτων της γυψοσανίδας και φυσικές ιδιότητες . . .	89

4.1 Προσομοίωση Δομικών Υλικών και Λοιπών Υλικών

Οι στερεές επιφάνειες εξομοιώνονται στον FDS ως θερμικά λεπτά ή παχιά στρώματα με την δυνατότητα να χαρακτηρίζονται από σταθερές ή μεταβλητές θερμικές ιδιότητες ανάλογα με την θερμοκρασία (η πυκνότητα όμως θεωρείται πάντα σταθερή). Το θερμοκρασιακό προφίλ κατά μήκος του υλικού υπολογίζεται με απλή μονοδιάστατη μεταφορά θερμότητας. Για την προσομοίωση του σπιτιού στην Αμφιλοχία, η οποία θα παρουσιαστεί στην συνέχεια, έγινε μια προσπάθεια εύρεσης έγκυρων τιμών για τις θερμό-φυσικές ιδιότητες όλων των κατασκευαστικών υλικών και των υλικών της επίπλωσης του κτιρίου. Τα έπιπλα στην κουζίνα είναι κυρίως ξύλινα (από σημύδα) ενώ για την επίπλωση του σαλονιού χρησιμοποιήθηκε αφρός πολυουρεθάνης και ξύλο.

4.1.1 Καύση ξύλου και πυρόλυση

Η υπολογιστική προσομοίωση στερεών καυσίμων υλικών είναι πολύπλοκη επειδή η συμπεριφορά της φωτιάς εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως οι χημικές και φυσικές ιδιότητες, ο προσανατολισμός των επιφανειών και οι περιβαλλοντικές συνθήκες. Οι πιο σημαντικοί περιβαλλοντικοί παράγοντες είναι η ροή θερμότητας προς την επιφάνεια και η συγκέντρωση οξυγόνου. Η έναυση φλόγας και η καύση στην επιφάνεια των υλικών εμπλέκουν τόσο φυσικές όσο και χημικές διεργασίες. Ένα στερεό υλικό πρέπει αρχικά να θερμανθεί προκειμένου να παραχθούν καύσιμα αέρια πριν αρχίσει να καίγεται παρουσία φλόγας. Ο ρυθμός πυρόλυσης ενός στερεού υλικού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την θερμοκρασία και μπορεί να εκφραστεί με μαθηματικούς όρους μέσω της εξίσωσης Arrhenius. Η εξίσωση Arrhenius, η οποία στηρίζεται στην κινητική θεωρία των αερίων, χρησιμοποιείται προκειμένου να προσδιοριστεί ο ρυθμός αντίδρασης της αέριας φάσης των χημικών αντιδράσεων. Παρόλα αυτά, λόγω της απλής μορφής της, χρησιμοποιείται και στην μοντελοποίηση των αντιδράσεων στερεάς φάσης, αν και δεν μπορεί να δικαιολογηθεί η χρήση της με φυσικό τρόπο.

Παράμετρος	Μονάδες μέτρησης	Τιμή
Προεκθετικός παράγοντας A	s^{-1}	$7.51 \cdot 10^{11}$
Ενέργεια ενεργοποίησης E	$kJ/kmol$	$1.61 \cdot 10^5$
Τάξη της αντίδρασης N_s	-	3.12
Θερμότητα καύσης (ΔH_c)	kJ/kg	14500

Πίνακας 4.1: Χρήση κινητικών παραμέτρων στην αντίδραση πυρόλυσης του ξύλου.

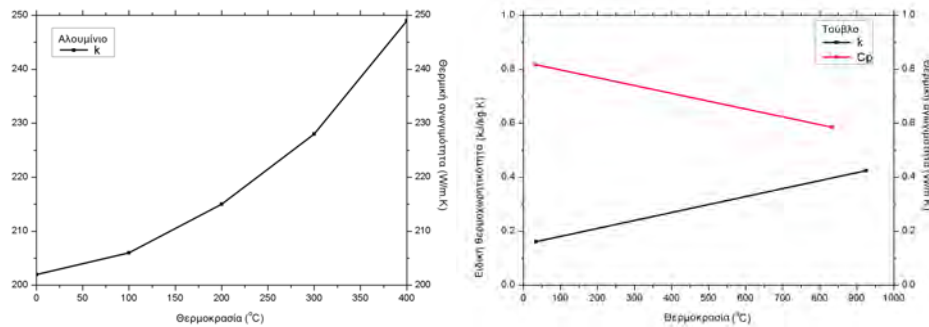
Οι κινητικές παράμετροι των αντιδράσεων που υφίσταται κάθε μέρος του υλικού, είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν. Τυπικά, αυτές οι παράμετροι έχουν σημασία όταν και οι δύο έχουν προσδιοριστεί μέσω ενός κοινού συνόλου πειραμάτων, όπως Θερμοβαρυμετρική Ανάλυση (Thermogravimetric analysis, TGA) και Διαφορική Θερμιδομετρία (Differential Scanning Calorimetry, DSC). Η επιλογή κατάλληλων φυσικών ιδιοτήτων και συντελεστών του ρυθμού πυρόλυσης

για ένα καύσιμο στερεό υλικό είναι μια πολύ δύσκολη διαδικασία. Ειδικά για τον ρυθμό πυρόλυσης, καθώς οι πειραματικές τιμές που προκύπτουν από πειράματα μικρής ή μεγάλης κλίμακας μπορεί να διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό ανάλογα με την μεθοδολογία που έχει ακολουθηθεί για την διεξαγωγή τους [Hostikka and McGrattan, 2004].

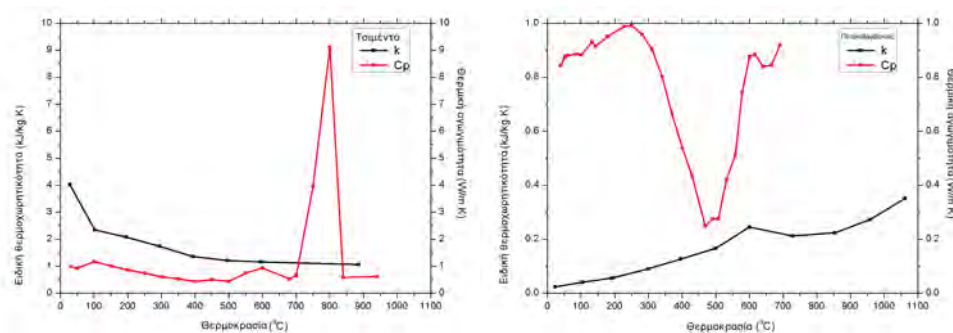
Το σπίτι που προσομοιώνεται θεωρήθηκε ότι είναι πλήρως εξοπλισμένο κυρίως με ξύλινα έπιπλα. Για την προσομοίωση της θερμικής αποσύνθεσης του ξύλου χρησιμοποιήθηκε αντίδραση Arrhenius ενός βήματος. Οι κινητικές και θερμικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση του ξύλου λήφθηκαν από την βιβλιογραφία [Matala, 2008] και οι αντίστοιχες τιμές φαίνονται στον Πίνακα 4.1. Θεωρήθηκε ότι η θερμότητα καύσης της σημύδας είναι 14.5 MJ/kg και ότι το 17.2% του ξύλου που καίγεται μετατρέπεται σε στερεό εξανθράκωμα (char) λόγω ατελούς καύσης [Matala, 2008]. Οι θερμικές ιδιότητες του ξύλου και του στερεού εξανθρακώματος δίνονται στον Πίνακα 4.2. Τα πυρολυτικά αέρια που παράγονται κατά την πυρόλυση του ξύλου περιγράφονται συνολικά μέσω του χημικού τύπου $C_{3.4}H_{6.2}O_{2.5}$ [Ritchie et al., 1997]. Για την προσομοίωση της καύσης των αερίων χρησιμοποιήθηκε μοντέλο κλάσματος μείγματος δύο βημάτων με σταθερό ρυθμό παραγωγής CO 0.004 kg CO/kg ξύλου [DiNenno et al., 2002].

4.1.2 Θέρμο-φυσικές ιδιότητες υλικών δόμησης

Οι στερεές επιφάνειες εξομοιώνονται στον FDS ως θερμικά λεπτά ή παχιά στρώματα με την δυνατότητα να χαρακτηρίζονται από σταθερές ή μεταβλητές θερμικές ιδιότητες ανάλογα με την θερμοκρασία (εκτός της πυκνότητας η οποία θεωρείται πάντα σταθερή). Η θερμοκρασιακή κατανομή κατά το πάχος του υλικού υπολογίζεται με απλή μονοδιάστατη μεταφορά θερμότητας. Για την προσομοίωση της κατοικίας (Κεφάλαιο 6) έγινε προσπάθεια εύρεσης αξιόπιστων τιμών για τις θερμό-φυσικές ιδιότητες όλων των κατασκευαστικών υλικών της επίπλωσης του κτιρίου. Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για την θερμική αγωγιμότητα (k), τη θερμοχωρητικότητα (C_p) και την πυκνότητα του κάθε υλικού, καθώς και οι σχετικές βιβλιογραφικές αναφορές



Σχήμα 4.1: Φυσικές ιδιότητες του αλουμινίου και του τσίβλου συναρτήσει της θερμοκρασίας.



Σχήμα 4.2: Φυσικές ιδιότητες του τσιμέντου και του πετροβάμβακα συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Υλικό	$k(W/m \cdot K)$	$C_p(kJ/kg \cdot K)$	$\rho(kg/m^3)$	Βιβλιογραφική αναφορά
Τσιμεντοσανίδα	0.35	0.879	1280.0	KNAUF ABEE
Πετροβάμβακας	Σχήμα 4.2	Σχήμα 4.2	44.5	[Benichou and Sultan, 2005]
Διογκωμένη πολυστερίνη EPS	0.039	1.21	15.0	KNAUF ABEE
Αλουμίνιο	Σχήμα 4.1	0.869	2707	[DiNenno et al., 2002]
Κεραμικά πλακάκια	0.8	1.0	3253.0	[Effing et al., 2007]
Γυαλί	1.069	0.85	2499.0	[Jonson and Ashby, 2002]
Σημύδα	0.22	2.2	550.0	[Matala, 2008]
Κάρβουνο	0.5	3.5	94	[Matala, 2008]
Αφρός πολυουρεθάνης	0.05	1.0	23.0	[Prasad et al., 2009]
Τούβλο	Σχήμα 4.1	Σχήμα 4.1	840.0	[Hu et al., 1993]
Τσιμέντο	Σχήμα 4.2	Σχήμα 4.2	1440.0	[Hu et al., 1993]

Πίνακας 4.2: Θέρμο-φυσικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση.

Ένα πολύ σημαντικό θέμα σχετικά με την πυρασφάλεια είναι η συμπεριφορά υαλοπινάκων όταν αυτοί εκτίθενται σε φωτιά. Όταν θερμαίνεται ένας υαλοπίνακας και η θερμοκρασία του φτάσει σε μια περιοχή μεταξύ 150°C και 200°C, υπάρχει μια τάση εμφάνισης της πρώτης ρωγμής, συνήθως σε κάποια συγκεκριμένη ακμή του. Ο ατμοσφαιρικός αέρας όμως δεν μπορεί να εισέλθει μέσα στο δωμάτιο μέσα από ρωγμές. Για να γίνει αυτό πρέπει να πέσουν ένα ή περισσότερα κομμάτια γυαλιού. Η οριακή συνθήκη που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις προσομοιώσεις για να σπάσει ένας υαλοπίνακας, επιβάλλει αυτό να σπάσει όταν η θερμοκρασία στην επιφάνειά του φτάσει τους 450°C. Η συνθήκη αυτή ορίστηκε με μια συντηρητική προσέγγιση σε μια πρόσφατη έρευνα σε σχέση με την συμπεριφορά των υαλοπινάκων σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες [Hietaniemi, 2005]. Χαρακτηριστικές τιμές που συμπεριλαμβάνονται σε αυτήν την μελέτη φαίνονται αναλυτικά στον Πίνακα 4.3.

Πειραματικά δεδομένα	Αριθμός παρατηρούμενων ρωγμών	Υπολογισμένη μέση θερμοκρασία υαλοπίνακα (°C)
Συμπεριφορά υαλοπίνακα σε συνθήκες φωτιάς [Hassani et al., 1995]	5	410-430
Διάδοση φωτιάς σε πολυώροφο κτίριο με πρόσοψη υαλοπινάκων [Anon., 1999]	7, 8	620-650, 545-570
Επίδοση μεμονωμένων στοιχείων υαλοπινάκων όταν εκτίθεται σε φωτιές μέσα σε κλειστό χώρο (η φωτιά υπάρχει σε μια γωνία του δωματίου) [Shields et al., 2001]	5	380-410
Ζητήματα φωτιάς σε κτίρια [Hietaniemi et al., 2002]	7, 6	520-540, 460-490
Πειράματα φωτιάς σε επιπλωμένα σπίτια [Mehaffey et al., 2004]	4	500-540

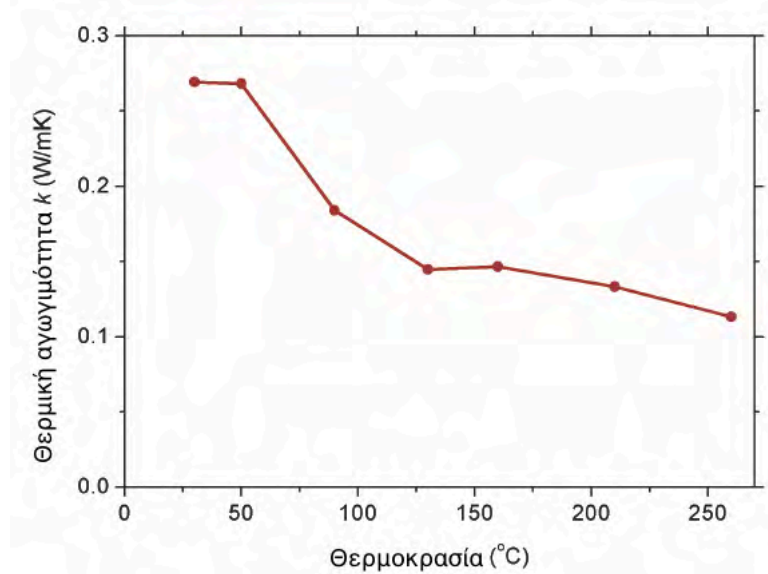
Πίνακας 4.3: Βιβλιογραφική ανασκόπηση συμπεριφοράς υαλοπινάκων σε συνθήκες φωτιάς

4.1.3 Κινητικές παράμετροι της αντίδρασης αφυδάτωσης δύο βημάτων της γυψοσανίδας και φυσικές ιδιότητες

Για την αφυδάτωση της γυψοσανίδας ορίζεται μια αντίδραση πυρόλυσης δύο βημάτων μέσω κατάλληλων παραμέτρων Arrhenius (Πίνακας 4.4).

Βήμα αντίδρασης	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$	$\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4$
Προεκθετικός παράγοντας $A(s^{-1})$	1.353779	0.456201
Ενέργεια ενεργοποίησης $E(kJ/kmol)$	$2.46 \cdot 10^{-1}$	$2.28 \cdot 10^4$
Θερμότητα αντίδρασης (kJ/kg)	345	115
Ποσοστό νερού $(kgH_2O/kg$ μείγματος)	12.75%	4.78%
Ποσοστό υπολοίπου $(kg$ υπολοίπου/ kg μείγματος)	87.25%	95.13%

Πίνακας 4.4: Χρήση κινητικών παραμέτρων στην αντίδραση αφυδάτωσης δύο βημάτων της γυψοσανίδας.

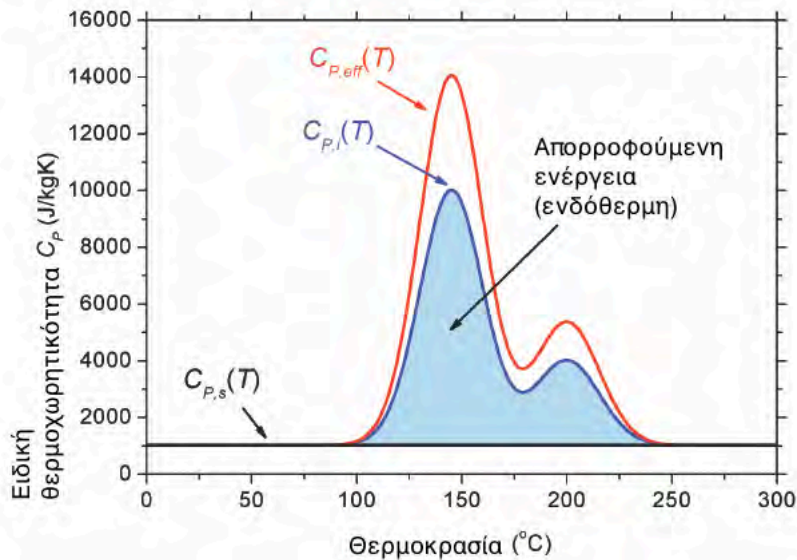


Σχήμα 4.3: Θερμική αγωγιμότητα της γυψοσανίδας συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Για την πυρασφάλεια των κτιρίων, οι γυψοσανίδες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε τοίχους αλλά και σε οροφές καθώς λόγω της αφύγρανσής τους έχουν την δυνατότητα να καθυστερούν την εξάπλωση της φωτιάς δια μέσω των τοίχων. Με αυτόν τον τρόπο δίνεται περισσότερος χρόνος για εκκένωση του κτιρίου και βελτιώνεται η πυρασφάλεια του κτιρίου [Ang and Wang, 2009].

Οι φυσικές ιδιότητες της γυψοσανίδας μεταβάλλονται χρονικά, λόγω των χημικών αντιδράσεων στις οποίες αυτή υπόκειται. Για αυτό το λόγο προκειμένου να υπάρχει συνέπεια στις προλέξεις της θερμοκρασίας των τοίχων, χρησιμοποιούνται θερμοκρασιακά εξαρτώμενες τιμές των φυσικών ιδιοτήτων της γυψοσανίδας. Έτσι, χρησιμοποιήθηκαν πειραματικές τιμές της θερμικής αγωγιμότητας εμπορικής γυψοσανίδας, οι οποίες μετρήθηκαν στο εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης με την μέθοδο θερμού νήματος, Σχήμα 4.3.

Σημαντική επίδραση στα χαρακτηριστικά της μεταφοράς θερμότητας σε συνθήκες φωτιάς έχουν η αφύγρανση του γύψου και η διάχυση των υδρατμών δια μέσω της γυψοσανίδας. Προκειμένου να ενσωματωθούν τα παραπάνω χαρακτηριστικά στον κώδικα του FDS θα απαιτούνταν η αναλυτική επίλυση των εξισώσεων μεταφοράς μάζας και θερμότητας μέσω της γυψοσανίδας με ενσωματωμένους τους όρους ατμοποίησης και διάχυσης για το νερό. Κάτι τέτοιο θα είχε απαγορευτικό υπολογιστικό κόστος. Για αυτό χρησιμοποιήθηκε μια εναλ-

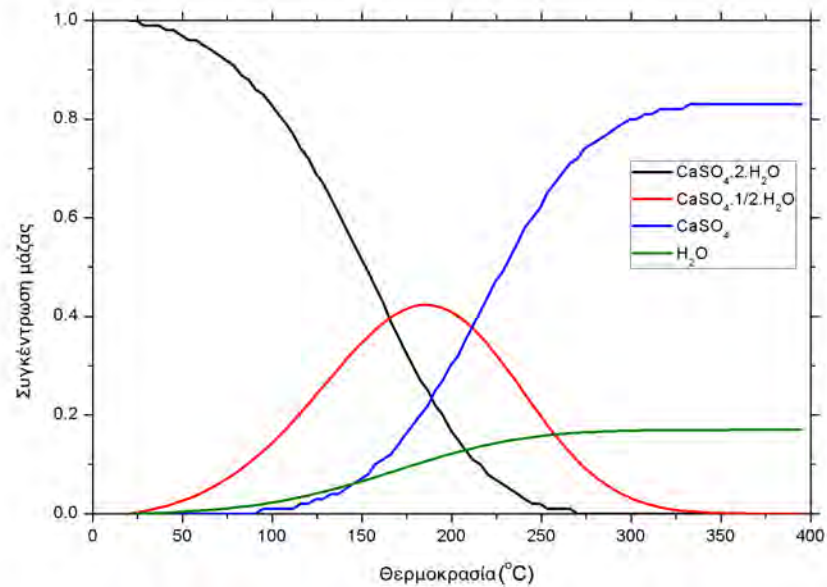


Σχήμα 4.4: Ειδική θερμοχωρητικότητα της γυψοσανίδας συναρτήσει της θερμοκρασίας [Ang and Wang, 2009].

λακτική προσέγγιση. Τα αποτελέσματα των δύο παραπάνω φαινομένων ενσωματώνονται στην ειδική θερμοχωρητικότητα δημιουργώντας έτσι μια "ενεργή" (effective) τιμή της ειδικής θερμοχωρητικότητας [Ang and Wang, 2009], σύμφωνα με την Εξίσωση (4.1):

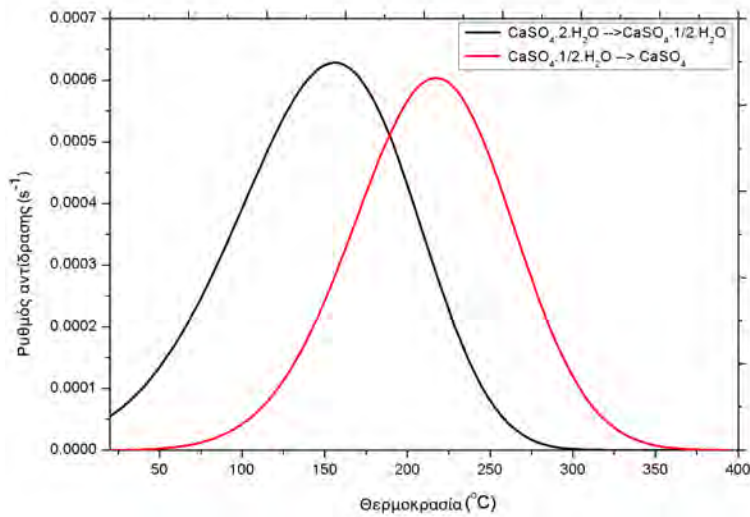
$$C_{p,eff}(T) = C_{p,s}(T) + \sum_{i=1}^2 f_i \cdot C_{p,i}(T) \quad (4.1)$$

Όπου $C_{p,s}$ είναι η αρχική ειδική θερμοχωρητικότητα του γύψου, Σχήμα 4.4. Ο όρος $C_{p,i}$ αντιστοιχεί στην πρόσθετη ειδική θερμότητα που οφείλεται στην ενδόθερμη αντίδραση αφύγρανσης της γυψοσανίδας. Οι τιμές αυτές υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας μετρήσεις DSC σε εμπορικές γυψοσανίδες. Οι όροι f_i είναι ουσιαστικά διορθωτικοί παράγοντες μεταφοράς μάζας που χρησιμοποιούνται προκειμένου να ληφθεί υπόψιν η μεταφορά των υδρατμών μέσα στην πορώδη δομή της γυψοσανίδας για τις δύο αντιδράσεις αφύγρανσης. Οι τιμές αυτές υπολογίστηκαν για την πρώτη αντίδραση $f_1 = 1.28$ και για την δεύτερη $f_2 = 1.42$ στην μελέτη των [Ang and Wang, 2009], αλλά σύμφωνα με την μεθοδολογία που προτείνουν στην συγκεκριμένη περίπτωση υπολογίστηκε $f_1 = f_2 = 1.45$. Δηλαδή υπάρχει μια αύξηση 45% στην συνολική ενέργεια της αφυδάτωσης.

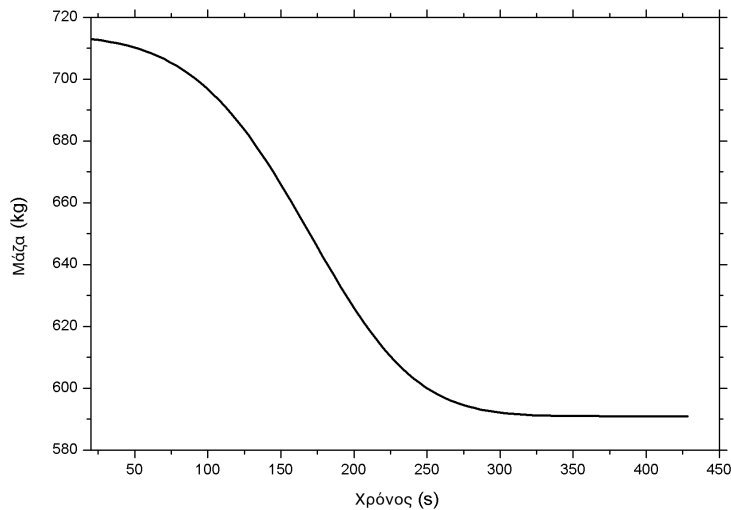


Σχήμα 4.5: Συγκέντρωση μάζας χημικών συστατικών της γυψοσανίδας συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Οι κινητικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την αφυδάτωση δύο βημάτων της γυψοσανίδας περιγράφονται αναλυτικά στον Πίνακα 4.4. Για τον υπολογισμό των κινητικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία από την μελέτη των [Elbeyli and Piskin, 2004]. Στο Σχήμα 4.5 απεικονίζεται σχηματικά η συγκέντρωση μάζας του κάθε συστατικού συναρτήσει της θερμοκρασίας. Επίσης απεικονίζονται τα δύο βήματα της αντίδρασης αφυδάτωσης, Σχήμα 4.6, και η πυκνότητα της γυψοσανίδας, Σχήμα 4.7, συναρτήσει της θερμοκρασίας.



Σχήμα 4.6: Τα δύο βήματα της αντίδρασης αφυδάτωσης της γυψοσανίδας συναρτήσει της θερμοκρασίας.



Σχήμα 4.7: Πυκνότητα γυψοσανίδας συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Κεφάλαιο 5

Υπολογιστική προσομοίωση φωτιάς σε δωμάτιο ISO9705

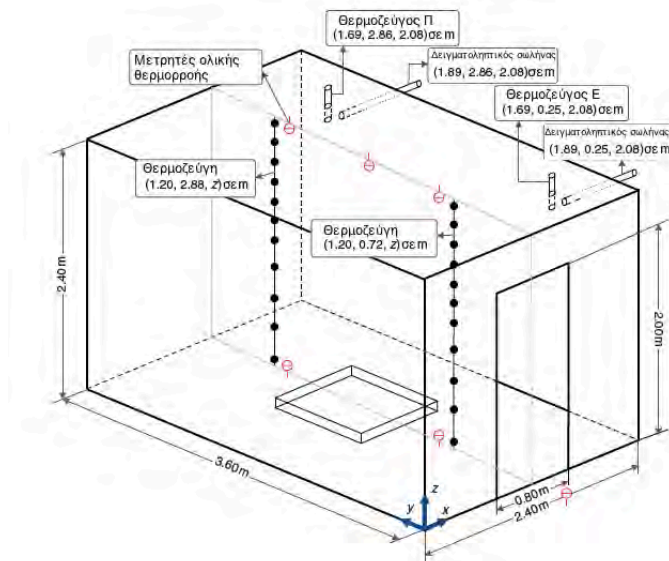
5.1	Περιγραφή της Γεωμετρίας	95
5.2	Στοιχεία Υπολογιστικής Προσομοίωσης	99
5.2.1	Υπολογιστικό πλέγμα	99
5.2.2	Αρχικές και οριακές συνθήκες	99
5.3	Πειραματικά Δεδομένα και Προλέξεις Θερμοκρασίας, O₂, CO₂, CO	101
5.4	Παραμετρική Μελέτη	109
5.4.1	Επίδραση της τεχνικής δόμησης	109
5.4.2	Περιγραφή ροϊκού πεδίου	112
5.4.3	Περιγραφή πεδίων θερμοκρασίας και συγκεντρώσεων	116
5.4.4	Προλέξεις θερμοκρασίας στους τοίχους	122
5.4.5	Προλέξεις O ₂ , CO ₂ και CO	129
5.5	Αξιολόγηση αποτελεσμάτων	131

5.1 Περιγραφή της Γεωμετρίας

Για την πιστοποίηση των αποτελεσμάτων του κώδικα FDS χρησιμοποιήθηκαν τα πειραματικά δεδομένα των [Hwang et al., 2010], από το Εθνικό Ινστιτούτο

Προτύπων και Τεχνολογίας (NIST). Η πειραματική μελέτη είχε στόχο την διερεύνηση του θερμικού, χημικού και ροϊκού περιβάλλοντος που δημιουργείται λόγω καύσης επτανίου σε ένα τυποποιημένο δωμάτιο ISO 9705. Οι παραπάνω συνθήκες μελετήθηκαν τόσο σε συνθήκες πλήρους αερισμού (overventilated fire, OVF) του χώρου όσο και σε συνθήκες ελλιπούς αερισμού (underventilated fire, UVF). Το δωμάτιο που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα έχει διαστάσεις μήκους 3.6m, πλάτους 2.4 m και ύψος 2.4 m με μια πόρτα πλάτους 0.8 m και ύψους 2.0 m, Σχήμα 5.1 . Η κατασκευή στηρίζεται σε έναν σιδερένιο σκελετό και οι τοίχοι καλύπτονται από δύο στρώματα (έκαστο των 25 mm, δηλαδή σύνολο 50 mm) κεραμικής πυράντοχης κουβέρτας πυκνότητας 128 kg/m^3 . Περισσότερες λεπτομέρειες για την κατασκευή του δωματίου μπορούν να βρεθούν στην εργασία [Lock et al., 2008].

Κατά την διάρκεια των πειραμάτων υπήρχε γινόταν μέτρηση της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης των O_2 , CO_2 και CO σε δύο θέσεις μέτρησης (Εμπρός θέση μέτρησης, Ε και Πίσω θέση μέτρησης, Π) στα ανώτερα στρώματα του δωματίου, σε ύψος 2.08m. Χρησιμοποιήθηκαν δύο θερμοστοιχεία τύπου R για την μέτρηση της θερμοκρασίας, ένας παραμαγνητικός αναλυτής (Servomex 4100) για την μέτρηση της συγκέντρωσης του οξυγόνου και ένας υπέρυθρος αναλυτής (Siemens, Ultramet 6E) για την μέτρηση της συγκέντρωσης του μονοξειδίου και του διοξειδίου του άνθρακα. Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας (Heat Release Rate, HRR, ισχύς της φωτιάς) μετρήθηκε σε ένα θερμιδόμετρο 6 m x 6 m στις εγκαταστάσεις του εργαστηρίου έρευνας φωτιών μεγάλης κλίμακας στο NIST. Το σχετικό σφάλμα των μετρήσεων του ρυθμού έκλυσης θερμότητας το οποίο υπολογίστηκε για τις πειραματικές μετρήσεις είναι 14%. Η λεπτομερής περιγραφή της μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκε για τις πειραματικές μετρήσεις μπορεί να βρεθεί στην εργασία των [Bryant et al., 2004]. Το μέγεθος του καυστήρα επτανίου που χρησιμοποιήθηκε είναι 1 m x 1 m. Και για τα τέσσερα σενάρια φωτιάς που πραγματοποιήθηκαν σε συνθήκες πλήρους αερισμού, χρησιμοποιήθηκε αντλία καυσίμου για την διασφάλιση της συνεχούς παροχής καυσίμου. Τα χαρακτηριστικά αυτών των τεσσάρων σεναρίων παρατίθενται αναλυτικά στον Πίνακα 5.1. Ο πραγματικός ρυθμός έκλυσης θερμότητας μετρήθηκε με το θερμιδόμετρο ενώ ο ιδεατός ρυθμός έκλυσης θερμότητας υπολογίστηκε έμμεσα είτε χρησιμοποιώντας την παροχή καυσίμου ή μετρώντας τον ρυθμό απώλειας μάζας του καυσίμου θεωρώντας ότι η θερμογόνος ικανότητα του επτανίου είναι 44.6 MJ/kg . Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν διάφορα επίπεδα παροχής καυσίμου κατά την διάρκεια των 5,000 s προκειμένου ο ιδεατός ρυθμός έκλυσης θερμότητας να αυξάνεται βηματικά μέχρι τα 2400 kW . Οι διακυμάνσεις στον πραγματικό ρυθμό έκλυσης θερμότητας οφείλονται στις εγγενείς αστάθειες που προκαλούνται λόγω του σχεδίου του καυστήρα. Παρόλα αυτά, οι μετρημένες τιμές του ρυθμού έκλυσης θερμότητας παρουσιάζουν είναι παραπλήσιες των



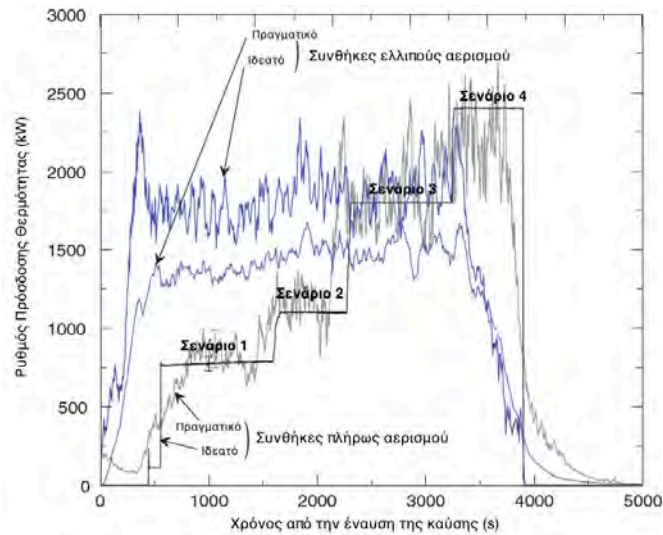
Σχήμα 5.1: Απεικόνιση της γεωμετρίας του πρότυπου δωματίου ISO9705.

αντίστοιχων τιμών του ιδεατού ρυθμού έκλυσης θερμότητας, σε κάθε περίοδο των τεσσάρων σεναρίων που παρουσιάζονται.

Πραγματοποιήθηκε ακόμα ένα σενάριο σε συνθήκες περιορισμένου αερισμού (παραμετρική μελέτη που πραγματοποιήθηκε με πλάτος πόρτας 0.2 m), στο οποίο όμως δεν θα γίνει αναφορά στην παρούσα μελέτη, Σχήμα 5.2. Λεπτομερής περιγραφή του καυστήρα που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε μια από τις παραπάνω περιπτώσεις καθώς και της αβεβαιότητας των πειραματικών μετρήσεων μπορεί να βρεθεί στην εργασία των [Lock et al., 2008]. Ο καυστήρας είναι τοποθετημένος στο γεωμετρικό κέντρο του δωματίου και η απώλεια μάζας του καυσίμου μετριέται με έναν ζυγό κάτω από τον καυστήρα, ο οποίος έχει ακρίβεια μέτρησης ± 0.001 kg.

Μεταβλητές	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3	Σενάριο 4
Χρόνος διεξαγωγής (s)	800-1200	1650-2050	2400-2800	3300-3700
Ιδεατός Ρυθμός Πρόσδοσης Θερμότητας (kW)	780	1110	1800	2400
Μετρούμενος Ρυθμός Πρόσδοσης Θερμότητας (kW)	780	1080	1680	2070
Ρυθμός απώλειας μάζας (kg/s)	0.017	0.025	0.040	0.054

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά των τεσσάρων σεναρίων φωτιάς που πραγματοποιήθηκαν από τους [Hwang et al., 2010].



Σχήμα 5.2: Ρυθμός έκλυσης θερμότητας για κάθε ένα από τα τέσσερα σενάρια και για καθε μια από τις συνθήκες αερισμού.

5.2 Στοιχεία Υπολογιστικής Προσομοίωσης

5.2.1 Υπολογιστικό πλέγμα

Το υπολογιστικό χωρίο που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της φωτιάς σε δωμάτιο ISO9705 έχει διαστάσεις 8.4 m x 3.0 m x 4.5 m κατά την x, y και z διάσταση αντιστοίχως. Είναι χωρισμένο σε 108,000 κυβικά υπολογιστικά κελιά, όπου το καθένα έχει πλευρά 0.1 m (Σχήμα ??). Το υπολογιστικό χωρίο εκτείνεται πέρα από τις φυσικές διαστάσεις του δωματίου προκειμένου να είναι δυνατή η προσομοίωση της εισόδου αέρα στο δωμάτιο δια μέσω της πόρτας με ικανοποιητικό τρόπο.

Η ποσότητα $D^*/\delta x$ χαρακτηρίζει το κατά πόσο η διακριτική ικανότητα του πλέγματος είναι ικανοποιητική για την μελέτη ενός σεναρίου φωτιάς [McDermott et al., 2010]. Η ποσότητα D^* είναι η χαρακτηριστική κλίμακα μήκους της φωτιάς (χαρακτηριστική διάμετρος της φωτιάς) και δx το μήκος του υπολογιστικού κελιού. Πρόκειται για αδιάστατη ποσότητα που προκύπτει συναρτήσει του ολικού ρυθμού έκλυσης θερμότητας, την πυκνότητα αέρα περιβάλλοντος, την ειδική θερμοχωρητικότητα αέρα περιβάλλοντος και την θερμοκρασία του σύμφωνα με την σχέση:

$$D^* = \left\{ \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty C_p T_\infty \sqrt{g}} \right\}^{2/5} \quad (5.1)$$

Στην μελέτη των [McGrattan et al., 2002] υποστηρίζεται ότι αν $0.05 < \delta x/D^* < 0.10$ τότε η ακρίβεια των προλέξεων είναι αρκούτως ικανοποιητική χωρίς να αυξάνεται υπέρμετρα το υπολογιστικό κόστος. Στην παρούσα μελέτη για το υπολογιστικό χωρίο που χρησιμοποιήθηκε ($\delta x = 0.1$) ισχύει ότι $\delta x/D^* = 0.055$ με αποτέλεσμα να ικανοποιείται η παραπάνω συνθήκη.

5.2.2 Αρχικές και οριακές συνθήκες

Στην αρχή της υπολογιστικής προσομοίωσης ($t=0$ s), θεωρείται ότι το πεδίο ταχυτήτων σε όλο το υπολογιστικό χωρίο, είναι μηδενικό και επικρατεί ενιαία αρχική θερμοκρασία 20°C. Ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης είναι 5 min, προκειμένου να απεικονιστούν με ακρίβεια τα πρώτα χαρακτηριστικά στάδια της εξέλιξης μιας φωτιάς. Ο μετρούμενος ρυθμός έκλυσης θερμότητας εισάγεται σαν

δεδομένο εισόδου στο μοντέλο. Το ποσοστό του καυσίμου που μετατρέπεται σε αιθάλη είναι 1.5% σύμφωνα με την μελέτη για την προσομοίωση παραγωγής αιθάλης σε φωτιές επτανίου [McGrattan, 2007]. Στα όρια του υπολογιστικού χωρίου (εκτός από το δάπεδο) χρησιμοποιήθηκαν "ανοιχτές" οριακές συνθήκες (απαιτείται οριακή συνθήκη τύπου Dirichlet, η πίεση είναι προκαθορισμένη και η τιμή της εξαρτάται από το αν η ροή εισέρχεται ή εξέρχεται από το υπολογιστικό χωρίο). Χρησιμοποιήθηκαν οι θερμικές ιδιότητες της k-Lite HTZ πυράντοχης κουβέρτας (Ειδική θερμοχωρητικότητα 1.13 kJ/kg/K και πυκνότητα 128 kg/m³), Πίνακας 5.2. Οι ιδιότητες του επτανίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3, [Turns, 2000].

Θερμοκρασία	Τιμή θερμικής αγωγιμότητας (W/m/k)
Μέχρι τα πρώτα 800°C	0.19
Μέχρι τα 1000°C	0.27
Μέχρι τα 1200°C	0.36

Πίνακας 5.2: Θερμική αγωγιμότητα της πυράντοχης κουβέρτας k-Lite HTZ.

Θερμότητα καύσης (kJ/kg)	44,600
Παραγωγή CO	0.010
Παραγωγή αιθάλης	0.015

Πίνακας 5.3: Θερμοχημικές ιδιότητες επτανίου, που χρησιμοποιήθηκε ως καύσιμο στις προσομοιώσεις [Turns, 2000].

5.3 Πειραματικά Δεδομένα και Προλέξεις Θερμοκρασίας, O₂, CO₂, CO

Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζονται ταυτόχρονα οι πειραματικές μετρήσεις της θερμοκρασίας και οι προλέξεις της από τον κώδικα FDS στις θέσεις μέτρησης Ε και Π, Σχήμα 5.1. Αντίστοιχα στα Σχήματα 5.4, 5.5, 5.6 που ακολουθούν, παρουσιάζονται ταυτόχρονα οι πειραματικές τιμές με τις προλέξεις συγκέντρωσης κατ' όγκο για O₂, CO₂ και CO στις θέσεις μέτρησης Ε και Π. Με σύμβολα απεικονίζονται οι πειραματικές μετρήσεις και με συνεχή γραμμή τα υπολογιστικά αποτελέσματα. Στην θέση μέτρησης Ε οι τιμές της θερμοκρασίας αυξάνονται καθώς αυξάνεται βηματικά και ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας σύμφωνα με τα τέσσερα σενάρια που έχουν παρουσιαστεί παραπάνω. Οι προλέξεις της θερμοκρασίας συμφωνούν σε μεγάλο βαθμό με τις πειραματικές μετρήσεις. Αντίστοιχη συμπεριφορά παρατηρείται και στις μετρήσεις συγκέντρωσης για το O₂ και το CO₂. Παρόλο που οι ποσοτικές διαφοροποιήσεις μεταξύ πειραματικών τιμών και προλέξεων αυξάνονται καθώς αυξάνεται ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας, σε γενικές γραμμές υπάρχει συμφωνία στην συμπεριφορά των αποτελεσμάτων. Η συγκέντρωση CO είναι πολύ χαμηλή για όλα τα σενάρια τόσο για τις πειραματικές μετρήσεις όσο και για τις προλέξεις.

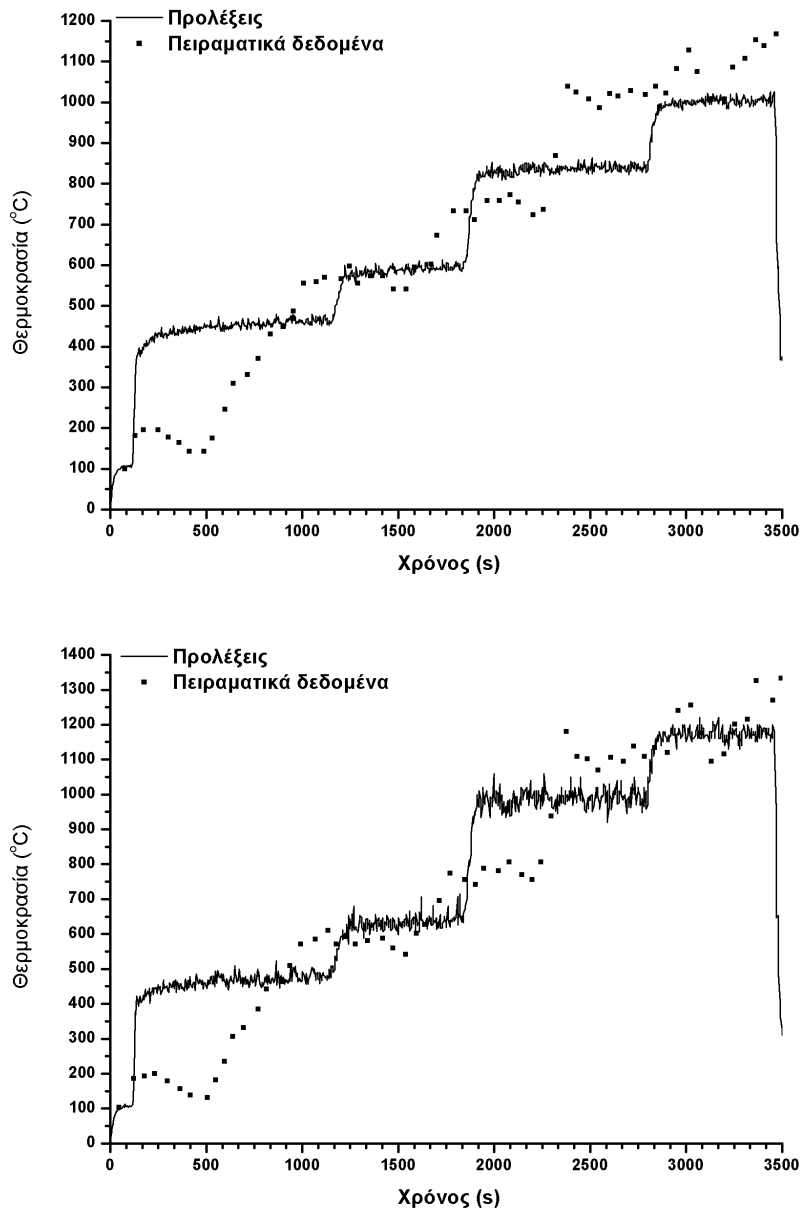
Στην θέση μέτρησης Π οι τιμές της θερμοκρασίας παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά όπως και στην θέση μέτρησης Ε, μέχρι τα 3000 s. Όταν ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας φτάσει τα 2070 kW, η θερμοκρασία στην θέση μέτρησης Π είναι αυξημένη κατά περίπου 200°C σε σχέση με την θέση μέτρησης Ε. Οι διαφορές στις συγκεντρώσεις για το O₂ και το CO₂ μεταξύ των δύο θέσεων Ε και Π δεν είναι τόσο μεγάλες (Πίνακες 5.4 και 5.5).

Η φυσική "θέση" της φωτιάς παίζει σημαντικό ρόλο στην θερμοκρασία του αέρα τόσο στην θέση μέτρησης Ε όσο και στην θέση μέτρησης Π. Φαίνεται καθαρά ότι λόγω της εισροής φρέσκου αέρα από την πόρτα δημιουργείται έντονο ροϊκό πεδίο που ωθεί την φλόγα να κινηθεί προς την πίσω (Σχήμα 5.9), θέση μέτρησης Π και άρα οι θερμοκρασίες αέρα που υπολογίζονται εκεί είναι αισθητά υψηλότερες. Οι συγκεντρώσεις των προϊόντων της καύσης είναι παραπλήσιες και στις δύο θέσεις μέτρησης επειδή το μεγαλύτερο ποσοστό της καύσης έχει ήδη ολοκληρωθεί πριν τα αντιδρώντα φτάσουν το ύψος τοποθέτησης των μετρητικών διατάξεων.

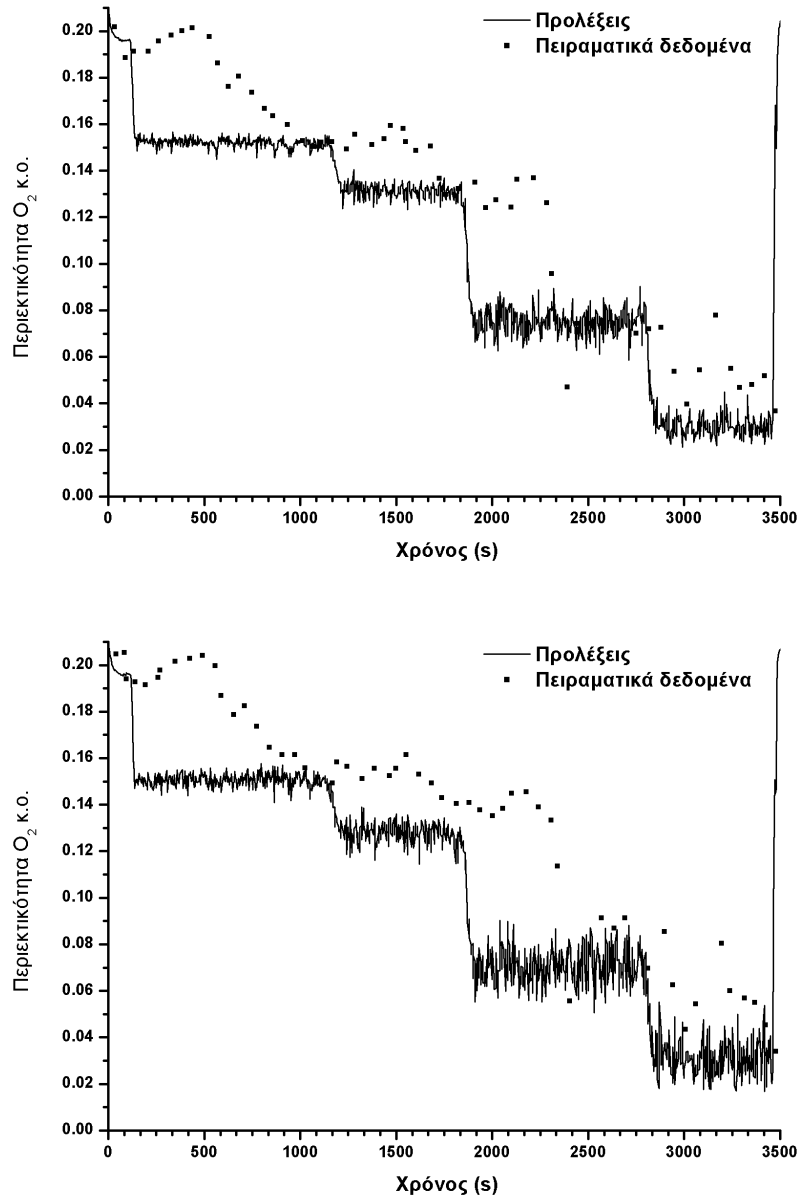
Οι προλέξεις για το CO δεν είναι τόσο κοντά στα πειραματικά δεδομένα γεγονός αναμενόμενο λόγω της απλουστευτικής προσέγγισης που χρησιμοποιείται στον κώδικα FDS για την πρόλεξη της παραγωγής CO. Με την χρήση του μοντέλου κλάσματος μείγματος δύο βημάτων, δεν είναι ακόμα δυνατόν να οριστεί με

ακρίβεια η ποσότητα του CO που παράγεται μετά την καύση, με αποτέλεσμα να υπερεκτιμάται η ποσότητα που παράγεται στο πρώτο βήμα της αντίδρασης των δύο βημάτων. Οι διαφοροποιήσεις που εμφανίζονται στις υπολογιστικές τιμές σε σχέση με τις πειραματικές μετρήσεις του CO μπορεί εν μέρει οφείλονται και στην παραδοχή σταθερού ποσοστού παραγωγής CO ως προς την μάζα του καυσίμου. Ο χρήστης μπορεί να εισάγει στο αρχείο εισόδου του κώδικα FDS μια μόνο σταθερή τιμή για την παραγωγή CO. Στην πραγματικότητα όμως, κατά την διάρκεια της καύσης, η παραγωγή CO δεν παραμένει σταθερή. Παρ' όλα αυτά, υπάρχει δυσκολία (ιδιαίτερα σε επίπεδο υπολογιστικού κόστους) περισσότερου λεπτομερούς προσέγγισης του φαινομένου, μέσω, για παράδειγμα, χημικής κινητικής.

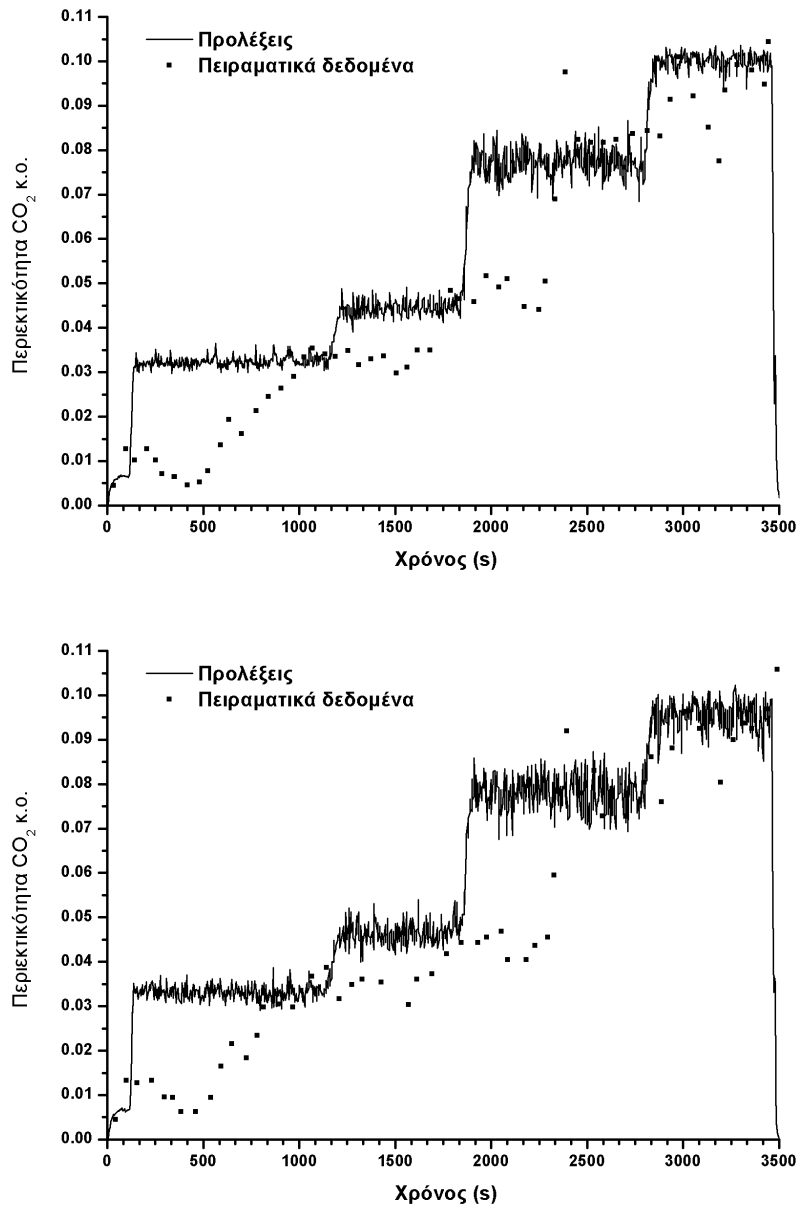
Η σύγκριση προλέξεων του FDS με πειραματικά αποτελέσματα σε τυποποιημένο δωμάτιο ISO9705 έδειξαν ότι η ακρίβεια πρόβλεψης θερμοκρασίας και συγκεντρώσεων O₂, CO₂ και CO είναι της τάξης των 14.6%, 24.1%, 37.7% και 253.5%. Αντίστοιχη ακρίβεια αναμένεται σε αντίστοιχες περιπτώσεις όπου δεν είναι διαθέσιμες πειραματικές μετρήσεις.



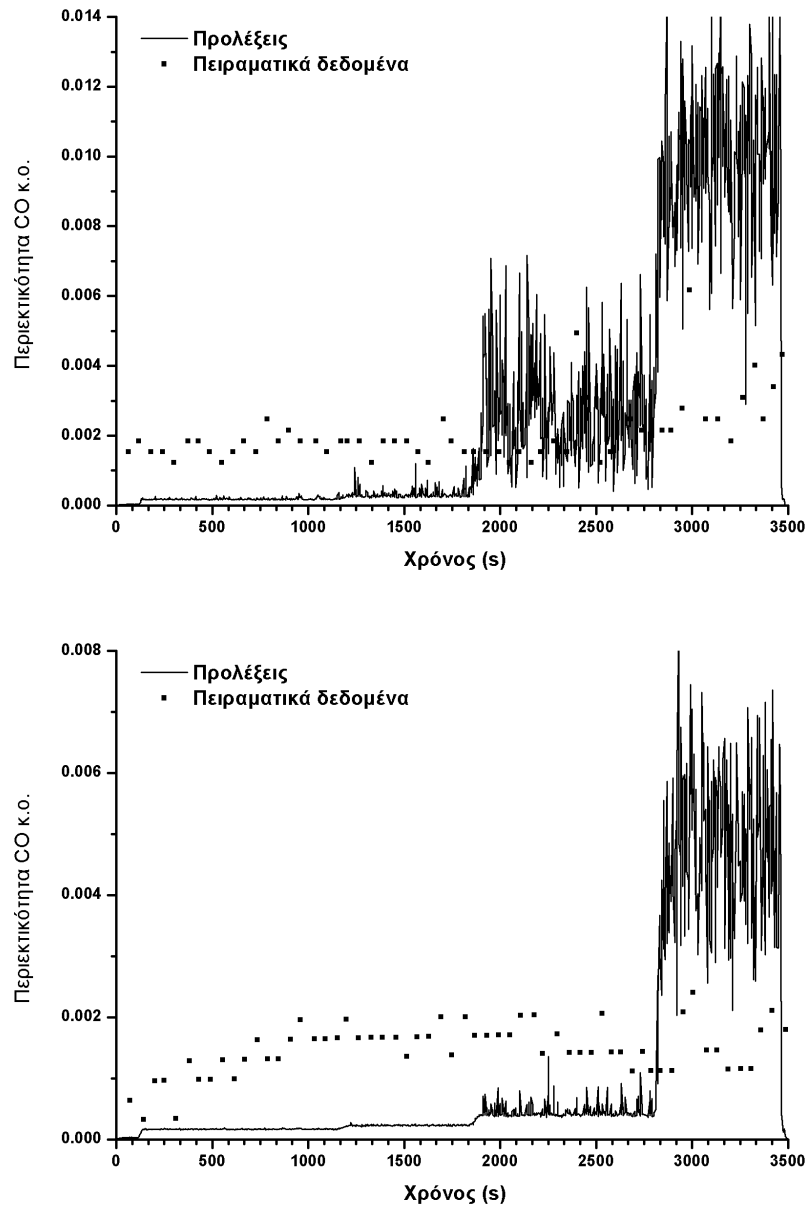
Σχήμα 5.3: Πειραματικά δεδομένα και προλέξεις θερμοκρασίας στην θέση μέτρησης E (πάνω εικόνα) και στην θέση Π (κάτω εικόνα).



Σχήμα 5.4: Πειραματικά δεδομένα και προλέξεις συγκέντρωσης O₂ στην θέση μέτρησης Ε (πάνω εικόνα) και στην θέση Π (κάτω εικόνα).



Σχήμα 5.5: Πειραματικά δεδομένα και προλέξεις συγκέντρωσης CO₂ στην θέση μέτρησης E (πάνω εικόνα) και στην θέση Π (κάτω εικόνα).



Σχήμα 5.6: Πειραματικά δεδομένα και προλέξεις συγκέντρωσης CO στην θέση μέτρησης Ε (πάνω εικόνα) και στην θέση Π (κάτω εικόνα).

Μεταβλητές	Θέση Ε		Θέση Π	
	Πειραματικές μετρήσεις	Προλέξεις	Πειραματικές μετρήσεις	Προλέξεις
T (°C)	710 (± 43)	696 (ΣΣ: 1.2%)	740 (± 44)	794 (ΣΣ: -11.4%)
O ₂	0.134 (± 0.016)	0.106 (ΣΣ: 20.9%)	0.139 (± 0.016)	0.101 (ΣΣ: 27.3%)
CO ₂	0.045 (± 0.005)	0.059 (ΣΣ:-30.1%)	0.042 (± 0.005)	0.061 (ΣΣ:-45.2%)
CO (· 10 ³)	0.20 (± 0.02)	0.33 (ΣΣ: -65.0%)	0.2 (± 0.02)	1.48 (ΣΣ: 640%)

Πίνακας 5.4: Πειραματικές τιμές και προλέξεις των μέσω τιμών της θερμοκρασίας και κατ' όγκον συγκεντρώσεων O₂, CO₂ και CO στις θέσεις Ε και Π, για ρυθμό έκλυσης θερμότητας 1080 kW (ΣΣ=Σχετικό Σφάλμα).

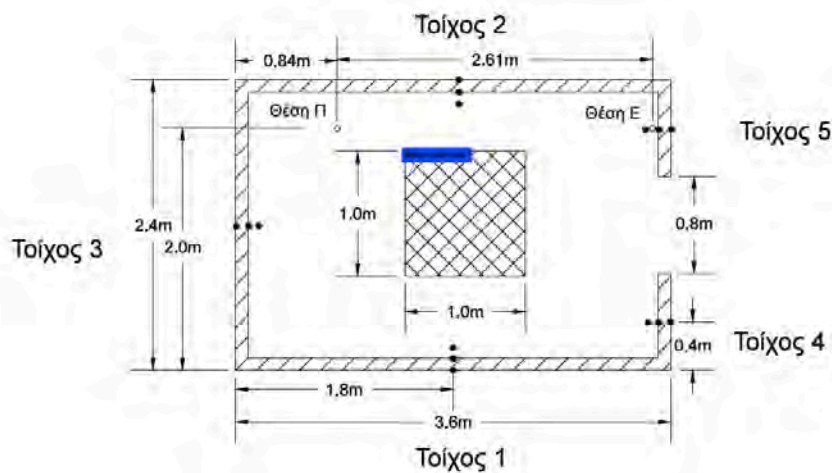
Μεταβλητές	Θέση Ε		Θέση Π	
	Πειραματικές μετρήσεις	Προλέξεις	Πειραματικές μετρήσεις	Προλέξεις
T (°C)	1160 (± 70)	900	1310 (± 79)	1061
O ₂	0.036 (± 0.004)	0.057	0.036 (± 0.004)	0.055
CO ₂	0.102 (± 0.012)	0.086	0.099 (± 0.012)	0.085
CO (· 10 ³)	1.60 (± 0.20)	2.12	4.8 (± 0.58)	5.38

Πίνακας 5.5: Πειραματικές τιμές και προλέξεις των μέσω τιμών της θερμοκρασίας θερμοκρασίας και κατ' όγκο συγκεντρώσεων O₂, CO₂ και CO στις θέσεις Ε και Π, για ρυθμό έκλυσης θερμότητας 2070 kW από 3300 s έως 3700 s.

5.4 Παραμετρική Μελέτη

5.4.1 Επίδραση της τεχνικής δόμησης

Σκοπός της παρούσας παραμετρικής μελέτης είναι η παρουσίαση της επίδρασης της τεχνικής ξηράς δόμησης σε συνθήκες φωτιάς. Επιλέχθηκε η γεωμετρία του προτυποποιημένου δωματίου ISO9705, Σχήμα 5.7, προκειμένου να μελετηθεί αναλυτικά η συμπεριφορά της τοιχοποιίας σε περιβάλλον πολύ υψηλών θερμοκρασιών. Χρησιμοποιήθηκαν δύο σενάρια μελέτης. Στο πρώτο χρησιμοποιήθηκε ως δομικό υλικό η απλή γυψοσανίδα με πάχος 25 mm (το οποίο ισοδυναμεί με το χαρακτηριστικό πάχος δύο εμπορικών γυψοσανίδων των 12.5 mm η καθεμία) και στο δεύτερο, γυψοσανίδα με ενσωματωμένο υλικό αλλαγής φάσης, με πάχος και αυτή 25 mm. Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας σε κάθε σενάριο ορίστηκε στα 2000 kW, ο χρόνος της προσομοίωσης στα 300 s και όπως ήδη αναφέρθηκε χρησιμοποιήθηκε ενιαίο ορθογωνικό πλέγμα 108,000 κελιών και στις δύο περιπτώσεις.



Σχήμα 5.7: Απεικόνιση της γεωμετρίας του πρότυπου δωματίου ISO9705 και τοποθέτηση μετρητικών οργάνων.



Σχήμα 5.8: Απεικόνιση της διαστρωμάτωσης των θερμών αερίων και της αιθάλης που εξέρχονται από δωμάτιο, πείραμα που διεξάχθηκε στο NIST.

Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας της φωτιάς είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τις υπόλοιπες παραμέτρους σε ένα περιβάλλον φωτιάς. Καθώς αυτός αυξάνεται, η θερμοκρασία αλλά και ο ρυθμός με τον οποίο αυτή μεταβάλλεται αυξάνονται, επιταχύνοντας την εξέλιξη της φωτιάς. Για παράδειγμα, μια φωτιά ισχύος 0.5 MW σε ένα δωμάτιο διαστάσεων 2.4 m x 3.7 m x 2.4 m θα κατανάλωνε όλο τον όγκο αέρα που υπάρχει στο δωμάτιο (21.312 m³) σε μόλις δύο λεπτά (127.8 s). Αυτό το σενάριο όμως αποτελεί μια υπεραπλούστευση της πραγματικότητας καθώς σε γενικές γραμμές όλες οι φωτιές ξεκινούν με χαμηλό ρυθμό έκλυσης θερμότητας και μεγαλώνουν μέχρι που δεν έχουν αρκετό οξυγόνο για να διατηρηθούν. Σε αυτήν την περίπτωση, η φωτιά θα συνεχίσει να καίει για λίγο ακόμη και στην συνέχεια οι φλόγες θα εξαφανιστούν αλλά θα συνεχιστεί η καύση των επιφανειών (αυτό εξαρτάται από τα καύσιμα που θα υπάρχουν στον χώρο) μέχρι η συγκέντρωση O₂ να πέσει κάτω από το 15%. Είναι απίθανο να προκύψει πυρκαγιά σε ένα δωμάτιο που δεν έχει καθόλου ανοίγματα (ή πιθανά ανοίγματα τα οποία μπορεί να προκύψουν κατά την διάρκεια, όπως π.χ. η αστοχία ενός υαλοπίνακα) όπως πόρτες ή παράθυρα. Ακόμα και αν τα παραπάνω είναι κλειστά είναι πιθανό να υπάρχουν σχισμές που θα επιτρέπουν την είσοδο αέρα στο δωμάτιο ώστε να διατηρηθεί η καύση. Στην περίπτωση που υπάρχουν ανοίγματα (όπως και στην περίπτωση που μελετάται στο παρόν κεφάλαιο) υπάρχει επαρκής ποσότητα αέρα για να διατηρηθεί η καύση. Με την εξέλιξη του φαινομένου σχηματίζεται ένα στρώμα θερμών αερίων που αρχίζει σταδιακά να γεμίζει το δωμάτιο. Καθώς τα θερμά αέρια αρχίζουν να εξέρχονται από την πόρτα, μειώνεται το μέγεθος του ανοίγματος το οποίο έχει στην διάθεση του ο φρέσκος αέρας για να εισέλθει στο δωμάτιο και κατά συνέπεια μεταβάλλεται και η παροχή του. Με αυτόν τον τρόπο η φωτιά εξαρτάται πλέον από

τον αερισμό του χώρου και ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας (αν αυτός δεν είναι ελεγχόμενος από κάποια αντλία παροχής καυσίμου) εξαρτάται και αυτός από το διαθέσιμο οξυγόνο του αέρα που εισέρχεται στον χώρο. Ο αερισμός του χώρου της φωτιάς είναι μια πολύπλοκη έννοια που μπορεί να έχει είτε αρνητική είτε θετική επίδραση στην εξέλιξη της φωτιάς. Η δημιουργία επιπλέον αιθάλης μπορεί να αυξήσει την ποσότητα των θερμών αερίων που εξέρχονται από το δωμάτιο και με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται και η έξοδος καύσιμης ύλης και ενέργειας από το δωμάτιο. Από την άλλη πλευρά, αυξάνοντας τον αερισμό στον χώρο, αυξάνεται ο ρυθμός έκλυσης ενέργειας και ενδεχομένως μπορεί να προκύψει καθολική ανάφλεξη (flashover).

5.4.2 Περιγραφή ροϊκού πεδίου

Η απεικόνιση του ροϊκού πεδίου στο επίπεδο συμμετρίας του δωματίου ($Y=1.3$ m) φαίνεται καθαρά στο Σχήμα 5.9. Μετά τα 8 πρώτα δευτερόλεπτα, παρατηρείται μεγάλη αύξηση της ταχύτητας της ροής στο επίπεδο της πόρτας, μέσω της οποίας μεταφέρονται τα καυσαέρια από το δωμάτιο που γίνεται η καύση επτανίου (heptane pool fire) στον εξωτερικό χώρο.

Σχετικά με την κίνηση των καυσαερίων από το δωμάτιο προς το εξωτερικό του, αναλυτικά συμβαίνουν τα εξής: Στα πρώτα στάδια της φωτιάς, τα προϊόντα της καύσης που σχηματίζονται είναι πιο θερμά και με μικρότερη πυκνότητα, με αποτέλεσμα να κινούνται κάθετα με φορά προς τα πάνω, ώσπου να φτάσουν στην οροφή. Το θερμό στρώμα των καυσαερίων κινείται, στη συνέχεια, οριζόντια, μέχρι να συναντήσει κάποιον τοίχο, που θα το αναγκάσει να σταματήσει την πορεία του. Έτσι, το στρώμα αιθάλης που είχε δημιουργηθεί, αρχίζει να γίνεται πιο πυκνό και να εκτείνεται στα πιο χαμηλά στρώματα του δωματίου, οπότε φτάνει μέχρι και επίπεδο της πόρτας, όπου βρίσκει διέξοδο και αρχίζει να μεταφέρεται προς το εξωτερικό του δωματίου. Στην ουσία δημιουργείται διαστρωμάτωση θερμών και ψυχρών περιοχών αφ' ενός λόγω της θερμοκρασιακής τους διαφοράς, αφ' ετέρου λόγω της ορμής που έχουν. Έτσι, δημιουργείται ροή μέσα στο δωμάτιο που οδηγεί τα θερμά καυσαέρια προς την έξοδο του δωματίου. Επιπλέον στην είσοδο του δωματίου υπάρχει παροχή φρέσκου αέρα, που τροφοδοτεί το δωμάτιο ενώ υπάρχει και ταυτόχρονη έξοδος καυσαερίων. Η συμπεριφορά αυτή των καυσαερίων και γενικότερα των θερμών και ψυχρών ρευμάτων, βρίσκεται σε απόλυτη συμφωνία με τις μελέτες για εξαερισμό και εξάπλωση καυσαερίων σε διάδρομο, όπως παρουσιάζονται σε κλασικά συγγράμματά [Quintiere, 2006]. Στο δωμάτιο όπου πραγματοποιείται η καύση, οι διαφοροποιήσεις στο διανυσματικό πεδίο είναι πολύ πιο έντονες. Από την στιγμή που θα αρχίσει η φωτιά, (πρώτη εικόνα στα αριστερά, Σχήμα 5.9), ενώ το πεδίο είναι σταθερό, αρχίζει μια έντονη ροή από την εστία της φωτιάς προς τα ανώτερα στρώματα αέρα του δωματίου. Οι μέγιστες τιμές της ταχύτητας, που εμφανίζονται πάνω από την εστία της φωτιάς, φτάνουν μέχρι και τα 8.25 m/s . Μετά τα πρώτα 3 s, τα καυσαέρια οδηγούνται προς το άνοιγμα της πόρτας, γεγονός που απεικονίζεται καθαρά στα στιγμιότυπα του ροϊκού πεδίου. Ο αέρας εισέρχεται στην πόρτα με ταχύτητες της τάξης των 2.5 m/s και λαμβάνει μέγιστη τιμή 8 m/s στα ανώτερα στρώματα, με διεύθυνση παράλληλη προς το δάπεδο του δωματίου και φορά προς το εξωτερικό του δωματίου. Λόγω αυτού του φαινομένου, σχηματίζονται δίνες αέρα στο κατακόρυφο επίπεδο, οι οποίες φέρουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά (Σχήμα 5.9):

- Είναι ιδιαίτερα έντονες κοντά στην οροφή αλλά και στο κάτω μέρος της

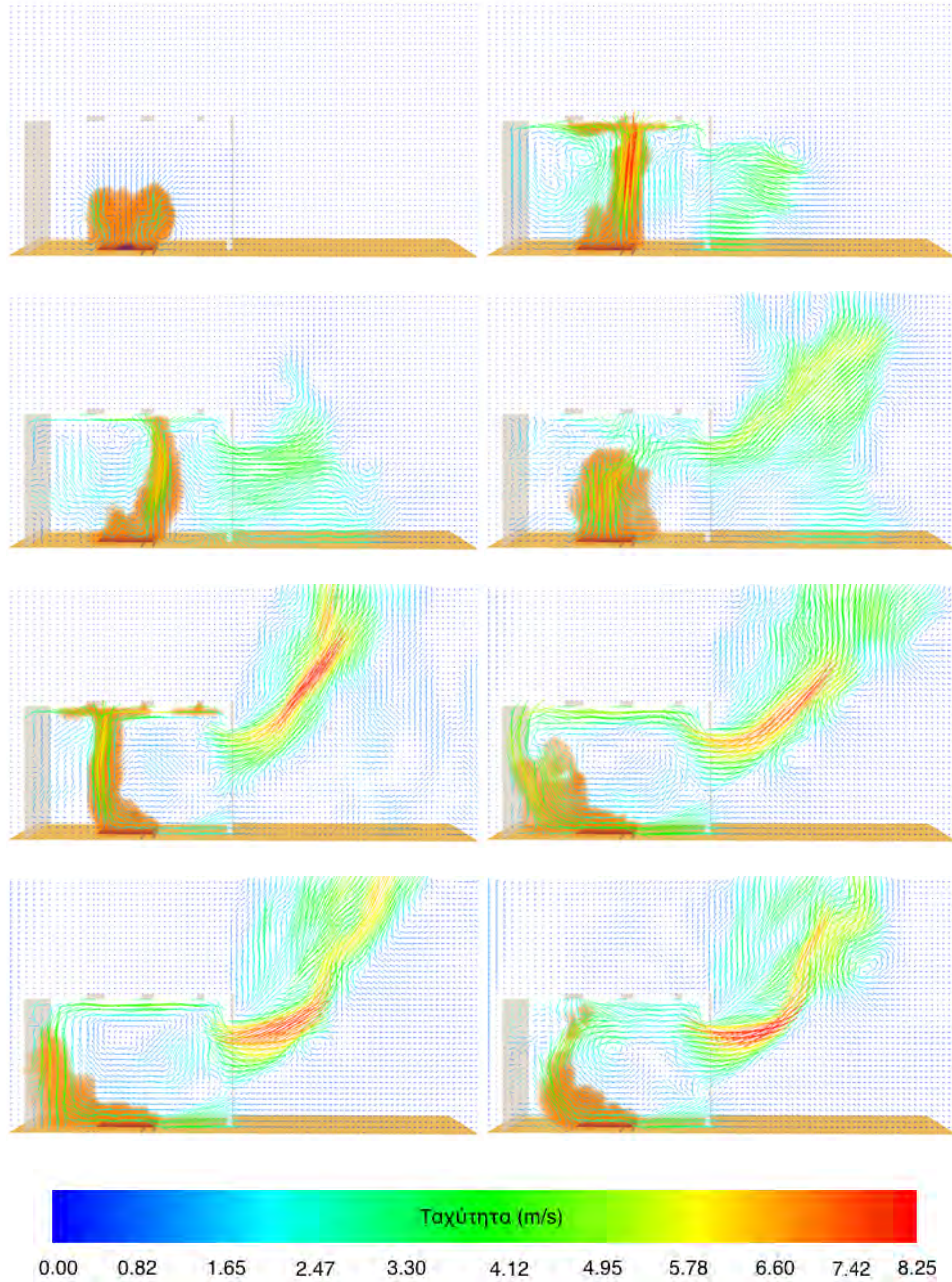
πόρτας. Έχουν κατεύθυνση από την εστία της φωτιάς προς την οροφή και από την οροφή οδηγούνται κατά μήκος των τοιχωμάτων μέχρι το δάπεδο από όπου και κατευθύνονται ξανά προς την εστία της φλόγας.

- Οι ταχύτητες στο μέσο των δινών είναι σχεδόν μηδενικές ενώ αντίθετα οι μεγαλύτερες τιμές παρουσιάζονται κοντά στην εστία της φωτιάς. Με την πάροδο του χρόνου, τα φαινόμενα εντατικοποιούνται μέχρι το 5 min όπου και σταματά η προσομοίωση.

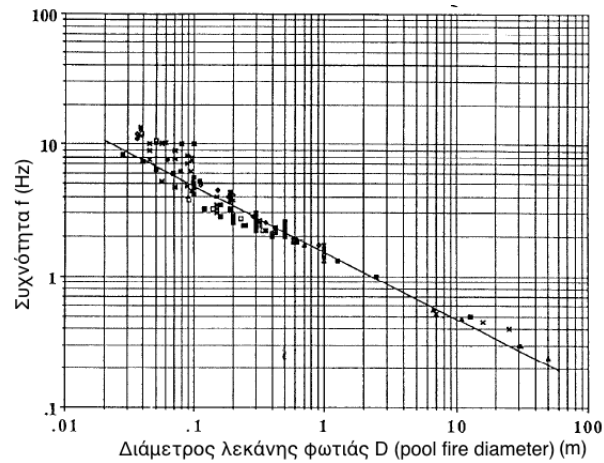
Όπως είναι φυσικό, αφού τα καυσαέρια συσσωρεύονται στα ανώτερα στρώματα του δωματίου, σε αυτά τα σημεία υπάρχει κυρίως διαταραχή του πεδίου ταχυτήτων. Οι μεγαλύτερες ταχύτητες παρουσιάζονται στο χωρίο εξωτερικά του δωματίου πάνω από την πόρτα. Καθώς τα καυσαέρια εξέρχονται, η ταχύτητα τους είναι της τάξης των 7-8 m/s, με κατεύθυνση από την πόρτα προς τα ανώτερα στρώματα του υπολογιστικού χωρίου. Στο επίπεδο πάνω από την φωτιά δημιουργούνται δίνες που οφείλονται στην διαφορά θερμοκρασίας των θερμών καυσαερίων που εξέρχονται και με τον ατμοσφαιρικό αέρα που εισέρχεται ταυτόχρονα από το κάτω μέρος της πόρτας. Μετά τα πρώτα 30 s η είσοδος φρέσκου αέρα από την πόρτα είναι τόσο έντονη ώστε δημιουργεί ένα ρεύμα που ωθεί την φλόγα προς την πλευρά του Τοίχου 3 και δημιουργείται έντονος στροβιλισμός στο μέσο του δωματίου. Παρατηρείται μάλιστα και μια περιοδική αστάθεια της φλόγας (ruffling) με συγκεκριμένο ρυθμό. Αυτή η αστάθεια εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την είσοδο του φρέσκου αέρα και μπορεί να επηρεάσει τόσο τον ρυθμό καύσης όσο και την ισχύ της φωτιάς [Ghoniem et al., 1996]. Σύμφωνα με πειραματικές μετρήσεις που έγιναν σε φωτιές διαφόρων μεγεθών και με χρήση διαφορετικών καυσίμων, φάνηκε ότι η συχνότητα της αστάθειας αυτής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος της λεκάνης του καυσίμου (pool) και είναι σχεδόν ανεξάρτητη από το είδος του καυσίμου [Beall, 1997]. Για την περιγραφή του παραπάνω φαινομένου προτάθηκε η Εξίσωση (5.2) (Σχήμα 5.10), όπου η συχνότητα f μετράται σε Hz και η διάμετρος της λεκάνης του καυσίμου D σε m. Άρα στην παρούσα περίπτωση, που ισχύει $D=1\text{m}$, η συχνότητα αυτή είναι 1.5 Hz.

$$f = \frac{1.5}{\sqrt{D}} \quad (5.2)$$

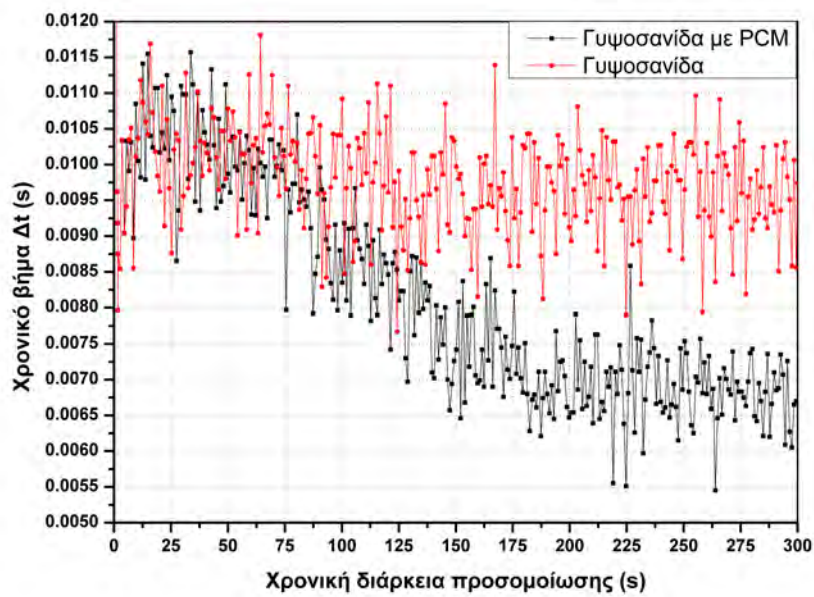
Το χρονικό βήμα στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν δεν παρέμεινε σταθερό, αλλά απεικονίζεται στο Σχήμα 5.11. Η τιμή του χρονικού βήματος παρέμεινε σταθερά κάτω από τα 0.012 s και για τις δύο περιπτώσεις, γεγονός που διασφαλίζει ότι το φαινόμενο ruffling μπορεί να παρατηρηθεί, καθώς η συχνότητα εμφάνισης του είναι 1.5 Hz.



Σχήμα 5.9: Απεικόνιση του ροϊκού πεδίου σε μήκος 1.3 m τα πρώτα 1 s, 2 s, 3 s, 4 s, 8 s, 30 s, 1 min και 5 min της προσομοίωσης.



Σχήμα 5.10: Γραφική απεικόνιση της Εξίσωσης (??).



Σχήμα 5.11: Μεταβολή του χρονικού βήματος της προσομοίωσης συναρτήσει του χρόνου.

5.4.3 Περιγραφή πεδίων θερμοκρασίας και συγκεντρώσεων

Αρχικά η θερμοκρασία του δωματίου παραμένει σταθερή στους 20°C. Μετά τα πρώτα δευτερόλεπτα εμφανίζεται σταδιακή αύξηση της μέσης θερμοκρασίας στο δωμάτιο, τόσο στην περίπτωση της γυψοσανίδας, Σχήμα 5.12, όσο και στην περίπτωση της γυψοσανίδας με PCM, Σχήμα 5.13. Στο δωμάτιο, από την στιγμή που αρχίζει η καύση μέχρι και το τέλος της προσομοίωσης, πάνω από την εστία της φλόγας επικρατούν θερμοκρασίες της τάξης των 800-1000°C (και για τις δύο περιπτώσεις) και δημιουργείται ένα πεδίο υψηλότερων θερμοκρασιών με κέντρο την εστία της φωτιάς και κατεύθυνση την οροφή του δωματίου. Το πλούμιο της φωτιάς δεν είναι συμμετρικό λόγω της εισόδου φρέσκου αέρα από την πόρτα και λόγω της έλλειψης οξυγόνου. Μετά τα πρώτα 30 s το πλούμιο της φωτιάς παραμένει στην πίσω πλευρά του δωματίου.

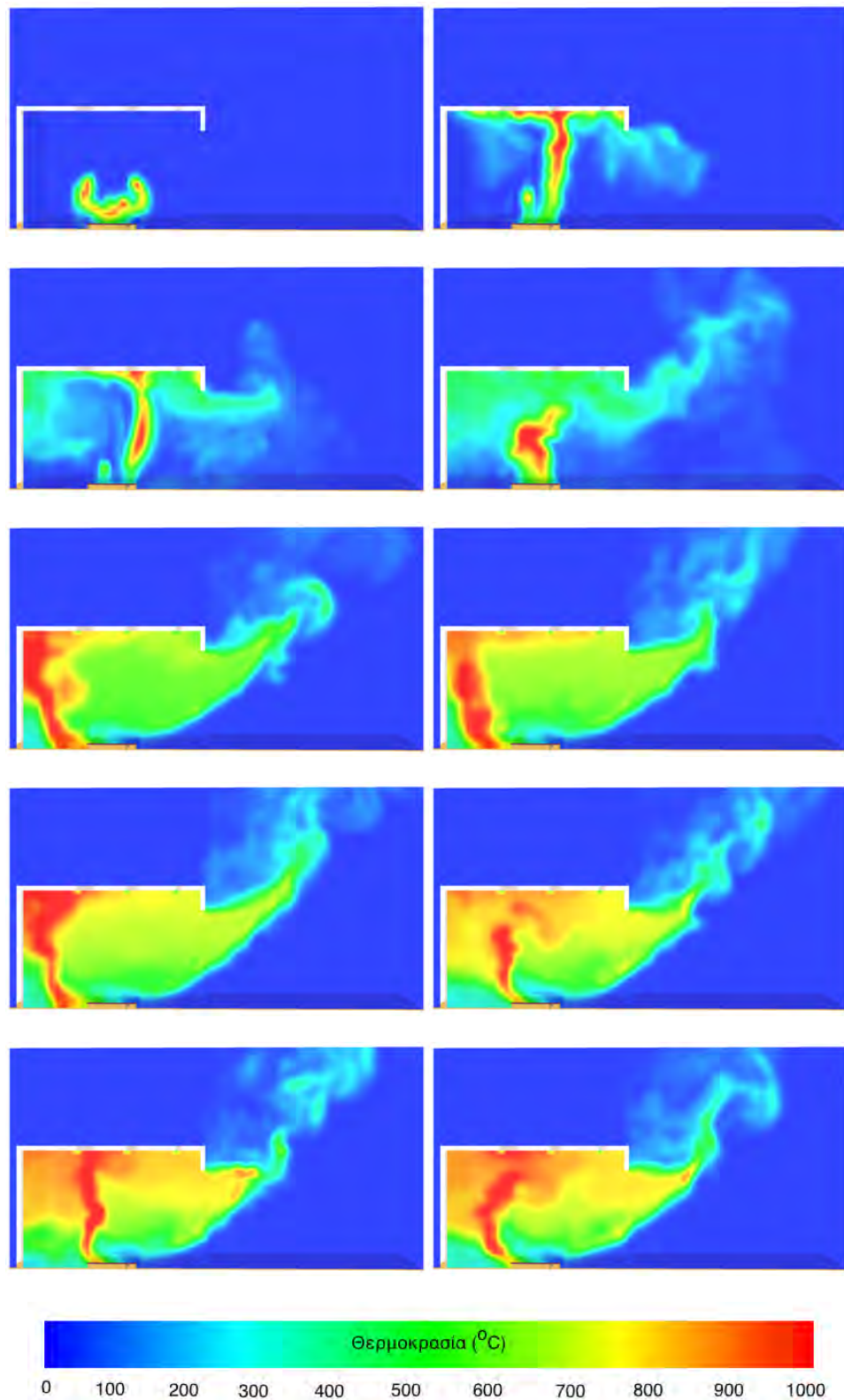
Η φωτιά καίει με σταθερό ρυθμό, όμως το θερμοκρασιακό πεδίο που δημιουργείται γύρω από την φλόγα δεν είναι σταθερό, λόγω του έντονου ροϊκού πεδίου που αναπτύσσεται εξαιτίας της συνεχούς εισόδου φρέσκου αέρα από την πόρτα. Το θερμοκρασιακό πεδίο στο εξωτερικό χωρίο αρχίζει να μεταβάλλεται αισθητά μετά το πέρας των τεσσάρων πρώτων λεπτών, δηλαδή πρώτα αυξάνεται η θερμοκρασία του δωματίου από τους 20°C στους 1000°C και μετά αρχίζει να μεταβάλλεται με πιο αργούς ρυθμούς η θερμοκρασία της εξωτερικής ατμόσφαιρας.

Τα θερμά ρεύματα αέρα συσσωρεύονται προς τα ανώτερα στρώματα γι' αυτό και τα στρώματα αέρα που βρίσκονται κάτω από την εστία της φωτιάς, διατηρούν χαμηλότερη θερμοκρασία, γύρω στους 600-700 °C, κατά την διάρκεια των πρώτων 4 min.

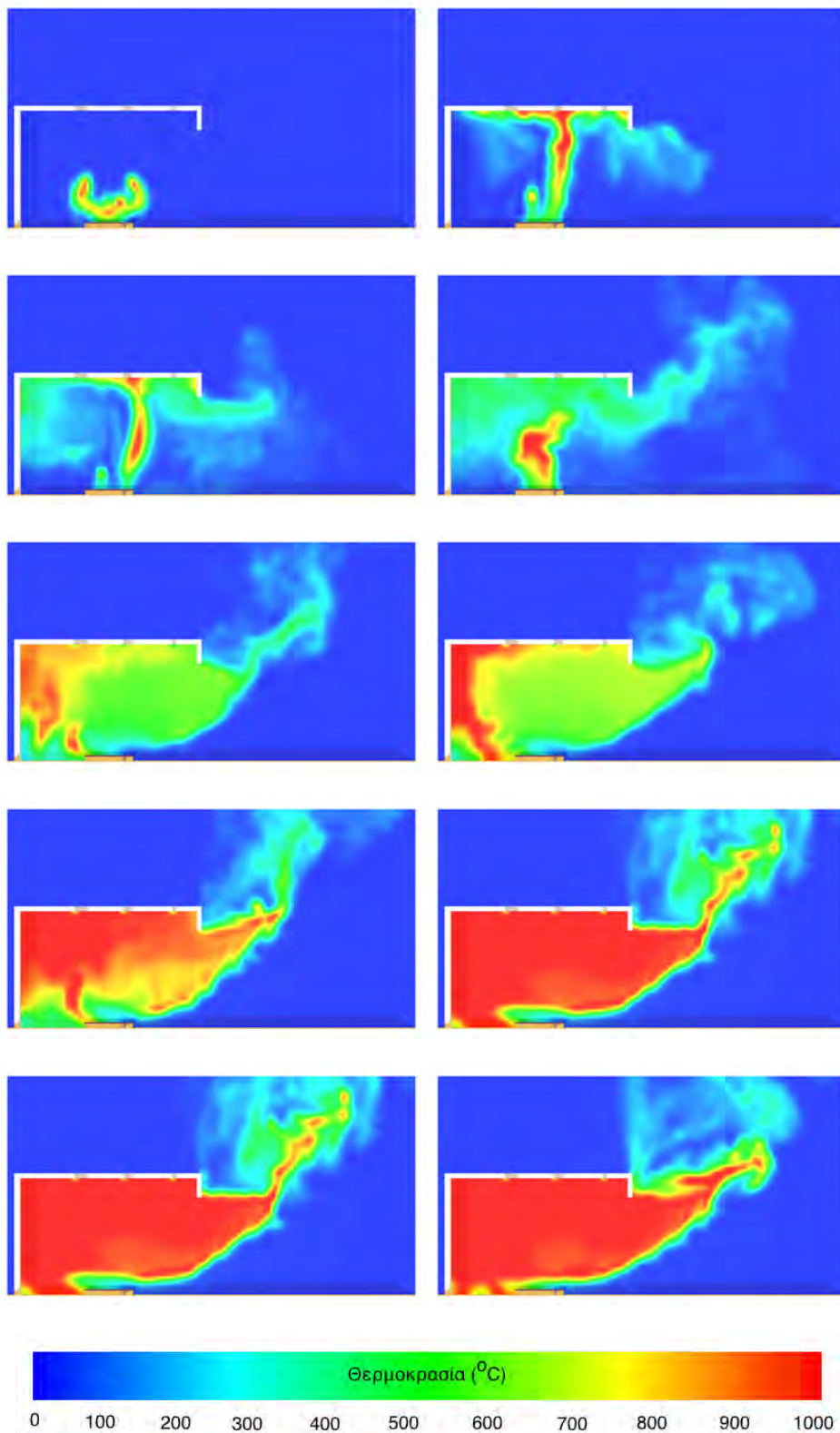
Οι δύο περιπτώσεις μελέτης παρουσιάζουν παρόμοιο θερμοκρασιακή κατανομή μέχρι και το πρώτο λεπτό που η μέση θερμοκρασία στα ανώτερα στρώματα του δωματίου που είναι κατασκευασμένο από γυψοσανίδες με PCM, αυξάνεται στους 900-1000°C. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι αρχίζει να εκλύεται η παραφίνη από τα τοιχώματα στον χώρο και να λειτουργεί σαν επιπλέον πηγή καυσίμου. Τα επιπλέον αυτά αέρια καύσιμα καίγονται και αυξάνουν κατά πολύ την θερμοκρασία στο εσωτερικό του δωματίου. Μάλιστα το θερμό ρεύμα των καυσαερίων αυξάνεται και αυτό με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγαλύτερη παροχή θερμού ρεύματος προς το εξωτερικό του δωματίου. Κατά την έξοδο των θερμών αερίων δημιουργούνται ιδιαίτερος έντονα τυρβώδη φαινόμενα τα οποία οφείλονται στο ότι το ρεύμα των θερμών αερίων βρίσκει εμπόδιο το πρέκι της πόρτας, το οποίο και προκαλεί αυτήν την διαταραχή στη ροή.

Εφόσον τα φαινόμενα είναι πιο έντονα στην περίπτωση της γυψοσανίδας

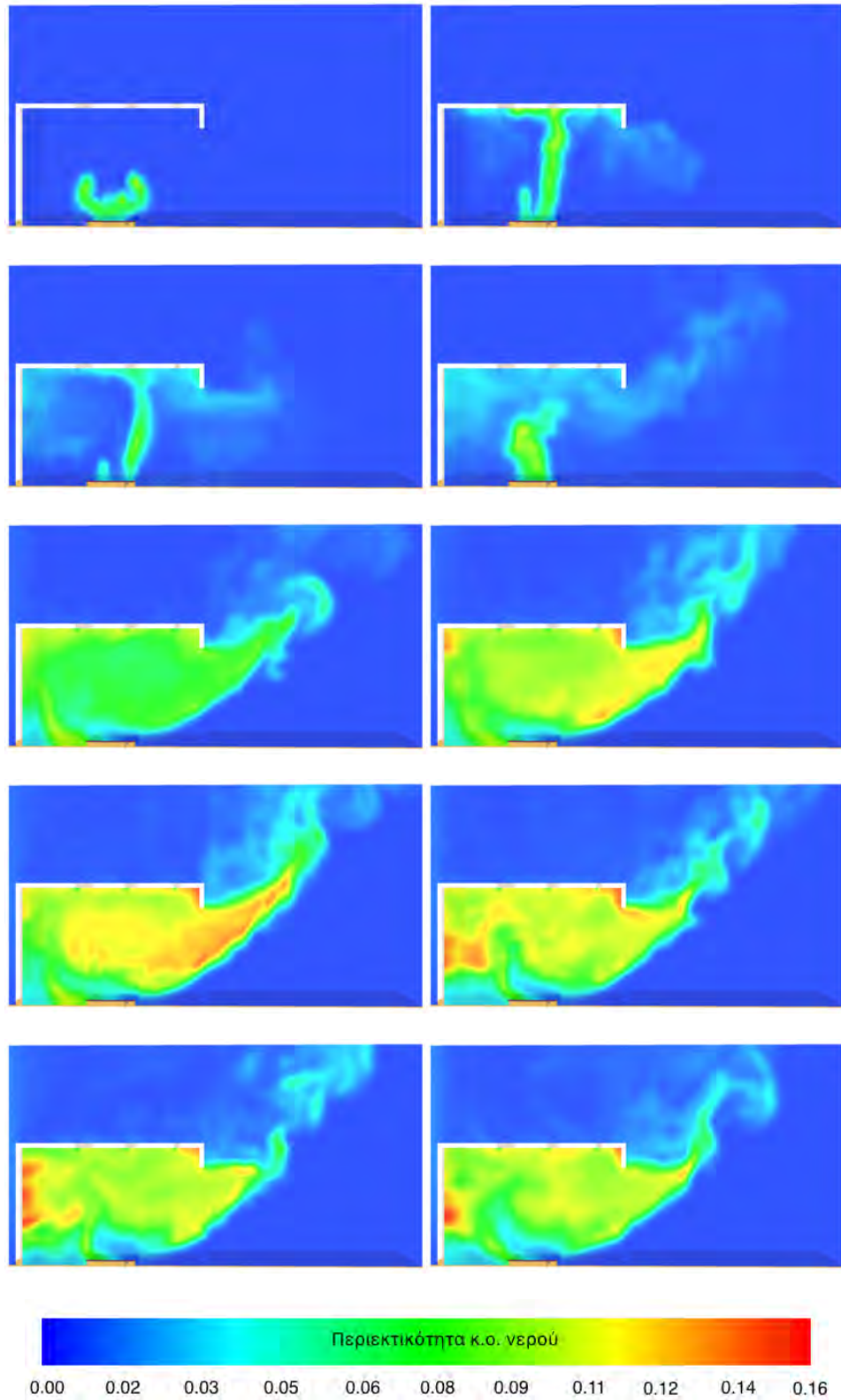
με PCM, το ίδιο ισχύει και για την εξάτμιση νερού, Σχήματα 5.14 και 5.15. Αν και στην περίπτωση της γυψοσανίδας με PCM φαίνεται ότι η περιεκτικότητα υδρατμού στο περιβάλλον του δωματίου είναι πολύ μεγαλύτερη, αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι εξατμίζεται η παραφίνη και το αέριο καύσιμο αναφλέγεται λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που κυριαρχούν στον χώρο. Άρα δημιουργείται επιπλέον ποσότητα υδρατμού, σε σχέση με την περίπτωση της απλής γυψοσανίδας, λόγω της καύσης της παραφίνης. Στην περίπτωση της κατασκευής με απλή γυψοσανίδα, μετά το πρώτο λεπτό της προσομοίωσης παρατηρείται η ατμοποίηση του νερού της γυψοσανίδας από το πάνω μέρος των τοίχων 4 και 5. Τα θερμά ρεύματα των καυσαερίων κινούνται στα ανώτερα στρώματα του δωματίου γι' αυτό και η ατμοποίηση αρχίζει πρώτα από το πάνω μέρος των τοίχων. Δεν ισχύει το ίδιο όμως για τον Τοίχο 3. Η φωτιά είναι πολύ κοντά του, με αποτέλεσμα να αρχίσει η ατμοποίηση του νερού σε εκείνο το τμήμα του τοίχου που είναι πιο κοντά στην φωτιά, μετά τα πρώτα 3 min.



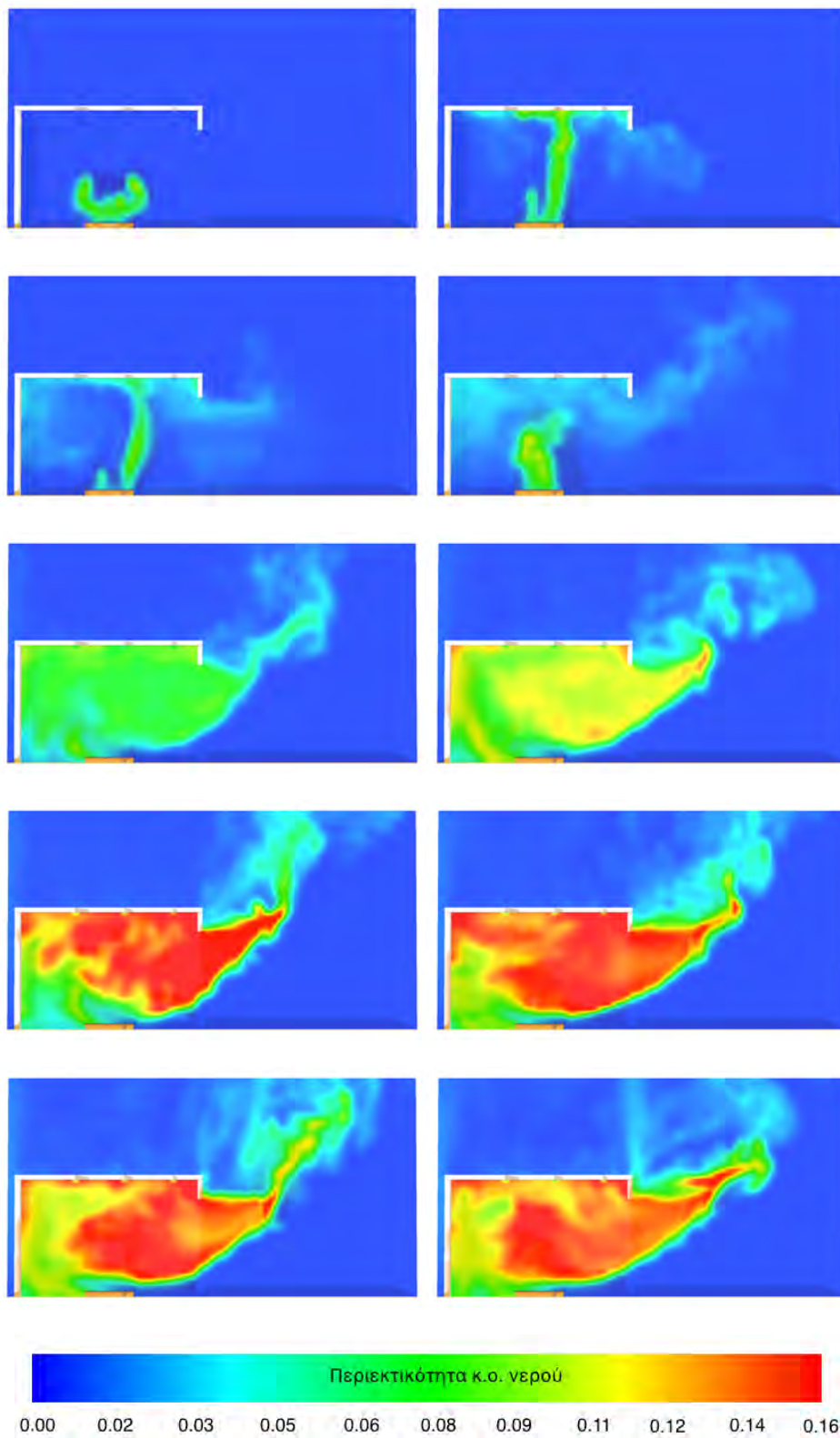
Σχήμα 5.12: Απεικόνιση του θερμοκρασιακού πεδίου σε μήκος 1.3 m τα πρώτα 1 s, 2 s, 3 s, 4 s, 8 s, 30 s, 1 min, 2 min, 3 min, 4 min και 5 min της προσομοίωσης, για την περίπτωση της απλής γυψοσανίδας.



Σχήμα 5.13: Απεικόνιση του θερμοκρασιακού πεδίου σε μήκος 1.3 m τα πρώτα 1 s, 2 s, 3 s, 4 s, 8 s, 30 s, 1 min, 2 min, 3 min, 4 min και 5 min της προσομίωσης, για την περίπτωση της γυψοσανίδας με PCM.



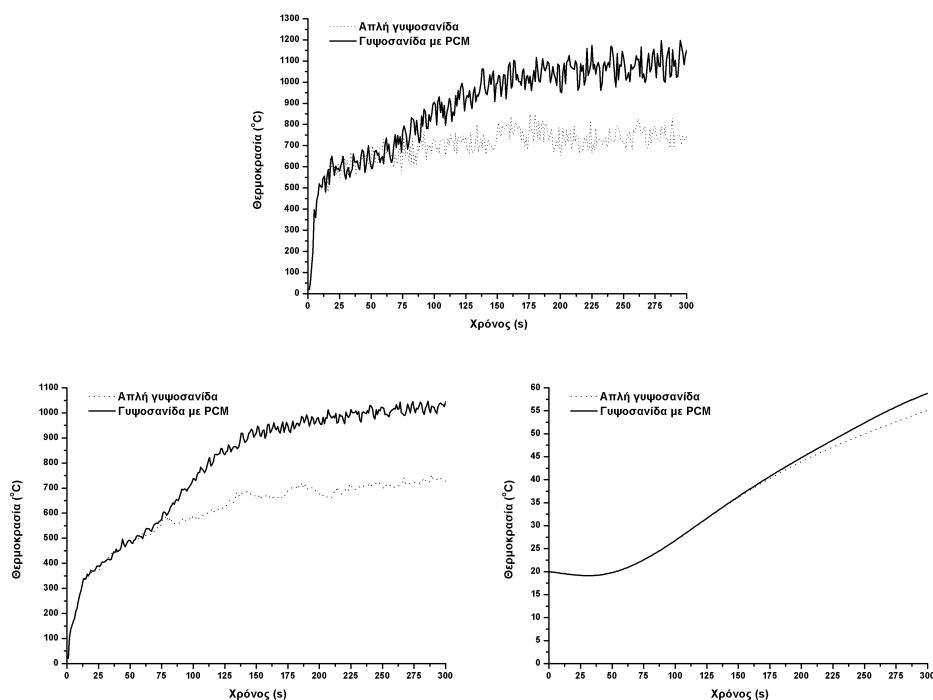
Σχήμα 5.14: Απεικόνιση της συγκέντρωσης κ.ο. υδρατμού σε μήκος 1.3 m τα πρώτα 1 s, 2 s, 3 s, 4 s, 8 s, 30 s, 1 min, 2 min, 3 min, 4 min και 5 min της προσομοίωσης, για την περίπτωση της απλής γυψοσανίδας.



Σχήμα 5.15: Απεικόνιση της συγκέντρωσης κ.ο. υδρατμού σε μήκος 1.3 m τα πρώτα 1 s, 2 s, 3 s, 4 s, 8 s, 30 s, 1 min, 2 min, 3 min, 4 min και 5 min της προσομοίωσης, για την περίπτωση της γυψοσανίδας με PCM.

5.4.4 Προλέξεις θερμοκρασίας στους τοίχους

Για την μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς των τοίχων του δωματίου στην φωτιά χρησιμοποιήθηκαν πέντε σημεία καταγραφής των προλέξεων της θερμοκρασίας των τοίχων, Σχήμα 5.7. Συγκεκριμένα, στο γεωμετρικό κέντρο του κάθε τοίχου καταγράφηκαν οι προλέξεις της θερμοκρασίας του αέρα ένα κελί πριν από τον εκτεθειμένη στην φωτιά πλευρά του τοίχου, της θερμοκρασίας του τοίχου στην εκτεθειμένη και στην μη εκτεθειμένη πλευρά του. Για τον Τοίχο 1 φαίνεται καθαρά από το γράφημα της θερμοκρασίας του αέρα, Σχήμα 5.16, ότι στην περίπτωση της γυψοσανίδας με PCM οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι πολύ μεγαλύτερες. Η διαφοροποίηση της θερμοκρασιακής κατανομής ξεκινάει μετά τα πρώτα 75 s όπου ενώ η θερμοκρασία στην περίπτωση της απλής γυψοσανίδας φτάνει μέχρι και τους 800°C, στην περίπτωση της γυψοσανίδας με PCM η μέγιστη θερμοκρασία φτάνει μέχρι και τους 1100°C.

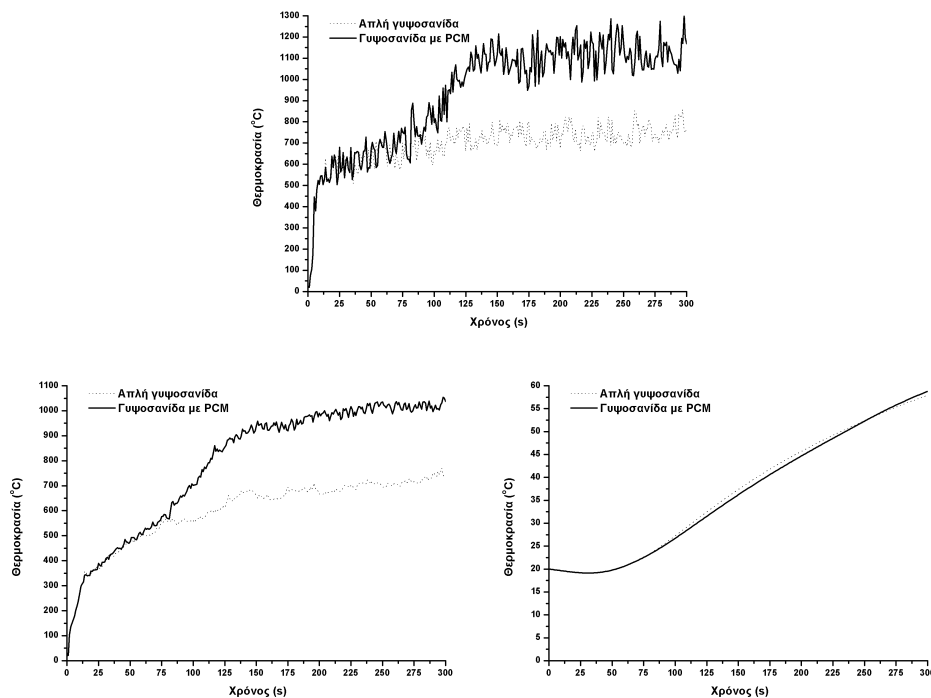


Σχήμα 5.16: Προλέξεις θερμοκρασίας αέρα (πάνω εικόνα), θερμοκρασίας τοίχου (ΤΟΙΧΟΣ 1) στην εκτεθειμένη στην φωτιά πλευρά (αριστερή εικόνα) και θερμοκρασίας της πίσω πλευράς του τοίχου (δεξιά εικόνα) για απλή γυψοσανίδα και γυψοσανίδα PCM σε ύψος 1.2 m.

Αντίστοιχες παρατηρήσεις ισχύουν και για τη θερμοκρασιακή κατανομή της εκτεθειμένης στην φωτιά πλευράς του τοίχου. Η θερμοκρασία της εκτεθειμένης πλευράς αυξάνεται με τον ίδιο τρόπο μέχρι τα 75 s, όμως στην κατασκευή με χρήση γυψοσανίδας με PCM μετά από αυτό το χρονικό διάστημα η θερμοκρασία αυξάνεται περαιτέρω μέχρι και τους 1000°C (αντίστοιχα με την θερμοκρασία αέρα) ενώ στην κατασκευή με χρήση απλής γυψοσανίδας η θερμοκρασία είναι κατά 300°C μικρότερη. Στην μη εκτεθειμένη πλευρά των γυψοσανίδων φαίνεται αρχικά, μέχρι τα πρώτα 60s, να υπάρχει μια πτώση της θερμοκρασίας τους λόγω της ατμοποίησης του νερού από την επιφάνεια τους. Στην συνέχεια όμως μετά τα 200 s η θερμοκρασία της γυψοσανίδας με PCM είναι αυξημένη κατά 10°C σε σχέση με την απλή γυψοσανίδα. Οι γυψοσανίδες οι οποίες εκτίθενται σε φωτιά θεωρείται ότι ξεπερνούν την μηχανική τους αντοχή όταν εμφανίζουν ρωγμές ή δημιουργούνται ανοίγματα κατά μήκος τους [Manzello et al., 2007]. Όμως επειδή αυτά τα φαινόμενα δεν μπορούν να οπτικοποιηθούν στον FDS, χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά κριτήρια αστοχίας για τις γυψοσανίδες. Σύμφωνα με το αυστραλιανό πρότυπο AS1530.4, μια γυψοσανίδα αστοχεί όταν η μέγιστη αύξηση θερμοκρασίας (σε σχέση με την ατμοσφαιρική) στην μη εκτεθειμένη πλευρά ξεπερνά τους 180°C [Clancy, 2002]. Η μέγιστη θερμοκρασία που παρατηρείται είναι 58°C για την περίπτωση της γυψοσανίδας με PCM και 50°C στην περίπτωση της απλής γυψοσανίδας, οπότε ο τοίχος δεν αστοχεί σε καμία από τις δύο περιπτώσεις.

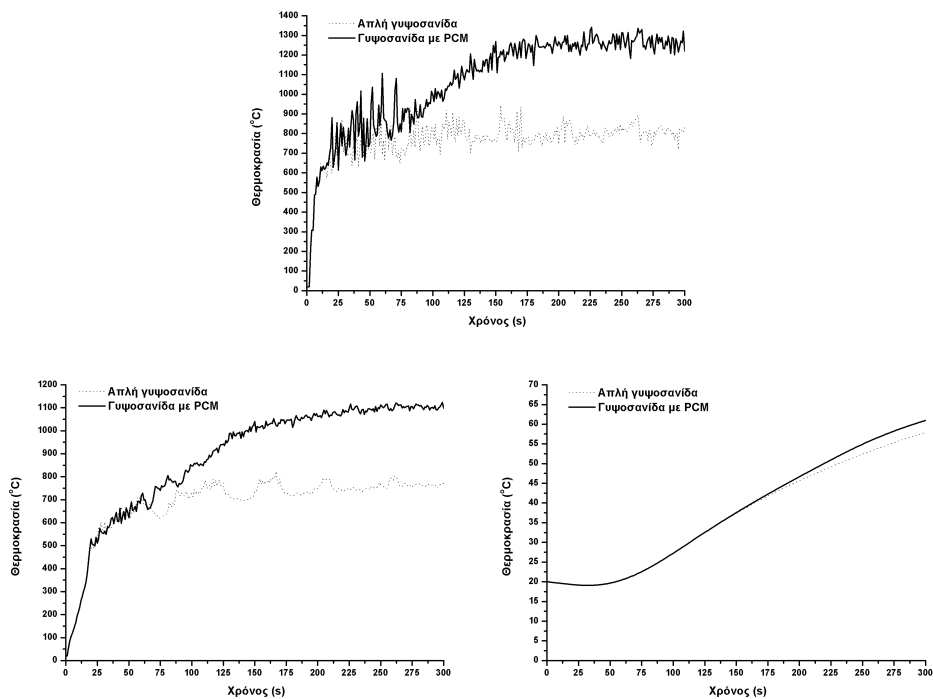
Αντίστοιχη συμπεριφορά παρατηρείται και για τον Τοίχο 2 καθώς είναι πλήρως συμμετρικός σε σχέση με την φωτιά, Σχήμα 5.17. Στην μη εκτεθειμένη πλευρά των γυψοσανίδων φαίνεται αρχικά, μέχρι τα πρώτα 60s, να υπάρχει μια πτώση της θερμοκρασίας τους λόγω της ατμοποίησης του νερού από την επιφάνεια τους. Στην συνέχεια όμως μετά τα 100s η θερμοκρασία της απλής γυψοσανίδας είναι μειωμένη κατά 2°C σε σχέση με την γυψοσανίδα με PCM, μέχρι και τα 250s. Η μέγιστη θερμοκρασία που παρατηρείται είναι 55°C για την περίπτωση της γυψοσανίδας με PCM και 54°C στην περίπτωση της απλής γυψοσανίδας, οπότε ο τοίχος δεν αστοχεί σε καμία από τις δύο περιπτώσεις.

Για τον Τοίχο 3 φαίνεται από το γράφημα της θερμοκρασίας του αέρα, Σχήμα 5.18, ότι στην περίπτωση της γυψοσανίδας με PCM οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι πάλι πολύ μεγαλύτερες και συνολικά σε σχέση με τον Τοίχο 1 οι θερμοκρασίες είναι μεγαλύτερες κατά 200°C. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι η φωτιά είναι πιο κοντά σε αυτόν τον τοίχο παρά στους υπόλοιπους τρεις τοίχους, μάλιστα αυτό απεικονίζεται και στα πρώτα 60 s όπου φαίνεται η διαταραχή της φωτιάς. Η διαφοροποίηση του θερμοκρασιακού προφίλ ξεκινάει μετά τα πρώτα 60 s όπου ενώ η θερμοκρασία στην περίπτωση της απλής γυψοσανίδας φτάνει μέχρι και τους 850°C, στην περίπτωση της γυψοσανίδας με PCM η

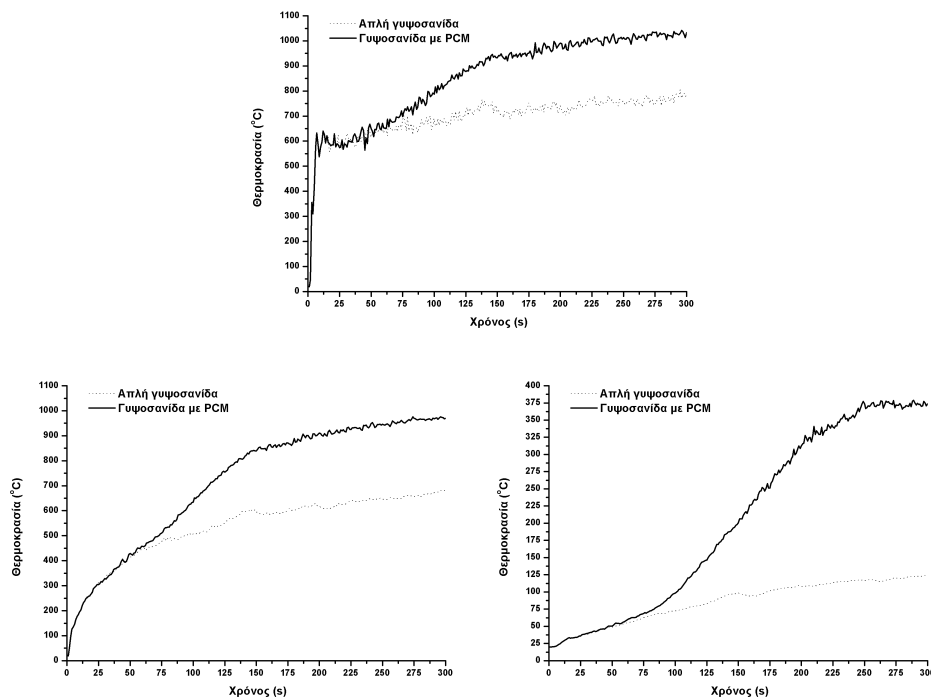


Σχήμα 5.17: Προλέξεις θερμοκρασίας αέρα (πάνω εικόνα), θερμοκρασίας τοίχου (ΤΟΙΧΟΣ 2) στην εκτεθειμένη στην φωτιά πλευρά (αριστερή εικόνα) και θερμοκρασίας της πίσω πλευράς του τοίχου (δεξιά εικόνα) για απλή γυψοσανίδα και γυψοσανίδα με PCM σε ύψος 1.2 m.

μέγιστη θερμοκρασία φτάνει μέχρι και τους 1250°C . Τα αντίστοιχα ισχύουν και για το θερμοκρασιακό προφίλ της εκτεθειμένης στην φωτιά πλευράς του τοίχου. Η θερμοκρασία της εκτεθειμένης πλευράς αυξάνεται με τον ίδιο τρόπο μέχρι τα 60s, όμως στην κατασκευή με χρήση γυψοσανίδας με PCM μετά από αυτό το χρονικό διάστημα η θερμοκρασία αυξάνεται περαιτέρω μέχρι και τους 1100°C (αντίστοιχα με την θερμοκρασία αέρα) ενώ στην κατασκευή με χρήση απλής γυψοσανίδας η θερμοκρασία είναι κατά 400°C μικρότερη. Στην μη εκτεθειμένη πλευρά των γυψοσανίδων φαίνεται αρχικά, μέχρι τα πρώτα 60 s, να υπάρχει μια πτώση της θερμοκρασίας τους λόγω της ατμοποίησης του νερού από την επιφάνεια τους. Στην συνέχεια όμως μετά τα 200 s η θερμοκρασία της γυψοσανίδας με PCM είναι αυξημένη κατά 5°C σε σχέση με την απλή γυψοσανίδα. Η μέγιστη θερμοκρασία που παρατηρείται είναι 60°C για την περίπτωση της γυψοσανίδας με PCM και 55°C στην περίπτωση της απλής γυψοσανίδας, οπότε ο τοίχος δεν αποχθεί σε καμία από τις δύο περιπτώσεις.



Σχήμα 5.18: Προλέξεις θερμοκρασίας αέρα (πάνω εικόνα), θερμοκρασίας τοίχου (ΤΟΙΧΟΣ 3) στην εκτεθειμένη στην φωτιά πλευρά (αριστερή εικόνα) και θερμοκρασίας της πίσω πλευράς του τοίχου (δεξιά εικόνα) για απλή γυψοσανίδα και γυψοσανίδα με PCM σε ύψος 1.2 m.

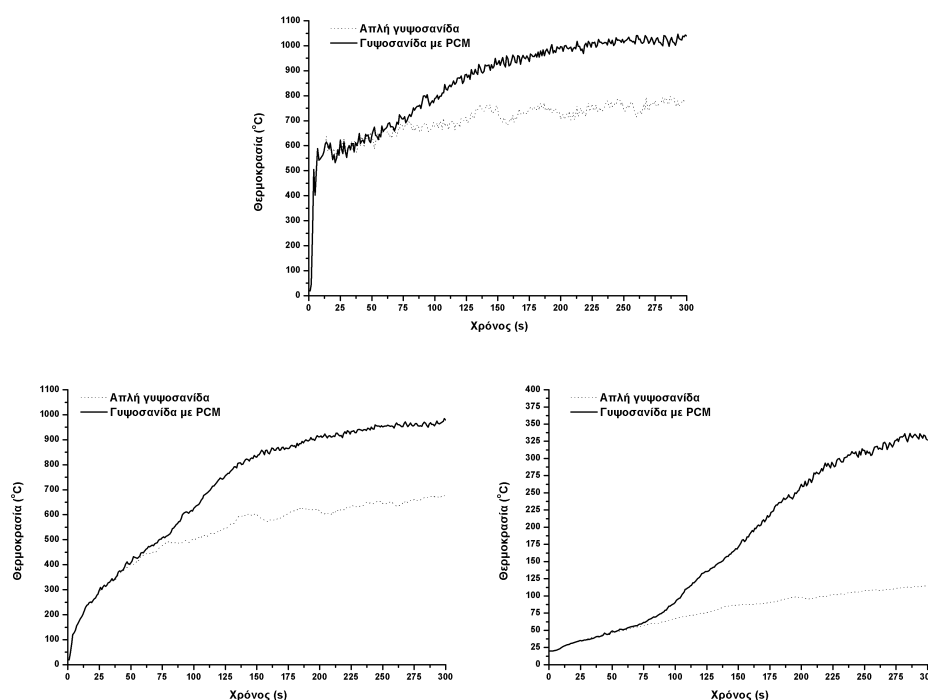


Σχήμα 5.19: Προλέξεις θερμοκρασίας αέρα (πάνω εικόνα), θερμοκρασίας τοίχου (ΤΟΙΧΟΣ 4) στην εκτεθειμένη στην φωτιά πλευρά (αριστερή εικόνα) και θερμοκρασίας της πίσω πλευράς του τοίχου (δεξιά εικόνα) για απλή γυψοσανίδα και γυψοσανίδα με PCM σε ύψος 1.2 m.

Για τον Τοίχο 4 και 5 φαίνεται καθαρά από το γράφημα της θερμοκρασίας του αέρα, Σχήματα 5.19 και 5.20, ότι στην περίπτωση της γυψοσανίδας με PCM οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι μεγαλύτερες σε σχέση με την απλή γυψοσανίδα. Η διαφοροποίηση της θερμοκρασιακής κατανομής ξεκινάει μετά τα πρώτα 65 s όπου ενώ η θερμοκρασία στην περίπτωση της απλής γυψοσανίδας φτάνει μέχρι και τους 700°C, στην περίπτωση της γυψοσανίδας με PCM η μέγιστη θερμοκρασία φτάνει μέχρι και τους 1000°C. Αντίστοιχες παρατηρήσεις ισχύουν και για τη θερμοκρασιακή κατανομή της εκτεθειμένης στην φωτιά πλευράς του τοίχου. Η θερμοκρασία της εκτεθειμένης πλευράς αυξάνεται με πιο αργό ρυθμό μέχρι τα 160 s, όμως στην κατασκευή με χρήση γυψοσανίδας με PCM μετά από αυτό το χρονικό διάστημα η θερμοκρασία αυξάνεται περαιτέρω μέχρι και τους 1000°C (αντίστοιχα με την θερμοκρασία αέρα) ενώ στην κατασκευή με χρήση απλής γυψοσανίδας η θερμοκρασία είναι κατά 300°C μικρότερη.

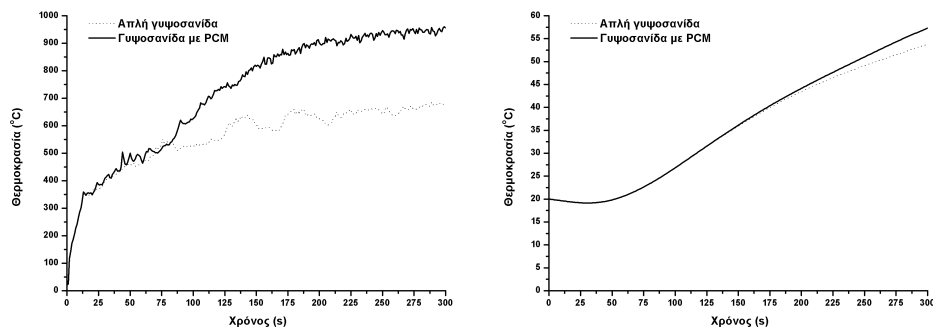
Στην μη εκτεθειμένη πλευρά των γυψοσανίδων φαίνεται αρχικά, μέχρι τα πρώτα 75 s, μια παρόμοια συμπεριφορά στα συστήματα των δύο γυψοσανίδων. Η θερμοκρασία της γυψοσανίδας με PCM είναι πολύ πιο αυξημένη σε σχέση με

τους προηγούμενους τοίχους, η μέγιστη θερμοκρασία φτάνει τους 350°C , και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μετά τα 75 s τα θερμά ρεύματα του καυσαερίου έχουν εξέλθει από το δωμάτιο. Έτσι ο τοίχος αυτός θερμαίνεται και από τις δύο πλευρές σε σχέση με τους υπόλοιπους τοίχους που θερμαίνονται μόνο από την μία πλευρά, και μετά τα πρώτα 130°C αστοχεί. Στην περίπτωση της απλής γυψοσανίδας η θερμοκρασία της μη εκτεθειμένης πλευράς είναι πολύ πιο χαμηλή (η μέγιστη θερμοκρασία που παρατηρείται είναι 100°C).



Σχήμα 5.20: Προλέξεις θερμοκρασίας αέρα (πάνω εικόνα), θερμοκρασίας τοίχου (ΤΟΙΧΟΣ 5) στην εκτεθειμένη στην φωτιά πλευρά (αριστερή εικόνα) και θερμοκρασίας της πίσω πλευράς του τοίχου (δεξιά εικόνα) για απλή γυψοσανίδα και γυψοσανίδα με PCM σε ύψος 1.2 m.

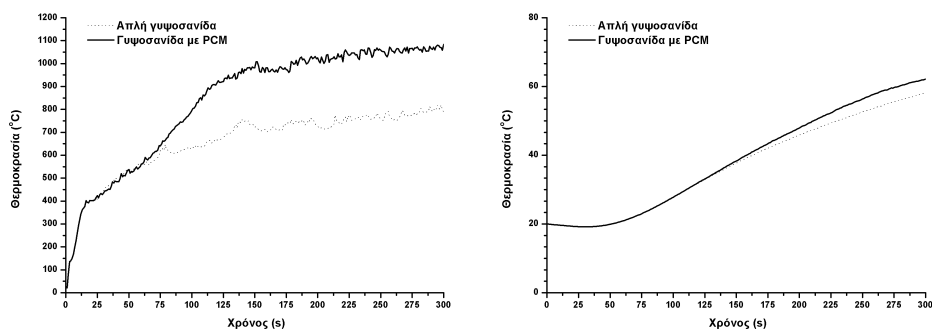
Ακολουθούν οι προλέξεις της θερμοκρασίας του Τοίχου 1 σε ύψος 0.6 m και σε 1.8 m, Σχήματα 5.21 και 5.22. Στο ύψος των 0.6 m οι θερμοκρασίες της εκτεθειμένης στην φωτιά πλευρά, στην περίπτωση της γυψοσανίδας με PCM, είναι μειωμένες (με μέγιστη θερμοκρασία που παρατηρείται να κυμαίνεται στους 900°C). Για την περίπτωση της απλής γυψοσανίδας, η μέγιστη θερμοκρασία που παρατηρείται είναι 650°C . Στην μη εκτεθειμένη πλευρά των γυψοσανίδων φαίνεται αρχικά, μέχρι τα πρώτα 75 s, να υπάρχει μια πτώση της θερμοκρασίας τους λόγω της ατμοποίησης του νερού από την επιφάνεια τους. Στην συνέχεια όμως μετά τα 200 s η θερμοκρασία της γυψοσανίδας με PCM είναι αυξημένη κατά 5°C σε



Σχήμα 5.21: Προλέξεις θερμοκρασίας τοίχου (ΤΟΙΧΟΣ 1) στην εκτεθειμένη στην φωτιά πλευρά (αριστερή εικόνα) και θερμοκρασίας της πίσω πλευράς του τοίχου (δεξιά εικόνα) για απλή γυψοσανίδα και γυψοσανίδα με PCM σε ύψος 0.6 m.

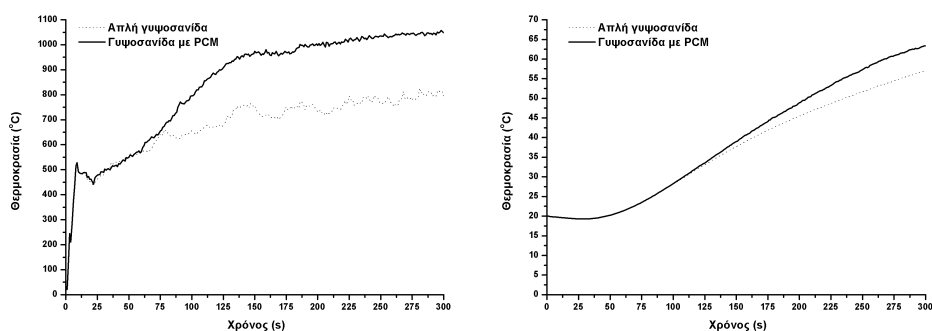
σχέση με την απλή γυψοσανίδα. Η μέγιστη θερμοκρασία που παρατηρείται είναι 55°C για την περίπτωση της γυψοσανίδας με PCM και 50°C στην περίπτωση της απλής γυψοσανίδας, οπότε ο τοίχος δεν αστοχεί σε καμία από τις δύο περιπτώσεις. Στο ύψος των 1.8 m οι θερμοκρασίες της εκτεθειμένης στην φωτιά πλευρά, στην περίπτωση της γυψοσανίδας με PCM, είναι αυξημένες (με μέγιστη θερμοκρασία που παρατηρείται να κυμαίνεται στους 1100°C). Για την περίπτωση της απλής γυψοσανίδας, η μέγιστη θερμοκρασία που παρατηρείται είναι 800°C . Στην μη εκτεθειμένη πλευρά των γυψοσανίδων φαίνεται αρχικά, μέχρι τα πρώτα 75 s, να υπάρχει μια πτώση της θερμοκρασίας τους λόγω της ατμοποίησης του νερού από την επιφάνεια τους. Στην συνέχεια όμως μετά τα 175 s η θερμοκρασία της γυψοσανίδας με PCM είναι αυξημένη κατά 10°C σε σχέση με την απλή γυψοσανίδα. Η μέγιστη θερμοκρασία που παρατηρείται είναι 65°C για την περίπτωση της γυψοσανίδας με PCM και 55°C στην περίπτωση της απλής γυψοσανίδας, οπότε ο τοίχος δεν αστοχεί σε καμία από τις δύο περιπτώσεις. Οι θερμοκρασίες αυτές είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες στο ύψος των 0.6 m.

Για την οροφή φαίνεται από το γράφημα της θερμοκρασίας του αέρα, Σχήμα 5.23, ότι η θερμοκρασία της εκτεθειμένης πλευράς αυξάνεται με τον ίδιο τρόπο μέχρι τα 90 s. Όμως στην κατασκευή με χρήση γυψοσανίδας με PCM μετά από αυτό το χρονικό διάστημα η θερμοκρασία αυξάνεται περαιτέρω μέχρι και τους 1000°C (αντίστοιχα με την θερμοκρασία αέρα) ενώ στην κατασκευή με χρήση απλής γυψοσανίδας η θερμοκρασία είναι κατά 200°C μικρότερη. Στην μη εκτεθειμένη πλευρά των γυψοσανίδων φαίνεται αρχικά, μέχρι τα πρώτα 60 s, να υπάρχει μια πτώση της θερμοκρασίας τους λόγω της ατμοποίησης του νερού από την επιφάνεια τους. Στην συνέχεια όμως μετά τα 150 s η θερμοκρασία της γυψοσανίδας με PCM είναι αυξημένη κατά 10°C σε σχέση με την απλή γυψοσα-



Σχήμα 5.22: Προλέξεις θερμοκρασίας τοίχου (ΤΟΙΧΟΣ 1) στην εκτεθειμένη στην φωτιά πλευρά (αριστερή εικόνα) και θερμοκρασίας της πίσω πλευράς του τοίχου (δεξιά εικόνα) για απλή γυψοσανίδα και γυψοσανίδα με PCM σε ύψος 1.8m.

νίδα. Η μέγιστη θερμοκρασία που παρατηρείται είναι 60°C για την περίπτωση της γυψοσανίδας με PCM και 50°C στην περίπτωση της απλής γυψοσανίδας, οπότε ο τοίχος δεν αστοχεί σε καμία από τις δύο περιπτώσεις.

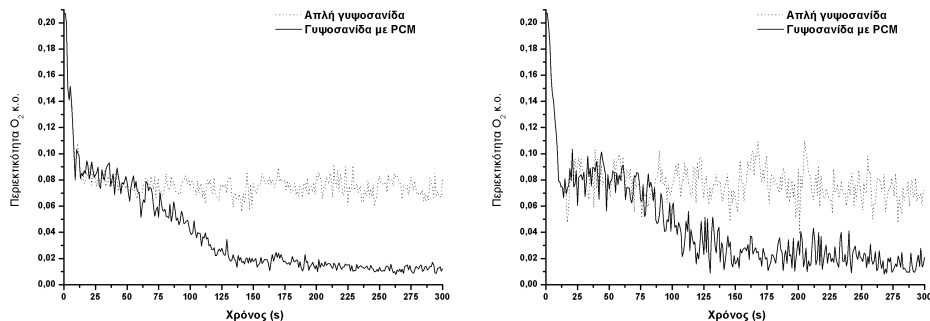


Σχήμα 5.23: Προλέξεις θερμοκρασίας τοίχου στο κέντρο της οροφής στην εκτεθειμένη στην φωτιά πλευρά (αριστερή εικόνα) και θερμοκρασίας της πίσω πλευράς του τοίχου (δεξιά εικόνα) για απλή γυψοσανίδα και γυψοσανίδα με PCM.

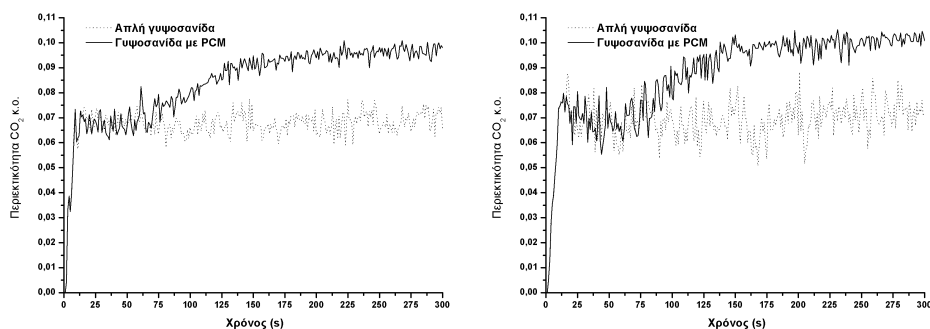
5.4.5 Προλέξεις O₂, CO₂ και CO

Στα Σχήματα 5.24, 5.25, 5.26 που ακολουθούν παρουσιάζονται ταυτόχρονα οι προλέξεις συγκέντρωσης κατ'όγκον για O₂, CO₂ και CO στις θέσεις μέτρησης E και Π για τα δύο διαφορετικά κατασκευαστικά σενάρια.

Στη θέση μέτρησης E, μέχρι τα πρώτα 70 s η συγκέντρωση O₂ μειώνεται στα-



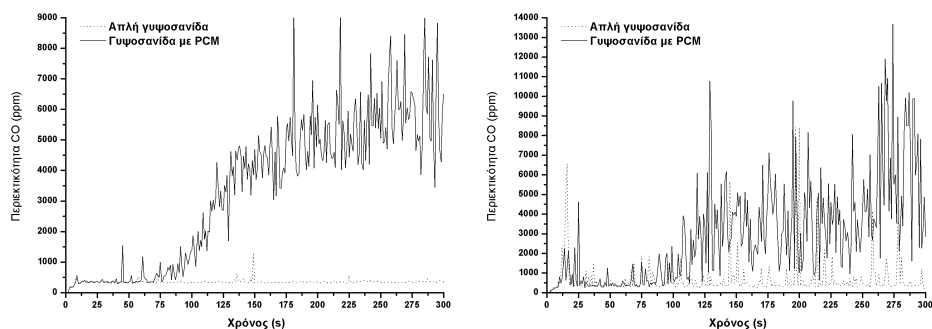
Σχήμα 5.24: Προλέξεις συγκέντρωσης O_2 στην θέση μέτρησης E (αριστερή εικόνα) και στην θέση Π (δεξιά εικόνα) για απλή γυψοσανίδα και γυψοσανίδα με PCM.



Σχήμα 5.25: Προλέξεις συγκέντρωσης CO_2 στην θέση μέτρησης E (αριστερή εικόνα) και στην θέση Π (δεξιά εικόνα) για απλή γυψοσανίδα και γυψοσανίδα με PCM.

διακά μέχρι το 8%, όμως στην συνέχεια στην περίπτωση της γυψοσανίδας με PCM η συγκέντρωση O_2 μειώνεται περαιτέρω μέχρι το 2%, γεγονός το οποίο οφείλεται στην περαιτέρω καύση των ατμών παραφίνης που εκλύονται. Στην περίπτωση της απλής γυψοσανίδας η περιεκτικότητα O_2 κυμαίνεται μεταξύ 7-9%. Στη θέση μέτρησης Π, μέχρι τα πρώτα 75s η συγκέντρωση O_2 μειώνεται σταδιακά μέχρι το 8%, όμως στην συνέχεια στην περίπτωση της γυψοσανίδας με PCM η συγκέντρωση O_2 μειώνεται μέχρι το 2%. Στην περίπτωση της απλής γυψοσανίδας η περιεκτικότητα O_2 κυμαίνεται μεταξύ 4 και 10%.

Στη θέση μέτρησης E, μέχρι τα πρώτα 70 s η συγκέντρωση CO_2 αυξάνεται σταδιακά μέχρι το 7%, όμως στην συνέχεια στην περίπτωση της γυψοσανίδας με PCM η συγκέντρωση CO_2 αυξάνεται περαιτέρω μέχρι το 10%. Στην περίπτωση



Σχήμα 5.26: Προλέξεις συγκέντρωσης CO στην θέση μέτρησης E (αριστερή εικόνα) και στην θέση Π (δεξιά εικόνα) για απλή γυψοσανίδα και γυψοσανίδα με PCM.

της απλής γυψοσανίδας η περιεκτικότητα CO₂ κυμαίνεται μεταξύ 5-7%. Στη θέση μέτρησης Π, μέχρι τα πρώτα 75s η συγκέντρωση CO₂ αυξάνεται σταδιακά μέχρι το 9%, όμως στην συνέχεια στην περίπτωση της γυψοσανίδας με PCM η συγκέντρωση O₂ αυξάνεται μέχρι το 10%. Στην περίπτωση της απλής γυψοσανίδας η περιεκτικότητα CO₂ κυμαίνεται μεταξύ 6-8%.

Στη θέση μέτρησης E, μέχρι τα πρώτα 70 s η συγκέντρωση CO στην περίπτωση της γυψοσανίδας με PCM αυξάνεται μέχρι τα 9000 ppm. Στην περίπτωση της απλής γυψοσανίδας η περιεκτικότητα CO κυμαίνεται μεταξύ 0-1000 ppm. Στη θέση μέτρησης Π, οι τιμές που παρατηρούνται είναι πολύ μεγαλύτερες. Στην περίπτωση της γυψοσανίδας με PCM η συγκέντρωση CO αυξάνεται μέχρι τα 13000 ppm. Στην περίπτωση της απλής γυψοσανίδας η περιεκτικότητα CO κυμαίνεται μεταξύ 0 και 6000 ppm.

5.5 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

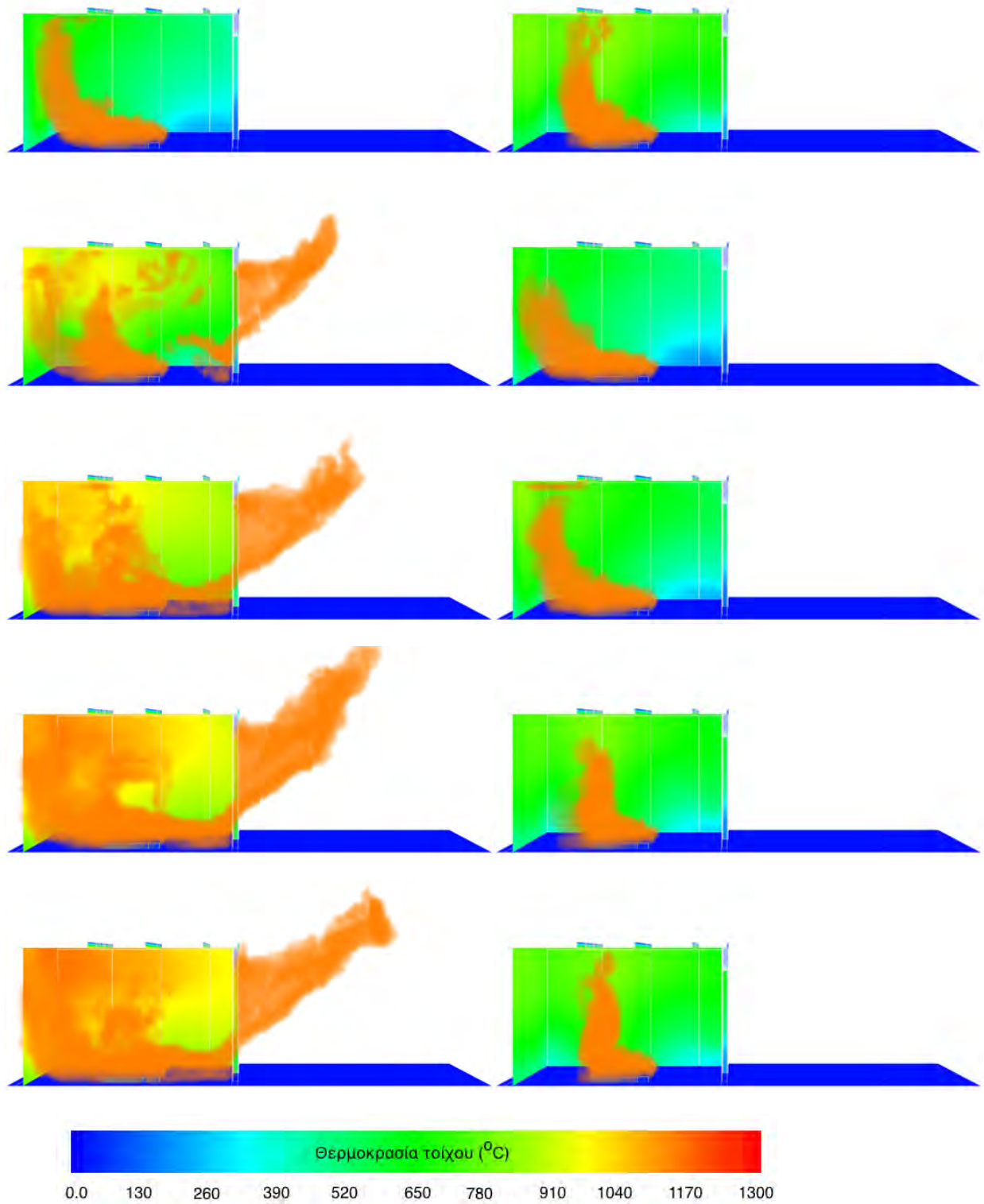
Η επίδραση της απελευθέρωσης του PCM μετά τα πρώτα 2 min της προσομοίωσης έχει μεγάλη επίδραση στην εξέλιξη της φωτιάς μέσα στο δωμάτιο, Σχήμα 5.27. Η παραφίνη που εκλύεται είναι ιδιαίτερα εύφλεκτη με αποτέλεσμα το αέριο καύσιμο που εκλύεται, κυρίως στα ανώτερα στρώματα του δωματίου, να καίγεται επιπλέον από το επτάνιο στην εστία στο κέντρο του δωματίου, Σχήμα 5.29 όπου με λευκό χρώμα απεικονίζεται η παραφίνη για κ.ο. συγκέντρωση 0.001 και αντίστοιχα με πράσινο χρώμα για 0.01. Η παραφίνη εκλύεται και από τις δύο πλευρές του τοίχου και αυτό συμβαίνει και στον τοίχο που βρίσκεται πάνω

από την πόρτα. Όμως στο σημείο αυτό η θερμοκρασία είναι ιδιαίτερα αυξημένη, λόγω της εξόδου των καυσαερίων από την πόρτα και υπάρχει περίσσεια οξυγόνου, με αποτέλεσμα να καίγεται απευθείας και να δημιουργείται ένα αισθητά μεγάλο μέτωπο φλόγας που εξέρχεται από το δωμάτιο. Το μέτωπο αυτό έχει μια ανοδική τάση καθώς παρασύρεται από τα θερμά ρεύματα που εξέρχονται από το δωμάτιο και παρασύρουν μαζί και την παραφίνη που εκλύεται. Οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στους τοίχους του δωματίου είναι πολύ πιο αυξημένες με αποτέλεσμα ο τοίχος πάνω από την πόρτα να φτάνει σε αστοχία.

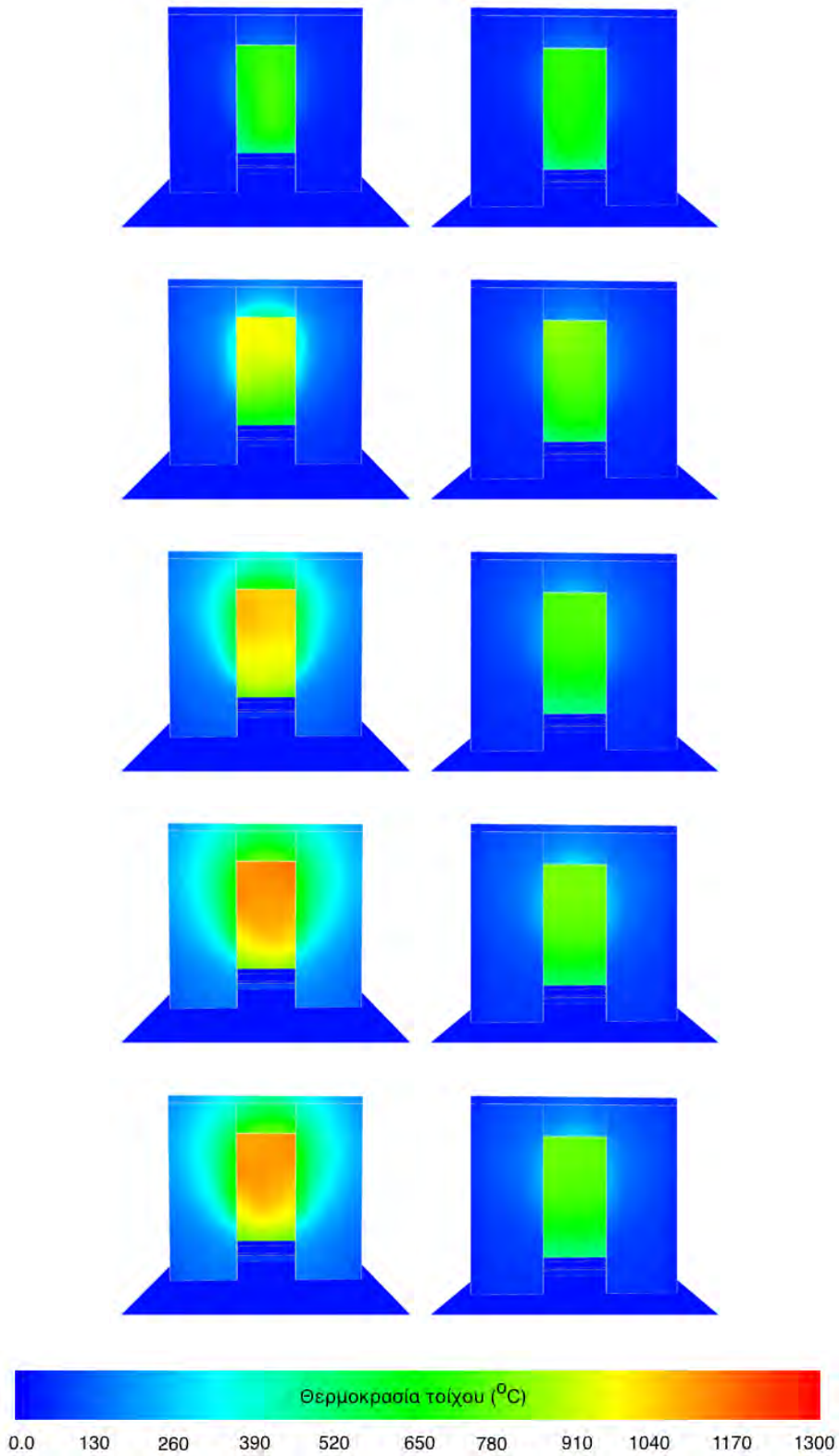
Η θερμοκρασία αστοχίας, όπως έχει ήδη αναφερθεί, επιτυγχάνεται για τον τοίχο γυψοσανίδας με PCM μετά τα πρώτα τρία λεπτά της προσομοίωσης ενώ οι μέγιστες θερμοκρασίες που παρατηρούνται για τους Τοίχο 4 και 5 στην περίπτωση της απλής γυψοσανίδας φτάνουν τους 250°C. Αυτές οι υψηλές θερμοκρασίες όμως παρατηρούνται μετά το τέταρτο λεπτό της προσομοίωσης και μάλιστα σε μια μικρή περιοχή γύρω από την πόρτα, Σχήμα 5.28 στην δεξιά στήλη.

Αντίθετα, στην περίπτωση της κατασκευής χρησιμοποιώντας γυψοσανίδα με PCM παρατηρείται ότι η περιοχή γύρω από την πόρτα, στην μη εκτεθειμένη πλευρά, ξεπερνάει από το πρώτο κιόλας λεπτό τους 200°C και μάλιστα φαίνεται καθαρά, Σχήμα 5.28 στην αριστερή στήλη, ότι στο τέλος της προσομοίωσης η περιοχή έχει φτάσει τους 600°C. Αυτό σημαίνει ότι μετά το τρίτο λεπτό θα άρχιζε η κατάρρευση της, γεγονός που θα έπαιζε σημαντικό ρόλο σε μια πραγματική κατασκευή, καθώς οι συνήθεις κατασκευές ξηράς δόμησης κατασκευάζονται πάνω σε χαλύβδινο σκελετό. Με την κατάρρευση της γυψοσανίδας ο σκελετός αυτός έρχεται σε άμεση επαφή με το περιβάλλον υψηλών θερμοκρασιών που δημιουργούνται σε συνθήκες φωτιάς. Η μελέτη αυτής της συμπεριφοράς είναι πολύ σημαντική για την διασφάλιση της ακεραιότητας όλης της κατασκευής. Μετά την έκθεση του χάλυβα σε υψηλές θερμοκρασίες, η μηχανική του αντοχή του μειώνεται αισθητά και μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία του μετά από 65min [Benichou and Sultan, 2004].

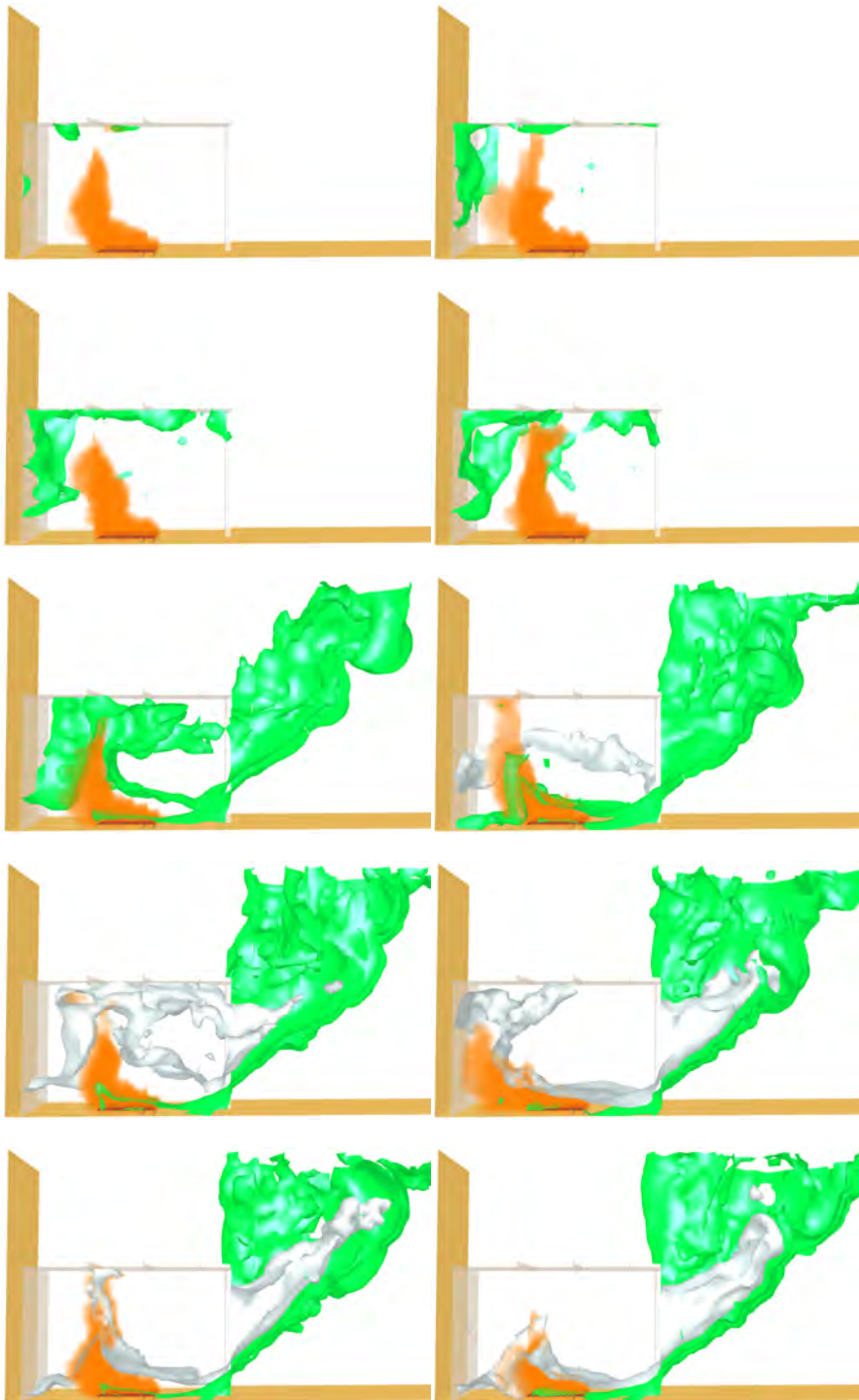
Οπότε συνολικά, παρατηρείται ότι η συμπεριφορά της κατασκευής με απλή γυψοσανίδα, όταν αυτή εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες, είναι καλύτερη σε σχέση με την κατασκευή από απλή γυψοσανίδα με ενσωματωμένα PCM. Για αυτό κρίνεται απαραίτητη η χρήση του PCM σε γυψοσανίδες να γίνεται σε συνδυασμό με κάποιο επιβραδυντικό καύσης, που θα διασφαλίσει καλύτερη συμπεριφορά της τοιχοποιίας σε συνθήκες φωτιάς.



Σχήμα 5.27: Προλέξεις θερμοκρασίας της εκτεθειμένης πλευράς του Τοίχου 2 και απεικόνιση της φωτιάς για την περίπτωση της απλής γυψοσανίδας (δεξιά) και γυψοσανίδας με PCM (αριστερά), για το 1, 2, 3, 4 και 5 min.



Σχήμα 5.28: Προλέξεις θερμοκρασίας της μη εκτεθειμένης στην φωτιά πλευρά των Τοίχων 4-5 για την περίπτωση της απλής γυψοσανίδας (δεξιά) και γυψοσανίδας με PCM (αριστερά), για το 1, 2, 3, 4 και 5 min.



Σχήμα 5.29: Κατανομή συγκέντρωσης αέριας παραφίνης στην περίπτωση της γυψοσανίδας με PCM, για το 30s, 31s, 32s, 33s, 1, 1.5, 2, 3, 4 και 5min.

Κεφάλαιο 6

Υπολογιστική προσομοίωση φωτιάς σε πρότυπη κατοικία

6.1	Εισαγωγή	138
6.1.1	Περιγραφή της γεωμετρίας	138
6.2	Λεπτομέρειες Υπολογιστικής Προσομοίωσης	140
6.2.1	Υπολογιστικό πλέγμα	140
6.2.2	Αρχικές και οριακές συνθήκες	141
6.3	Υπολογιστική Προσομοίωση	144
6.3.1	Παρουσίαση του Ροϊκού Πεδίου	144
6.3.2	Παρουσίαση του Θερμοκρασιακού Πεδίου	149
6.4	Παραμετρικές μελέτες	159
6.4.1	Επίδραση της τεχνικής δόμησης	161
6.4.2	Επίδραση του αερισμού	165
6.4.3	Όρια Επικινδυνότητας	169
6.5	Αξιολόγηση αποτελεσμάτων	189

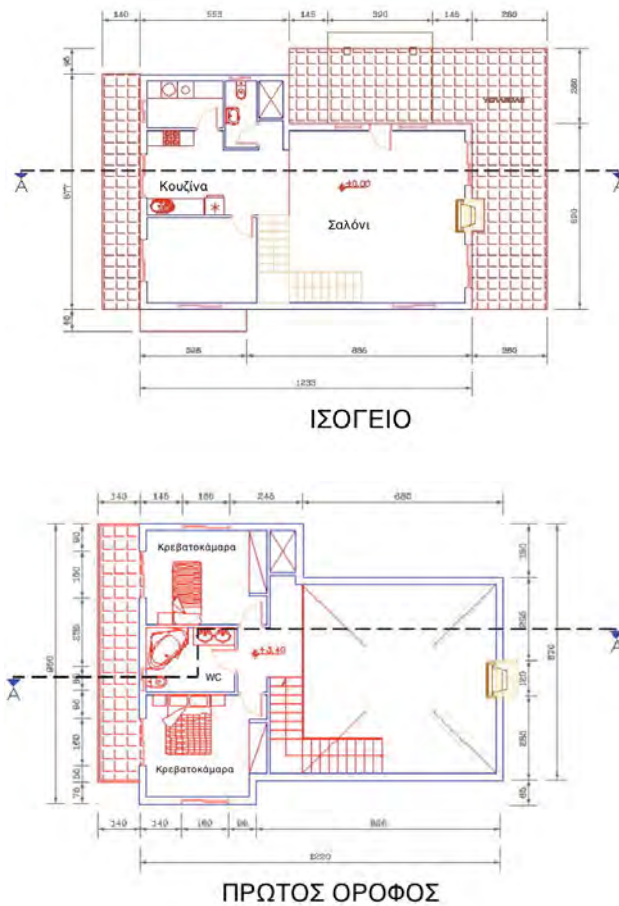
6.1 Εισαγωγή

6.1.1 Περιγραφή της γεωμετρίας

Για τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του κώδικα FDS, χρησιμοποιήθηκε η ακριβής γεωμετρία πρότυπης κατοικίας που κατασκευάστηκε στο Στάνο-Αμφιλοχίας (εταιρία ΚΝΑUF Γυψοποιία Α.Β.Ε.Ε.), Σχήμα 6.1. Πρόκειται για ένα δώροφο κτίριο με τυπική εσωτερική διάταξη κατοικίας. Στο ισόγειο υπάρχουν η κουζίνα, ένα γραφείο, ένα δωμάτιο, ένα μικρό μπάνιο και το κυρίως καθιστικό, Σχήμα 6.2, ενώ στον πρώτο όροφο υπάρχουν δύο κρεβατοκάμαρες και ένα επιπλέον μπάνιο. Η κατοικία θεωρείται ότι είναι πλήρως επιπλωμένο, με βάση τα χαρακτηριστικά μιας τυπικής κατοικίας στην Ελλάδα, Σχήμα 6.3. Για τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την επίπλωση του κτιρίου χρησιμοποιήθηκαν ρεαλιστικές θερμό-χημικές ιδιότητες προκειμένου η προσομοίωση να είναι κοντά στην πραγματικότητα. Κάποιες κατασκευαστικές λεπτομέρειες δεν απεικονίζονται προκειμένου να μειωθεί ο όγκος του υπολογιστικού πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση.



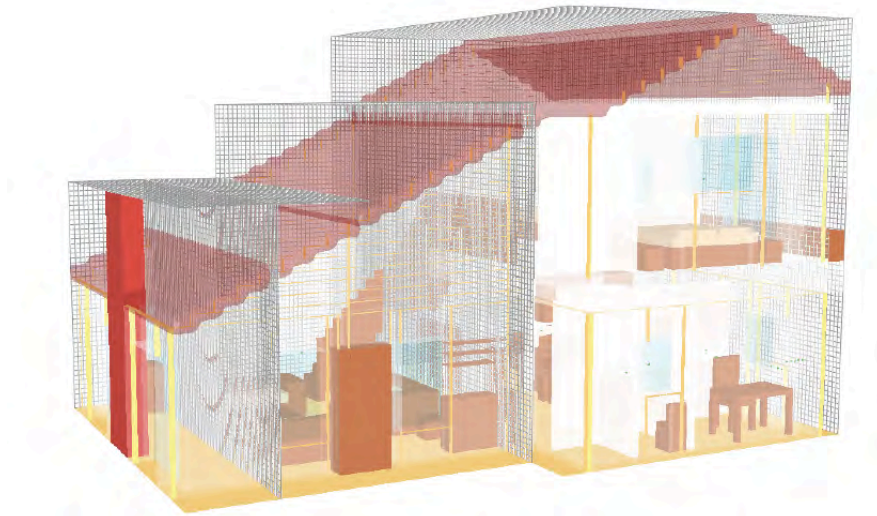
Σχήμα 6.1: Φωτορεαλιστική και πραγματική απεικόνιση της πρότυπης κατοικίας στην Αμφιλοχία.



Σχήμα 6.2: Κάτοψη και βασικές διαστάσεις της πρότυπης κατοικίας στην Αμφιλοχία.



Σχήμα 6.3: Απεικόνιση της γεωμετρίας στον FDS και της εσωτερικής διαρρύθμισης της κατοικίας.



Σχήμα 6.4: Υπολογιστικό πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση φωτιάς στην πρότυπη κατοικία στην Αμφιλοχία.

6.2 Λεπτομέρειες Υπολογιστικής Προσομοίωσης

6.2.1 Υπολογιστικό πλέγμα

Το υπολογιστικό χωρίο που χρησιμοποιήθηκε για την κατοικία έχει διαστάσεις 12.8 m x 11.2 m x 8 m κατά την x,y και z διάσταση αντιστοίχως. Είναι χωρισμένο σε 798,720 κυβικά υπολογιστικά κελιά, όπου το καθένα έχει πλευρά 0.1 m (Σχήμα 6.4). Το πλέγμα είναι χωρισμένο σε 8 τομείς προκειμένου να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί η "παράλληλη" έκδοση του FDS, με χρήση ενός πρωτοκόλλου μετάδοσης μηνυμάτων (MPI, Message Passing Interface) προκειμένου να γίνει κατανομή των υπολογισμών σε πολλούς ετερογενείς επεξεργαστές και να μειωθεί ο υπολογιστικός χρόνος. Πιο συγκεκριμένα η υλοποίηση του MPI που χρησιμοποιείται είναι η βιβλιοθήκη MPICH (MPI Chameleon). Ο συνολικός υπολογιστικός χρόνος που απαιτήθηκε για την κάθε προσομοίωση ήταν περίπου 24 ώρες σε υπολογιστή με 4 GB μνήμη και επεξεργαστή Core i7 920.

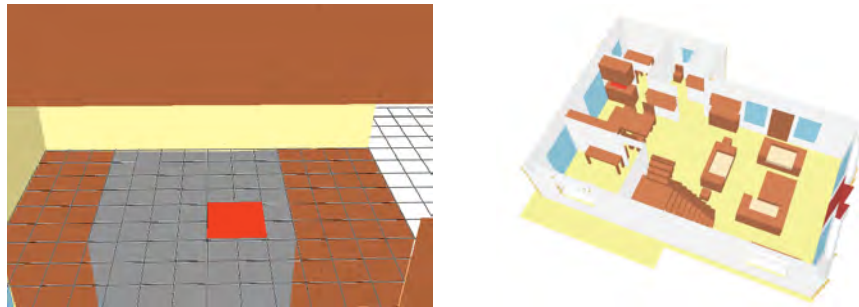
6.2.2 Αρχικές και οριακές συνθήκες

Στην αρχή της υπολογιστικής προσομοίωσης ($t=0s$), θεωρείται ότι το πεδίο ταχυτήτων σε όλο το υπολογιστικό χωρίο, είναι μηδενικό και υπάρχει ενιαία αρχική θερμοκρασία $20^{\circ}C$. Ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης είναι 15 λεπτά, προκειμένου να απεικονιστούν με ακρίβεια τα χαρακτηριστικά στάδια της εξέλιξης μιας φωτιάς. Τα στάδια αυτά είναι η ανάπτυξη της φωτιάς (growth period), η πλήρως ανεπτυγμένη φωτιά (fully developed fire) και η φάση της μείωσης (decay period). Μετά την έναυση της καύσης σε μια τοπική εστία φωτιάς, τρία ενδεχόμενα μπορεί να συμβούν [Drysdale, 1999]:

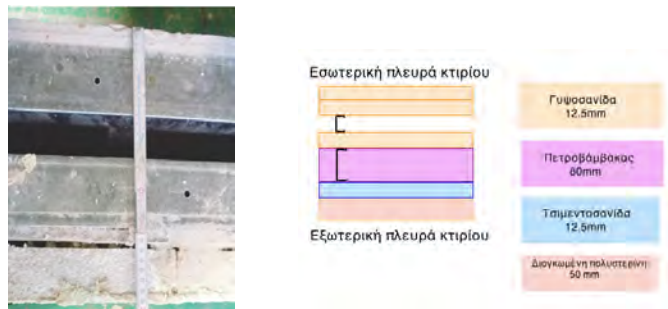
- Η φωτιά μπορεί να κάψει μόνο το αρχικό αντικείμενο μέχρι τέλους πριν προλάβει να εξαπλωθεί σε άλλα αντικείμενα και να σβήσει λόγω έλλειψης διαθέσιμου καυσίμου. Αυτό το σενάριο είναι πιθανό να συμβεί σε περιπτώσεις που η φωτιά βρίσκεται σε απομονωμένο σημείο.
- Αν δεν υπάρχει επαρκής αέρας η φωτιά μπορεί να σβήσει λόγω έλλειψης οξυγόνου ή ακόμα και αν συνεχίσει να καίει, αυτό θα γίνει με πολύ χαμηλούς ρυθμούς ανάλογα με την περιεκτικότητα οξυγόνου στον χώρο.
- Σε περιπτώσεις που υπάρχει αρκετό καύσιμο και αέρας, η φωτιά μπορεί να εξελιχθεί σε πλήρως ανεπτυγμένη στην οποία όλα τα καύσιμα υλικά στο δωμάτιο θα αρχίσουν να καίγονται.

Η κύρια αιτία των αναφερθέντων πυρκαγιών σε κατοικίες στις ΗΠΑ είναι ο εξοπλισμός κουζίνας [Ahrens et al., 2004]. Στην παρούσα εργασία, όπως αναφέρεται και στο Κεφάλαιο 1, σαν πηγή έναυσης της φωτιάς χρησιμοποιήθηκε μια ορθογώνια επιφάνεια $0.2\text{ m} \times 0.2\text{ m}$ στην επιφάνεια μιας ηλεκτρικής κουζίνας (Σχήμα 6.5). Στην αρχή της προσομοίωσης ($t=0s$) ορίζεται φωτιά σταθερής ισχύος 300 kW , η οποία επιλέχθηκε βάσει βιβλιογραφικών αναφορών σχετικά με φωτιές στην κουζίνα οι οποίες συνδέονται με οικιακό εξοπλισμό και μαγειρικό φυτικό έλαιο [Luo and Beck, 1994].

Οι εξωτερικοί τοίχοι της κατοικίας αποτελούνται από πολλά στρώματα υλικών τα οποία είναι (από την εσωτερική προς την εξωτερική πλευρά): δύο γυψοσανίδες πάχους 12.5 mm τοποθετημένες μαζί, ένα κενό αέρα 182.5 mm (σε αυτόν τον χώρο είναι τοποθετημένος ο χαλύβδινος σκελετός του κτιρίου και από εκεί διέρχονται καλώδια και σωλήνες), μια γυψοσανίδα 12.5 mm , ένα στρώμα μόνωσης πετροβάμβακα 80 mm , μια τσιμεντοσανίδα 12.5 mm (Aquapanel) και τέλος ένα τελικό στρώμα μόνωσης 50 mm διογκωμένης πολυστερίνης (EPS) (Σχήμα 6.6).



Σχήμα 6.5: Επιφάνεια της ηλεκτρικής κουζίνας στην κουζίνα όπου επιλέχθηκε για την προσομοίωση της φωτιάς λόγω ανάφλεξης μαγειρικού λαδιού σε τηγάνι και κάτοψη της πρότυπης κατοικίας.

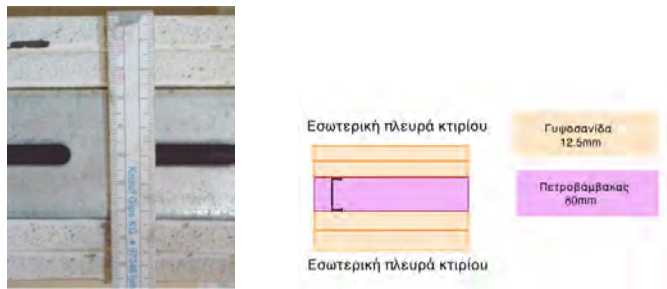


Σχήμα 6.6: Τομή κατά μήκος του εξωτερικού τοίχου.

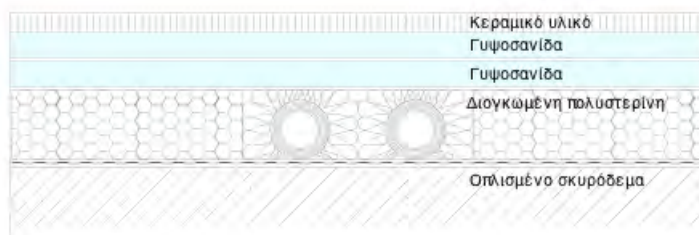
Οι εσωτερικοί τοίχοι έχουν συμμετρική δομή, η οποία αποτελείται από δύο γυψοσανίδες 12.5 mm η καθεμία, ένα στρώμα μόνωσης πετροβάμβακα 80 mm και ξανά άλλες δύο γυψοσανίδες 12.5 mm η καθεμία (Σχήμα 6.7).

Το δάπεδο του ισόγειου αποτελείται από (από το έδαφος προς το εσωτερικό του κτιρίου): ένα στρώμα οπλισμένου σκυροδέματος, ένα στρώμα μόνωσης διογκωμένης πολυστερίνης (EPS) 24.5 mm, δύο γυψοσανίδες των 12.5 mm η καθεμία και ένα στρώμα κεραμικού υλικού πάχους 5 mm (Σχήμα 6.8).

Το δάπεδο του πρώτου ορόφου αποτελείται (από το ισόγειο προς τον πρώτο όροφο) από μια γυψοσανίδα των 12.5 mm, ένα στρώμα μόνωσης διογκωμένης πολυστερίνης 24.5 mm, μία γυψοσανίδα GIFA 28 mm και ένα τελικό στρώμα κεραμικού υλικού πάχους 5 mm. Τέλος η οροφή του πρώτου ορόφου αποτελείται από μια γυψοσανίδα πάχους 12.5 mm, ένα στρώμα μόνωσης διογκωμένης πολυστερίνης (EPS) 24.5 mm και ένα στρώμα μόνωσης από πετροβάμβακα 100 mm.



Σχήμα 6.7: Τομή κατά μήκος του εσωτερικού τοίχου.



Σχήμα 6.8: Τομή κατά μήκος του δαπέδου του ισογείου.

Η οροφή του πρώτου ορόφου αποτελείται από μια γυψοσανίδα των 12.5 mm, ένα στρώμα μόνωσης διογκωμένης πολυστερίνης 24.5 mm και ένα στρώμα μόνωσης από πετροβάμβακα 100 mm.

Το σαλόνι της κατοικίας είναι επιπλωμένο με καναπέδες από αφρό πολυουρεθάλης και ξύλινα έπιπλα, όπως ένα μικρό τραπέζι στο κέντρο του δωματίου, ράφια και συρταριέρα. Στην κουζίνα υπάρχουν ξύλινοι πάγκοι και ένα ξύλινο τραπέζι με δύο καρέκλες στο μέσο του δωματίου. Στα υπνοδωμάτια υπάρχουν ξύλινα κρεβάτια με στρώμα από αφρό πολυουρεθάλης και ξύλινα κομοδίνα.

6.3 Υπολογιστική Προσομοίωση

6.3.1 Παρουσίαση του Ροϊκού Πεδίου

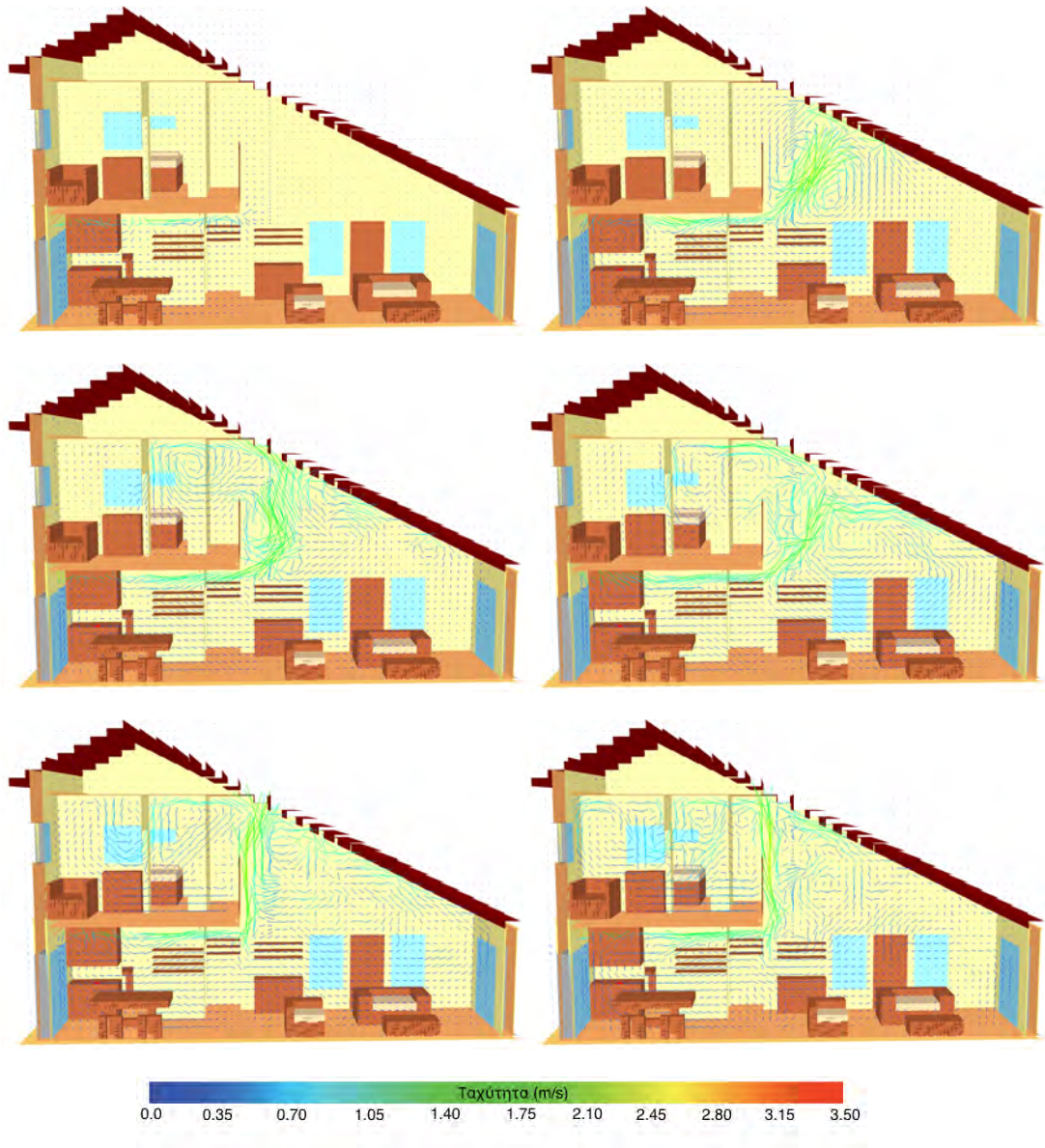
Στα Σχήματα 6.9 και Σχήματα 6.10 παρουσιάζονται οι προλέξεις του ροϊκού πεδίου κοντά στην περιοχή της φωτιάς αλλά και κατά μήκος της κατοικίας. Πιο συγκεκριμένα στο Σχήμα 6.9 παρουσιάζεται αναλυτικά η ροή για τα πρώτα 30 s της προσομοίωσης (ανά πέντε δευτερόλεπτα). Στην συνέχεια στο Σχήμα 6.10, παρουσιάζεται το ροϊκό πεδίο, για τα πρώτα 8 min της προσομοίωσης (ανά ένα λεπτό).

Όπως αναμένεται, οι μεγαλύτερες τιμές των ταχυτήτων παρατηρούνται κοντά στην περιοχή της φωτιάς, όπου υπάρχουν έντονα τυρβώδη φαινόμενα εξαιτίας των μεγάλων θερμοκρασιακών διαφορών που δημιουργούνται. Οι μεγάλες διαφορές στην πυκνότητα αναγκάζουν το μείγμα του αέρα και των προϊόντων της καύσης να ανέλθουν στα ανώτερα στρώματα των δωματίων, με αποτέλεσμα, στα σενάρια όπου η πόρτα της κουζίνας παραμένει ανοιχτή, να αυξάνεται η παροχή φρέσκου αέρα στο εσωτερικό της κατοικίας. Δημιουργείται έτσι ένα έντονο ρεύμα, ταχυτήτων 1-1.5 m/s, με κατεύθυνση το καθιστικό που στην συνέχεια κινείται ανοδικά προς την κεκλιμένη οροφή της κατοικίας. Μετά τα 5 min της προσομοίωσης παρατηρείται επίσης έντονος στροβιλισμός, αντίθετης φοράς, στον διάδρομο του πρώτου ορόφου. Ο στροβιλισμός της ροής που δημιουργείται λόγω της κεκλιμένης οροφής, δημιουργεί ακολούθως μια ανακυκλοφορία των θερμών ρευμάτων στην ζώνη του καθιστικού, με ταχύτητες που κυμαίνονται κοντά στο 1 m/s. Μετά το 6 min οι φλόγες μειώνονται σημαντικά και το ίδιο συμβαίνει με τις ταχύτητες του ροϊκού πεδίου.

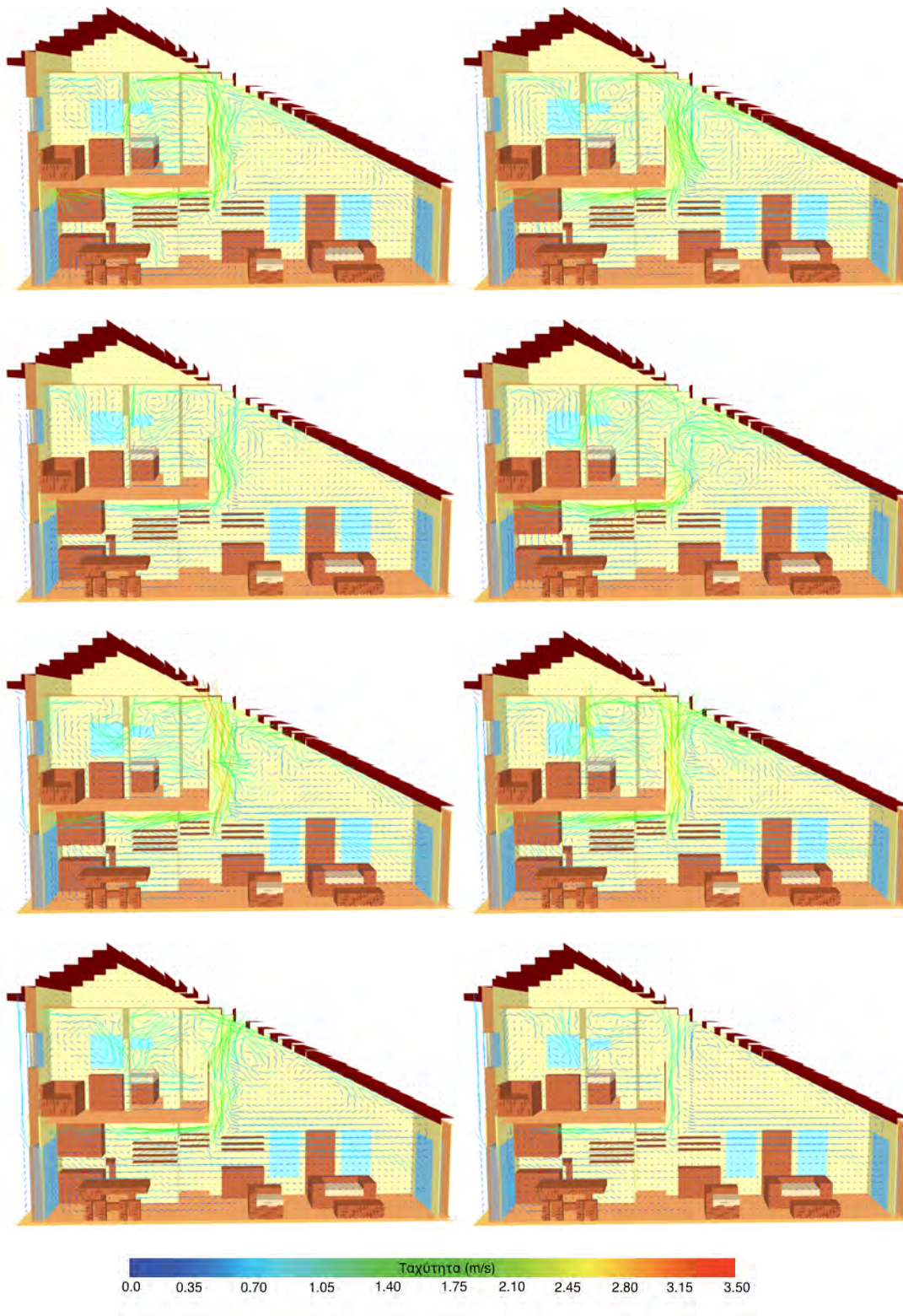
Στο Σχήμα 6.11 παρουσιάζονται οι προλέξεις του ροϊκού πεδίου κοντά στην περιοχή της φωτιάς κατά το πλάτος της κουζίνας. Οι μεγαλύτερες ταχύτητες, της τάξης των 3-3.5 m/s, παρουσιάζονται στην εστία της κουζίνας όπου αποτελεί και το σημείο έναυσης της φωτιάς. Τα θερμά ρεύματα που δημιουργούνται έχουν μια ανοδική τάση και δημιουργείται και μια μικρή ζώνη ανακυκλοφορίας στα ανώτερα στρώματα του δωματίου (λόγω της ύπαρξης της οροφής). Το ροϊκό πεδίο αποκαθίσταται μετά το 7 min της προσομοίωσης όπου η φωτιά σβήνει εξαιτίας της έλλειψης οξυγόνου (σε αυτήν την περίπτωση θεωρήθηκε ότι δεν υπάρχουν ανοίγματα στο κτίριο, άρα δεν υπάρχει είσοδος φρέσκου αέρα που να τροφοδοτεί την φωτιά με οξυγόνο). Πρόκειται δηλαδή για ένα σενάριο ανεπαρκούς αεριζόμενου χώρου που δεν ευνοεί την εξάπλωση της φωτιάς.

Παρατηρείται επίσης ότι στα υπνοδωμάτια και το μπάνιο του πρώτου ορόφου δημιουργούνται μικρές ζώνες ανακυκλοφορίας της ροής, της τάξης των 0.7 m/s,

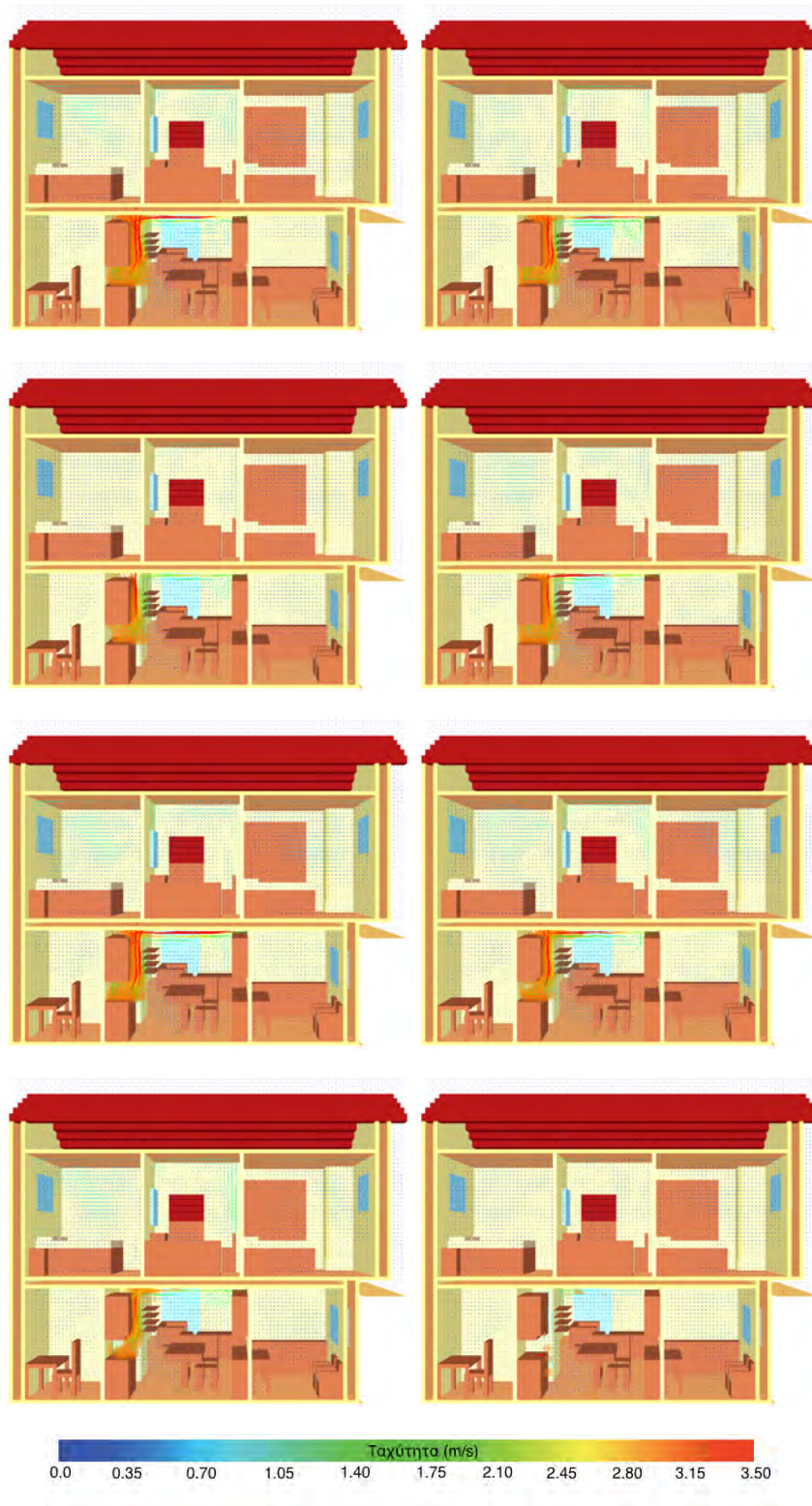
στα υψηλότερα στρώματα των δωματίων. Οι μεγάλες διαφορές στην πυκνότητα οδηγούν το μείγμα του αέρα και των προϊόντων της καύσης να ανέλθουν, με αποτέλεσμα το ισόγειο να τροφοδοτείται με αέρα χαμηλότερης θερμοκρασίας προερχόμενο από τον πρώτο όροφο.



Σχήμα 6.9: Διανυσματική απεικόνιση του ροϊκού πεδίου της Περίπτωσης Γ1, σε μήκος 5.9 m τα πρώτα 30 δευτερόλεπτα της προσομοίωσης (ανά πέντε δευτερόλεπτα).



Σχήμα 6.10: Διανυσματική απεικόνιση του ροϊκού πεδίου της Περίπτωσης Γ1, σε μήκος 5.9 m τα πρώτα 8 λεπτά της προσομίωσης (ανά ένα λεπτό).



Σχήμα 6.11: Διανυσματική απεικόνιση του ροϊκού πεδίου της Περίπτωσης Γ1, κατά μήκος της κουζίνας τα πρώτα 8 λεπτά της προσομοίωσης (ανά ένα λεπτό).

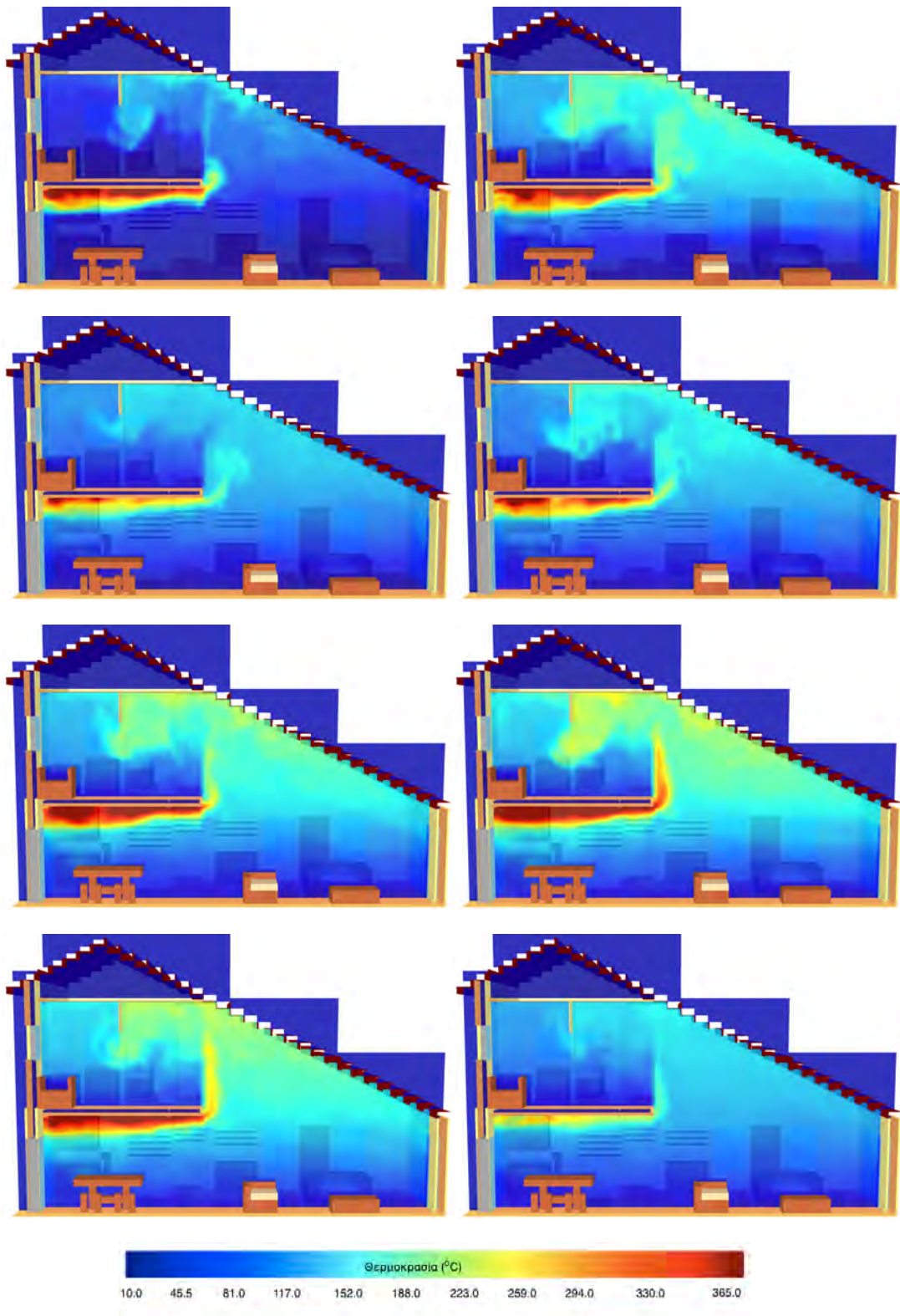
6.3.2 Παρουσίαση του Θερμοκρασιακού Πεδίου

Στα Σχήματα 6.12 και 6.13 παρουσιάζονται οι προλέξεις του θερμοκρασιακού πεδίου κοντά στην περιοχή της φωτιάς αλλά και κατά μήκος της κατοικίας (σε μήκος 5.9 m και πλάτος 11.9 m αντίστοιχα), για τα πρώτα 8 min της προσομοίωσης (ανά ένα λεπτό).

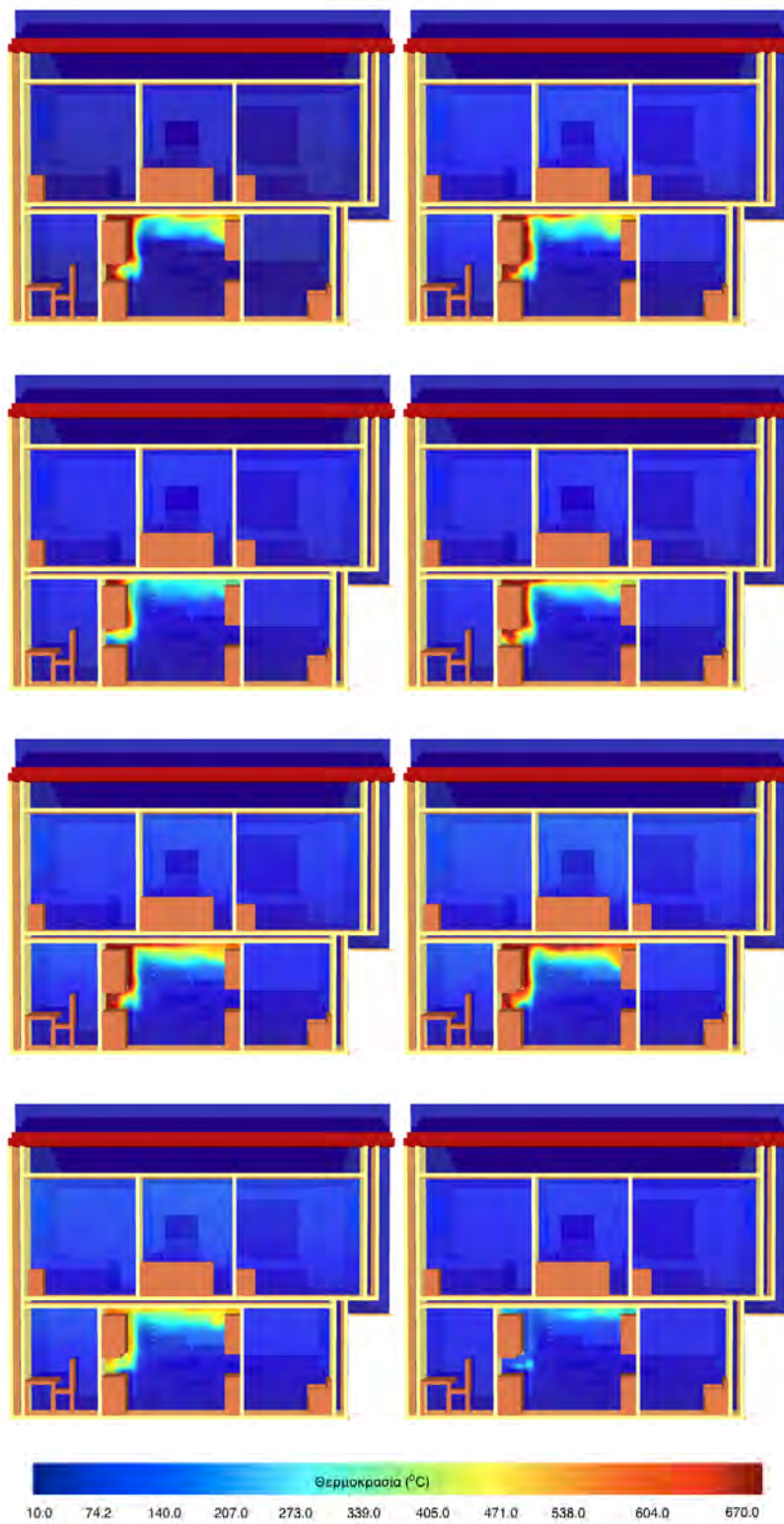
Στο Σχήμα 6.12 φαίνονται καθαρά τα χαρακτηριστικά του θερμού ρεύματος αερίων που δημιουργείται αρχικά στην περιοχή κοντά στην οροφή της κουζίνας και στην συνέχεια κατευθύνεται προς το καθιστικό. Μετά το 1 min, η δομή των δινών που δημιουργούνται είναι εμφανής καθώς τα θερμά προϊόντα της καύσης κινούνται προς τον επάνω όροφο και προς τα κατώτερα στρώματα του καθιστικού. Μετά τα 6 min γίνεται αισθητή η μείωση της θερμοκρασίας καθώς η φωτιά έχει αρχίσει να σβήνει λόγω έλλειψης οξυγόνου. Οι μέγιστες θερμοκρασίες παρατηρούνται στην περιοχή κοντά στην οροφή της κουζίνας και κυμαίνονται στο 350-365°C, ενώ μετά το πέρας των πρώτων 6 min η θερμοκρασία στο εσωτερικό του κτιρίου σταθεροποιείται στους 150°C.

Στο Σχήμα 6.13 φαίνονται με περισσότερη λεπτομέρεια τα χαρακτηριστικά του θερμοκρασιακού πεδίου στον χώρο της κουζίνας. Στην περιοχή ακριβώς πάνω από την εστία της κουζίνας όπου αναπτύσσεται το πλούμιο της φωτιάς, παρατηρούνται οι μεγαλύτερες θερμοκρασίες, της τάξης των 600-670°C. Η διαστρωμάτωση του πεδίου ταχυτήτων οδηγεί σταδιακά και στην διαστρωμάτωση του θερμοκρασιακού πεδίου στο δωμάτιο της κουζίνας. Παρόμοια διαστρωμάτωση στο θερμοκρασιακό πεδίο παρατηρείται και στα δωμάτια του πρώτου ορόφου αν και όχι σε τόσο μεγάλο βαθμό και με θερμοκρασίες που φτάνουν μέχρι και τους 200°C.

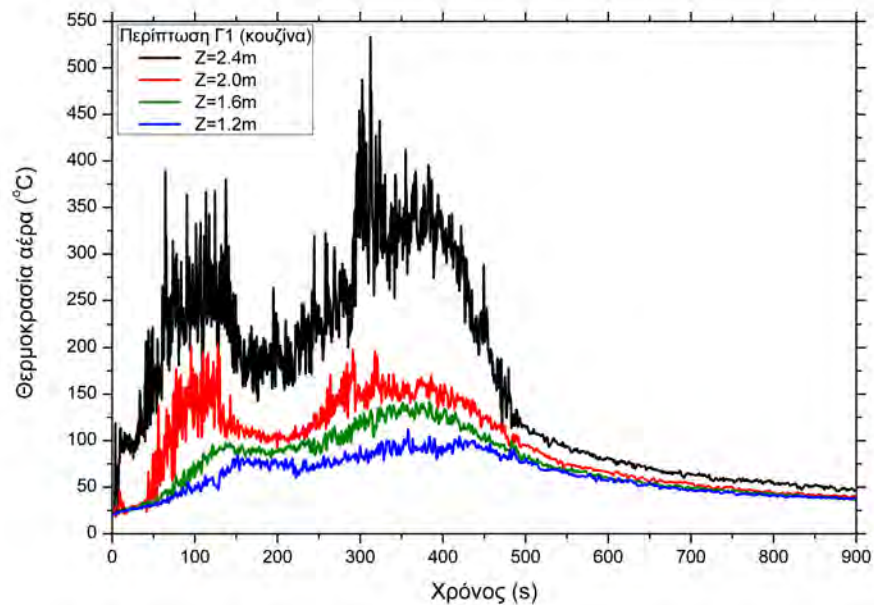
Οι θερμοκρασίες στην κουζίνα δεν αυξάνονται δραματικά εξαιτίας του γεγονότος ότι τα εσωτερικά ανοίγματα (πόρτες) του κτιρίου παραμένουν ανοιχτά κατά την διάρκεια όλης της προσομοίωσης επιτρέποντας την ροή του αέρα και των προϊόντων της καύσης σε όλον το όγκο του κτιρίου. Για αυτό το λόγο δεν παρατηρούνται και φαινόμενα καθολικής ανάφλεξης (flashover), όπως θα μπορούσαν να συμβούν σε ένα μεμονωμένο δωμάτιο, που για παράδειγμα, μέσω ενός ανοιχτού παραθύρου θα υπήρχε παροχή φρέσκου αέρα από το περιβάλλον προκαλώντας την συνεχή αύξηση της μέσης θερμοκρασίας και θα επέτρεπε στα υλικά να φτάσουν την θερμοκρασία αυτανάφλεξης τους.



Σχήμα 6.12: Απεικόνιση του θερμοκρασιακού πεδίου σε μήκος 5.9 m τα πρώτα 8 λεπτά της προσομίωσης (ανά ένα λεπτό).



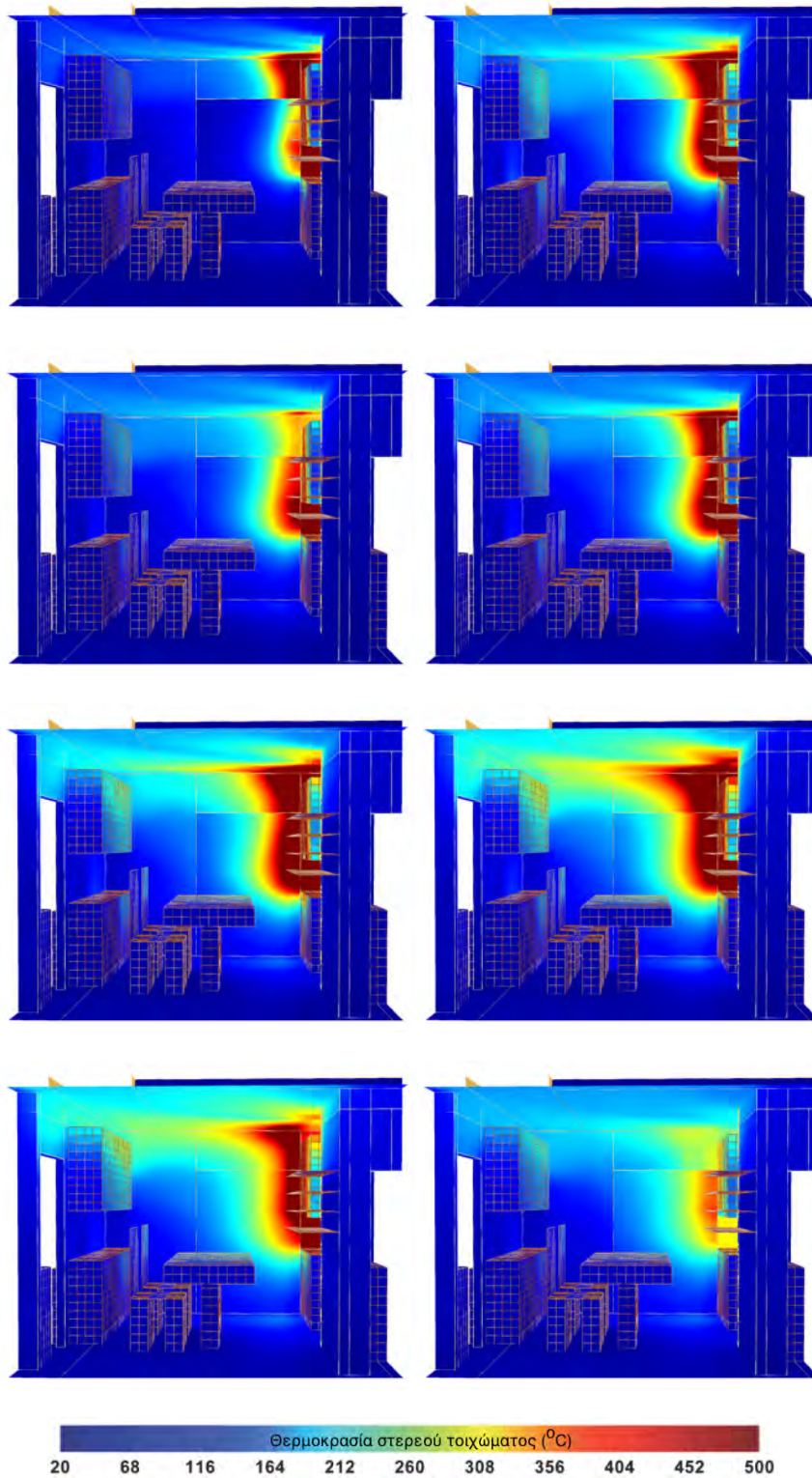
Σχήμα 6.13: Απεικόνιση του θερμοκρασιακού πεδίου σε πλάτος 11.9 m τα πρώτα 8 λεπτά της προσομοίωσης (ανά ένα λεπτό).



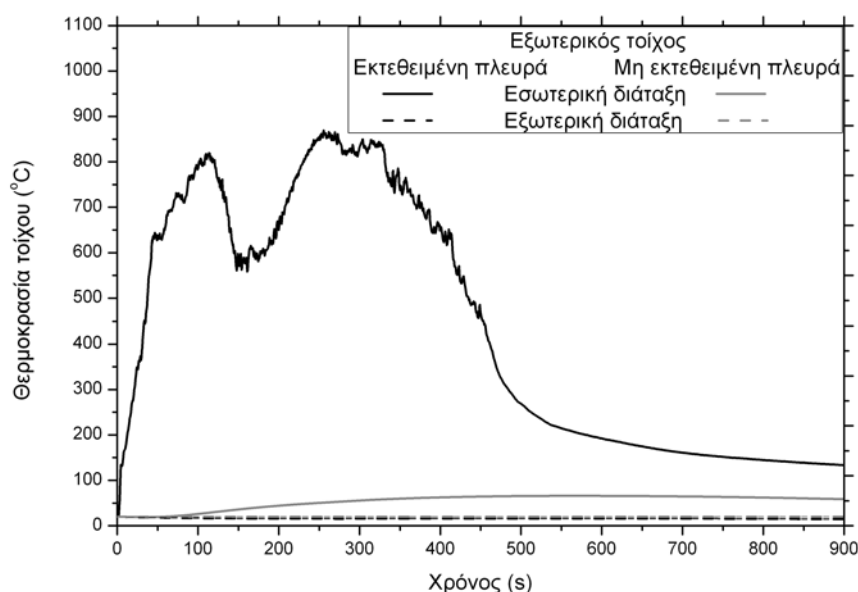
Σχήμα 6.14: Θερμοκρασία αέρα στην μέση της κουζίνας, σε διαφορετικά ύψη, συναρτήσει του χρόνου (Περίπτωση Γ1).

Στο Σχήμα 6.14 παρουσιάζεται η χρονική μεταβολή των θερμοκρασιών του αέρα στο μέσο της κουζίνας σε διαφορετικά ύψη (στα 1.2, 1.6, 2.0 και 2.4 m). Τα χαρακτηριστικά της διαστρωμάτωσης του θερμοκρασιακού πεδίου, όπως αναφέρθηκαν και παραπάνω, είναι προφανή. Τα θερμά προϊόντα της καύσης κινούνται προς τα πάνω σχηματίζοντας ένα στρώμα θερμού αέρα, ενώ τα ψυχρότερα αέρια κινούνται προς τα χαμηλότερα στρώματα του δωματίου. Η αξιοσημείωτη πτώση θερμοκρασίας που παρατηρείται μετά τα 6 min της προσομοίωσης οφείλεται στην αναστολή της φωτιάς λόγω της σταδιακής στέρησης οξυγόνου. Οι παραπάνω παρατηρήσεις συμφωνούν απόλυτα με τα όσα έχουν διατυπωθεί μέχρι στιγμής. Όπως ήδη έχει αναφερθεί, οι γυψοσανίδες οι οποίες εκτίθενται σε φωτιά θεωρείται ότι ξεπερνούν την μηχανική τους αντοχή όταν εμφανίζουν ρωγμές ή δημιουργούνται ανοίγματα κατά μήκος τους [Manzello et al., 2007]. Σύμφωνα με το αυστραλιανό πρότυπο AS1530.4, μια γυψοσανίδα αστοχεί όταν η μέγιστη αύξηση θερμοκρασίας (σε σχέση με την ατμοσφαιρική) στην μη εκτεθειμένη πλευρά ξεπερνά τους 180°C [Clancy, 2002]. Η παρούσα μελέτη CFD επιτρέπει την μελέτη της αντοχής της γυψοσανίδας στα πλαίσια της συμπεριφοράς της σε συνθήκες φωτιάς. Στην συγκεκριμένη πρότυπη κατοικία οι γυψοσανίδες δεν αποτελούν φέροντα στοιχεία, συνεπώς η αστοχία τους δεν συνεπάγεται άμεσα την κατάρρευση του κτιρίου. Στο Σχήμα 6.15 απεικονίζονται οι προλέξεις της θερμο-

κρασίας των επιφανειών της κουζίνας. Όπως αναμένεται, οι μέγιστες θερμοκρασίες παρατηρούνται στην περιοχή γύρω από την φωτιά και στην οροφή ακριβώς πάνω από την εστία της κουζίνας, όπου κατά περιπτώσεις φτάνουν μέχρι και τους 500°C. Η διαφοροποίηση που εμφανίζεται στις θερμοκρασίες μεταξύ της επιφάνειας της γυψοσανίδας και της γυάλινης επιφάνειας της εξώπορτας οφείλεται στις διαφορετικές θερμό-φυσικές ιδιότητες που χαρακτηρίζουν αυτά τα υλικά. Οι θερμοκρασίες φαίνεται να μειώνονται μετά τα 6 min, καθώς μειώνεται αντιστοίχως και η ισχύς της φωτιάς.



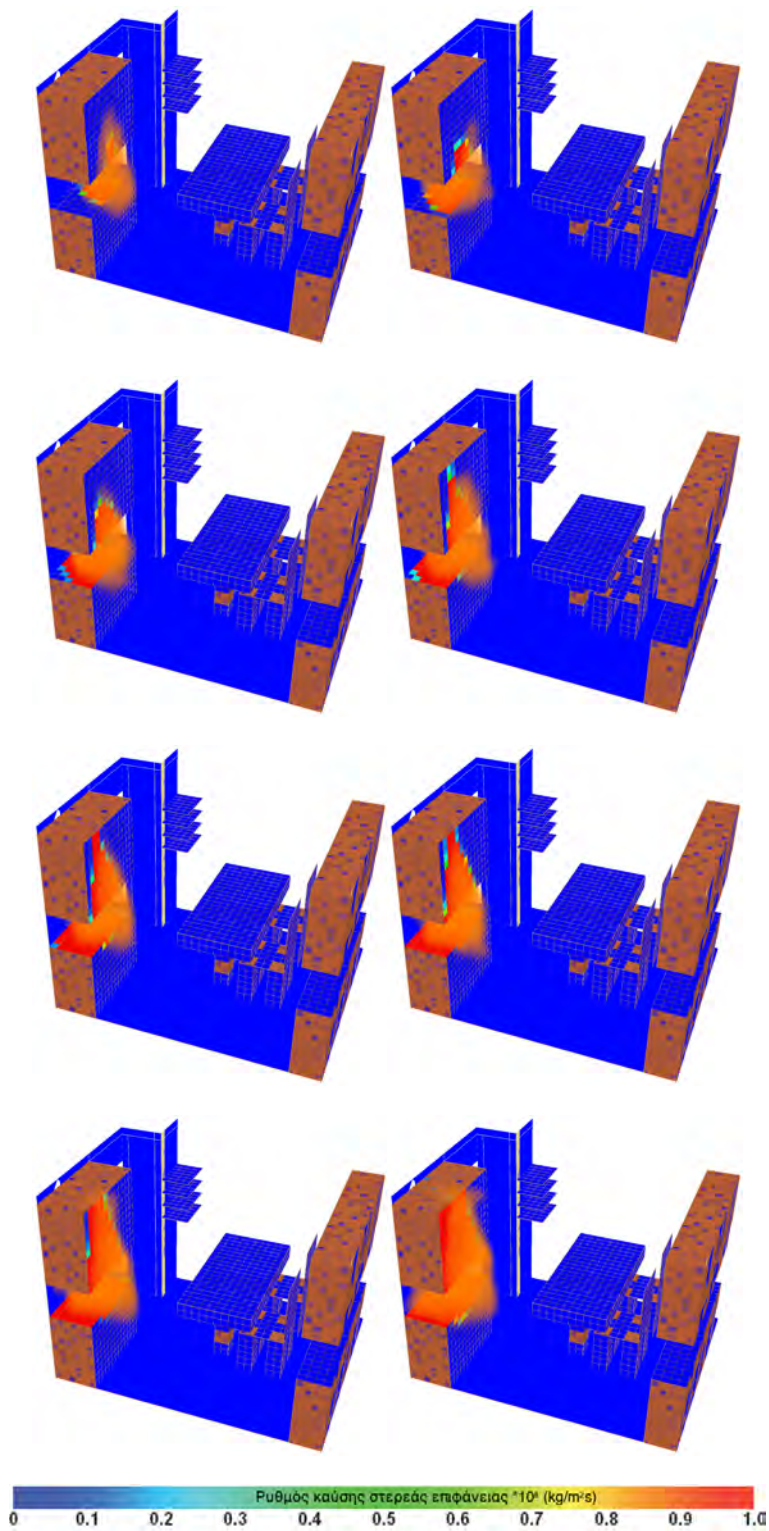
Σχήμα 6.15: Προλέξεις της θερμοκρασίας επιφάνειας των τοίχων της κουζίνας τα πρώτα 8 λεπτά της προσομοίωσης (ανά ένα λεπτό).



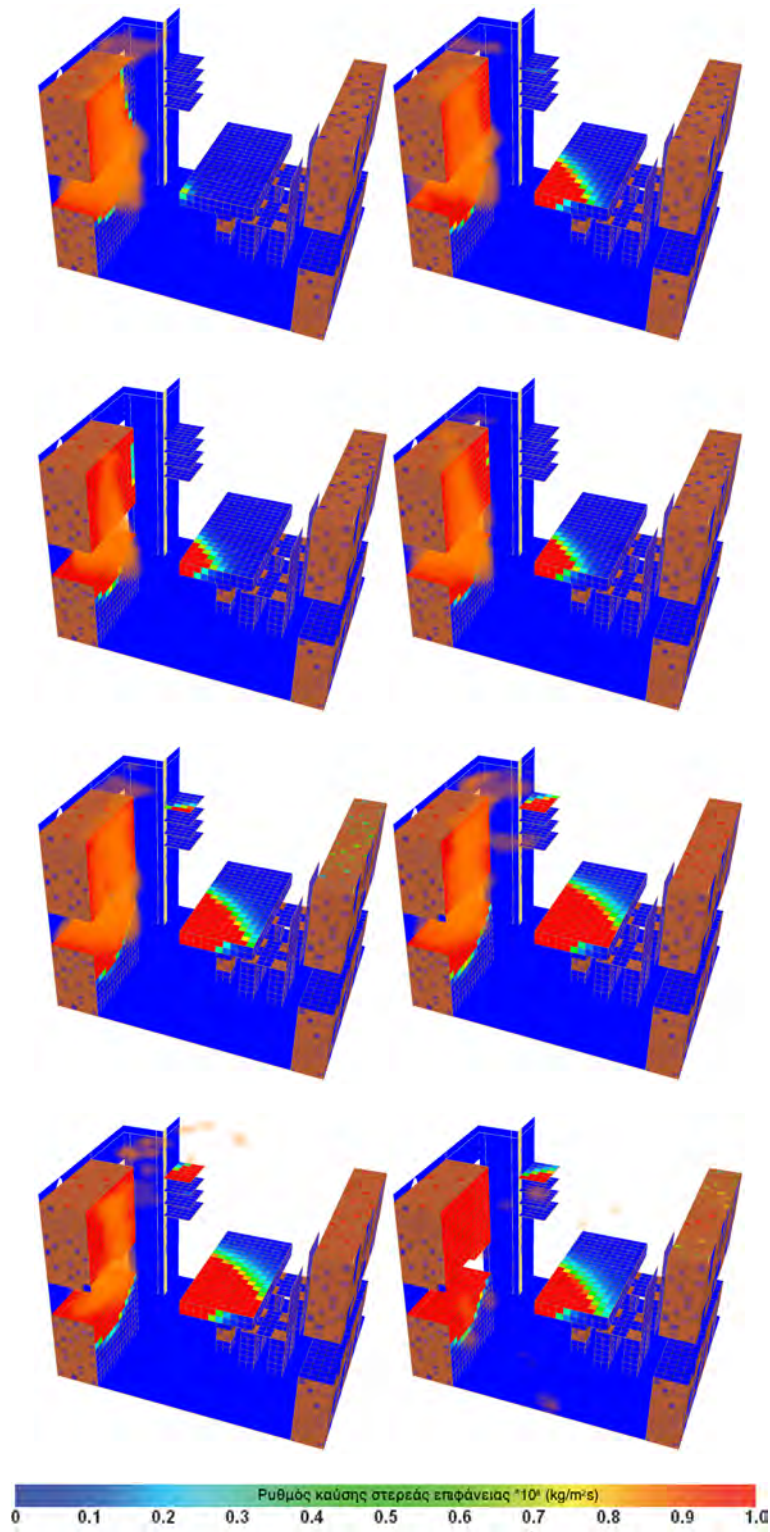
Σχήμα 6.16: Θερμοκρασία εξωτερικού νότιου τοίχου της κουζίνας, για την εσωτερική και εξωτερική διάταξη του, συναρτημένη του χρόνου (Περίπτωση Γ1).

Στο Σχήμα 6.16 απεικονίζονται οι προλέξεις της χρονικής μεταβολής της θερμοκρασίας του εξωτερικού τοίχου που βρίσκεται κοντά στην εστία της φωτιάς σε ύψος 1.35 m. Στην εσωτερική διάταξη, Σχήμα 6.6 (δύο γυψοσανίδες των 12.5 mm), η οποία βρίσκεται άμεσα εκτεθειμένη στην φωτιά, παρατηρούνται ιδιαιτέρως αυξημένες θερμοκρασίες. Μάλιστα μετά τα πρώτα 5 s της προσομοίωσης η θερμοκρασία ξεπερνά τους 200°C και οι μέγιστες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι της τάξης των 800-900°C. Η μη εκτεθειμένη πλευρά της εσωτερικής διάταξης του τοίχου φτάνει μέχρι και τους 50°C, δεν παρατηρείται δηλαδή αστοχία της για το συγκεκριμένο σενάριο φωτιάς. Μετά τα 6 min παρατηρείται σταδιακή μείωση της θερμοκρασίας καθώς μειώνεται η ισχύς της φωτιάς λόγω έλλειψης οξυγόνου. Στην εξωτερική διάταξη του τοίχου, Σχήμα 6.6 (γυψοσανίδα, τσιμεντοσανίδα και μονωτικά υλικά), δεν παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας καθώς μεταξύ της εσωτερικής και της εξωτερικής διάταξης του τοίχου υπάρχει κενό αέρα 182.5 mm που διαχωρίζει τις δύο διατάξεις. Ο αέρας που κινείται ανάμεσα στις δύο αυτές διατάξεις φαίνεται να συμπεριφέρεται σαν ένα πολύ ικανό μονωτικό υλικό που εμποδίζει την περαιτέρω μετάδοση θερμότητας μεταξύ των δομικών υλικών. Στο Σχήμα 6.17 απεικονίζεται ο ρυθμός καύσης των στερεών υλικών που υπάρχουν στην κουζίνα (κυρίως των ξύλινων επίπλων) τα πρώτα 40 s της προσομοίωσης. Η φωτιά ξεκινάει από μια από τις εστίες της κουζίνας και πολύ γρήγορα φαίνεται να εξαπλώνεται στον ξύλινο πάγκο και τα

ντουλάπια που την πλαισιώνουν δημιουργώντας ένα έντονο μέτωπο πυρόλυσης το οποίο κινείται σταδιακά προς τα πάνω μέχρι που φτάνει στην οροφή. Λόγω της έντονης μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία από τις φλόγες, το ξύλινο τραπέζι αλλά και τα ράφια που φαίνονται προς την πλευρά του καθιστικού αναφλέγονται μετά τα πρώτα 2 min από την έναυση της φλόγας, Σχήμα 6.18. Ο ρυθμός καύσης των ξύλινων επιφανειών φαίνεται και αυτός να μειώνεται σταδιακά μετά τα πρώτα 6 min της προσομοίωσης.



Σχήμα 6.17: Προλέξεις του ρυθμού καύσης τα πρώτα 40 δευτερόλεπτα της προσομοίωσης (ανά 5 s).



Σχήμα 6.18: Προλέξεις του ρυθμού καύσης τα πρώτα 8 λεπτά της προσομοίωσης (ανά ένα λεπτό).

6.4 Παραμετρικές μελέτες

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε παραμετρική μελέτη προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση της τεχνικής δόμησης αλλά και των διαφορετικών συνθηκών εξαερισμού. Τα κύρια χαρακτηριστικά των περιπτώσεων που μελετήθηκαν παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 6.1.

Περίπτωση	Πόρτα κουζίνας	Τεχνική δόμησης
Γ1	κλειστή	Χαλύβδινος σκελετός - γυψοσανίδα
Γ2	ανοιχτή	Χαλύβδινος σκελετός - γυψοσανίδα
Γ3	κλειστή	Χαλύβδινος σκελετός - γυψοσανίδα με PCM
Γ4	ανοιχτή	Χαλύβδινος σκελετός - γυψοσανίδα με PCM
T1	κλειστή	Σκυρόδεμα - τούβλο
T2	ανοιχτή	Σκυρόδεμα - τούβλο

Πίνακας 6.1: Περιπτώσεις που μελετήθηκαν συνολικά και στις δύο παραμετρικές μελέτες.

Στην πρώτη Περίπτωση Γ1, η οποία αποτέλεσε και την βάση σύγκρισης, όλα τα εξωτερικά ανοίγματα της κατοικίας (πόρτες και παράθυρα) παρέμειναν κλειστά, ενώ όλα τα εσωτερικά ανοίγματα θεωρήθηκαν ανοιχτά. Σαν αποτέλεσμα δεν υπήρξε ροή αερίων από το εσωτερικό του κτιρίου στον εξωτερικό χώρο, ούτε το αντίθετο. Όμως, υπήρξε κάποια μορφή αλληλεπίδρασης μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού πεδίου καθώς επιλύθηκε η ροή θερμότητας με αγωγή δια μέσω των εξωτερικών τοίχων της κατοικίας.

Προκειμένου να μελετηθούν οι διαφορετικές τεχνικές δόμησης και η επίδρασή τους στη εξέλιξη της πυρκαγιάς, μελετήθηκαν ακόμα δύο τεχνικές δόμησης. Χρησιμοποιήθηκε σαν υλικό δόμησης των τοίχων γυψοσανίδα με ενσωματωμένο PCM (Περίπτωση Γ3) αλλά και συμβατικό τούβλο (Περίπτωση Τ1). Στην Περίπτωση Τ1, θεωρήθηκε ότι οι εσωτερικοί τοίχοι έχουν πάχος 10cm τούβλου ενώ οι εξωτερικοί αποτελούνται από 10 cm τούβλο, 5cm μόνωση και μετά ανά 10 cm τούβλο. Η συγκεκριμένη τεχνική δόμησης είναι ιδιαιτέρως διαδεδομένη στις ελληνικές κατοικίες και γι' αυτό επιλέχθηκε να συγκριθεί με τα δύο άλλα σενάρια δόμησης. Τα χαρακτηριστικά του τούβλου που χρησιμοποιήθηκαν έχουν ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 4.

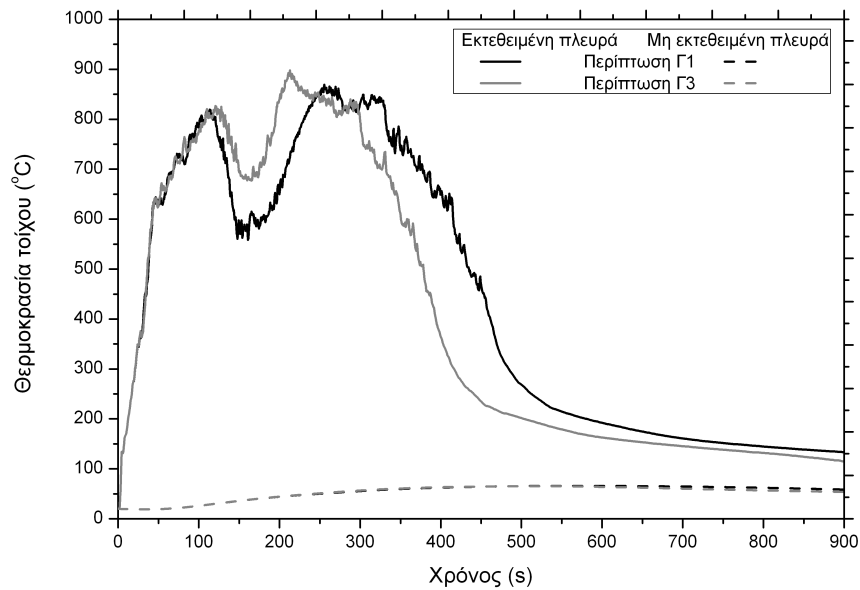
Το υπολογιστικό χωρίο σε όλες τις προσομοιώσεις επεκτείνεται 2.0 m προς τα έξω από κάθε πλευρά της κατοικίας. Αυτό έγινε προκειμένου να μελετηθεί η ροή αέρα στον εξωτερικό χώρο και να μελετηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η επίδραση των εξωτερικών ανοιγμάτων. Στην Περίπτωση Γ2 όλες οι παράμετροι της προσομοίωσης παρέμειναν κοινές εκτός από το γεγονός ότι η πόρτα που υπάρχει στην νότια πλευρά της κουζίνας (1.6 m x 2.2 m) παρέμεινε ανοιχτή καθόλη την διάρκεια της προσομοίωσης. Λόγω αυτής της διάταξης υπήρχε δυνατότητα εισχώρησης φρέσκου ατμοσφαιρικού αέρα από το εξωτερικό προς το εσωτερικό της κουζίνας, στην κύρια ζώνη της καύσης. Η μελέτη αυτή είχε σαν στόχο την διερεύνηση των συνθηκών αερισμού οι οποίοι είναι εξαιρετικά σημαντικοί για την εξέλιξη της φωτιάς (ανεπαρκώς αεριζόμενοι χώροι και επαρκώς αεριζόμενοι χώροι). Αντίστοιχα ισχύουν και για τις Περιπτώσεις Γ4 και Τ2.

6.4.1 Επίδραση της τεχνικής δόμησης

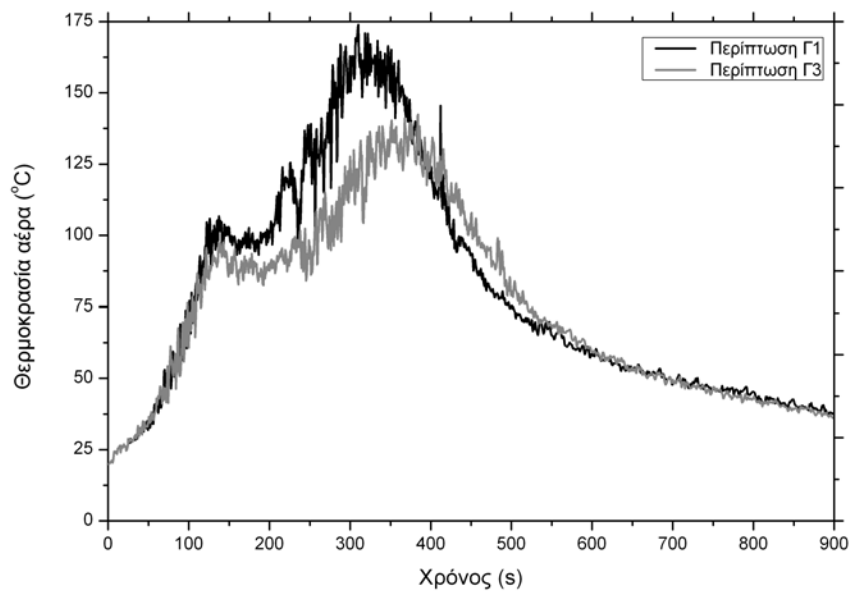
Οι προλέξεις της θερμοκρασίας επιφάνειας των εξωτερικών τοίχων για τις Περιπτώσεις Γ1 και Γ3 φαίνονται στο Σχήμα 6.19. Στην Περίπτωση Γ1 όπου σαν υλικό δόμησης χρησιμοποιείται η γυψοσανίδα και στην Περίπτωση Γ3 όπου έχει χρησιμοποιηθεί γυψοσανίδα με ενσωματωμένα PCM, η "εκτεθειμένη" πλευρά αντιστοιχεί στην άμεσα εκτεθειμένη στην φωτιά πλευρά της εσωτερικής διάταξης του τοίχου ενώ η "μη εκτεθειμένη" πλευρά αντιστοιχεί στην εξωτερική πλευρά της εσωτερικής διάταξης του εξωτερικού τοίχου. Η εξωτερική πλευρά της εξωτερικής διάταξης του τοίχου δεν απεικονίζεται σε αυτά τα διαγράμματα καθώς σε καμία από τις περιπτώσεις η θερμοκρασία της δεν ξεπερνάει τους 20°C, εξαιτίας των καλών μονωτικών υλικών που παρεμβάλλονται. Οι θερμοκρασίες της εκτεθειμένης πλευράς δείχνουν ένα μικρό πλεονέκτημα των απλών γυψοσανίδων έναντι των γυψοσανίδων με PCM. Στην Περίπτωση Γ3 η εκτεθειμένη στην φωτιά πλευρά αναπτύσσει υψηλότερες θερμοκρασίες, κατά 50°C, σε σχέση με την Περίπτωση Γ1, όπου η μέγιστη θερμοκρασία που παρατηρείται είναι 850°C. Από την άλλη, στην Περίπτωση Γ3 η γυψοσανίδα με PCM φαίνεται να ψύχεται πιο γρήγορα μετά τα πρώτα 6 min όπου η φωτιά σιγά σιγά μειώνεται, σε σχέση με την Περίπτωση Γ1 όπου η ίδια διαδικασία ξεκινάει μετά τα πρώτα 7 min της προσομοίωσης. Οι μη εκτεθειμένες πλευρές και των δύο περιπτώσεων αυξάνουν με τον ίδιο τρόπο την θερμοκρασία τους, αναπτύσσοντας και οι δύο μέγιστη θερμοκρασία κοντά στους 65°C.

Στο Σχήμα 6.20, φαίνονται αντίστοιχα οι προλέξεις της θερμοκρασίας του αέρα στο μέσο της κουζίνας σε ύψος 1.6 m για τις δύο Περιπτώσεις Γ1 και Γ3. Το προφίλ των θερμοκρασιών είναι κοινό με την διαφορά ότι στην Περίπτωση Γ1 η μέγιστη θερμοκρασία είναι 175°C ενώ στην Περίπτωση Γ3 είναι χαμηλότερη κατά 40°C.

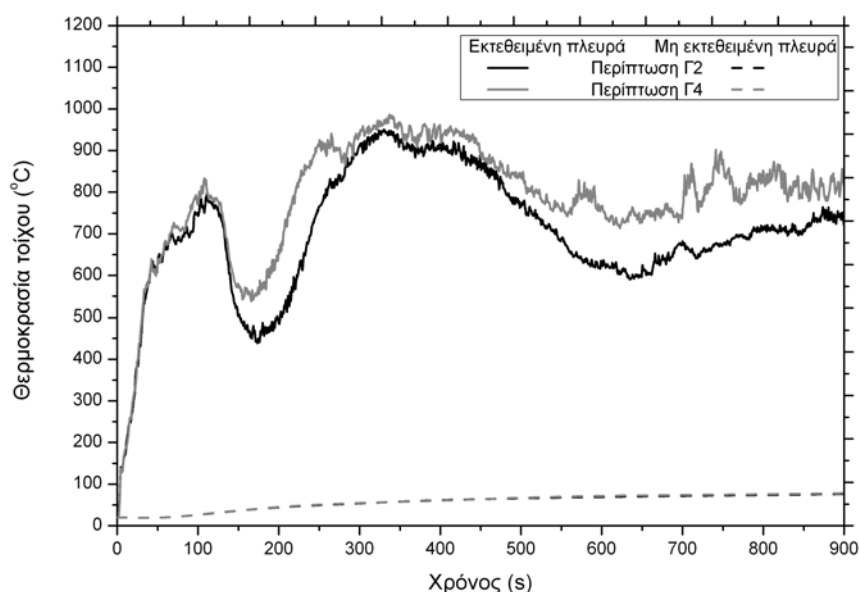
Οι προλέξεις της θερμοκρασίας της επιφάνειας των εξωτερικών τοίχων για τις Περιπτώσεις Γ2 και Γ4 φαίνονται στο Σχήμα 6.21, όπου η πόρτα στον εξωτερικό τοίχο της κουζίνας παραμένει ανοιχτή. Οι θερμοκρασίες της εκτεθειμένης πλευράς δείχνουν πάλι ένα μικρό πλεονέκτημα των απλών γυψοσανίδων έναντι των γυψοσανίδων με PCM. Μάλιστα μετά τα πρώτα 2 min της προσομοίωσης οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στην Περίπτωση Γ4 είναι σταθερά πιο πάνω από τις αντίστοιχες της Περίπτωσης Γ2. Η μέγιστη διαφορά, κατά 200°C, παρατηρείται μετά τα πρώτα 10 min της προσομοίωσης που η φωτιά είναι πλήρως ανεπτυγμένη.



Σχήμα 6.19: Θερμοκρασία εξωτερικού νότιου τοίχου της κουζίνας, για την εσωτερική και εξωτερική διάταξη του, συναρτήσει του χρόνου (Περίπτωση Γ1 και Γ3).

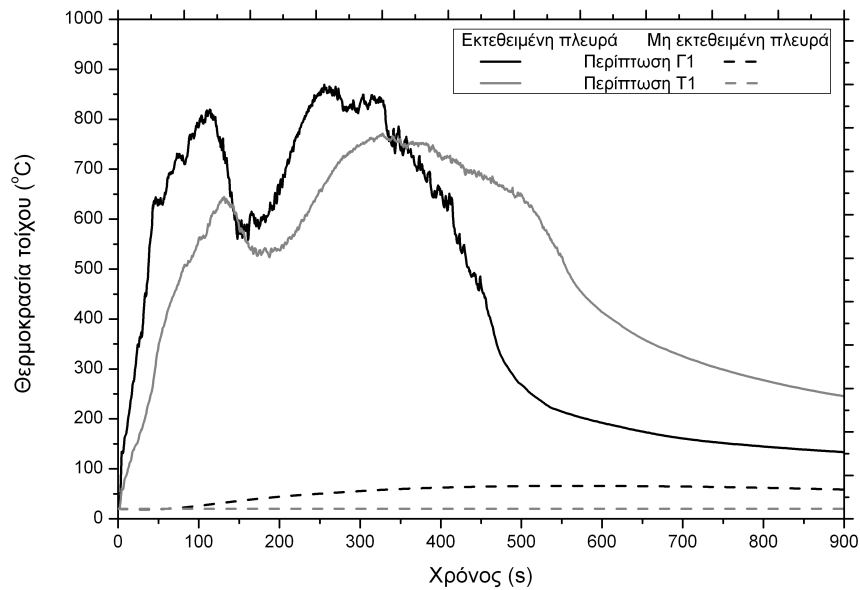


Σχήμα 6.20: Θερμοκρασία αέρα στο μέσο της κουζίνας σε ύψος 1.6m, συναρτήσει του χρόνου (Περίπτωση Γ1 και Γ3).

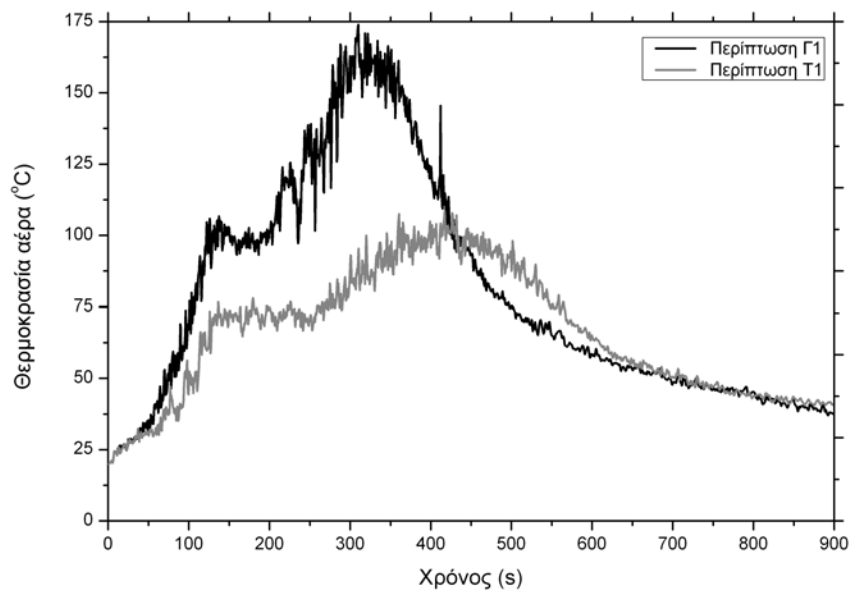


Σχήμα 6.21: Θερμοκρασία εξωτερικού νότιου τοίχου της κουζίνας, για την εσωτερική και εξωτερική διάταξη του, συναρτήσει του χρόνου (Περίπτωση Γ2 και Γ4).

Οι προλέξεις της θερμοκρασίας επιφάνειας των εξωτερικών τοίχων για τις Περιπτώσεις Γ1 και T1 φαίνονται στο Σχήμα 6.22, όπου η πόρτα στον εξωτερικό τοίχο της κουζίνας παραμένει κλειστή. Οι θερμοκρασίες της εκτεθειμένης πλευράς δείχνουν μεγάλο πλεονέκτημα της κατασκευής με τούβλο έναντι της κατασκευής με απλές γυψοσανίδες. Η εκτεθειμένη πλευρά του εξωτερικού τοίχου στην Περίπτωση Γ1 αναπτύσσει θερμοκρασίες μέχρι και 900°C ενώ την αντίστοιχη χρονική στιγμή στην Περίπτωση T1 η θερμοκρασία φτάνει στην μέγιστη τιμή των 750°C . Μάλιστα η εξωτερική πλευρά της εσωτερικής διάταξης του τοίχου στην Περίπτωση Γ1 θερμαίνεται μέχρι τους 65°C] σε αντίθεση με την διάταξη τούβλου στην Περίπτωση T1 όπου η θερμοκρασία της δεν ξεπερνά την ατμοσφαιρική θερμοκρασία των 20°C . Αντίστοιχα συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν και για τις θερμοκρασίες του αέρα στο μέσο της κουζίνας, Σχήμα 6.23, όπου η μέγιστη θερμοκρασία στην Περίπτωση T1 είναι κατά 75°C χαμηλότερη σε σχέση με την Περίπτωση Γ1.



Σχήμα 6.22: Θερμοκρασία εξωτερικού νότιου τοίχου της κουζίνας, για την εσωτερική και εξωτερική διάταξη του, συναρτήσει του χρόνου (Περίπτωση Γ1 και T1).



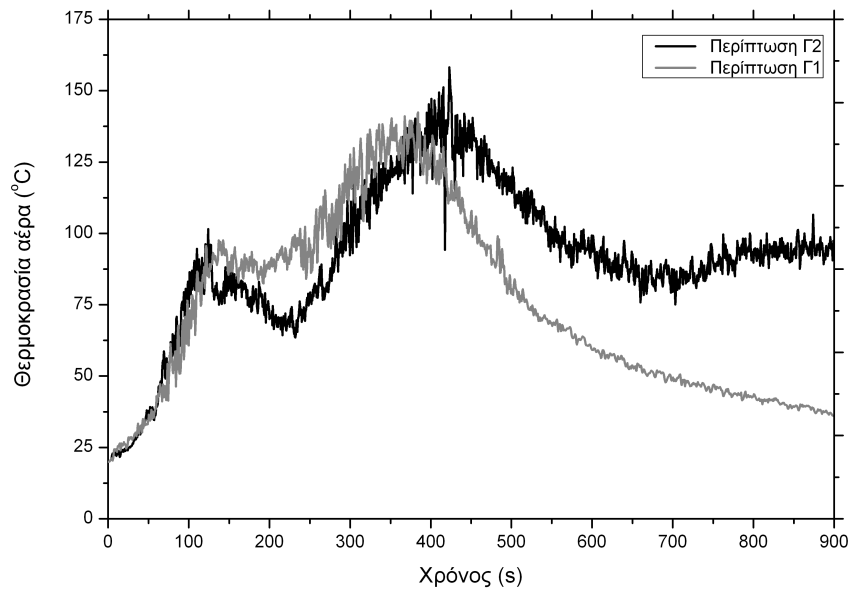
Σχήμα 6.23: Θερμοκρασία αέρα στο μέσο της κουζίνας σε ύψος 1.6m, συναρτήσει του χρόνου (Περίπτωση Γ1 και T1).

6.4.2 Επίδραση του αερισμού

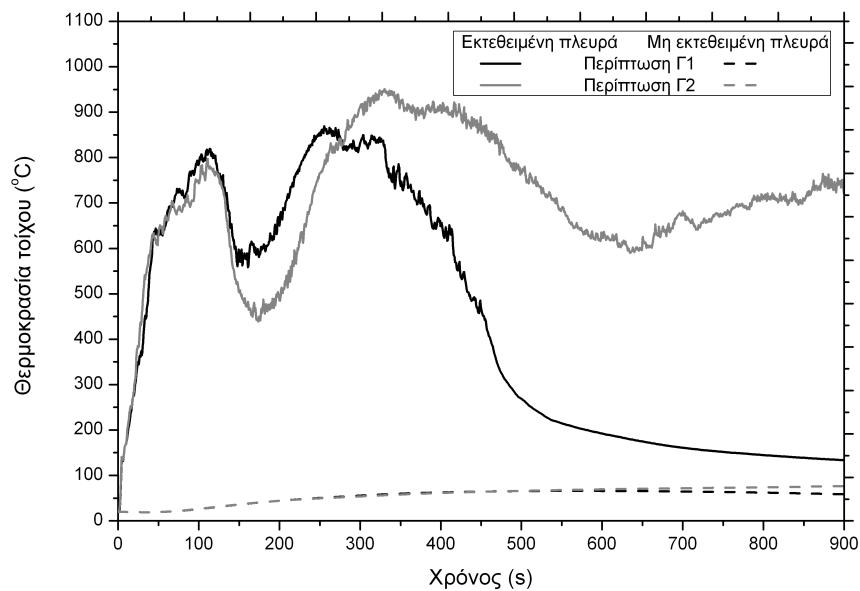
Στα Σχήματα 6.26 και 6.27 παρουσιάζονται οι προλέξεις του ροϊκού πεδίου κοντά στην περιοχή της φωτιάς αλλά και κατά μήκος της κατοικίας, για την Περίπτωση Γ2. Πιο συγκεκριμένα στο Σχήμα 6.26 παρουσιάζεται αναλυτικά η ροή για τα πρώτα 30 s της προσομοίωσης (ανά πέντε δευτερόλεπτα). Στην συνέχεια στο Σχήμα 6.27, παρουσιάζεται το ροϊκό για τα πρώτα 8 min της προσομοίωσης.

Όπως αναμένεται, οι μεγαλύτερες τιμές των ταχυτήτων παρατηρούνται κοντά στην περιοχή της φωτιάς, όπου υπάρχουν έντονα τυρβώδη φαινόμενα εξαιτίας των μεγάλων θερμοκρασιακών διαφορών που δημιουργούνται και είναι κατά μέτρο πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές που παρατηρούνται για την Περίπτωση Γ1. Οι μεγάλες διαφορές στην πυκνότητα αναγκάζουν το μείγμα του αέρα και των προϊόντων της καύσης να ανέλθουν στα ανώτερα στρώματα των δωματίων, με αποτέλεσμα, αφού η πόρτα της κουζίνας παραμένει ανοιχτή, να αυξάνεται η παροχή φρέσκου αέρα προς το εσωτερικό της κατοικίας. Δημιουργείται έτσι ένα έντονο ρεύμα, της τάξης των 2 m/s, με κατεύθυνση το καθιστικό που στην συνέχεια κινείται ανοδικά προς της κεκλιμένη οροφή της κατοικίας. Μετά τα 5 min της προσομοίωσης παρατηρείται επίσης έντονος στροβιλισμός, αντίθετης φοράς, στον διάδρομο του πρώτου ορόφου. Ο στροβιλισμός της ροής λόγω της κεκλιμένης οροφής, προκαλεί ακολούθως μια ανακυκλοφορία των θερμών ρευμάτων στην ζώνη του καθιστικού, με ταχύτητες που κυμαίνονται κοντά στο 1 m/s.

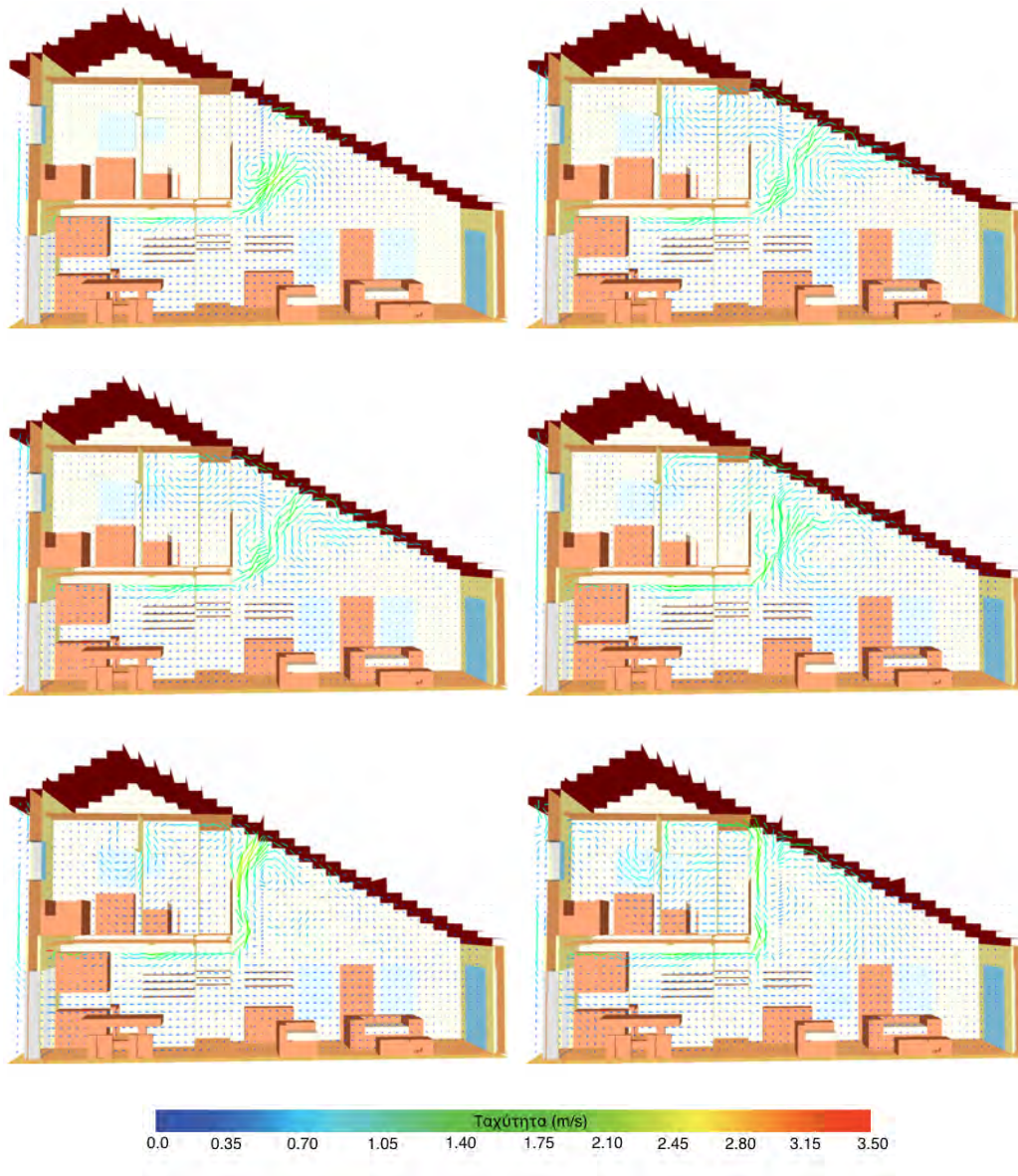
Στο Σχήμα 6.24 φαίνονται οι προλέξεις της θερμοκρασίας αέρα στο μέσον της κουζίνας για τις Περιπτώσεις Γ1 και Γ2 σε ύψος 1.6 m. Γίνονται αισθητές οι χαρακτηριστικές διαφορές μεταξύ των συνθηκών επαρκούς αερισμού του χώρου (Περίπτωση Γ2) και ανεπαρκούς αερισμού του χώρου (Περίπτωση Γ1). Στην Περίπτωση Γ2 αναπτύσσονται μεγαλύτερες θερμοκρασίες και ειδικότερα μετά τα πρώτα 6 min της προσομοίωσης, όπου στις συνθήκες ανεπαρκούς αερισμού η φωτιά δεν έχει αρκετό οξυγόνο για να διατηρηθεί. Η Περίπτωση Γ2 αντιπροσωπεύει ένα "χειρότερο" σενάριο σε σχέση με την Περίπτωση Γ1, καθώς η φωτιά γίνεται πιο έντονη και συνεπώς αναπτύσσονται μεγαλύτερες θερμοκρασίες και ροή θερμότητας. Στο Σχήμα 6.25 φαίνονται οι προλέξεις της θερμοκρασίας των επιφανειών του τοίχου για τις Περιπτώσεις Γ1 και Γ2. Από το 6 min και μετά η προσομοίωση είναι εντελώς διαφορετική με τις θερμοκρασίες του τοίχου να παραμένουν υψηλές μέχρι το τέλος της προσομοίωσης για την Περίπτωση Γ2 ενώ αντίθετα παρατηρείται μείωση της θερμοκρασίας της επιφάνειας του τοίχου για τις αντίστοιχες χρονικές στιγμές για την Περίπτωση Γ1.



Σχήμα 6.24: Θερμοκρασία αέρα στο μέσο της κουζίνας σε ύψος 1.6m, συναρτήσει του χρόνου (Περίπτωση Γ1 και Γ2).



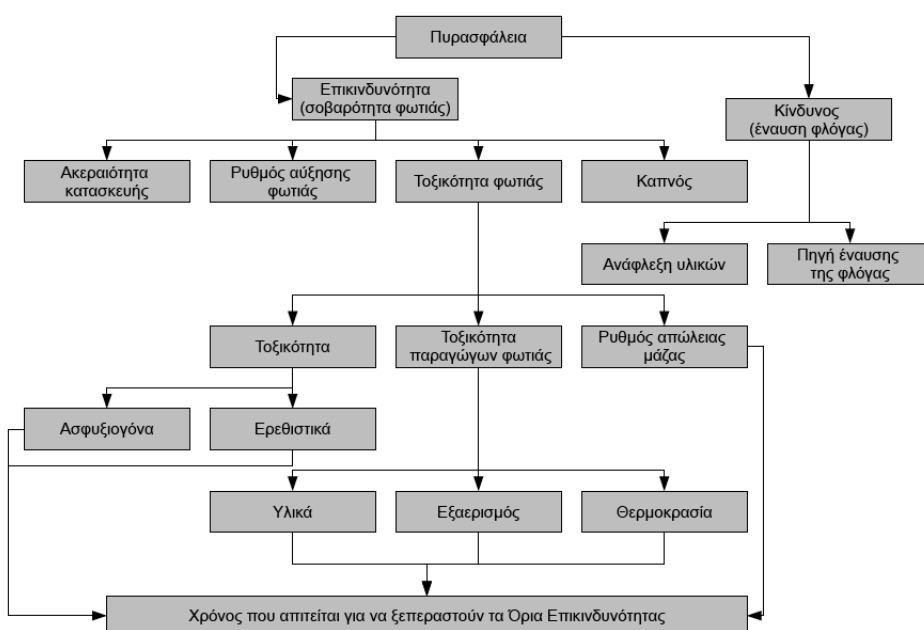
Σχήμα 6.25: Θερμοκρασία εξωτερικού νότιου τοίχου της κουζίνας, για την εσωτερική και εξωτερική διάταξη του, συναρτήσει του χρόνου (Περίπτωση Γ1 και Γ2).



Σχήμα 6.26: Διανυσματική απεικόνιση του ροϊκού πεδίου της Περίπτωσης Γ2, σε μήκος 5.9 m τα πρώτα 30 δευτερόλεπτα της προσομοίωσης (ανά πέντε δευτερόλεπτα).



Σχήμα 6.27: Διανυσματική απεικόνιση του ροϊκού πεδίου της Περίπτωσης Γ2, σε μήκος 5.9 m τα πρώτα 8 λεπτά της προσομοίωσης (ανά ένα λεπτό).

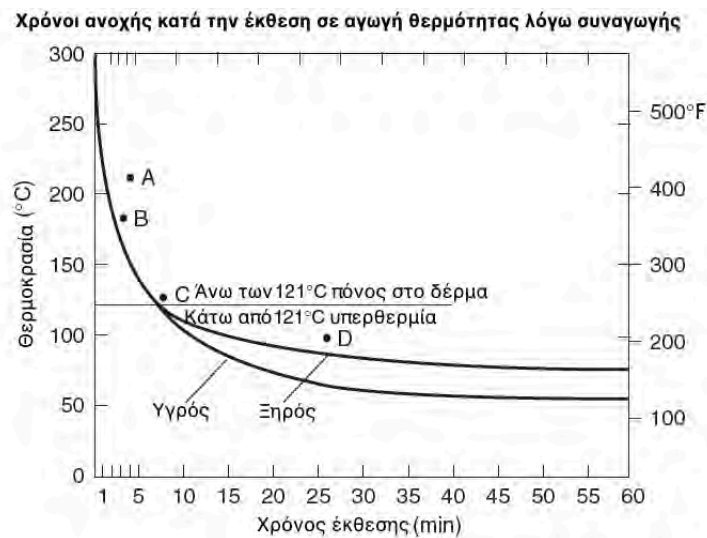


Σχήμα 6.28: Σχηματική απεικόνιση των παραγόντων που εμπλέκονται στην αξιολόγηση του κινδύνου όσον αφορά στην τοξικότητα μιας φωτιάς [Stec and Hull, 2011].

6.4.3 Όρια Επικινδυνότητας

Το μεγαλύτερο ποσοστό των ανθρώπινων απωλειών που προκύπτουν κατά την διάρκεια μιας πυρκαγιάς σχετίζεται με την εισπνοή τοξικών αερίων. Οι απαιτήσεις πυρασφάλειας για ένα κτίριο διαχωρίζονται στην πυραντοχή (η ικανότητα διατήρησης της δομικής ακεραιότητας του κατά την διάρκεια μιας πυρκαγιάς) και στην ίδια την αντίδραση του στην φωτιά (εύφλεκτα υλικά και τοξικότητα). Για την αξιολόγηση της ασφάλειας απαιτείται η αξιολόγηση διαφόρων σεναρίων, η ποσότητα καυσίμου που υπάρχει στον χώρο και οι δυνατότητες διαφυγής που υπάρχουν. Στο Σχήμα 6.28, απεικονίζονται αναλυτικά οι παράγοντες που εμπλέκονται σε αυτήν την αξιολόγηση. Η παραγωγή τοξικών προϊόντων εξαρτάται από την χημική σύνθεση των υλικών που καίγονται αλλά και από τις συνθήκες της ίδιας της φωτιάς.

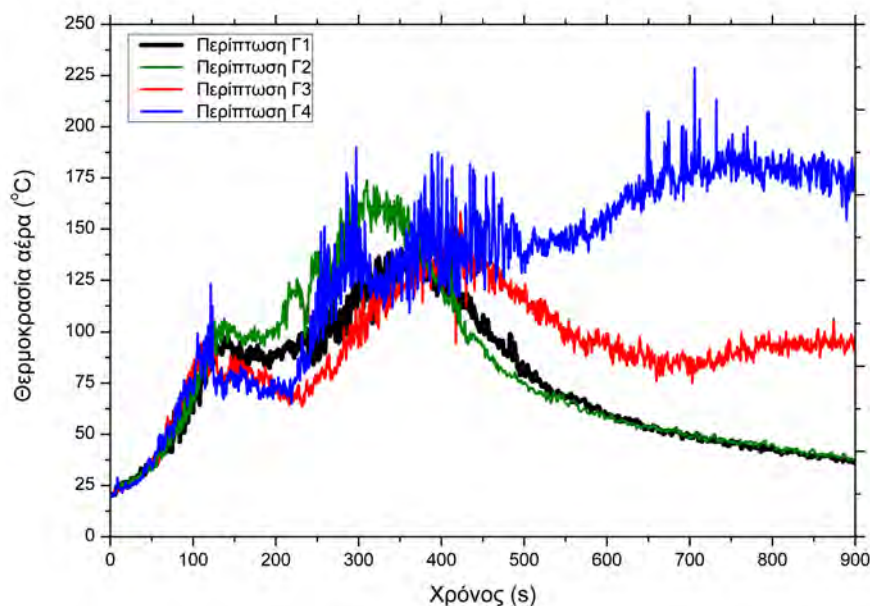
Προκειμένου να αξιολογηθούν σωστά οι παραπάνω συνθήκες πυρασφάλειας, είναι απαραίτητη η διερεύνηση του κατά πόσο υπερβαίνονται τα όρια επικινδυνότητας για τον ανθρώπινο οργανισμό. Ο μέσος άνθρωπος αν εκτεθεί για πάνω από ένα χρονικό διάστημα σε υψηλές θερμοκρασίες, είναι πιθανό να υποφέρει



Σχήμα 6.29: Χρόνοι ανοχής για την έκθεση σε θερμό αέρα, [DiNenno et al., 2002].

από εγκαύματα ή ακόμα και να οδηγηθεί στον θάνατο, κυρίως εξαιτίας της υπερθερμίας. Οι χρόνοι ανοχής σε τέτοιες ακραίες συνθήκες, Πίνακας 6.2, επηρεάζονται κυρίως από την ροή θερμότητας στην οποία εκτίθενται τα άτομα αλλά και από δευτερεύοντες παράγοντες, όπως ο ρουχισμός και η δραστηριότητα τους [DiNenno et al., 2002].

Η απλή περίπτωση της υπερθερμίας αναφέρεται στην έκθεση (για 15 min και πάνω) σε θερμό περιβάλλον που όμως η θερμοκρασία δεν είναι πολύ υψηλή (κάτω των 120°C για ξηρό αέρα και 80°C για κορεσμένο αέρα) με αποτέλεσμα να μην προκαλούνται εγκαύματα αλλά αυξάνεται σταδιακά η θερμοκρασία του ανθρώπινου σώματος. Αν η θερμοκρασία του σώματος ξεπεράσει τους 42.5°C μπορεί να υπάρξουν τραγικές συνέπειες αν δεν υπάρχει ιατρική περίθαλψη μέσα στα επόμενα λίγα λεπτά από την έκθεση. Στο Σχήμα 6.29 φαίνονται οι χρόνοι ανοχής για άτομο το οποίο είναι σε συνθήκες εργασίας και δεν φέρει ρουχισμό, σε συνθήκες χαμηλής ταχύτητας αέρα (0.5 m/s). Σε θερμοκρασίες κάτω των 120°C η ανοχή μειώνεται εξαιτίας της υπερθερμίας, ενώ πάνω από αυτήν την θερμοκρασία παίζει σημαντικό ρόλο ο πόνος λόγω των εγκαυμάτων. Στην περιοχή κάτω των 120°C , ο δροσισμός λόγω της εξάτμισης του ιδρώτα παίζει σημαντικό ρόλο και για αυτό το ποσοστό υγρασίας του αέρα είναι σημαντικός παράγοντας για τους χρόνους ανοχής. Φαίνεται λοιπόν καθαρά, ότι ο ρουχισμός παίζει πολύ σημαντικό ρόλο για τις θερμοκρασίες άνω των 120°C , ενώ για την περιοχή κάτω από αυτήν την θερμοκρασία μπορεί να αποτελέσει ανασταλτικό παράγοντα. Τα σημεία A, B, C και D αναφέρονται σε άτομα που είναι ντυμένα.



Σχήμα 6.30: Θερμοκρασία αέρα στο μέσο της κουζίνας σε ύψος 1.6m, συναρτήσει του χρόνου (Περίπτωση Γ1, Γ2, Γ3, και Γ4).

Οι προλέξεις της θερμοκρασίας του αέρα στο μέσον της κουζίνας σε ύψος 1.6 m για τις Περιπτώσεις Γ1, Γ2, Γ3 και Γ4 απεικονίζονται στο Σχήμα 6.30. Η οριακή θερμοκρασία των 120°C ξεπερνάται μετά το 5 min της προσομοίωσης για τις Περιπτώσεις Γ1, Γ2 και Γ3 όμως μετά το πέρας 1 min για τις Περιπτώσεις Γ1 και Γ2 και αντίστοιχα 2 min για την Περίπτωση Γ3, η θερμοκρασία μειώνεται ξανά κάτω από αυτό το όριο. Δεν ισχύουν όμως τα ίδια για την Περίπτωση Γ4 όπου το θερμοκρασιακό όριο των 120°C ξεπερνάται μετά το 5 min αλλά η θερμοκρασία του χώρου δεν μειώνεται μέχρι και το τέλος του χρόνου προσομοίωσης. Μάλιστα το χρονικό διάστημα που η θερμοκρασία είναι πάνω από τους 120°C ξεπερνάει τα 7 min για την Περίπτωση Γ4, συνεπώς η επικινδυνότητα για τους ενοίκους του κτίσματος είναι ιδιαίτερα αυξημένη σε αυτήν την περίπτωση.

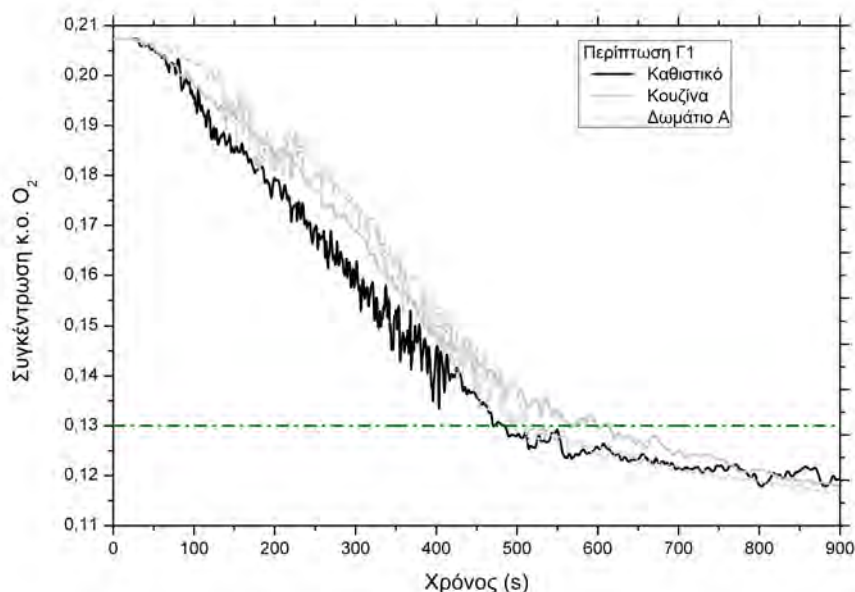
Στον Πίνακα 6.3 φαίνονται τα όρια επικινδυνότητας εξαιτίας τοξικών προϊόντων της καύσης και εξαιτίας χαμηλής συγκέντρωσης οξυγόνου (υποξία) όπως αυτά παρουσιάζονται στο εγχειρίδιο [DiNenno et al., 2002].

Θερμοκρασία ξηρού αέρα (°C)	Χρόνος ανοχής (min)	Σημεία στο Σχήμα 6.29
110	25	D
126	7	C
180	4	B
205	3	A

Πίνακας 6.2: Χρόνοι ανοχής για την έκθεση σε θερμό αέρα, [DiNenno et al., 2002].

Αέριο	Συγκέντρωση κ.ο. για χρόνο έκθεσης 5min	Συγκέντρωση κ.ο. για χρόνο έκθεσης 30min
CO ₂	7-8%	6-7%
CO	6000-8000 ppm	1400-1700 ppm
O ₂	10-13%	<12%

Πίνακας 6.3: Όρια επικινδυνότητας για την έκθεση σε τοξικά προϊόντα της καύσης, [DiNenno et al., 2002].

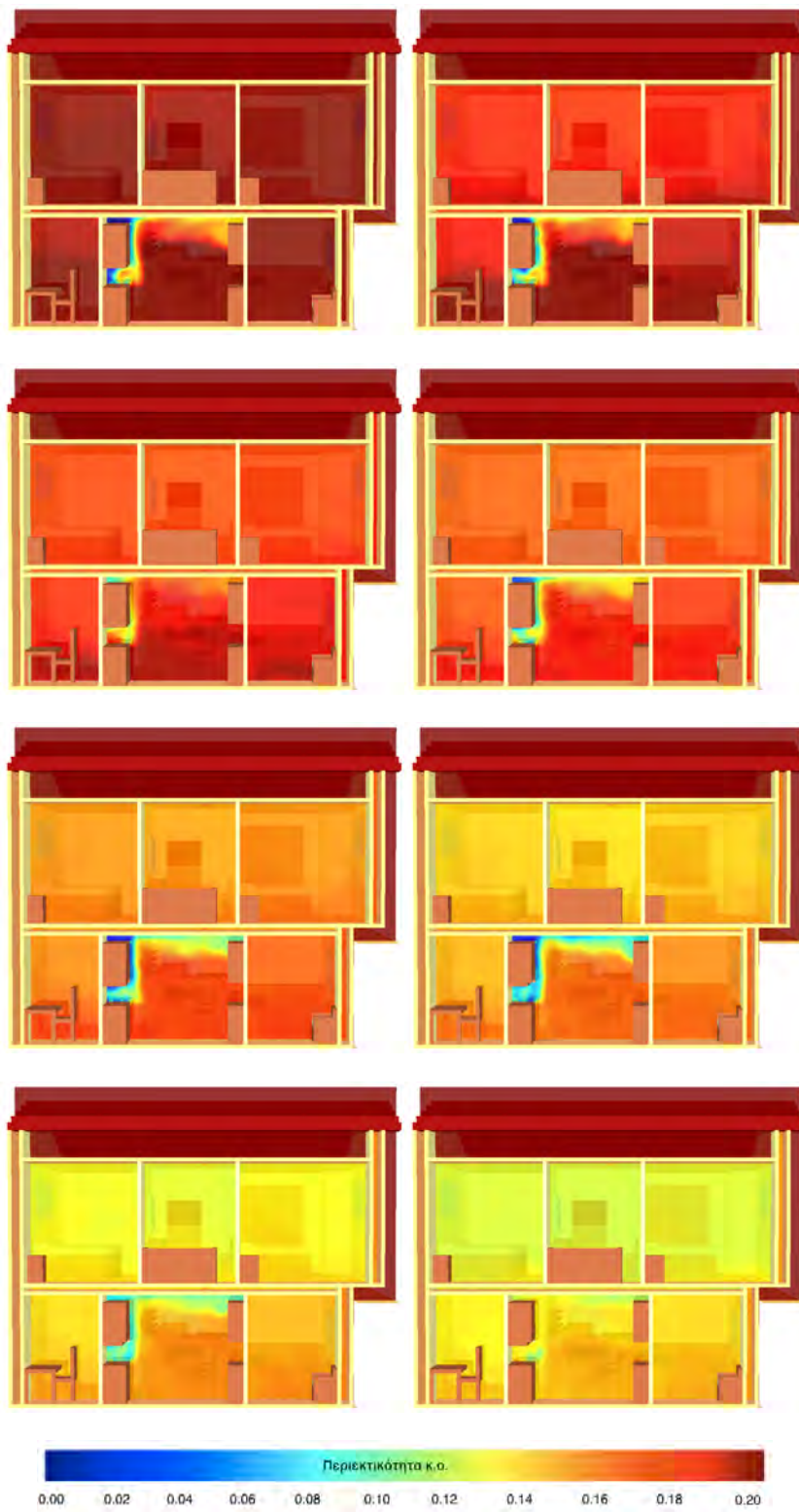


Σχήμα 6.31: Προλέξεις της συγκέντρωσης κ.ο. CO₂ σε τρία δωμάτια της κατοικίας σε ύψος 1.6m (Περίπτωση Γ1).

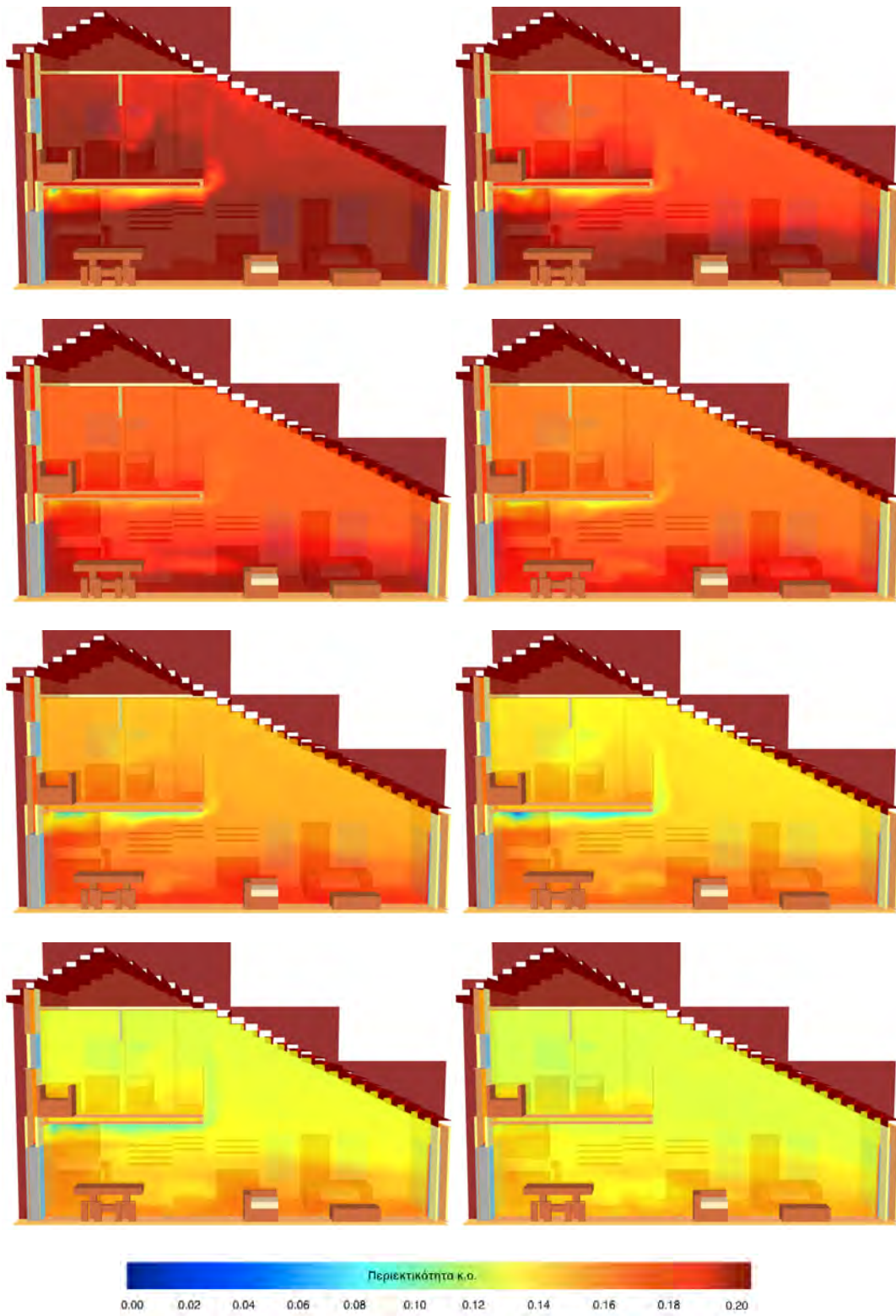
Παρουσίαση Διασποράς CO, CO₂ και O₂

Στην συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά η διασπορά O₂ για την Περίπτωση Γ1. Καθώς όλα τα εξωτερικά ανοίγματα παραμένουν κλειστά (παράθυρα και πόρτες), δεν επιτρέπεται η εισροή φρέσκου αέρα μέσα στο κτίριο. Για αυτό με την πάροδο του χρόνου η ποσότητα O₂ που παραμένει στον χώρο μειώνεται σταδιακά. Μετά τα 6 min της προσομοίωσης η συγκέντρωση O₂ στο εσωτερικό του κτιρίου είναι τόσο χαμηλή που η φωτιά δεν μπορεί πλέον να διατηρηθεί και πλέον χαρακτηρίζεται ως ανεπαρκώς αεριζόμενη. Η χρονική εξέλιξη του φαινομένου απεικονίζεται αναλυτικά κατά μήκος του κτιρίου στο Σχήμα 6.33 και κατά πλάτος στο Σχήμα 6.32. Στο Σχήμα 6.31 παρουσιάζονται οι κ.ο. προλέξεις της συγκέντρωσης O₂ σε τρία διαφορετικά δωμάτια της κατοικίας σε μέσο ύψος αναπνοής 1.6 m. Η Οριακή Συγκέντρωση Οξυγόνου (Limiting Oxygen Concentration, LOC) ορίζεται σαν η συγκέντρωση κάτω από την οποία δεν μπορεί να διατηρηθεί η καύση και η τιμή της ορίζεται περίπου στο 12%. Η τιμή αυτή ισούται περίπου με τον μέσο όρο της συγκέντρωσης του O₂ στο εσωτερικό του κτιρίου μετά τα 6 min της προσομοίωσης. Για συγκέντρωση κάτω από 13% τα συμπτώματα της υποξίας είναι πολύ έντονα και όπως φαίνεται και από το Σχήμα 6.31, μετά το πέρας των πρώτων 8 min οι συνθήκες επιβίωσης μέσα στο κτίριο είναι ιδιαιτέρως

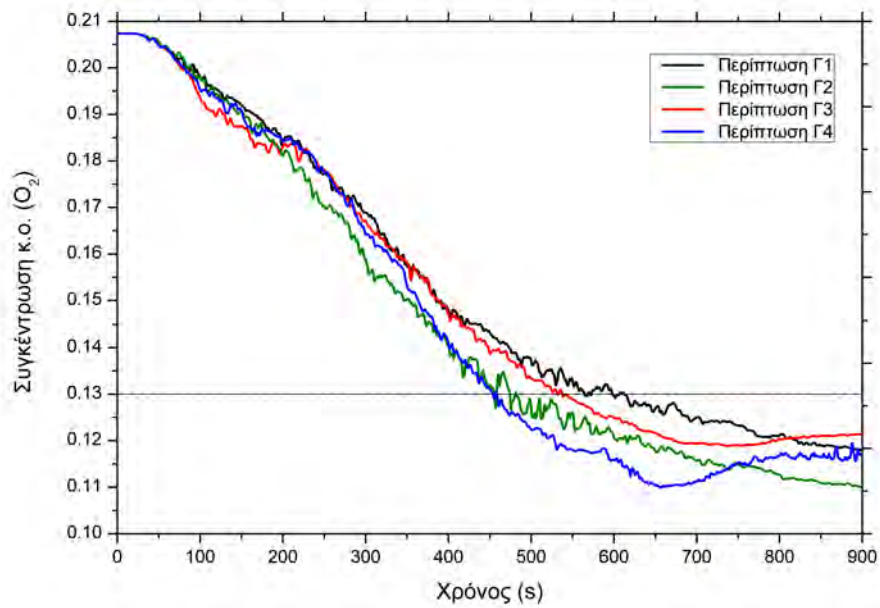
δύσκολες. Στα Σχήματα 6.34 και 6.35 παρουσιάζονται οι προλέξεις της συγκέντρωσης O_2 για κάθε μια από τις Περιπτώσεις Γ1, Γ2, Γ3 και Γ4 για την κουζίνα και το καθιστικό αντίστοιχα. Η συγκέντρωση O_2 στο καθιστικό φτάνει κάτω από το 13% πιο γρήγορα σε σχέση με την κουζίνα, ενώ η Περίπτωση Γ4 φαίνεται να είναι η πιο επικίνδυνη για του ενοίκους του χώρου.



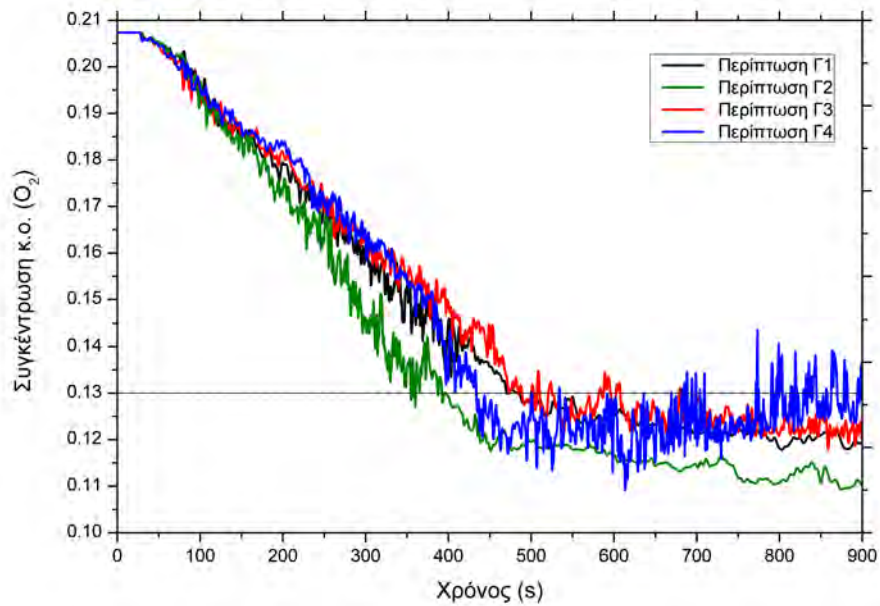
Σχήμα 6.32: Απεικόνιση της περιεκτικότητας O_2 σε πλάτος 11.9 m τα πρώτα 8 λεπτά της προσομοίωσης (ανά ένα λεπτό), Περίπτωση Γ1.



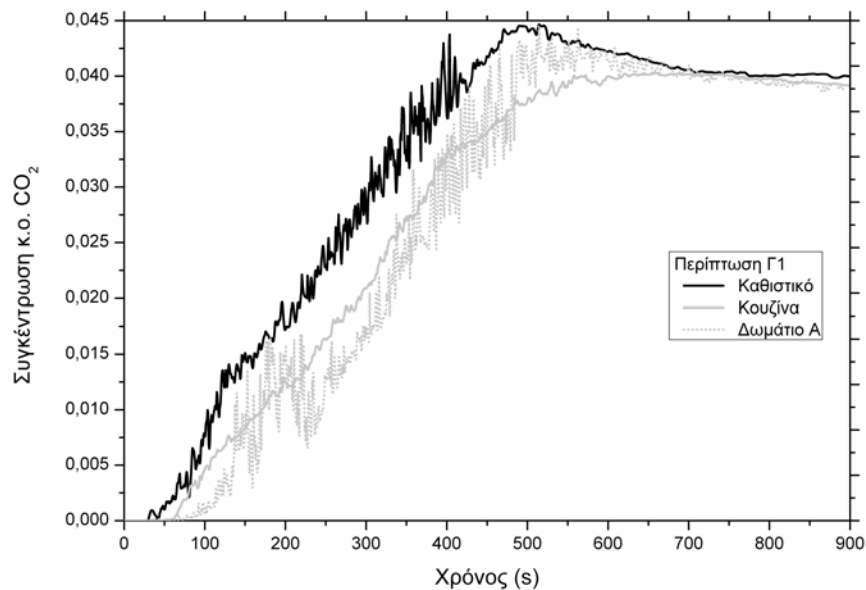
Σχήμα 6.33: Απεικόνιση της περιεκτικότητας O_2 σε μήκος 5.9 m τα πρώτα 8 λεπτά της προσομοίωσης (ανά ένα λεπτό), Περίπτωση Γ1.



Σχήμα 6.34: Προλέξεις της συγκέντρωσης κ.ο. O₂ στην κουζίνα της κατοικίας σε ύψος 1.6m (Περίπτωση Γ1, Γ2, Γ3 και Γ4).

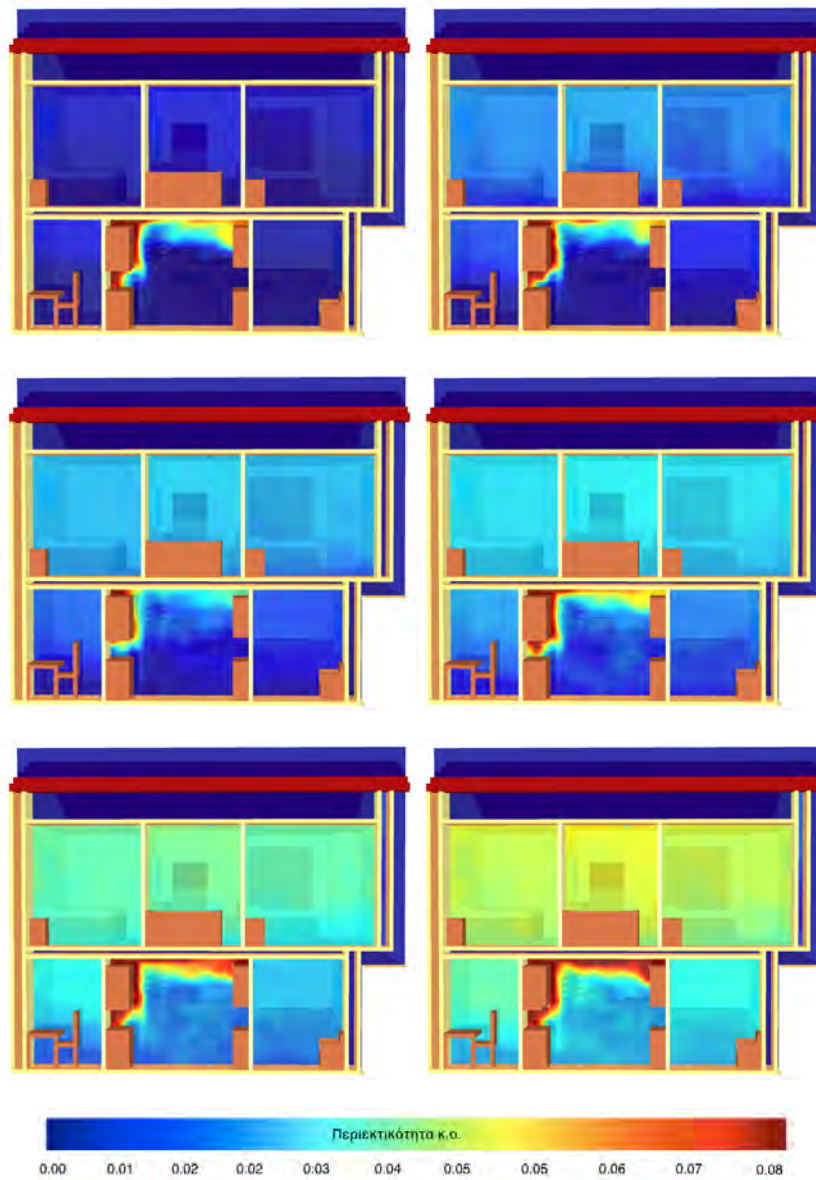


Σχήμα 6.35: Προλέξεις της συγκέντρωσης κ.ο. O₂ στο καθιστικό της κατοικίας σε ύψος 1.6m (Περίπτωση Γ1, Γ2, Γ3 και Γ4).

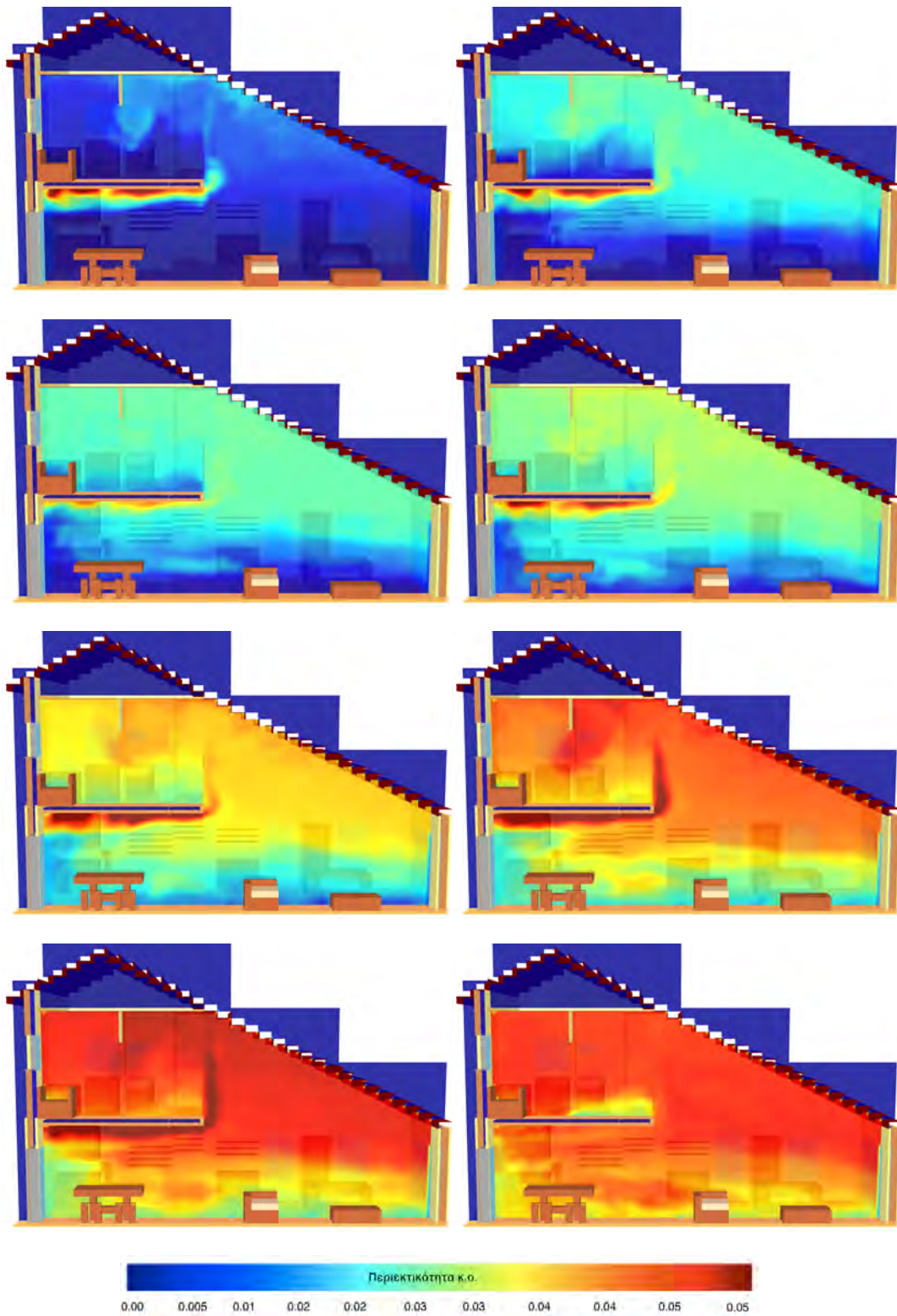


Σχήμα 6.36: Προλέξεις της συγκέντρωσης κ.ο. CO₂ σε τρία δωμάτια της κατοικίας σε ύψος 1.6m (Περίπτωση Γ1).

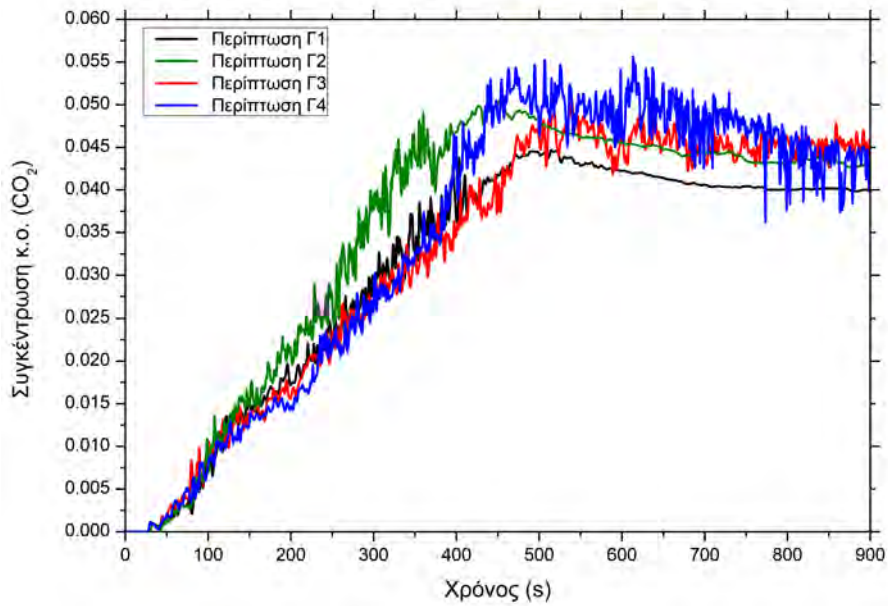
Στην συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά η διασπορά CO₂ για την Περίπτωση Γ1. Με την πάροδο του χρόνου η ποσότητα CO₂ που δημιουργείται στον χώρο αυξάνεται σταδιακά. Μετά το 6 min της προσομοίωσης η συγκέντρωση CO₂ στο εσωτερικό του κτιρίου παραμένει σταθερή 4%, δηλαδή το όριο επικινδυνότητας (7%) δεν ξεπερνάται σε καμία περίπτωση. Η χρονική εξέλιξη του φαινομένου απεικονίζεται αναλυτικά κατά μήκος του κτιρίου στο Σχήμα 6.38 και κατά πλάτος στο Σχήμα 6.37. Στο Σχήμα 6.36 παρουσιάζονται οι κ.ο. προλέξεις της συγκέντρωσης CO₂ σε τρία διαφορετικά δωμάτια της κατοικίας σε μέσο ύψος αναπνοή 1.6 m. Η συγκέντρωση CO₂ αυξάνεται ιδιαιτέρως στην οροφή της κουζίνας μετά τα πρώτα 4 min της προσομοίωσης, ενώ φαίνεται καθαρά ότι στα δωμάτια του πρώτου ορόφου η συγκέντρωση CO₂ είναι πιο αυξημένη. Αυτό συμβαίνει καθώς τα θερμά ρεύματα των καυσαερίων της καύσης έχουν μικρότερη πυκνότητα και άρα κατευθύνονται προς τα ανώτερα στρώματα του κτιρίου και στην συνέχεια αρχίζουν να γεμίζουν σταδιακά το κτίριο. Στο τέλος της προσομοίωσης η συγκέντρωση CO₂ σε όλο το κτίριο είναι ιδιαιτέρως αυξημένη (κοντά στο 5%). Στα Σχήματα 6.39 και 6.40 παρουσιάζονται οι προλέξεις της συγκέντρωσης CO₂ για κάθε μια από τις Περιπτώσεις Γ1, Γ2, Γ3 και Γ4 για την κουζίνα και το καθιστικό αντίστοιχα. Η συγκέντρωση CO₂ στο καθιστικό φτάνει μέχρι και το 5.5% στην Περίπτωση Γ4, η οποία φαίνεται να είναι η πιο επικίνδυνη για του ενοίκου του χώρου.



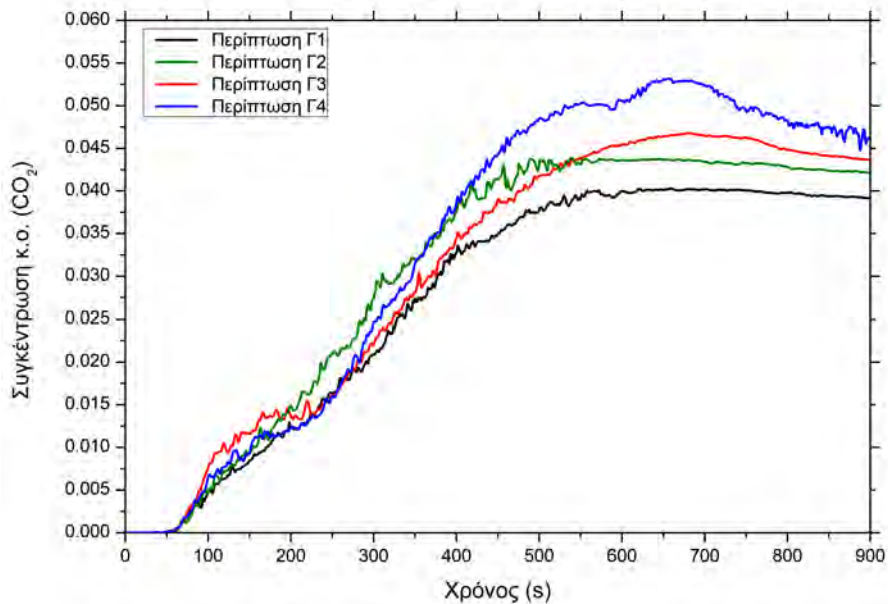
Σχήμα 6.37: Απεικόνιση της περιεκτικότητας CO₂ σε πλάτος 11.9 m τα πρώτα 6 λεπτά της προσομοίωσης (ανά ένα λεπτό), Περίπτωση Γ1.



Σχήμα 6.38: Απεικόνιση της περιεκτικότητας CO₂ σε μήκος 5.9 m τα πρώτα 8 λεπτά της προσομίωσης (ανά ένα λεπτό), Περίπτωση Γ1.



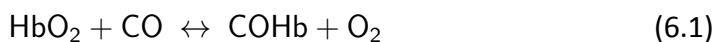
Σχήμα 6.39: Προλέξεις της συγκέντρωσης κ.ο. CO₂ στην κουζίνα της κατοικίας σε ύψος 1.6m (Περίπτωση Γ1, Γ2, Γ3 και Γ4).



Σχήμα 6.40: Προλέξεις της συγκέντρωσης κ.ο. CO₂ στο καθιστικό της κατοικίας σε ύψος 1.6m (Περίπτωση Γ1, Γ2, Γ3 και Γ4).

Επιδράσεις του CO στον ανθρώπινο οργανισμό

Το CO διαλύεται στο αίμα, όπου μπορεί να ενωθεί με την αιμοσφαιρίνη, την μυογλοβίνη και το κυτταροχρωματικό σύστημα των ιστών. Οι πιο σοβαρές επιπτώσεις που παρατηρούνται, είναι όταν συνενώνεται με την αιμοσφαιρίνη (Hb), η οποία είναι μια σιδηρούχος πρωτεΐνη, υπεύθυνη για την μεταφορά του οξυγόνου στον οργανισμό (εναλλακτικό όνομα: αιμογλοβίνη). Το CO απορροφάται μέσω των πνευμόνων και δεσμεύεται από την αιμοσφαιρίνη σχηματίζοντας την καρβοξυαιμοσφαιρίνη (COHb). Αυτή είναι μία αντιστρεπτή αντίδραση όπως φαίνεται στην Εξίσωση (6.1).

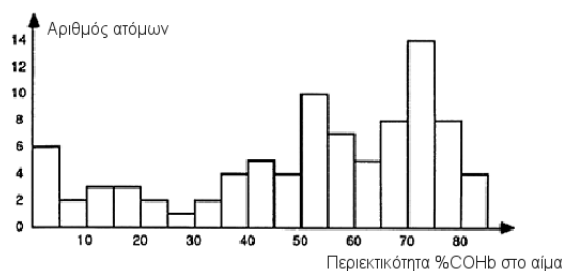


Η έλξη που δημιουργεί το CO στην αιμοσφαιρίνη είναι κατά 250 φορές μεγαλύτερη από αυτήν που δημιουργεί το οξυγόνο. Συνεπώς, υπάρχει μείωση στην ικανότητα της αιμοσφαιρίνης να μεταφέρει οξυγόνο, που μεταφράζεται σε συνεχώς μειούμενη μεταφορά οξυγόνου στους ιστούς του σώματος.

Αυτή η κυτταρική υποξία, σε πρώιμο στάδιο δημιουργεί πονοκεφάλους, ζαλάδες, ναυτία, τάση για εμετό, δυσκολία αναπνοής, δυσκολία όρασης και ακοής, πόνους στο στήθος, μυϊκούς πόνους και κράμπες. Σταδιακά, όμως, μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια συνείδησης, μυοκαρδιοπάθεια, ισχαιμία, υπόταση, καρδιακή ανεπάρκεια και αρρυθμίες [Bateman, 2007]. Η πρώτη φορά που παρατηρήθηκε η σύνδεση αυτών των συμπτωμάτων με το CO, ήταν στα μέσα του 19ου αιώνα από τον Claude Bernard [Prockop and Chichkova, 2007].

Τα διάφορα όργανα του οργανισμού επηρεάζονται σε διαφορετικό βαθμό από την δηλητηρίαση με CO. Η εγκεφαλική λειτουργία επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό. Σοβαρή τοξική δηλητηρίαση μπορεί να προκαλέσει μόνιμες παθολογικές μεταβολές, παρόμοιες με αυτές που δημιουργούν και άλλες μορφές ασφυξίας. Επίσης, ιδιαίτερα ευάλωτη είναι η καρδιά, εξαιτίας της υψηλής κατανάλωσης οξυγόνου που απαιτείται για την εύρυθμη λειτουργία της [Astrup, 1972], για αυτό και ασθενείς με καρδιακή ανεπάρκεια διατρέχουν μεγαλύτερο κίνδυνο. Άλλα όργανα που μπορεί να επηρεαστούν, είναι το δέρμα (εμφάνιση φουσκαλών), οι πνεύμονες (πνευμονικό οίδημα) και οι μύες που συγκρατούν τον σκελετό (κατάρρευση μυϊκών ιστών και μαζικός θάνατός τους).

Από το 1933, το Εθνικό Ινστιτούτο Προστασίας κατά της Φωτιάς στην Αμερική (National Fire Protection Association, NFPA) έχει δημοσιεύσει άρθρα, στα οποία γίνεται σαφής αναφορά στο γεγονός ότι η κύρια αιτία θανάτου, κατά την διάρκεια μιας πυρκαγιάς, είναι η τοξικότητα των προϊόντων της καύσης (π.χ. αιθάλη).



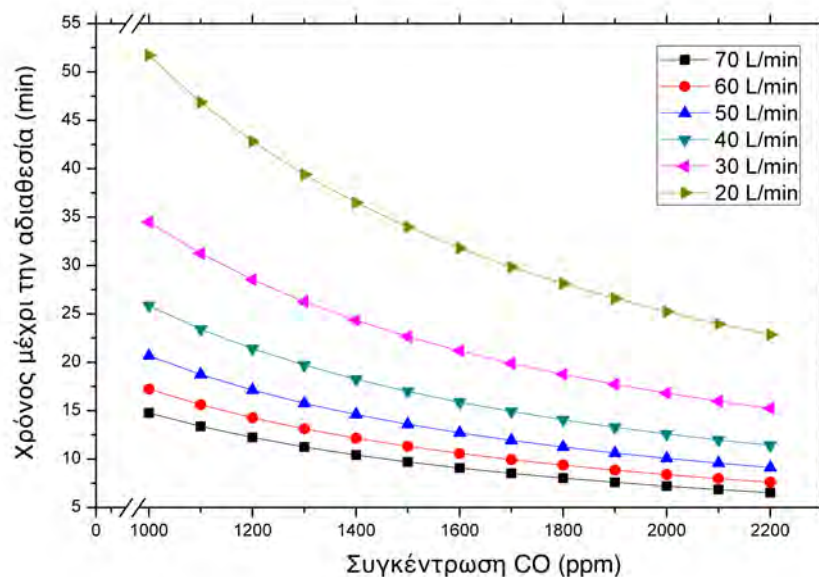
Σχήμα 6.41: Περιεκτικότητα COHb στο αίμα 87 θυμάτων πυρκαγιάς.

Η σύνθεση του καπνού, κατά την διάρκεια μιας φωτιάς, δεν είναι ενιαία, αλλά εξαρτάται από το εκάστοτε καύσιμο. Παρ' όλα αυτά, ανεξάρτητα από αυτό το γεγονός, η αιθάλη περιέχει πάντα δύο τύπους τοξικών αερίων, αυτά που προκαλούν ασφυξία και αυτά που προκαλούν ερεθισμό. Το CO είναι από τα πιο σημαντικά αέρια που δημιουργούν ασφυξία. Η αιθάλη από φωτιές, πάντα περιέχει οξειδία του άνθρακα και νερό και αφού όλα τα οργανικά υλικά αποδίδουν κατά την καύση τους CO, διοξείδιο του άνθρακα και νερό κατά την διάρκεια της καύσης. Τα υπόλοιπα συστατικά του καπνού, αν και μπορεί να είναι πιο τοξικά από το CO, δεν είναι τόσο επιβλαβή όσο αυτό μιας και βρίσκονται σε μικρότερες περιεκτικότητες. Άλλα αέρια του καπνού όπως το διοξείδιο του άνθρακα και το νερό, αν και βρίσκονται σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις δεν είναι τόσο επιβλαβή, καθώς δεν είναι τόσο τοξικά. Η τοξική επικινδυνότητα του κάθε αερίου, μπορεί να οριστεί σαν το πηλίκο της συγκέντρωσής του, προς την συγκέντρωση που απαιτείται προκειμένου να προκληθούν σοβαρές σωματικές βλάβες ή και θάνατος [Hirschler et al., 2006].

Το Ινστιτούτο Ιατρικής του Όσλο διεξήγαγε μια έρευνα η οποία παρουσίαζε το ποσοστό COHb στο αίμα θυμάτων πυρκαγιάς και τα αποτελέσματά της φαίνονται στο Σχήμα 6.41. Η παρακάτω εξίσωση περιγράφει την συνάρτηση μεταξύ της καρβοξυαιμοσφαιρίνης στο αίμα, της συγκέντρωσης CO, του εισπνεόμενου όγκου αέρα και του χρόνου έκθεσης, Εξίσωση (6.2):

$$COHb = (3.317 \cdot 10^{05}) \cdot (CO)^{1.036} RMV \cdot (t) \quad (6.2)$$

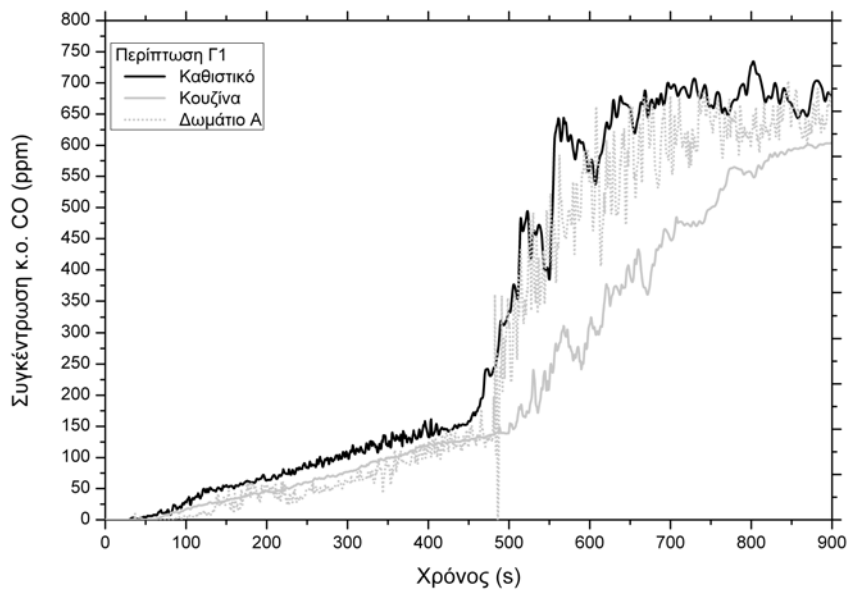
όπου COHb το ποσοστό καρβοξυαιμοσφαιρίνης (%), CO η συγκέντρωση CO (ppm), RMV ο ρυθμός αναπνοής (respiration rate, L/min) και t ο χρόνος έκθεσης (min), [Stewart et al., 1973]. Για την συγκεκριμένη μελέτη υπολογίστηκε ο χρόνος μέχρι να καταρριφθούν τα όρια επικινδυνότητα (μέχρι το ποσοστό COHb στο αίμα να φτάσει το 44%) για αυξημένο ρυθμό αναπνοής (που αντιστοιχεί στην



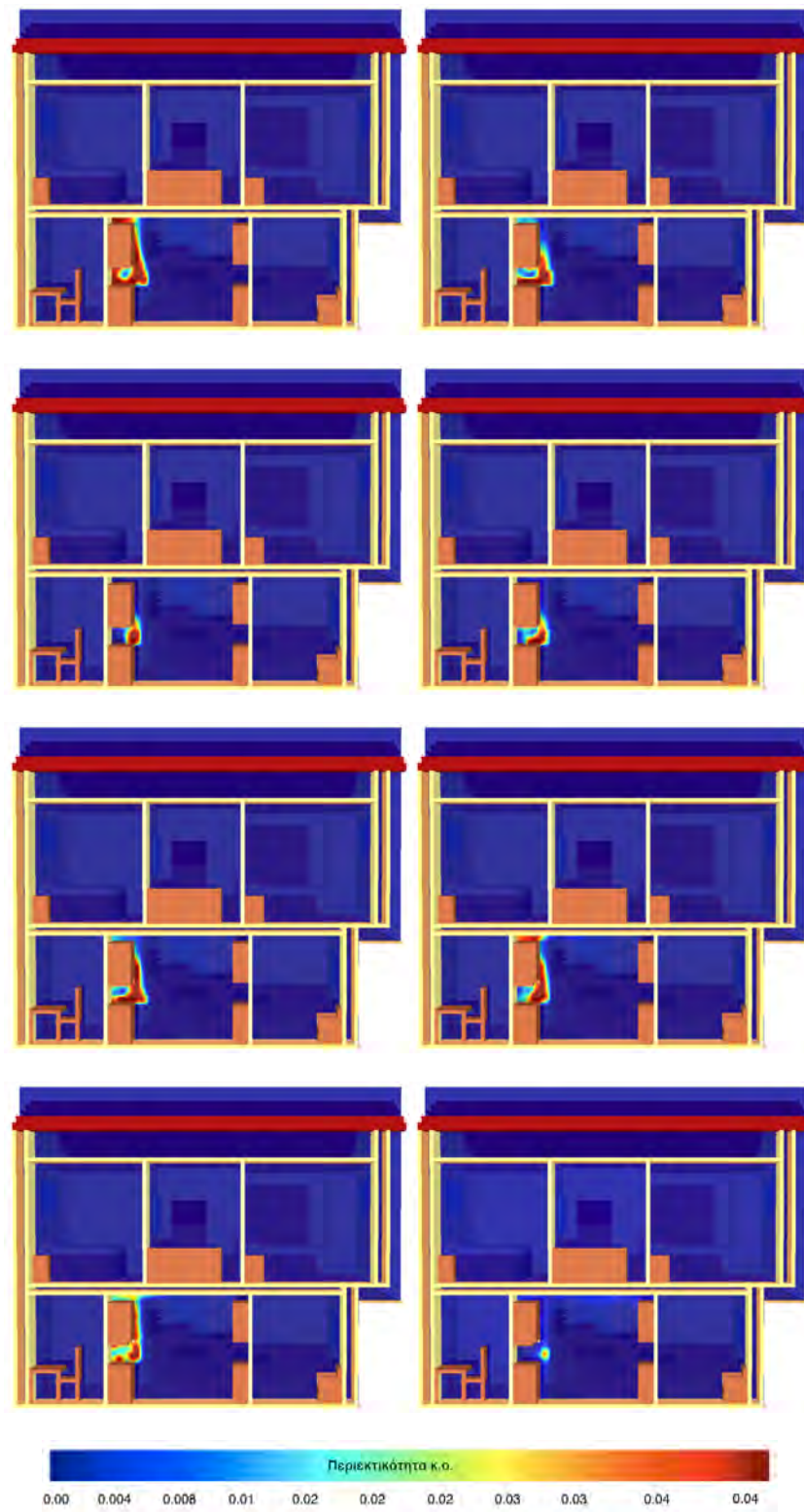
Σχήμα 6.42: Εξάρτηση του χρόνου μέχρι την αδιαθεσία συναρτήσει του ρυθμού αναπνοής.

περίπτωση βαριάς άσκησης), για μια μέση συγκέντρωση CO, στα 11.26 min.

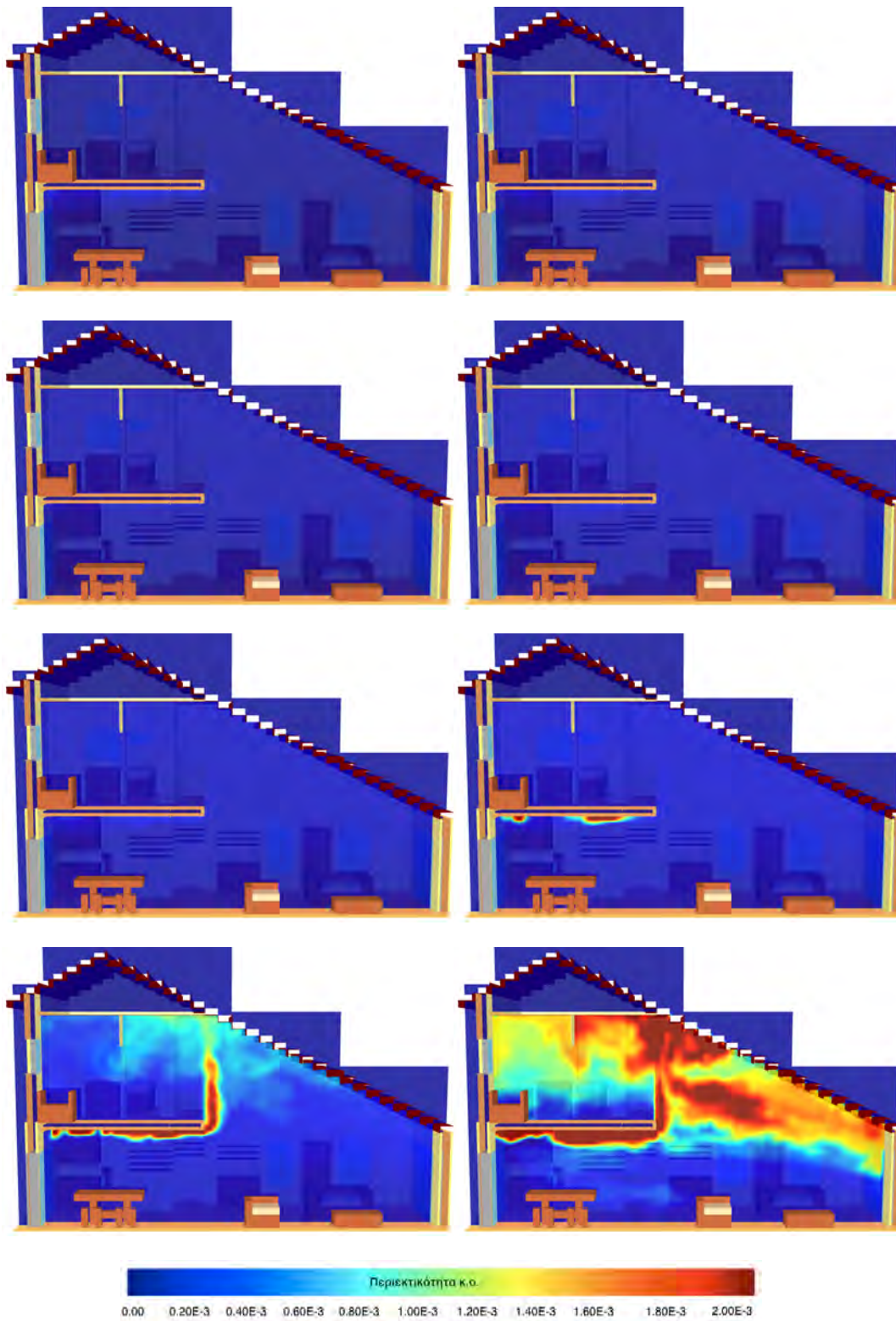
Στην συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά η διασπορά CO για την Περίπτωση Γ1. Με την πάροδο του χρόνου η ποσότητα CO που δημιουργείται στον χώρο αυξάνεται σταδιακά. Η χρονική εξέλιξη του φαινομένου απεικονίζεται αναλυτικά κατά μήκος του κτιρίου στο Σχήμα 6.45 και κατά πλάτος στο Σχήμα 6.44. Στο Σχήμα 6.43 παρουσιάζονται οι κ.ο. προλέξεις της συγκέντρωσης CO σε τρία διαφορετικά δωμάτια της κατοικίας σε μέσο ύψος αναπνοή 1.6 m. Η συγκέντρωση CO αυξάνεται ιδιαιτέρως στην οροφή της κουζίνας μετά τα πρώτα 4 min της προσομοίωσης, ενώ φαίνεται καθαρά ότι στα δωμάτια του πρώτου ορόφου η συγκέντρωση CO είναι αυξάνεται σταδιακά μετά τα πρώτα 5 min της προσομοίωσης. Αυτό συμβαίνει καθώς τα θερμά ρεύματα των καυσαερίων της καύσης έχουν μικρότερη πυκνότητα και άρα κατευθύνονται προς τα ανώτερα στρώματα του κτιρίου και στην συνέχεια αρχίζουν να γεμίζουν σταδιακά το κτίριο. Στο τέλος της προσομοίωσης η συγκέντρωση CO σε όλο το κτίριο είναι ιδιαιτέρως αυξημένη (κοντά στα 2000 ppm). Στα Σχήματα 6.46 και 6.47 παρουσιάζονται οι προλέξεις της συγκέντρωσης CO για κάθε μια από τις Περιπτώσεις Γ1, Γ2, Γ3 και Γ4 για την κουζίνα και το καθιστικό αντίστοιχα. Η συγκέντρωση CO στο καθιστικό φτάνει μέχρι και τα 1800 ppm στην Περίπτωση Γ4 ενώ στην κουζίνα η μέγιστη τιμή που εμφανίζεται είναι 1350 ppm.



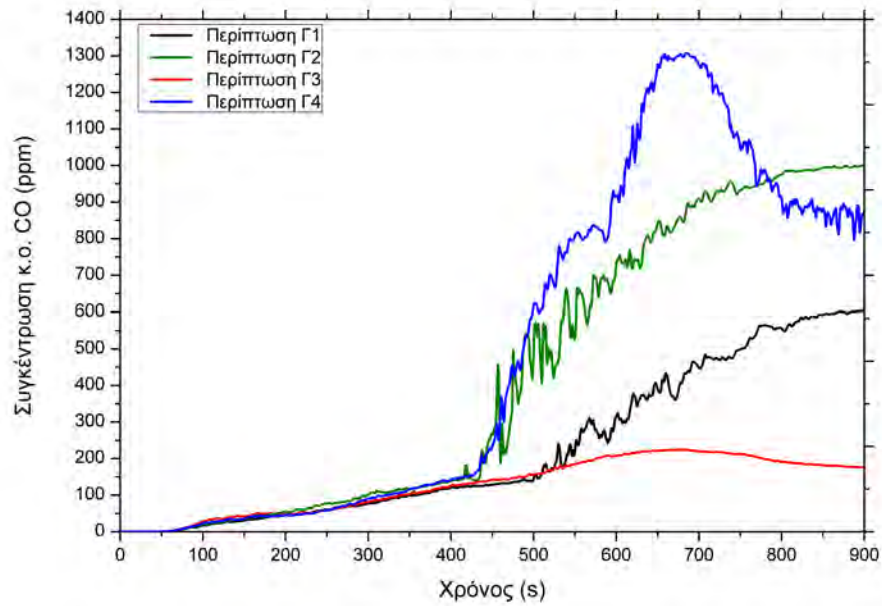
Σχήμα 6.43: Προλέξεις της συγκέντρωσης κ.ο. CO σε τρία δωμάτια της κατοικίας σε ύψος 1.6m (Περίπτωση Γ1).



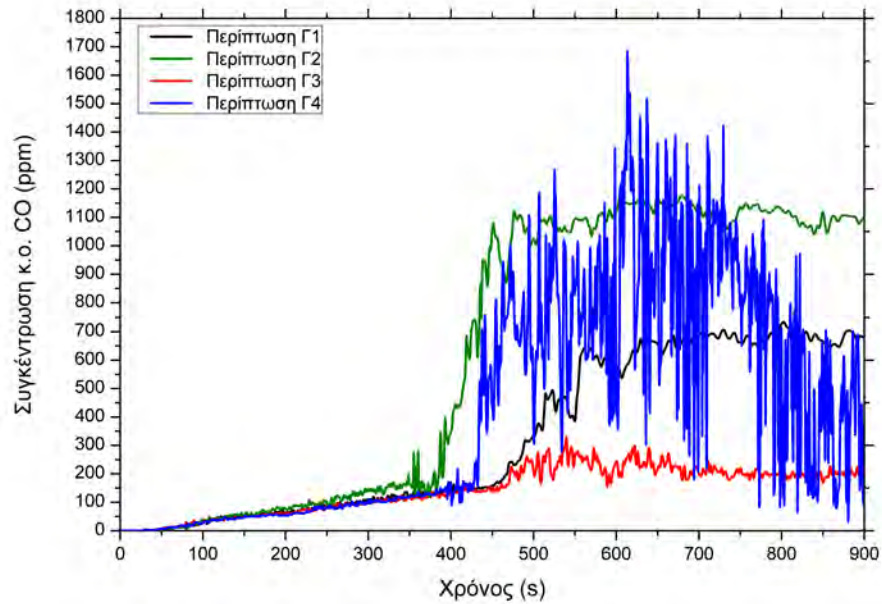
Σχήμα 6.44: Απεικόνιση της περιεκτικότητας CO σε πλάτος 11.9 m τα πρώτα 8 λεπτά της προσομοίωσης (ανά ένα λεπτό), Περίπτωση Γ1.



Σχήμα 6.45: Απεικόνιση της περιεκτικότητας CO σε μήκος 5.9 m τα πρώτα 8 λεπτά της προσομοίωσης (ανά ένα λεπτό), Περίπτωση Γ1.



Σχήμα 6.46: Προλέξεις της συγκέντρωσης κ.ο. CO στην κουζίνα της κατοικίας σε ύψος 1.6m (Περίπτωση Γ1, Γ2, Γ3 και Γ4).



Σχήμα 6.47: Προλέξεις της συγκέντρωσης κ.ο. CO στο καθιστικό της κατοικίας σε ύψος 1.6m (Περίπτωση Γ1, Γ2, Γ3 και Γ4).

6.5 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Για την αξιολόγηση του πρότυπου κτιρίου στην Αμφιλοχία σε συνθήκες φωτιάς πραγματοποιήθηκε λεπτομερής μελέτη CFD χρησιμοποιώντας τον κώδικα FDS. Η προσομοίωση επέτρεψε την αξιολόγηση του αναπτυσσόμενου ροϊκού πεδίου, τα χαρακτηριστικά εξάπλωσης της φωτιάς και την θερμική συμπεριφορά των δομικών στοιχείων του κτιρίου. Η πρότυπη κατοικία θεωρήθηκε πλήρως εξοπλισμένο με χρήση κυρίως ξύλινων επίπλων, σύμφωνα με μια τυπική διάταξη κατοικίας. Στις προσομοιώσεις συμπεριλήφθηκαν λεπτομερείς θερμό-χημικές ιδιότητες για την πυρόλυση του ξύλου και την καύση. Προκειμένου δε να περιγραφεί με ακρίβεια η θερμική συμπεριφορά των δομικών στοιχείων και των υλικών των στοιχείων της επίπλωσης, χρησιμοποιήθηκαν οι πραγματικές θερμό-φυσικές τους ιδιότητες. Μοντελοποιήθηκαν λεπτομερώς η διαδικασίες αφύγρανσης της γυψοσανίδας και στην περίπτωση της γυψοσανίδας με PCM η εξάτμιση της παραφίνης.

Προκειμένου να υπάρχει μια ολοκληρωμένη εικόνα του πεδίου του εσωτερικού του κτιρίου κατά την διάρκεια μιας πυρκαγιάς χρησιμοποιήθηκαν οι χρονικά μεταβαλλόμενες προλέξεις διαφόρων παραμέτρων όπως της ταχύτητας των αερίων, της θερμοκρασίας των στερεών τοιχωμάτων και των αερίων και της συγκέντρωσης τοξικών αερίων. Οι προλέξεις της θερμοκρασίας των αερίων χρησιμοποιήθηκαν επιπλέον για την οπτικοποίηση του ροϊκού πεδίου και για τον υπολογισμό της ροής θερμότητας στην οποία εκτίθεται το κάθε δομικό στοιχείο της κατασκευής. Οι προλέξεις της θερμοκρασίας των επιφανειών των τοίχων χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της πυραντίστασης των υλικών που συμπεριελήφθησαν στην προσομοίωση. Τέλος, οι θερμοκρασίες του αέρα και η συγκέντρωση των CO, CO₂ και O₂ συντέλεσαν στον καθορισμό του αποδεκτού επιπέδου κινδύνου για τους ενοίκους του κτιρίου.

Ολοκληρώθηκε μια σειρά από παραμετρικές μελέτες σε σχέση με τον αερισμό του κτιρίου αλλά και την χρήση διαφορετικών τεχνικών δόμησης προκειμένου να διερευνηθεί περαιτέρω η επίδραση των διαφορετικών αυτών παραμέτρων στα χαρακτηριστικά της φωτιάς. Η παραμετρική μελέτη για τον αερισμό του κτιρίου διερευνήθηκε με την σύγκριση δύο διαφορετικών σεναρίων. Στο πρώτο όλα τα ανοίγματα (πόρτες και παράθυρα) του κτιρίου προς το εξωτερικό περιβάλλον θεωρήθηκαν κλειστά ενώ στο δεύτερο η εξώπορτα στην κουζίνα θεωρήθηκε ανοιχτή, επιτρέποντας έτσι την εισαγωγή φρέσκου αέρα στον χώρο της φωτιάς. Η παραμετρική μελέτη που αφορούσε στις τεχνικές δόμησης ολοκληρώθηκε για τρία διαφορετικά σενάρια. Στο πρώτο χρησιμοποιήθηκε σαν κύριο υλικό δόμησης η απλή γυψοσανίδα, στο δεύτερο γυψοσανίδα με ενσωματωμένο PCM και στο τρίτο χρησιμοποιήθηκε μια συμβατική κατασκευή από τούβλο και ενισχυ-

μένο τσιμεντένιο σκελετό.

Οι προλέξεις κατέδειξαν την δημιουργία συνθηκών τυπικά στρωματοποιημένου ροϊκού και θερμικού πεδίου μέσα στο κτίριο. Η θερμοκρασία των αερίων και η συγκέντρωση των CO και CO₂ αυξάνονται συναρτήσει του ύψους του κτιρίου λόγω της ύπαρξης θερμικά υποκινούμενης τυρβώδους ροής προς τα πάνω. Οι θερμοκρασίες της επιφάνειας των τοίχων αυξάνονται σταδιακά όμως επειδή οι τοίχοι αυτοί είναι μη φέροντες δεν υπάρχει εμφανής κίνδυνος κατάρρευσης του κτιρίου.

Οι διαφορές που εντοπίστηκαν στις διαφορετικές τεχνικές δόμησης οδηγούν στο συμπέρασμα ότι στην περίπτωση που χρησιμοποιήθηκε σαν βασικό δομικό υλικό η γυψοσανίδα με ενσωματωμένο PCM οι θερμοκρασίες που αναπτύχθηκαν ήταν μεγαλύτερες λόγω της εξάτμισης της παραφίνης που λειτούργησε σαν επιπλέον πηγή καυσίμου. Η τυπική κατασκευή με τούβλο ήταν αυτή που είχε την καλύτερη απόκριση στην φωτιά καθώς σε αυτήν την περίπτωση παρατηρήθηκαν οι χαμηλότερες θερμοκρασίες τόσο στον αέρα όσο και στην επιφάνεια των τοίχων.

Όταν δεν υπάρχουν ανοίγματα προς το ατμοσφαιρικό περιβάλλον η φωτιά είναι ανεπαρκώς αεριζόμενη με αποτέλεσμα μετά το 6 min της προσομοίωσης να οδηγείται στην σβέση της λόγω της μη επάρκειας στην συγκέντρωση O₂ στο δωμάτιο της κουζίνας. Στην αντίθετη περίπτωση όπου υπάρχει ανοιχτή μια πόρτα στην κουζίνα που επιτρέπει την είσοδο φρέσκου αέρα στον χώρο, η φωτιά είναι επαρκώς αεριζόμενη και οι αντιδράσεις της καύσης μπορούν και διατηρούνται μέχρι και το τέλος της προσομοίωσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη υψηλότερων θερμοκρασιών και συγκέντρωσης τοξικών προϊόντων από την καύση.

Τα όρια επικινδυνότητας ξεπεράστηκαν μετά τα 10 min της προσομοίωσης για την συγκέντρωση O₂ και μετά τα 11 min για την συγκέντρωση CO, ενώ για το CO₂ δεν ξεπεράστηκαν σε καμία χρονική στιγμή.

Έτσι λοιπόν συνολικά, η χρήση CFD προσομοίωσης επέτρεψε την αξιόπιστη εκτίμηση της έναυσης, εξάπλωσης και υποβάθμισης των χαρακτηριστικών της φωτιάς όπως επίσης και την αντίδραση των χρησιμοποιούμενων δομικών υλικών όταν αυτά εκτίθενται σε εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες. Επιπλέον πραγματοποιήθηκε και μια εκτεταμένη αξιολόγηση των κριτηρίων επικινδυνότητας για τους ενοίκους του κτιρίου.

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα

Ο κώδικας FDS είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την πρόλεξη της έναυσης, ανάπτυξης και υποβάθμισης φαινομένων φωτιάς σε μια πληθώρα εφαρμογών. Οι εφαρμογές μπορεί να ποικίλουν ανάλογα με την γεωμετρική τους πολυπλοκότητα αλλά και με τα διαφορετικά σενάρια καύσης που μπορεί να χρησιμοποιηθούν. Οι αναπτυσσόμενες συνθήκες του ροϊκού και θερμοκρασιακού πεδίου μπορούν να περιγραφούν ρεαλιστικά καθώς δίνεται στον χρήστη η δυνατότητα λεπτομερούς εισαγωγής δεδομένων για την πλειονότητα των παραμέτρων που απαιτούνται για την περιγραφή του φαινομένου της φωτιάς. Αν και αυτό είναι μια εξαιρετικά σύνθετη υπόθεση, η υπολογιστική της προσομοίωση μπορεί να γίνει με αρκετά καλή ακρίβεια, όπως φαίνεται και από την σύγκριση των προλέξεων με τα πειραματικά δεδομένα στο Κεφάλαιο 4. Για να χρησιμοποιηθούν όμως σωστά αυτές οι παράμετροι απαιτείται σε βάθος εξοικείωση με τον κώδικα αλλά και εμπειρία προκειμένου να αποτυπωθεί με ακρίβεια η πραγματικότητα. Υπάρχει ιδιαίτερη δυσκολία στην συλλογή αξιόπιστων στοιχείων που αφορούν την θερμική συμπεριφορά των διαφόρων υλικών σε υψηλές θερμοκρασίες, καθώς και άλλων χαρακτηριστικών που αφορούν την εξέλιξη της φωτιάς (όπως για παράδειγμα η παραγωγή αιθάλης). Δεν υπάρχουν πάντα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα που να περιγράφουν την μεταβολή της πυκνότητας, ειδικής θερμοχωρητικότητας και του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας και αυτός είναι ένας ανασταλτικός παράγοντας που μπορεί να συντελέσει στην μη σωστή τοποθέτηση ενός προβλήματος.

Η αντίδραση των διαφόρων υλικών στην φωτιά αποτελεί έναν τομέα ιδιαίτερου ενδιαφέροντος καθώς τα νέα κατασκευαστικά υλικά απαιτείται να ελεγχθούν όσον αφορά την πυραντοχή τους πριν χρησιμοποιηθούν στις κατασκευές. Μέχρι τώρα έχουν ολοκληρωθεί μελέτες για την αντίδραση διαφόρων υλικών κυ-

ρίως σε απλές γεωμετρίες ενός ή δύο δωματίων. Όμως με την ραγδαία ανάπτυξη των μοντέλων πεδίου και την αύξηση της υπολογιστικής ισχύος δίνεται σταδιακά η δυνατότητα πιο εκτεταμένων μελετών σε πιο πολύπλοκες γεωμετρίες, για τις οποίες μέχρι πριν μερικά χρόνια το υπολογιστικό κόστος θα ήταν απαγορευτικό. Η ανάλυση των συνθηκών που αναπτύσσονται κατά την διάρκεια μιας πυρκαγιάς είναι εξαιρετικής σημασίας τόσο για την ασφάλεια των ενοίκων όσο και προκαταρκτικά για τον ασφαλή σχεδιασμό του κτιρίου ή του χώρου αυτού.

Οι διαφορές που εντοπίστηκαν στις τεχνικές δόμησης οδηγούν στο συμπέρασμα ότι στην περίπτωση που χρησιμοποιήθηκε σαν βασικό δομικό υλικό η γυψοσανίδα με ενσωματωμένο PCM οι θερμοκρασίες που αναπτύχθηκαν ήταν μεγαλύτερες λόγω της παραφίνης που λειτούργησε σαν επιπλέον καύσιμο για την φωτιά. Η τυπική κατασκευή με τούβλο ήταν αυτή που είχε την καλύτερη απόκριση στην φωτιά καθώς σε αυτήν την περίπτωση παρατηρήθηκαν οι χαμηλότερες θερμοκρασίες τόσο στον αέρα όσο και στην επιφάνεια των τοίχων.

Η χρήση της γυψοσανίδας αποτελεί καινοτομία καθώς μελλοντικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ευρέως ως βασικό υλικό δόμησης λόγω της καλής αισθητικής της, της εύκολης εφαρμογής της και της μηχανικής σταθερότητάς της. Εστιάζοντας στην πυραντοχή, όταν η γυψοσανίδα εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες λόγω φωτιάς, το μοριακά δεσμευμένο στην κρυσταλλική της δομή νερό αλλά και η ελεύθερη υγρασία της, απελευθερώνονται και μεταφέρονται διαμέσου αυτής, απορροφώντας ενέργεια και άρα μειώνοντας την μέση θερμοκρασία του τοίχου. Η γυψοσανίδα έχει την ικανότητα να επιβραδύνει την μεταφορά θερμότητας διαμέσου των τοίχων και των δαπέδων, λόγω της ενδόθερμης αφύγρανσης που συμβαίνει σε υψηλές θερμοκρασίες. Ως αποτέλεσμα βελτιώνεται η συνολική συμπεριφορά του κτιρίου στην φωτιά. Προκειμένου να επιτευχθεί μια καλύτερη ενεργειακή συμπεριφορά του κτιρίου αναπτύσσονται νέοι τύποι γυψοσανίδας με ενσωματωμένα PCM. Οι περισσότερες μελέτες αποδεικνύουν ότι η εφαρμογή τους σε καλά μονωμένα κτίρια μπορεί να συντελέσει στην εξοικονόμηση μέχρι και 25% στις ενεργειακές απαιτήσεις θέρμανσης και ψύξης. Δυστυχώς, τα σήμερα χρησιμοποιούμενα PCM αποτελούνται κυρίως από παραφίνες οι οποίες όταν εκτεθούν σε υψηλές θερμοκρασίες εξατμίζονται λειτουργώντας έτσι σαν επιπλέον πηγή καυσίμου στον χώρο της φωτιάς. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί είτε με τον εγκλωβισμό τους σε μικροκάψουλες με αυξημένη πυραντοχή, είτε με την ανάπτυξη νέων υλικών όπως ένυδρα άλατα.

Για μια πιο αποδοτική μελλοντική χρήση του κώδικα FDS θα ήταν χρήσιμη η ενσωμάτωση μιας υπορουτίνας που θα περιέγραφε λεπτομερώς την μεταφορά θερμότητας μέσα σε μια γυψοσανίδα. Η συμπεριφορά των γυάλινων επιφανειών ενός κτιρίου (θραύση υαλοπινάκων) σε υψηλές θερμοκρασίες είναι πολύ σημαντική προκειμένου να συμπεριληφθούν στην μελέτη φαινόμενα αερισμού

που ενδεχομένως θα συμβάλλουν στην εξέλιξη της πυρκαγιάς μέσα στο κτίριο. Θα ήταν επίσης αρκετά χρήσιμη η μελέτη και εναλλακτικών σεναρίων φωτιάς, μιας και στην παρούσα μελέτη έγινε αναφορά μόνο σε φωτιά που ξεκίνησε στον χώρο της κουζίνας.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο συνδυασμός του κώδικα FDS με κώδικες προσομοίωσης σεναρίων εκκένωσης (όπως για παράδειγμα ο κώδικας EVAC που αναπτύσσεται επίσης από το NIST), το οποίο μπορεί να έχει εφαρμογή σε προσομοιώσεις εκκένωσης πυρκαγιάς σε αεροσκάφη, σήραγγες, βαγόνια τρένων, νυχτερινά κέντρα, πολυκαταστήματα και πλήθος άλλων περιπτώσεων. Επίσης μπορούν να μελετηθούν εναλλακτικά συστήματα πυρόσβεσης.

Βιβλιογραφία

- Astm e1355-04, standard guide for evaluating the predictive capabilities of deterministic fire models. 2004a.
- Standard guide for evaluating the predictive capabilities of deterministic fire models. 2004b.
- M. Ahrens, J. Hall, J. Comoletti, S. Gamache, and A. LeBeau. A profile of fire in the united states 1992-2001. Technical Report 13th Edition, U.S. Fire Administration, U.S.A., 2004.
- M. Ahrens, J. Hall, J. Comoletti, S. Gamache, and A. LeBeau. Behavioral mitigation of cooking fires through strategies based in statistical analysis. Technical Report EME-2005-CA-0343, U.S. Fire Administration, U.S.A., 2007.
- C. N. Ang and Y. C. Wang. Effect of moisture transfer on specific heat of gypsum plasterboard at high temperatures. *Construction and Building Materials*, 23: 675–686, 2009.
- Anon. Fire spread in multi-storey building with glazed curtain wall facades. Loss Prevention Council, Borehamwood, England (LPR 11: 1999), 1999.
- P. Astrup. Some physiological and pathological effects of moderate carbon monoxide exposure. *British Medical Journal*, 4:447–452, 1972.
- D. Baroudi. *Thermal models for fire safety - Calculation of flame spread on surfaces and heating of structures*. PhD thesis, November 2007.
- D. N. Bateman. Carbon monoxide. *Elsevier Medicine*, 35:604–605, 2007.
- K. A. Beall. 13th meeting on the ujnrc panel on fire research and safety. Technical Report NIST 6030, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, U.S.A., 1997.
- T. Beer. Percolation theory and fire spread. *Combustion Science and Theory*, 72: 297–304, 1990.

- A. Belmiloudi and G. Le Meur. Mathematical and numerical analysis of dehydration of gypsum plasterboards exposed to fire. *Applied Mathematics and Computation*, 163:1023–1041, 2005.
- N. Benichou and A. M. Sultan. Fire resistance behaviour of lightweight-framed construction. Structures in Fire, Proceedings of the 3rd International Workshop, Ottawa, Ontario., 2004.
- N. Benichou and A. M. Sultan. Thermal properties of lightweight-framed construction components at elevated temperatures. *Fire and Materials*, 29: 165–179, 2005.
- R. A. Bryant, T. J. Ohlemiller, E. L. Johnson, A. Hamins, B. S. Grove, W. F. Guthrie, A. Maranghides, and G. W. Mulholland. The nist 3 megawatt quantitative heat release rate facility - description and procedure. Technical Report NIST 7052, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, U.S.A., 2004.
- P. Clancy. A parametric study on the time-to-failure of wood framed walls in fire. *Fire Technology*, 38:243–269, 2002.
- L. Y. Cooper and G. P. Forney. Consolidated compartment fire model computer code application ccfm.vents. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland., 2005.
- P. J. DiNenno, D. Drysdale, C. L. Beyler, W. D. Walton, R. L. P. Cruster, J.R. Hall, and J.M. Watts. *S.F.P.E. Handbook for Fire Engineering, 3rd Edition*. National Fire Protection Association, U.S.A., 2002.
- D. Drysdale. *An introduction to fire dynamics*. John Wiley and Sons Ltd, Sussex, England, 1999.
- C. Effing, S. Güths, and E. O. Alarcon. Evaluation of the thermal comfort of ceramic floor tiles. *Materials Research*, 10:301–307, 2007.
- I. Y. Elbeyli and S. Piskin. Kinetic study of the thermal dehydration of borogypsum. *Journal of Hazardous Materials*, B116:111–117, 2004.
- Z. Fu and G. Hadjisophocleous. A two-zone fire growth and smoke movement model for multi-compartment buildings. *Fire Safety Journal*, 34:257–285, 2000.
- E. R. Galea, J. Ewer, M. K. Patel, S. Taylor, B. Knight, and M. Petridis. Smartfire: An intelligent cfd based fire model. *Journal of Fire Protection Engineering*, 10: 13–27, 1999.

- A. F. Ghoniem, I. Lakkis, and M. Soteriou. Numerical simulation of the dynamics of large fire plumes and the phenomenon of puffing. 26th International Symposium on Combustion, Naples, Italy, 1996.
- V. Gravemeier. Current methods for the numerical simulation of turbulent flows. *CADFEM Infoplaner*, 1:44–45, 2007.
- S. Gschwander, P. Schossig, and H. M. Henning. Micro-encapsulated paraffin in phase-change slurries. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 89:307–315, 2005.
- J. R. Hall. Home-cooking fire patterns and trends. Technical report, National Fire Protection Association, 1 Batterymarch Park, Quincy, MA 02169-7471, 2006.
- R. Hasib, R. Kumar, Shashi, and S. Kumar. Simulation of an experimental compartment fire by cfd. *Building and Environment*, 42:3149–3160, 2007.
- S. K. Hassani, T. J. Shields, and G. W. Silcock. An experimental investigation into the behaviour of glazing in enclosure fire. *Journal of Applied Fire Science*, 4: 303–312, 1995.
- J. Hietaniemi. Probabilistic simulation of glass fracture and fallout in fire. Project R4SU00232, TT Working Papers 41, 2005.
- J. Hietaniemi, T. Hakkarainen, J. Huhta, T. Korhonen, J. Siiskonen, and J. Vaari. Ontelotilojen paloturvallisuus: Ontelopalojen tutkimus kokeellisesti ja mallintamalla”, (fire safety of cavity spaces: Experimental and simulation study of fires in cavities.). Technical report, VTT Tiedotteita, Research Notes 2128, 2002.
- O. J. Hinze. *Turbulence*. MacGraw Hills, New York, 1959.
- M. M. Hirschler, M. S. Debanne, and B. J. Larsen. *Carbon monoxide and human lethality: fire and non-fire studies*. Elsevier Applied Science, London and New York, 2006.
- S. Hostikka and K. B. McGrattan. Large eddy simulation of wood combustion. Proceedings of the 9th International Interflam Conference, 17-19 September, Edinburgh, U.K., 2004.
- F. X. Hu, T. T. Lie, G. M. Polomark, and W. J. MacLaurin. Thermal properties of building materials at elevated temperatures, internal report no 643. Technical report, National Research Council of Canada, 1200 Montreal Road, M-58 Ottawa, Ontario, K1A 0R6 Canada, 1993.

- C. H. Hwang, A. Lock, M. Bundy, E. Johnsson, and G. H. Ko. Studies on fire characteristics in over- and under ventilated full-scale compartments. *Journal of Fire Sciences*, 28:460–486, 2010.
- K. Jonson and M. Ashby. *Material and Design, the art and science of material selection in product design*. Butterworth-Heinemann, U.K., 2002.
- V. T. Karman and G. I. Taylor. Some remarks on the statistical theory of turbulence. Proceedings of the 5th International Congress in Applied Mechanics, Cambridge, MA, 347, 1938.
- M. J. Karter. Fire losses in the united states during 2008. Technical Report No FLX08, National Fire Protection Association, Fire Analysis and Research Division, Quincy, MA, U.S.A., 2009.
- A. Kashef, N. Benichou, I. Reid, and G. Hadjisophocleous. Fierasystem theory report: Fire spread model (fspm). Technical Report No 134, National Research Council of Canada, Institute for Research in Construction, 2003.
- J. Kosny, D. W. Yarbrough, T. Riazzi, D. Leuthold, J. B. Smith, and M. Bianchi. Development and testing of ignition resistant microencapsulated phase change material. Proceedings of the 11th International Congress on thermal energy storage (Effstock), Stockholm, Sweden, 2009.
- C. Lai, R. H. Chenb, and C. Y. Linb. Heat transfer and thermal storage behaviour of gypsum boards incorporating micro-encapsulated pcm. *Energy and Buildings*, 42:1259—1266, 2010.
- M. Lesieur, O. Metais, and P. Comte. *Large-Eddy Simulation of turbulence*. Cambridge University Press, The Edinburgh Building, Cambridge CB2 2RU, UK, 2005.
- A. Lock, M. Bundy, E. L. Johnsson, A. Hamins, G. H. Ko, C. Hwang, P. Fuss, and R. Harris. Experimental study of the effects of fuel type, fuel distribution and vent size on full-scale underventilated compartment fires in an iso 9705 room. Special Publication 1603, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD., 2008.
- M. Luo and V. Beck. The fire environment in a multi-room building-comparison of predicted and experimental results. *Fire Safety Journal*, 23:413–438, 1994.
- K. MacGrattan, S. Hostikka, J. Floyd, H. Baum, R. Rehm, W. Mell, and R. MacDermott. Fire dynamics simulation (version 5) technical reference guide. NIST Special Publication 1018-5, 2007.

- D. Madrzykowski and A. Hamins. Residential kitchen fire suppression research needs: Workshop proceedings. Technical Report Special Publication 1066, National Institute of Standards and Technology, Washington, U.S.A., 2007.
- L. S. Manzello, G. R. Gann, R. S. Kukuck, and B. D. Lenhert. Influence of gypsum board type on real fire performance of partition assemblies. *Fire and Materials*, 31:425–442, 2007.
- A. Matala. Estimation of solid phase reaction parameters for fire simulation. Master's thesis, 2008.
- R. J. McDermott, G. P. Forney, K. McGrattan, and W. E. Mell. V european conference on computational fluid dynamics, eccomas cfd 2010. In *Towards FDS6: complex geometry, embedded meshes and quality assessment*, June 2010.
- K. B. McGrattan. Fire safety science proceedings. In *Fire Modelling: Where are we? Where are we going?*, September 2005.
- K. B. McGrattan. Verification and validation of selected fire models for nuclear power plant applications, volume 7: Fire dynamics simulator. Final report, NUREG-1824, EPRI 1011999, 2007.
- K. B. McGrattan, J. Floyd, G. Forney, H. Baum, and S. Hostikka. Fire safety science - proceedings of the seventh international symposium, worcester, ma. In *Improved Radiation and Combustion Routines for a Large Eddy Simulation Fire Model*, June 2002.
- K. B. McGrattan, R. McDermott, S. Hostikka, and J. Floyd. *Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide*. 2010.
- J. R. Mehaffey, S. T. Craft, L. R. Richardson, and M. Batista. Fire experiments in furnished houses. Proceedings of the Fourth International Seminar, Londonderry, Northern Ireland, UK, 2004.
- J. Menzel and B. Prime. *Thermal analysis of polymers: fundamentals and applications*. John Wiley and Sons, 2009.
- B. Merci and K. V. Maele. Numerical simulations of full-scale enclosure fires in a small compartment with natural roof ventilation. *Fire Safety Journal*, 43: 495–511, 2008.
- E. H. Mitler. The harvard fire model. *Fire Safety Journal*, 9:7–16, 1985.

- H. E. Mitler and J. A. Rocket. User's guide to first, a comprehensive singleroom fire model. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, 1987.
- V. Novozhilov. Computational fluid dynamics modelling of compartment fires. *Progress in Energy and Combustion Science*, 27:611–666, 2001.
- S. Olenick and D. Carpenter. An updated international survey of computer models for fire and smoke. *Journal of Fire Protection Engineering*, 13:87–110, 2003.
- R. D. Peacock, W. W. Jones, G. P. Forney, and P. A. Reneke. Cfast – consolidated model of fire growth and smoke transport (version 6). user's guide. NIST Special Publication 1041, 2005.
- K. Prasad, R. Kramer, N. Marsh, and M. Nyden. Numerical simulation of fire spread on polyurethane foam slabs. Proceedings of the 11th International Conference of Fire and Materials, 26-28 January, San Francisco, U.S.A., 2009.
- D. L. Prockop and I. R. Chichkova. Carbon monoxide intoxication: An update review. *Journal of Neurological Sciences*, 262:633–638, 2007.
- J. G. Quintiere. *Fundamentals of Fire Phenomena*. John Wiley & Sons Ltd., Sussex, England, 2006.
- R. G. Rehm and H. R. Baum. The equations of motion for thermally driven, buoyant flows. *Journal of Research of the NBS*, 83:297–308, 1978.
- G. Rein, A. Bar-Ilan, and C. Fernandez-Pello. A comparison of three models for the simulation of accidental fires. *Journal of Fire Protection Engineering*, 16: 183–209, 2006.
- G. Rein, L. J. Torero, W. Jahn, J. Stern-Gottfried, L. N. Ryder, S. Desanghere, M. Lazaro, F. Mowrer, A. Coles, D. Joyeux, D. Alvear, A. J. Capote, A. Jowrsey, C. Abecassis-Empis, and P. Reszka. Round-robin study of a priori modelling predictions of the dalmarnock fire test one. *Fire Safety Journal*, 44:590–602, 2009.
- K. Remesh and K. H. Tan. Zone models with compartment fire tests. *Journal of Fire Sciences*, 25:321–349, 2006.
- F. L. Richardson. *Weather Prediction by Numerical Process*. Cambridge University Press, 1922.

- J. S. Ritchie, D. K. Steckler, A. Hamins, G. T. Cleary, C. J. Yang, and T. Kashiwagi. The effect of sample size on the heat release rates of charring materials. Proceedings of the 5th International Symposium on Fire Safety Sciences, 3-7 March, Melbourne, Australia., 1997.
- R. M. Rowell. *Wood Chemistry and Wood Composites*. CRC Press, 2005.
- M. H. Salley and R. T. Kassawara. Verification and validation of selected fire models for nuclear power plant applications. Electric Power Research Institute and US Nuclear Regulatory Commission, Volume 7: FIRE DYNAMICS SIMULATOR, 2007.
- R. Schiestel. *Modeling and Simulation of turbulent flows*. ISTE Ltd, London, UK, 2006.
- A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, and D. Buddhi. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13:318–345, 2009.
- T. J. Shields, G. W. H., and M. F. Flood. Performance of single glazing elements exposed to enclosure corner fires of increasing severity. *Fire and Materials*, 25: 123–152, 2001.
- V. Shigunov. A zone model for fire development in multiple connected compartments. *Fire Safety Journal*, 40:555–578, 2005.
- R. Siegel and J. R. Howell. *Thermal Radiation Heat Transfer*. Taylor and Francis, New York, fourth edition, 2002.
- P. Smardz. *Validation of Fire Dynamics Simulator (FDS) for forced and natural convection flows*. PhD thesis, October 2006.
- A. A. Stec and T. R. Hull. Assessment of the fire toxicity of building insulation materials. *Energy and Buildings*, 43:498–506, 2011.
- R. D. Stewart, J. E. Peterson, T. N. Fisher, M. J. Hosko, E. D. Baretta, H. C. Dodd, and A. A. Hermann. Experimental human exposure to high concentrations of carbon monoxide. *Environmental Health*, 26:1–7, 1973.
- J. S. Su, N. Benichou, A. C. Bwalya, G. D. Loughheed, B. C. Taber, P. Leroux, G. Proulx, A. Kashef, C. McCartney, and J. R. Thomas. Fire performance of houses. phase i. study of unprotected floor assemblies in basement fire scenarios. Technical Report Summary Report RR-252, National Research Council Canada, Canada., 2008.

- S. R. Turns. *An Introduction to Combustion, Concepts and Applications*. McGraw-Hill, U.S.A., 2000.
- K. G. Wakili and E. Hugi. Four types of gypsum plaster boards and their thermophysical properties under fire conditions. *Journal of Fire Sciences*, 27: 27–43, 2009.
- K. G. Wakili, E. Hugi, L. Wullschleger, and T. H. Frank. Gypsum board in fire - modeling and experimental validation. *Journal of Fire Sciences*, 25:267–282, 2007.
- G. H. Yeoh and K. K. Yuen. *Computational Fluid Dynamics in Fire Engineering*. Elsevier, Amsterdam, 2009.
- G. H. Yeoh, R. K. K. Yuen, S. C. P. Chueng, and W. K. Kwok. On modelling combustion, radiation and soot processes in compartment fires. *Building and Environment*, 38:771–785, 2003a.
- G. H. Yeoh, R. K. K. Yuen, S. M. Lo, and D. H. Chen. On numerical comparison of enclosure fire in a multi-compartment building. *Fire Safety Journal*, 38:85–94, 2003b.
- N. Μαρκάτος. *Τυρβώδη φαινόμενα μεταφοράς και μαθηματικά πρότυπα προσομοίωσης τους*. 1998.
- Γ. Μπεργελές. *Υπολογιστική Ρευστομηχανική*. ΣΥΜΕΩΝ, Αθήνα, 2006.
- Μ. Φούντη. *Θεωρία Καύσης και Συστήματα Καύσης*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2005.