

# ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ

Δήμος Κοντογεώργος  
*Υποψ. Διδ., Ε.Μ.Σ.Κ - Ε.Μ.Π.*

Διονύσιος Κολαΐτης  
*Δρ. Ερευνητής, Ε.Μ.Σ.Κ - Ε.Μ.Π.*

Μαρία Φούντη  
*Καθηγήτρια Σχολής Μηχ. Μηχ. Ε.Μ.Π., Ε.Μ.Σ.Κ. – Ε.Μ.Π.*

*Λέξεις κλειδιά: Μετάδοση θερμότητας, Υπολογιστική Ρευστομηχανική, φωτιά, πυροπροστασία*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Στην παρούσα εργασία γίνεται παρουσίαση της χρήσης κωδίκων υπολογιστικής ρευστομηχανικής σε εφαρμογές διάδοσης φωτιάς σε κτίρια, με έμφαση στη συμπεριφορά των δομικών υλικών του κελύφους και της τοιχοποιίας. Συγκεκριμένα μελετώνται διεξοδικά οι φυσικοί μηχανισμοί έναυσης, διάδοσης και κατάσβεσης της φωτιάς. Στόχος των προσομοιώσεων είναι ο σχεδιασμός και η βελτιστοποίηση νέων μεθόδων παθητικής πυροπροστασίας. Τα αριθμητικά αποτελέσματα παρέχουν σημαντικές πληροφορίες οι οποίες συμβάλλουν στην κατανόηση της συμπεριφοράς της φωτιάς, καθώς και στην ανάπτυξη μεθόδων καταπολέμησής της.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η φωτιά, η οποία χαρακτηρίζεται από τη μη ελεγχόμενη εξάπλωση ενός μετώπου καύσης, αποτελεί ένα από τα πλέον σύνθετα φαινόμενα, καθώς ενσωματώνει μια μεγάλη ποικιλία φυσικών και χημικών διεργασιών, οι οποίες παρατηρούνται στις πολυφασικές, πολυσυστατικές και αντιδρώσες ροές. Οι διεργασίες αυτές περιλαμβάνουν φαινόμενα καύσης, μεταφοράς ορμής, μάζας και θερμότητας, τα οποία αλληλεπιδρούν συνθέτοντας ένα εξαιρετικά πολύπλοκο φυσικό και χημικό φαινόμενο.

Ο εξαιρετικά πολυσύνθετος χαρακτήρας της φωτιάς αποτέλεσε μια από τις αιτίες για τις οποίες καθυστέρησε η διεξοδική επιστημονική έρευνα μέχρι περίπου τη δεκαετία του 1950 (Quintiere, 1998). Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει σημαντικά βήματα στη μελέτη τόσο των φαινομένων φωτιάς, όσο και των τρόπων αντιμετώπισής της (πυρασφάλειας). Σε αυτό βοήθησε η ραγδαία εξέλιξη των υπολογιστικών μέσων σε συνδυασμό με την πρόοδο

της Υπολογιστικής Ρευστόμηχανικής (ΥΡ). Εντούτοις, φαινόμενα όπως η τύρβη και η καύση αποτελούν προβλήματα τα οποία, ακόμη και σήμερα, δεν είναι δυνατόν να προσομοιωθούν με ακρίβεια. Κατά συνέπεια, η επιτυχής περιγραφή όλων των φυσικών και χημικών φαινομένων τα οποία εμφανίζονται κατά τη διάδοση της φωτιάς και η ενσωμάτωση των αντίστοιχων μοντέλων σε ένα υπολογιστικό εργαλείο, αποτελεί μια εξαιρετικά πολυσύνθετη διαδικασία.

Η κατανόηση της αλληλεπίδρασης ανάμεσα στο μέτωπο της φωτιάς, την κίνηση του καπνού και τη μεταφορά θερμότητας προς τα στερεά τοιχώματα αποτελεί σημαντικό στοιχείο για την πρόληψη και τον έλεγχο της εξάπλωσης μιας φωτιάς σε ένα κλειστό χώρο. Η αλληλεξάρτηση των παραπάνω φαινομένων καθώς και η αλληλεπίδρασή τους με τα υλικά κατασκευής του κελύφους σπάνια λαμβάνεται υπόψη στην πλειονότητα των υπολογιστικών μοντέλων τα οποία είναι διαθέσιμα σήμερα (Cox, 1999, Founti, 2000). Η ανάπτυξη υπολογιστικών εργαλείων ικανών να περιγράφουν με ακρίβεια τα τρία παραπάνω φαινόμενα αποτελεί μια καινοτομική διαδικασία, η οποία ανήκει στο ερευνητικό πεδίο αιχμής στον τομέα της πυρασφάλειας. Στόχος ενός τέτοιου εργαλείου είναι ο σχεδιασμός κτιρίων μεγαλύτερης ασφάλειας, η ανάπτυξη νέων συστημάτων εντοπισμού της φωτιάς και κατάσβεσής της, καθώς και η δημιουργία νέων υλικών με αυξημένη αντοχή στη φωτιά. Η σύγχρονη τάση για γρήγορη ανέγερση «ελαφρών κατασκευών» με συχνή χρήση εύφλεκτων υλικών (π.χ. πλαστικά) ενισχύει την ανάγκη συνδυασμένης ερευνητικής δραστηριότητας στις περιοχές της παθητικής πυροπροστασίας κτιρίων, της τεχνολογίας κατασκευών, της επιστήμης των υλικών, της τοξικολογίας κ.α.

Η δυνατότητα του υπολογισμού της θερμοκρασίας μιας επιφάνειας αποτελεί αντικείμενο της έρευνας σε αρκετούς τομείς εφαρμογών. Στον τομέα της πυρασφάλειας ενδιαφέρει η δυνατότητα αποτροπής της διάδοσης της φωτιάς με επιφανειακή εξάπλωση, μέσω της χρήσης κατάλληλων δομικών υλικών, τα οποία επιβραδύνουν ή και παρεμποδίζουν ολοκληρωτικά τη διάδοση της φωτιάς (fire retardants). Επίσης, στον κατασκευαστικό τομέα αναζητούνται αξιόπιστες υπολογιστικές μέθοδοι, οι οποίες να είναι σε θέση να προσδιορίσουν τη θερμοκρασία των δομικών στοιχείων μιας κατασκευής για τον έλεγχο και την εξασφάλιση της αντοχής της στην περίπτωση εκδήλωσης μιας πυρκαγιάς.

Η μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία αποτελεί ένα σημαντικό μηχανισμό μετάδοσης θερμότητας στις φωτιές και επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη δομή και τη δυνατότητα κατάσβεσής τους (Abbud-Madrid, 1990, Guo, 1997), όπως επίσης και τη διαδικασία σχηματισμού οξειδίων του αζώτου, λόγω της έντονης εξάρτησης της από το επίπεδο της θερμοκρασίας (Chan et al., 1995, Pbas, 2004, Pbas et al. 2005). Η ακριβής προσομοίωση της μετάδοσης θερμότητας μέσω ακτινοβολίας οδηγεί σε σημαντική αύξηση του απαιτούμενου υπολογιστικού χρόνου, καθώς προϋποθέτει τη χρήση πολύπλοκων μαθηματικών εκφράσεων. Επίσης, σε πρακτικές εφαρμογές

παρουσιάζονται ελλείψεις ως προς τις απαιτούμενες λεπτομερείς πληροφορίες για τις οπτικές ιδιότητες των αερίων (αντιδρώντων και προϊόντων) αλλά και των επιφανειών των τοιχωμάτων του κελύφους (Keramida et al., 2000).

Η εργασία αυτή παρουσιάζει τις δυνατότητες που παρέχει η χρήση κωδικών ΥΡ σε εφαρμογές έναυσης, διάδοσης και κατάσβεσης φωτιάς. Συγκεκριμένα, η προσομοίωση του πολυφασικού, πολυσυστατικού και αντιδρώντος πεδίου ροής, το οποίο αναπτύσσεται σε συνθήκες φωτιάς στο εσωτερικό κελύφους, επιτρέπει τη βαθύτερη κατανόηση των μηχανισμών έναυσης και διάδοσης της φωτιάς, ενώ παρέχει σημαντικές πληροφορίες για το σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση συστημάτων παθητικής πυροπροστασίας.

## 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Στους κώδικες ΥΡ, οι οποίοι χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία, γίνεται επίλυση των εξισώσεων διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας στο χρόνο και στο χώρο (σε τρεις διαστάσεις).

### 2.1 Καύση

Για την προσομοίωση της καύσης χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός του μοντέλου θραύσης των δινών (Eddy Break-Up) και του μοντέλου χημικής κινητικής πεπερασμένου ρυθμού (finite rate chemistry). Συγκεκριμένα, στην περιοχή όπου η ανάμιξη είναι κυρίαρχη ο ρυθμός αντίδρασης  $R_{mix}$  υπολογίζεται από το μοντέλο Eddy Dissipation Model (Magnussen, 1989), ενώ στην περιοχή όπου η χημεία καθορίζει την καύση ο ρυθμός αντίδρασης  $R_{kin}$  υπολογίζεται από τη σχέση του Arrhenius (Dryer, 1973). Ο συνολικός ρυθμός αντίδρασης σε κάθε υπολογιστικό κελί θεωρείται ίσος με τον μικρότερο όρο των  $R_{mix}$  και  $R_{kin}$ .

### 2.2 Ακτινοβολία

Για την προσομοίωση των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία σε κλειστό χώρο, χρησιμοποιούνται δύο υπολογιστικά μοντέλα: το μοντέλο διακριτής μεταφοράς (discrete transfer) (Lockwood, 1981) και το μοντέλο έξι ανηγμένων ροών (6-flux) (Schuster, 1905, Hamaker, 1947, Hoffmann, 1988). Το μοντέλο διακριτής μεταφοράς θεωρείται ακριβές και αξιόπιστο, ενώ έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές περιπτώσεις προσομοίωσης φωτιάς (Fletcher et al. & Luo, 1994, Yan, 1996, Luo, 1997). Το μοντέλο των έξι ανηγμένων ροών είναι ένα αρκετά παλιό μοντέλο, απλό στην κατανόηση και εύκολο στην εφαρμογή. Το μεγάλο του πλεονέκτημα είναι η οικονομία υπολογιστικού χρόνου από την οποία χαρακτηρίζεται. Έχει εφαρμοστεί και αυτό σε πολλές περιπτώσεις

προσομοίωσης φωτιάς σε κλειστό χώρο (Hoffmann, 1988), αλλά χαρακτηρίζεται από περιορισμένη ακρίβεια αποτελεσμάτων.

### 2.3 Μεταφορά θερμότητας σε στερεή επιφάνεια

Όταν μία επιφάνεια θερμαίνεται μέσω συναγωγής και θερμικής ακτινοβολίας, ο συνολικός ρυθμός ροής θερμότητας διαμέσου της επιφάνειας  $q_w$ , δίνεται από την εξίσωση 1.

$$q_w = q_{cond} = q_{conv} + q_{rad} \quad (1)$$

όπου  $q_{cond}$  = ρυθμός ροής θερμότητας με αγωγή [ $W / m^2$ ],  $q_{conv}$  = ρυθμός ροής θερμότητας με συναγωγή [ $W / m^2$ ] και  $q_{rad}$  = ρυθμός ροής θερμότητας με ακτινοβολία [ $W / m^2$ ]. Ο ρυθμός ροής θερμότητας με συναγωγή,  $q_{conv}$ , υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης 2, ενώ ο ρυθμός ροής θερμότητας με ακτινοβολία,  $q_{rad}$ , προσδιορίζεται από την εξίσωση 3.

$$q_{conv} = h_w (T_w - T_f) \quad (2)$$

$$q_{rad} = \frac{2\varepsilon}{2-\varepsilon} (T_w^4 - R_x) \quad (3)$$

όπου  $T_w$  = θερμοκρασία της επιφάνειας [K],  $T_f$  = θερμοκρασία του παρακείμενου ρευστού [K],  $R_x$  = ρυθμός ροής της ακτινοβολίας [ $W / m^2$ ], ο οποίος υπολογίζεται από το μοντέλο της ακτινοβολίας και  $\varepsilon$  = συντελεστής εκπομπής της επιφάνειας.

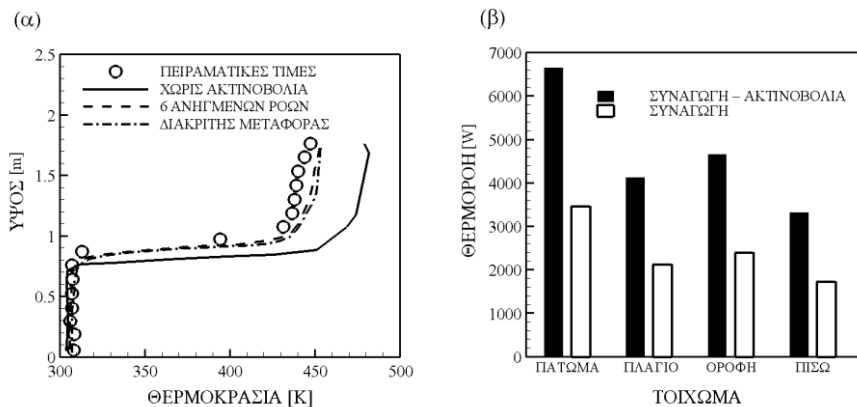
Οι τρεις μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας έχουν αρκετές ομοιότητες μεταξύ τους αλλά και ορισμένες σημαντικές διαφορές. Στην αγωγή και στη συναγωγή θερμότητας, η ενέργεια μεταφέρεται μέσω των ελεύθερων ηλεκτρονίων του ατομικού πλέγματος, ή από μόριο σε μόριο μέσω συγκρούσεων ή λόγω εξωτερικής ροής. Αντίθετα, η θερμική ακτινοβολία δεν χρειάζεται κάποιο μέσο, καθώς μεταφέρεται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Μια άλλη σημαντική διαφορά μεταξύ των μηχανισμών της αγωγής/συναγωγής και της ακτινοβολίας είναι η συσχέτιση τους με τη θερμοκρασία. Ενώ οι ρυθμοί μεταφοράς θερμότητας με αγωγή και συναγωγή μεταβάλλονται γραμμικά με τη θερμοκρασία, ο ρυθμός μεταφοράς με ακτινοβολία είναι ανάλογος της διαφοράς της τέταρτης δύναμης της θερμοκρασίας, γεγονός το οποίο την καθιστά πολύ σημαντική σε συνθήκες όπου επικρατούν υψηλές θερμοκρασίες. Μία τέτοια περίπτωση είναι και η φωτιά σε κλειστό χώρο, όπου η ακτινοβολία επηρεάζει άμεσα τη διαμόρφωση του αναπτυσσόμενου ροϊκού και θερμοκρασιακού πεδίου. Επίσης, η ακτινοβολία παίζει σημαντικό ρόλο στην εξάπλωση της φωτιάς με μηχανισμούς δευτερεύουσας ανάφλεξης. Για το λόγο αυτό, η μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία θεωρείται ως μία από τις βασικότερες

παραμέτρους η οποία πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό συστημάτων πυρόσβεσης και πυροπροστασίας.

### 3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

#### 3.1 Επίδραση ακτινοβολίας σε φωτιά μέσα σε κλειστό χώρο

Για τη διεξοδική μελέτη της σχετικής συνεισφοράς των τριών μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιήθηκε η περίπτωση φωτιάς σε τυπική γεωμετρία δωματίου για την οποία υπάρχουν διαθέσιμες πειραματικές μετρήσεις (Steckler et al., 1982). Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας υπολογιστικής ρευστομηχανικής FDS (έκδοση 4.07).



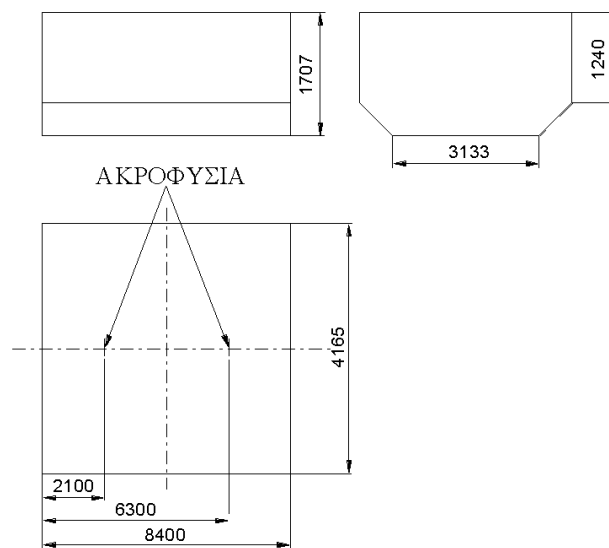
Εικόνα 1. (α) Κατανομή θερμοκρασίας στην πόρτα του δωματίου, (β) Ροή θερμότητας στα τοιχώματα του δωματίου.

Στο Σχήμα 1α απεικονίζεται ενδεικτικά η κατανομή της θερμοκρασίας στην πόρτα του δωματίου, για φωτιά ισχύος 62.9kW, η οποία βρίσκεται τοποθετημένη στο κέντρο του δωματίου. Στο σχήμα συγκρίνονται τα υπολογιστικά αποτελέσματα με τις πειραματικές μετρήσεις των Steckler et al. (1982). Παρατηρείται ότι στην περίπτωση που δεν λαμβάνεται υπόψη η ακτινοβολία, η θερμοκρασία στο ανώτερο αέριο στρώμα του δωματίου υπερεκτιμάται κατά περίπου 25%. Αντίθετα, όταν λαμβάνεται υπόψη η ακτινοβολία, βελτιώνεται σημαντικά η συμφωνία μεταξύ των πειραματικών τιμών και των αντίστοιχων προλέξεων. Όσον αφορά την απόδοση των δύο μοντέλων ακτινοβολίας δεν παρατηρείται μεγάλη διαφορά στα αποτελέσματά τους. Στο Σχήμα 1β παρουσιάζονται οι θερμικές απώλειες από κάθε τοίχο του δωματίου, με και χωρίς ακτινοβολία. Είναι φανερό ότι ο

ρυθμός ροής θερμότητας σε κάθε τοίχωμα αυξάνεται σημαντικά με την ακτινοβολία, ενώ ο συνολικός ρυθμός απώλειας σχεδόν διπλασιάζεται. Κατά συνέπεια, επιβεβαιώνεται η μεγάλη σημασία της προσομοίωσης των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία στην περίπτωση φωτιάς σε κλειστό χώρο.

### 3.2 Κατάσβεση φωτιάς

Στα πλαίσια της εξέτασης των μηχανισμών μεταφοράς μάζας σε συνθήκες φωτιάς διερευνήθηκε η δυνατότητα χρήσης ενός συνδυασμένου πυροσβεστικού υλικού, το οποίο αποτελείται από αλογόνο ( $CF_3Br$ ) και αέρα εμπλουτισμένο σε άζωτο (Nitrogen Enriched Air – NEA), για την κατάσβεση φωτιάς σε αποθηκευτικό χώρο αεροσκάφους (Εικ. 2). Αρχικά γίνεται ταυτόχρονη παροχή όλων των συστατικών του πυροσβεστικού υλικού, ενώ μετά από τα πρώτα 30s διακόπτεται η παροχή του αλογόνου. Στα πλαίσια της εργασίας πραγματοποιήθηκε παραμετρική μελέτη η οποία αφορούσε την συγκέντρωση του οξυγόνου στον αέρα και τη συνολική παροχή του αέρα (Εικ. 3). Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας YP CFX (έκδοση 10.0).

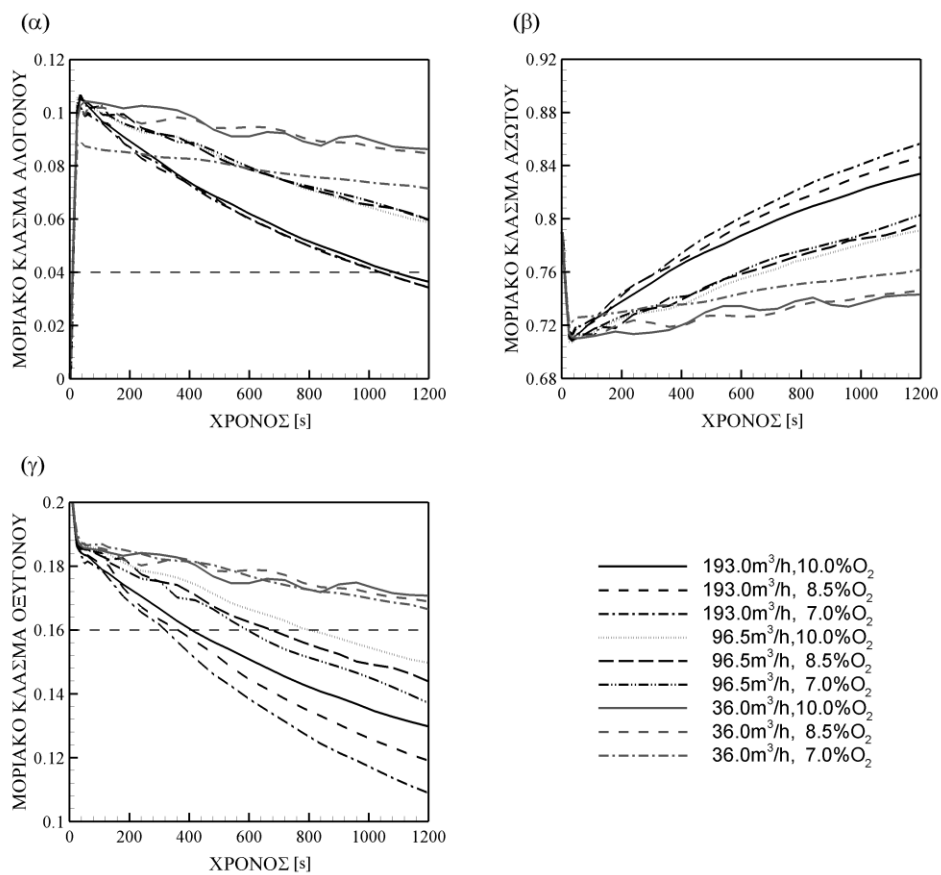


Εικόνα 2. Σκαρίφημα αποθηκευτικού χώρου αεροσκάφους.

Η ποσότητα του αλογόνου η οποία διοχετεύεται μέσω των ακροφυσιών κατά τα πρώτα 30s είναι 45kg. Στην Εικόνα 3 παρουσιάζονται οι προβλέψεις της κατανομής του κλάσματος μάζας των τριών βασικών

συστατικών στο κέντρο του αποθηκευτικού χώρου. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν για χρονικό διάστημα ίσο με 20min από την έναρξη της παροχής των συστατικών.

Στην Εικόνα 3α φαίνεται ότι η παροχή του αλογόνου ολοκληρώνεται στα πρώτα 30s και στη συνέχεια η συγκέντρωσή του μειώνεται με την πάροδο του χρόνου. Η ακριβώς αντίθετη συμπεριφορά παρατηρείται στην περίπτωση της συγκέντρωσης του άζωτου (Εικ. 3β): η αρχική μείωση λόγω της παροχής του αλογόνου ακολουθείται από σταδιακή αύξηση μετά τα πρώτα 30s. Όσον αφορά τη συγκέντρωση του οξυγόνου, παρατηρείται μια απότομη μείωση στα πρώτα 30s, η οποία στη συνέχεια συνεχίζεται με μικρότερο ρυθμό (Εικ. 3γ).

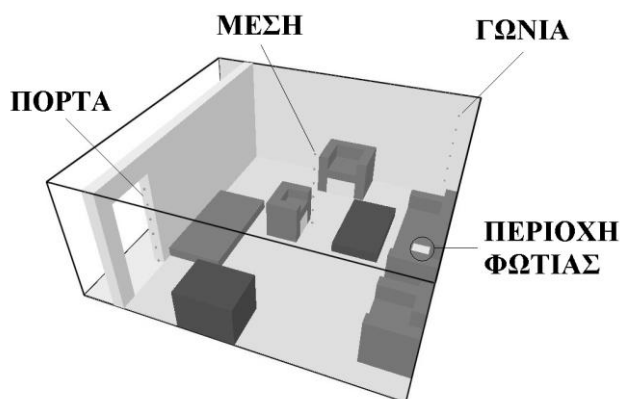


Εικόνα 3. Κατανομή των συστατικών στο κέντρο του δωματίου: (α) αλογόνο, (β) άζωτο και (γ) οξυγόνο.

Συνολικά, η μοριακή συγκέντρωση του αλογόνου είναι, σε όλες τις περιπτώσεις, μεγαλύτερη του 4% για χρονικό διάστημα 20min, καλύπτοντας έτσι τις απαιτήσεις της διαδικασίας κατάσβεσης. Λαμβάνοντας υπόψη το χρόνο που απαιτείται για να επιτευχθεί χαμηλή συγκέντρωση O<sub>2</sub> (περίπου 16% κ.ο.) προκειμένου να περιοριστεί η διάδοση της φωτιάς, η παραμετρική μελέτη έδειξε ότι: (α) η μείωση της συγκέντρωσης του O<sub>2</sub> στο NEA κατά 30%, οδηγεί σε μείωση του απαιτούμενου χρόνου κατά 31%, (β) η αύξηση της παροχής του NEA κατά 50%, οδηγεί σε μείωση του απαιτούμενου χρόνου κατά 48.6% και ταυτόχρονη μείωση της συγκέντρωσης του O<sub>2</sub> στο NEA κατά 30% και (γ) η αύξηση της παροχής του NEA κατά 50%, οδηγεί σε μείωση του απαιτούμενου χρόνου κατά 64.5%. Συμπερασματικά, το NEA μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα ασφαλές μέσο πυρόσβεσης σε κλειστούς χώρους.

### 3.3 Διάδοση φωτιάς σε τυπικό δωμάτιο

Στα πλαίσια διερεύνησης των φαινομένων διάδοσης φωτιάς σε κλειστούς χώρους, εξετάστηκε η περίπτωση φωτιάς σε ένα τυπικό επιπλωμένο δωμάτιο καθιστικού. Στην Εικόνα 4 φαίνεται η γεωμετρία του δωματίου και το σημείο όπου εκδηλώνεται η φωτιά, καθώς και τα σημεία παρακολούθησης της θερμοκρασίας. Οι τοίχοι του δωματίου είναι επενδεδυμένοι με γυψοσανίδα, ενώ τα έπιπλα είναι από ξύλο (έλατο).

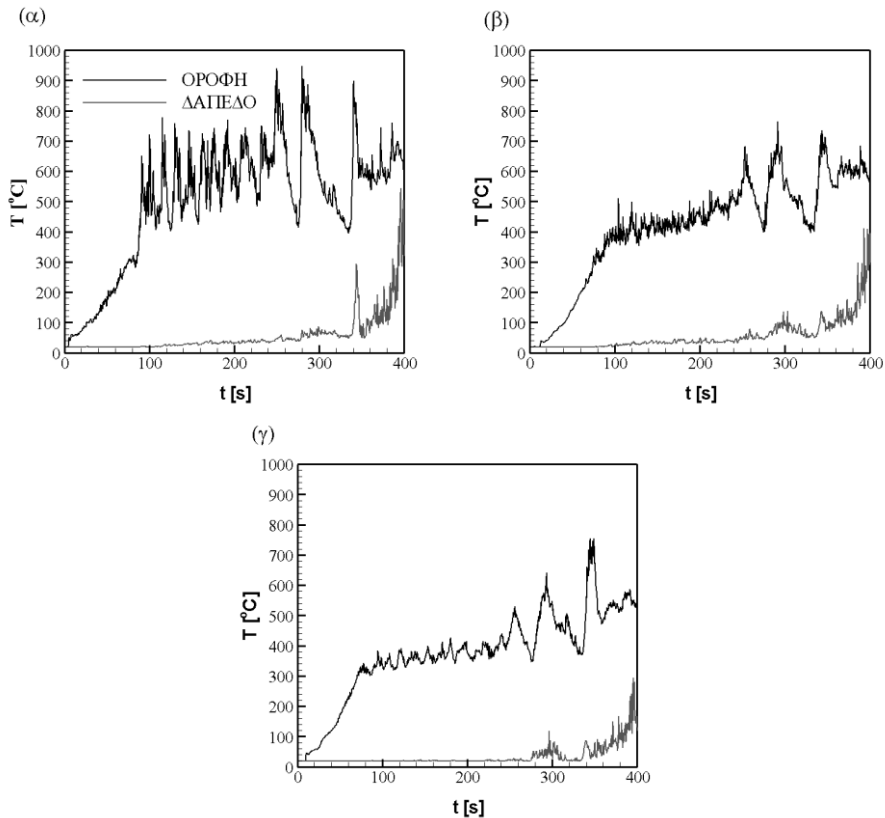


Εικόνα 4. Γεωμετρία δωματίου.

Για την προσομοίωση της φωτιάς χρησιμοποιείται μια σταθερή πηγή θερμότητας  $1000\text{kW/m}^2$  σε επιφάνεια  $0.06\text{m}^2$ , η οποία οδηγεί σε συνολική ισχύ φωτιάς  $60\text{kW}$ . Το υπολογιστικό πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε είναι



ομοίωμα 52x52x24 κόμβων, ενώ ο χρόνος προσομοίωσης ήταν 15min. Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας YP FDS (έκδοση 4.07).

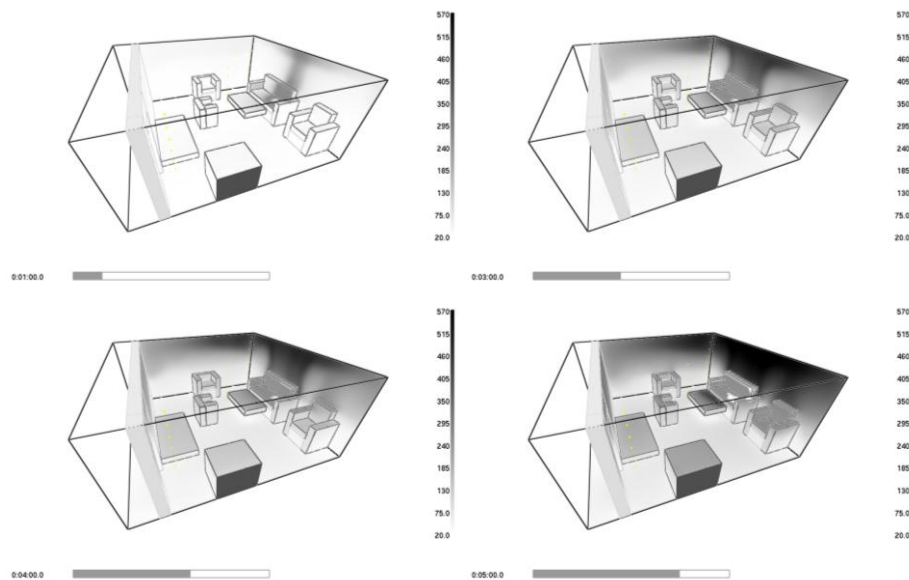


Εικόνα 5. Κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα κοντά στην οροφή και στο δάπεδο: (α) γωνία, (β) μέση και (γ) πόρτα.

Στην Εικόνα 5 παρουσιάζεται η κατανομή της θερμοκρασίας σε δύο σημεία, κοντά στην οροφή και το δάπεδο του δωματίου. Είναι φανερό ότι οι θερμοκρασίες είναι μεγαλύτερες στην οροφή από ότι στο δάπεδο, γεγονός αναμενόμενο, δεδομένων των ανωστικών δυνάμεων οι οποίες ασκούνται στο θερμό αέρα. Στο χρονικό διάστημα 250s – 350s παρατηρείται μια έντονη διακύμανση της θερμοκρασίας, η οποία οφείλεται στην τοπική σβέση και επανάφλεξη της φωτιάς (flashover) λόγω του ρυθμού έκλυσης των πτητικών αερίων από τα διάφορα υλικά που υπάρχουν μέσα στο δωμάτιο. Ο ρυθμός με τον οποίο καίγονται τα εύφλεκτα υλικά είναι διαφορετικός λόγω των διαφορετικών ιδιοτήτων και θερμοκρασιών ανάφλεξής τους. Στην οροφή της γωνίας του δωματίου (Εικ. 5α), παρατηρούνται οι υψηλότερες θερμοκρασίες εξαιτίας της τοπικής

ανακυκλοφορίας της ροής, η οποία εμφανίζεται σε εκείνη την περιοχή. Τέλος, οι χαμηλότερες τιμές της θερμοκρασίας εμφανίζονται στην πόρτα, η οποία βρίσκεται στη μεγαλύτερη απόσταση από το σημείο έναυσης της φωτιάς.

Στο Σχήμα 6 παρουσιάζονται χρονικά στιγμιότυπα της κατανομής του θερμοκρασιακού πεδίου στα τοιχώματα του δωματίου (1min, 3min, 4min και 5min από τη στιγμή της έναυσης). Η συνεχής αύξηση της θερμοκρασίας στις επιφάνειες των τοιχωμάτων με την πάροδο του χρόνου είναι εμφανής. Τα υλικά του δωματίου σταδιακά θερμαίνονται, ώσπου η θερμοκρασία τους φτάσει τη θερμοκρασία ανάφλεξης τους. Στο σημείο αυτό αρχίζουν να καίγονται εκλύοντας πτητικά αέρια, ενώ παρατηρείται περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας τους, έως την πλήρη καύση τους.



Εικόνα 6. Ισοσταθμικές καμπύλες θερμοκρασίας τοιχωμάτων (1min, 3min, 4min, 5min).

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία έγινε παρουσίαση των δυνατοτήτων που παρέχουν οι κώδικες υπολογιστικής ρευστομηχανικής για την προσομοίωση της φωτιάς σε κλειστούς χώρους. Στα πλαίσια αυτά, διερευνήθηκε η σχετική σημασία των τριών μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας σε περιπτώσεις φωτιάς, όπου διαπιστώθηκε η μεγάλη επίδραση της ακτινοβολίας λόγω της έντονης εξάρτησής της από τη θερμοκρασία. Η διερεύνηση αυτή πραγματοποιήθηκε μέσω της χρήσης ενός κώδικα ΥΡ για την προσομοίωση

φωτιάς σε ένα τυπικό δωμάτιο. Τα υπολογιστικά αποτελέσματα συγκρίθηκαν με διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα και διαπιστώθηκε καλή συμφωνία μόνο στην περίπτωση που λαμβάνεται υπόψη η ακτινοβολία.

Ένας από τους στόχους της προσομοίωσης των φαινομένων της φωτιάς είναι ο σχεδιασμός και η βελτιστοποίηση νέων μεθόδων ενεργητικής πυροπροστασίας. Στα πλαίσια αυτά, διερευνήθηκε η χρήση ενός νέου πυροσβεστικού υλικού (αέρας εμπλουτισμένος με άζωτο). Η νέα μέθοδος εφαρμόστηκε σε ένα κλειστό χώρο αποθήκευσης αεροσκάφους, στον οποίο το πυροσβεστικό υλικό διοχετεύθηκε μέσω δύο ακροφυσίων. Η παραμετρική μελέτη που πραγματοποιήθηκε, επέτρεψε τον προσδιορισμό της επίδρασης της σύστασης και της παροχής του υλικού στον χρόνο, ο οποίος απαιτείται για να φτάσει η συγκέντρωση του  $O_2$  σε μια κρίσιμη τιμή.

Τέλος, εξετάστηκε η περίπτωση έναυσης και διάδοσης μιας πραγματικής φωτιάς σε ένα τυπικό δωμάτιο καθιστικού, όπου έγινε φανερή η αλληλεπίδραση της φωτιάς με τα στερεά υλικά. Τα αντικείμενα του δωματίου καίγονται και εκλύουν πτητικά αέρια, τα οποία με τη σειρά τους τροφοδοτούν εκ νέου τη φωτιά, μέχρι να ολοκληρωθεί η καύση. Επιπλέον, λόγω των ανωστικών δυνάμεων, τα θερμά καυσαέρια ανεβαίνουν προς την οροφή, με αποτέλεσμα να παρατηρούνται υψηλότερες θερμοκρασίες στα ανώτερα στρώματα του δωματίου. Τέλος, τα τοιχώματα του δωματίου θερμαίνονται σταδιακά, γεγονός το οποίο παρέχει σημαντικές πληροφορίες για τις θερμικές τάσεις που αναπτύσσονται σε αυτά και κατ' επέκταση στα δομικά στοιχεία της κατασκευής.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία αυτή χρηματοδοτήθηκε από το ερευνητικό πρόγραμμα ISSB: The Integrated Safe & Smart Building Concept του 6<sup>ου</sup> Προγράμματος Πλαισίου της Ε.Ε.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Abbud-Madrid, A. & Ronney, D.P., "Effects of radiative and diffusive transport processes on premixed flames near flammability limits", in Proceedings of the 23<sup>rd</sup> Symposium on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, USA (1990) 423-431

Chan, S.H., Pan, X.C. & Abou-Ellail, M.M.M., "Flamelet structure of radiating CH<sub>4</sub>-air flames", Combustion Flame, Vol. 102, (1995) 438-446

Cox, G., "Fire Safety Lecture: Fire Research in the 21st Century", Fire Safety Journal, Vol. 32, (1999) 203-220

Dryer, F.L. & Glassman, I., "High temperature oxidation of CO and CH<sub>4</sub>", 14<sup>th</sup> Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburg, USA (1973) 987

Fletcher, D.F., Kent, H.J., Apte, V.B. & Green, A.R., "Numerical simulations of smoke movement from a pool fire in a ventilated tunnel", *Fire Safety J.*, Vol. 23, (1994) 305-325

Founti, M.A. & Cox, G., "Fire Safety: A look in its past and future", in *Proceedings of the International Conference on Technology Watch and innovation in the Construction Industry* (Brussels Belgium April 5-6, 2000), Brussels, Belgium (2000) 121-126

Guo, H., Ju, Y., Maura, K. & Niioka, T., "Radiation extinction limit of counter flow premixed lean methane-air flames", *Combustion Flame*, Vol. 109, (1997) 639-646

Hamaker, H.C., "Radiation and heat conduction in light-scattering material: Part I", *Philips Res.*, Vol. 2, (1947) 55

Hoffmann, N. & Markatos, N.C., "Thermal radiation effects on fires in enclosures", *Appl. Math. Modelling*, Vol. 12, (1988) 129-140

Ilbas, M., "The effect of thermal radiation and radiation models on hydrogen-hydrocarbon combustion modelling", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 30, (2004) 1113-1126

Ilbas, M., Yilmaz, I. & Kaplam, Y., "Investigations of hydrogen and hydrocarbon composite fuel combustion and NO<sub>x</sub> emission characteristics in a model combustor", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 30, (2005) 1139-1147

Keramida, E.P., Liakos, H.H., Founti, M.A., Boudouvis, A.G. & Markatos, N.C., "Radiative heat transfer in natural gas-fired furnaces", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, (2000) 801-809

Lockwood, F.C. & Shah, N.G., "A new radiation solution method for incorporation in general combustion prediction procedures", *Proceedings of the 18<sup>th</sup> Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, USA (1981) 1405-1416

Luo, M. & Beck, V., "The fire environment in a multi-room building – Comparison of predicted and experimental results", *Fire Safety J.*, Vol. 23, (1994) 413-438

Luo, M., He, Y. & Beck, V. "Application of field model and two-zone model to flashover fires in a full-scale multi-room single level building", *Fire Safety J.*, Vol. 29, (1997) 1-26

Magnussen, F., "Modeling of NO<sub>x</sub> and Soot Formation by the Eddy Dissipation Concept", *CIMAC Conference* (Tianjin China June 4-9 1989), Tianjin, China (1989)

Quintiere J.G., 3<sup>rd</sup> Asia-Oceania Symp on Fire Science and Technology, Singapore (1998) 3-14

Schuster, A., "Radiation through a foggy atmosphere", *J. Astrophys.*, Vol. 21, (1905) 1

Steckler, K.D., J.G. Quintiere, W. J. Rinkinen, "Flow induced by fire in a compartment", National Bureau of Standards NBSIR 82-2520 (1982)

Yan, Z. & Holmstedt, G., "CFD and experimental studies of room fire growth on wall lining materials", *Fire Safety J.*, Vol. 27, (1996) 201-238