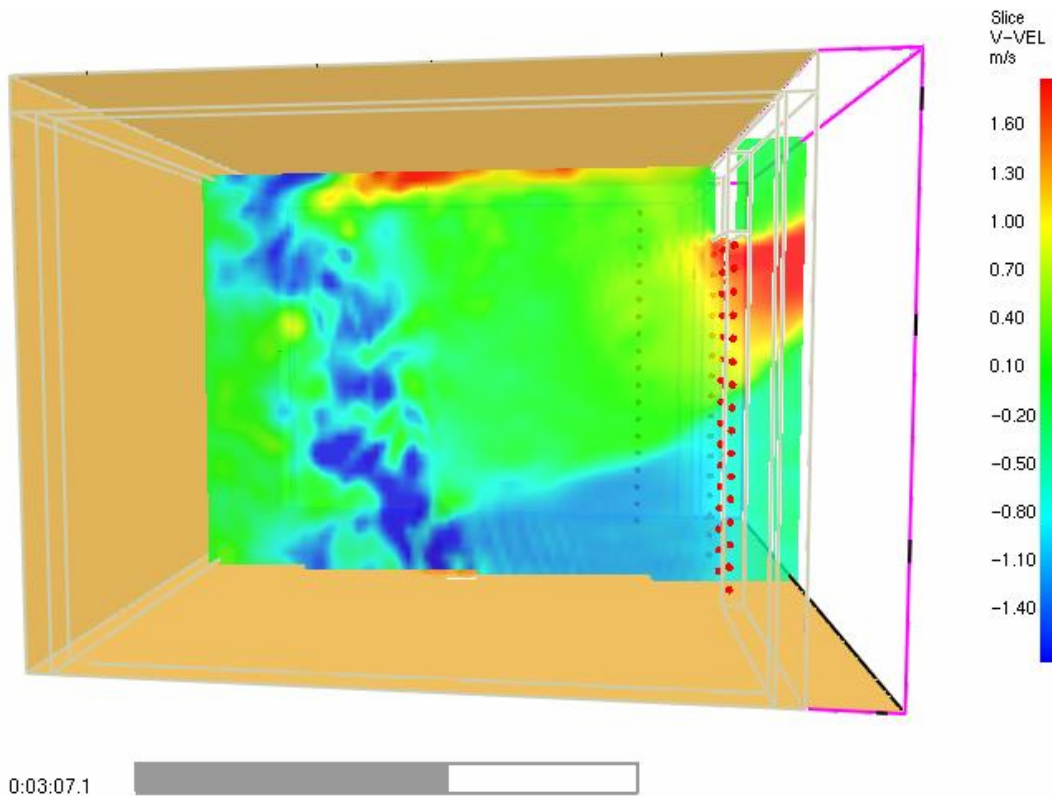




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Θέμα: Προσομοίωση της διαδικασίας εξάπλωσης πυρκαγιών σε κτίρια με τη χρήση λογισμικού υπολογιστικής ρευστομηχανικής



Όνοματεπώνυμο: Νικόλαος Πατρόνης
A.M.: 02101313
Επιβλέπουσα καθηγήτρια: Μαρία Φούντη

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος.....	3
1.Φωτιές σε κτίρια.....	4
1.1 Περιγραφή του φαινομένου, κύρια χαρακτηριστικά.....	4
1.1.1 Διάδοση της φωτιάς.....	5
1.2 Διεθνείς δοκιμές πιστοποίησης και μέτρησης χαρακτηριστικών της φωτιάς.....	11
2.Παρουσίαση κώδικα υπολογιστικής ρευστομηχανικής FDS.....	18
2.1 Μοντέλα προσομοίωσης φυσικών διεργασιών.....	18
2.1.1 Υδροδυναμικό μοντέλο.....	20
2.1.2 Μοντέλο καύσης.....	21
2.2 Μοντέλο LES.....	22
2.2.1 Φίλτρα LES.....	25
2.3 Τρόποι μοντελοποίησης των άλυτων ποσοτήτων.....	28
3.Προσομοίωση φωτιάς σε τυπικό δωμάτιο (περίπτωση Steckler).....	32
3.1 Παραμετρική μελέτη.....	37
3.1.1 Εκπομπή καπνού.....	40
3.1.2 Σταθερά Smagorinsky.....	42
3.1.3 Κλάσμα ακτινοβολίας.....	43
3.1.4 Μοντέλο ακτινοβολίας.....	46
3.1.5 Σύγκριση των καλύτερων προσεγγίσεων.....	48
3.2 Αποτελέσματα.....	50
3.3 Συμπερασματικά σχόλια.....	84
4.Προσομοίωση φωτιάς σε κτίριο.....	87
4.1 Καύση του ξύλου.....	88
4.2 Ιδιότητες υλικών.....	91
4.3 Εξέλιξη της φωτιάς και σχολιασμός των αποτελεσμάτων.....	93
5.Συμπεράσματα-Προοπτικές.....	118

Πρόλογος

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται προσομοίωση της εξάπλωσης φωτιάς σε κτίρια με τη χρήση λογισμικού υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη των χαρακτηριστικών του φαινομένου της φωτιάς, η κατανόηση του τρόπου διάδοσής της και η προσομοίωση του φαινομένου κατά τον ακριβέστερο δυνατό τρόπο.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι κυριότεροι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η διάδοση της φωτιάς σε κλειστούς χώρους. Παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο κάθε παράγοντας επιδρά στη διάδοση της φωτιάς και στη συνέχεια αναφέρονται οι πλέον χαρακτηριστικές διεθνείς πιστοποιημένες δοκιμές μέτρησης των χαρακτηριστικών της φωτιάς.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο κώδικας υπολογιστικής ρευστομηχανικής FDS ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση των διαφορετικών περιπτώσεων φωτιάς σε αυτή την εργασία. Επίσης παρουσιάζεται το μοντέλο Προσομοίωσης Μεγάλης Δίνης (Large Eddy Simulation-LES) το οποίο χρησιμοποιείται από τον κώδικα FDS για την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν τη συμπεριφορά της φωτιάς.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται σύγκριση διαθέσιμων πειραματικών μετρήσεων με υπολογιστικά αποτελέσματα για την περίπτωση φωτιάς σε δωμάτιο, με στόχο να εκτιμηθεί η ικανότητα του κώδικα FDS να προσομοιώνει τη φωτιά ικανοποιητικά. Επίσης γίνεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων ώστε να εκτιμηθούν οι παράγοντες που επηρεάζουν κατά κύριο λόγο την ακρίβεια των υπολογιστικών αποτελεσμάτων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από προσομοίωση φωτιάς σε πραγματικό κτίριο για το οποίο ελήφθησαν υπόψη όλα τα έπιπλα τα οποία βρίσκονται εντός του κτιρίου.

Στο τελευταίο κεφάλαιο διατυπώνονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα διπλωματική εργασία.

1.Φωτιές σε κτίρια

1.1 Περιγραφή του φαινομένου, κύρια χαρακτηριστικά

Με τον όρο «φωτιές σε κτίρια» γενικά περιγράφεται μία φωτιά η οποία περιορίζεται μέσα σε ένα δωμάτιο ή οπουδήποτε μέσα σε ένα κτίριο. Οι φωτιές αυτού του είδους συνήθως αφορούν χώρους όγκου της τάξης των 100 m³. Μία φωτιά σε κτίριο περιλαμβάνει τρία στάδια (Drysdale,1999):

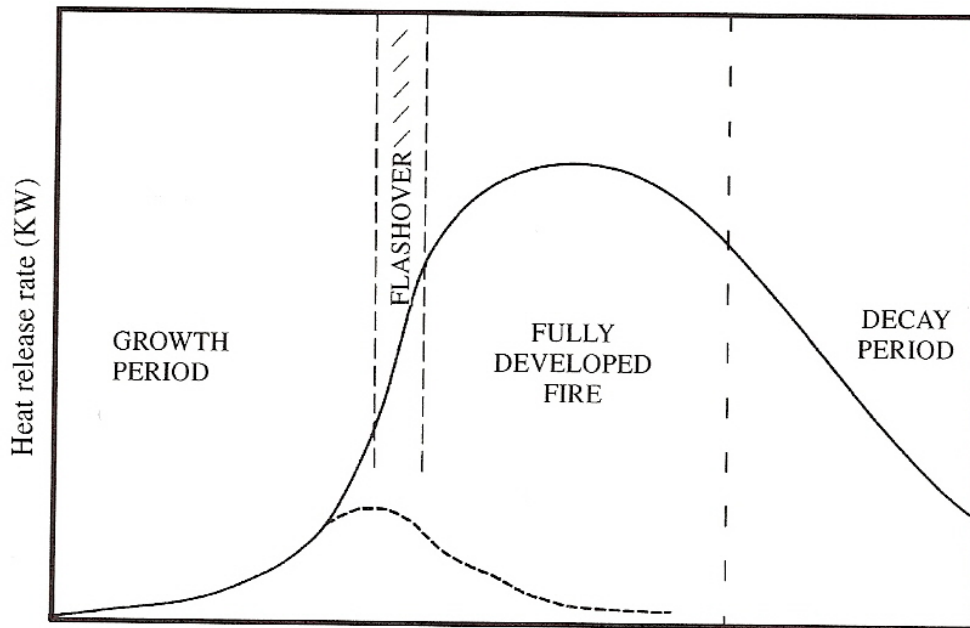
α) Το στάδιο της ανάπτυξης (growth period) ή στάδιο πριν την πλήρη ανάφλεξη κατά το οποίο η μέση θερμοκρασία του χώρου είναι σχετικά χαμηλή και η φωτιά περιορίζεται κοντά στην πηγή της ,

β) Η πλήρως ανεπτυγμένη φωτιά (fully developed fire) ή φωτιά ύστερα από την πλήρη ανάφλεξη κατά τη διάρκεια της οποίας όλα τα καύσιμα αντικείμενα μέσα στο χώρο έχουν αρχίσει να καίγονται και οι φλόγες εμφανίζονται να καλύπτουν πλήρως το χώρο και

γ) Η περίοδος αποσύνθεσης (decay period) η οποία ορίζεται συνήθως ως αυτή η περίοδος κατά την οποία η μέση θερμοκρασία έχει πέσει στο 80% της μέγιστης τιμής της.

Η μέση θερμοκρασία στο πρώτο στάδιο είναι χαμηλή ενώ μέσα και κοντά στη ζώνη καύσης εμφανίζονται υψηλές τοπικές θερμοκρασίες. Η μετάβαση από το πρώτο στο δεύτερο στάδιο χαρακτηρίζεται ως «πλήρης ανάφλεξη» (flashover) και αντιστοιχεί σε μία ραγδαία μετάβαση από την κατάσταση των τοπικών εστιών φωτιάς στην έναυση καύσης όλων των καυσίμων αντικειμένων μέσα στο χώρο. Η διάρκεια αυτού του μεταβατικού σταδίου είναι συνήθως μικρή σε σχέση με τη διάρκεια των κυρίων σταδίων της φωτιάς και σηματοδοτεί την έναρξη της πλήρως αναπτυγμένης φωτιάς. Οποιοσδήποτε δεν έχει καταφέρει να διαφύγει από ένα δωμάτιο πριν την «πλήρη ανάφλεξη» έχει λίγες πιθανότητες να επιβιώσει.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 1 κατά τη διάρκεια της πλήρως αναπτυγμένης φωτιάς ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας φτάνει στο μέγιστο ενώ μεγιστοποιείται και η απειλή προς γειτονικούς χώρους-και πιθανώς γειτονικά κτίρια. Οι φλόγες βγαίνοντας από τα όποια ανοίγματα του κτιρίου μεταδίδουν τη φωτιά στο υπόλοιπο του κτιρίου είτε εσωτερικά (διαμέσου των ανοιχτών εσωτερικών θυρών) είτε εξωτερικά (διαμέσου των παραθύρων).Συνήθως κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου επέρχεται η μέγιστη δομική καταστροφή στο κτίριο λόγω της οποίας μπορεί να προκληθεί η μερική ή ολική κατάρρευσή του. Κατά τη διάρκεια του επόμενου σταδίου ο ρυθμός καύσης μειώνεται καθώς το καύσιμο σιγά-σιγά εξαντλείται.



Εικόνα 1 : Διαδοχή των σταδίων στην εξέλιξη μιας φωτιάς (growth period:φάση ανάπτυξης της φωτιάς, fully developed fire:πλήρως αναπτυγμένη φωτιά, decay period:φάση μείωσης, flashover:πλήρης ανάφλεξη)

Κατόπιν της έναυσης καύσης σε μια τοπική εστία φωτιάς τρία πράγματα μπορεί να συμβούν (Drysdale , 1999):

- 1) Η φωτιά μπορεί να κάψει μόνο το αρχικό αντικείμενο μέχρι τέλους πριν προλάβει να εξαπλωθεί σε άλλα αντικείμενα και έτσι να σβήσει λόγω έλλειψης περαιτέρω καυσίμου. Αυτό είναι πολύ πιθανό να συμβεί ειδικά όταν η αρχική φωτιά βρίσκεται σε ένα απομονωμένο σημείο.
- 2) Αν δεν υπάρχει επαρκής αέρας η φωτιά μπορεί να σβήσει λόγω έλλειψης οξυγόνου ή να συνεχίσει να καίει με πολύ αργούς ρυθμούς οι οποίοι θα είναι ανάλογοι προς την περιεκτικότητα του αέρα του χώρου σε οξυγόνο
- 3) Αν υπάρχει αρκετό καύσιμο και αέρας η φωτιά μπορεί να εξελιχθεί σε πλήρως αναπτυγμένη στην οποία όλα τα καύσιμα υλικά μέσα στο δωμάτιο έχουν αρχίσει να καίγονται.

1.1.1 Διάδοση της φωτιάς

Ο ρυθμός με τον οποίο θα αναπτυχθεί μια φωτιά θα εξαρτηθεί από το πόσο γρήγορα μπορεί να εξαπλωθεί η φλόγα από το σημείο ανάφλεξης σε όλα τα κοντινά καύσιμα υλικά. Για τη μετάβαση σε πλήρως αναπτυγμένη φωτιά στο εσωτερικό ενός δωματίου απαιτείται ανάπτυξη της φωτιάς πέρα από ένα συγκεκριμένο όριο έτσι ώστε να εμφανιστούν υψηλές θερμοκρασίες (τυπικά >600°C) στο ύψος της οροφής του δωματίου. Ο ρυθμός αύξησης του τοπικού ρυθμού καύσης επηρεάζεται κατά κύριο λόγο από το μέγεθος της συνολικά καιόμενης επιφάνειας , ενώ σημαντικό ρόλο έχει και η εμφάνιση φαινομένων μεταφοράς θερμότητας από ακτινοβολία. Η φωτιά μπορεί να διαδοθεί σε στερεές αλλά και υγρές επιφάνειες. Στα πλαίσια αυτής της

εργασίας θα εξετασθεί η διάδοση σε στερεές επιφάνειες καθώς αυτό είναι το κυρίαρχο φαινόμενο στην περίπτωση της φωτιάς μέσα σε κτίρια. Διάφοροι παράγοντες παίζουν ρόλο στην εξάπλωση της φωτιάς:

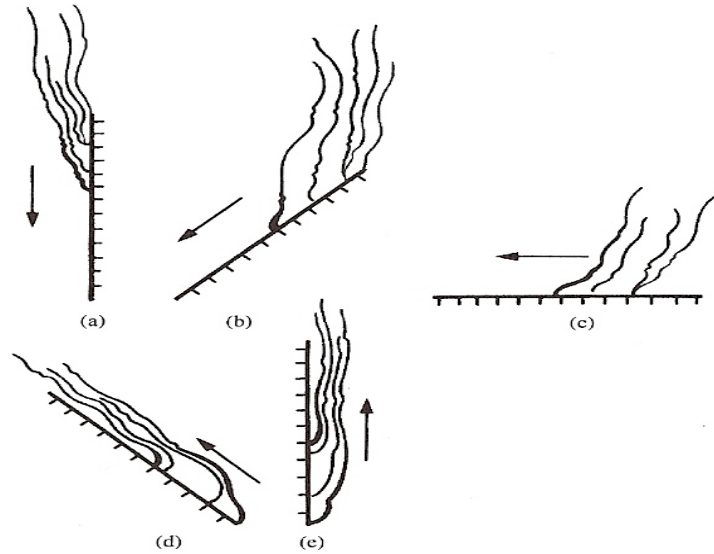
1) Ο προσανατολισμός της επιφάνειας και η κατεύθυνση διάδοσης.

Γενικά οι στερεές επιφάνειες μπορούν να καούν σε οποιαδήποτε πλευρά τους ασχέτως προσανατολισμού της επιφάνειας (σε αντίθεση με τα υγρά τα οποία καίγονται μόνο στην οριζόντια επιφάνειά τους). Έχει παρατηρηθεί (Magee and McAlevy , 1971) ότι ο ρυθμός διάδοσης της φλόγας προς τα πάνω σε μια επιφάνεια λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του όταν η επιφάνεια είναι κάθετη και μειώνεται σταδιακά όσο μειώνεται η γωνία κλίσης. Ο ρυθμός διάδοσης της φλόγας προς τα κάτω σε μια επιφάνεια είναι πολύ πιο αργός σε σχέση με το ρυθμό διάδοσης προς τα πάνω ενώ σε αυτή την περίπτωση το φαινόμενο είναι λιγότερο ευαίσθητο στις αλλαγές της κλίσης. Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται κάποια ενδεικτικά πειραματικά αποτελέσματα διάδοσης φλόγας σε επιφάνεια στερεού καυσίμου.

Πίνακας 1: Πειραματικά αποτελέσματα (Magee and McAlevy, 1971)

Κλίση(°)	Ρυθμός εξάπλωσης(mm/s)
0	3.6
+22.5	6.3
+45	11.2
+75	29.2
+90	46-74 (μη σταθερός)

Ο λόγος για αυτό το φαινόμενο είναι ότι ο τρόπος με τον οποίο αλληλεπιδρά η φλόγα με το άκαυστο καύσιμο μεταβάλλεται καθώς μεταβάλλεται και ο προσανατολισμός της επιφάνειας. Σε μια οριζόντια ή επικλινή προς τα κάτω επιφάνεια η εισροή αέρα (air entrainment) στη φλόγα οδηγεί σε «μετάδοση φλόγας αντίθετα προς το ρεύμα αέρα» ενώ στην περίπτωση ανοδικής κλίσης , λόγω της άνωσης , τόσο η φλόγα όσο και τα προϊόντα της καύσης κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση γεμίζοντας το οριακό στρώμα και δημιουργώντας υψηλούς ρυθμούς μεταφοράς θερμότητας στο μέτωπο της ζώνης καύσης (Εικόνα 2).

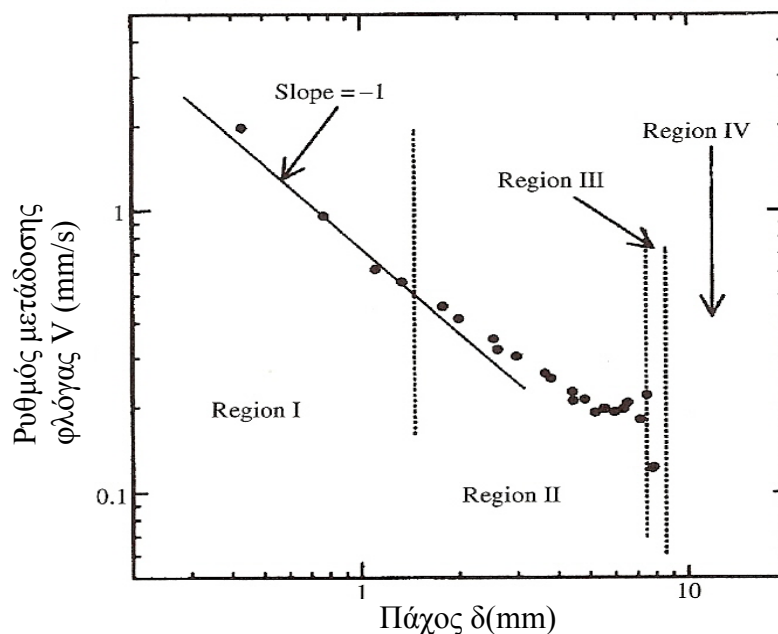


Εικόνα 2: Διαφορετικές περιπτώσεις εξάπλωσης της φωτιάς ανάλογα με την κλίση της επιφάνειας

2) Πάχος καυσίμου

Ενώ η εξάπλωση της φλόγας μπορεί να θεωρηθεί ως ένα πρόβλημα ψευδο-μόνιμης κατάστασης, εμφανίζονται παρ'όλα αυτά και μεταβατικά φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας. Το μέτωπο της φλόγας αντιπροσωπεύει ένα όριο το οποίο διαχωρίζει τις δύο διαφορετικές καταστάσεις του ακαύστου και του καιομένου καυσίμου. Η κίνηση αυτού του ορίου κατά μήκος του καυσίμου μπορεί να θεωρηθεί ως η διάδοση ενός μετώπου ανάφλεξης: όπως συμβαίνει με την ανάφλεξη έτσι και εδώ ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας με αγωγή από την επιφάνεια προς το εσωτερικό του καυσίμου επηρεάζει σημαντικά τη διεργασία. Αν το καύσιμο είναι πολύ λεπτό έχει βρεθεί θεωρητικά ότι ο ρυθμός μετάδοσης της φλόγας είναι αντιστρόφως ανάλογος προς το πάχος (τ) του υλικού. Οι Magee and McAlevy χρησιμοποιώντας δεδομένα του Royal (1970) έδειξαν ότι για κατωφερή μετάδοση φλόγας σε κάθετα δοκίμια από λεπτά καύσιμα σελιλόζης ισχύει $V \propto \tau^{-1}$ για πάχη μικρότερα των 1.5 mm. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώθηκε από τα αποτελέσματα των Suzuki et al. (1994).

Αυξανόμενου του πάχους του καυσίμου, ο ρυθμός μετάδοσης της φλόγας γίνεται τελικά ανεξάρτητος του πάχους. Οι Suzuki et al. (1994) έδειξαν ότι η εξάρτηση του ρυθμού μετάδοσης από το πάχος γινόταν λιγότερο αισθητή για $\tau > 1.5$ mm και ο ρυθμός κατέληγε να είναι σταθερός για πάχη στην περιοχή 5.0-7.5 mm (Εικόνα 3).



Εικόνα 3 : Εξάρτηση του ρυθμού μετάδοσης φλόγας από το πάχος του υλικού (Περιοχές I και II: σταθερή μετάδοση, Περιοχή III: ασταθής μετάδοση, Περιοχή IV: μη μετάδοση (δεδομένα από Suzuki et al., 1994)

3) Πυκνότητα, θερμοχωρητικότητα και θερμική αγωγιμότητα

Το «βάθος θέρμανσης» (depth of heating) προσδιορίζεται προσεγγιστικά μέσω της σχέσης $(at)^{1/2}$ (1.1.1.1) όπου a είναι η θερμική διάχυση ($k/\rho c$) και t είναι ο χρόνος σε s κατά τον οποίο η επιφάνεια του στερεού είναι εκτεθειμένη σε μια ροή θερμότητας. Για ένα κινούμενο μέτωπο φλόγας ο χρόνος έκθεσης για το άκαυστο καύσιμο είναι l/V (1.1.1.2) όπου V είναι ο ρυθμός μετάδοσης και l είναι το «θερμαινόμενο μήκος» δηλαδή το μήκος του δείγματος το οποίο είναι κάθετο στη μετακινούμενη φλόγα και στο οποίο η θερμοκρασία αυξάνεται από T_0 (περιβάλλοντος) στη θερμοκρασία που αντιστοιχεί στη φλόγα. Έτσι το οριακό πάχος τ_{cr} για τη μετάδοση της φλόγας δίνεται από την εξίσωση (1.1.1.3)

$$\tau_{cr} = (al/V)^{0.5} \quad (1.1.1.3)$$

Για λεπτά καύσιμα ($\tau < \tau_{cr}$) θα ισχύει η σχέση (1.1.1.4)

$$V \propto (\rho c \tau)^{-1} \quad (1.1.1.4)$$

Για καύσιμα με $\tau > \tau_{cr}$ ισχύει η σχέση (1.1.1.5) όπου δ είναι το πάχος του θερμού στρώματος στην επιφάνεια του υλικού.

$$\delta = (al/V)^{0.5} \quad (1.1.1.5)$$

Με αντικατάσταση στη σχέση (1.1.1.3) όπου τ με δ προκύπτει η σχέση (1.1.1.6):

$$V \propto 1/k\rho c \quad (1.1.1.6)$$

Καθώς η θερμική αγωγιμότητα ενός στερεού (k) είναι γενικά ανάλογη με την πυκνότητά του, από την εξίσωση (1.1.1.6) συνάγεται ότι ο ρυθμός μετάδοσης της φλόγας εξαρτάται από την πυκνότητα του καυσίμου υλικού (προσεγγιστικά $V \propto \rho^{-2}$). Αυτό εξηγεί γιατί στα υλικά χαμηλής πυκνότητας αναπτύσσεται πολύ εύκολα φωτιά: αρκεί να θερμανθεί μόνο μια πολύ μικρή ποσότητα μάζας από την επιφάνεια του υλικού προκειμένου να εξαπλωθεί η φλόγα.

4) Γεωμετρία του υλικού

α) Πλάτος.

Το πλάτος ενός αντικειμένου έχει μικρή ή καθόλου επίδραση στο ρυθμό μετάδοσης κατωφερούς φλόγας. Η κατάσταση είναι διαφορετική για φλόγα που κινείται προς τα πάνω. Οι Thomas and Webster (1960) κατέληξαν στην εξίσωση (1.1.1.7) ύστερα από πειράματα σε κλωστές από βαμβάκι:

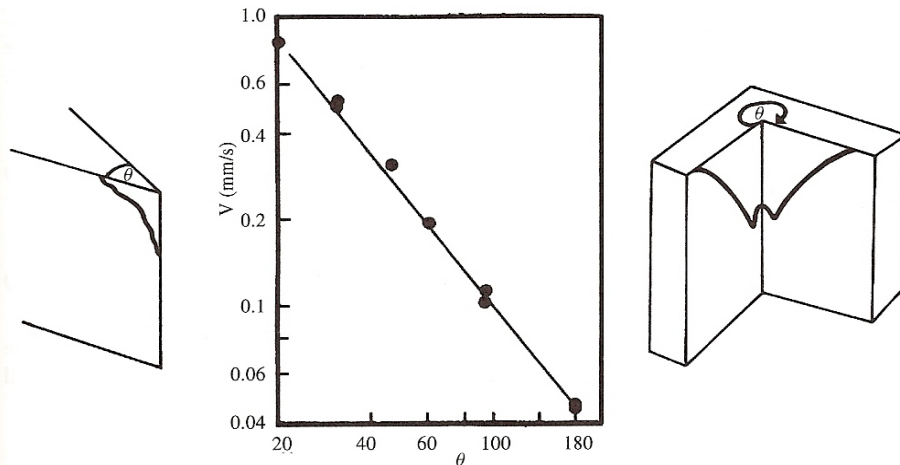
$$V \propto (\text{πλάτος})^{0.5} \quad (1.1.1.7)$$

β) Παρουσία γωνιών

Η φλόγα εξαπλώνεται πολύ πιο ραγδαία σε μια γωνία ή μια ακμή παρά πάνω από μια επίπεδη επιφάνεια. Το φαινόμενο αυτό ερευνήθηκε συστηματικά από τους Markstein and de Ris (1972) οι οποίοι χρησιμοποίησαν κατάλληλες κατασκευές από PMMA. Ο ρυθμός κατωφερούς μετάδοσης στην ακμή μετρήθηκε ως συνάρτηση της γωνίας θ και βρέθηκε ότι ισχύει η σχέση (1.1.1.8):

$$V \propto \theta^{4/3} \quad (1.1.1.8)$$

Όσο μικρότερη είναι η γωνία θ τόσο περισσότερο η ακμή του στερεού πλησιάζει τη συμπεριφορά λεπτού καυσίμου με τη φωτιά να εξαπλώνεται προς τα κάτω και από τις δύο πλευρές. Ο ρυθμός κατωφερούς μετάδοσης είναι ελάχιστος για $\theta=180^\circ$. Οι Markstein and de Ris (1972) εκτίμησαν ότι $V \approx 0.56$ m/s για $\theta=270^\circ$ με αυτή να είναι η μέγιστη ταχύτητα, κοντά στη γωνία.



Εικόνα 4: Εξάρτηση του ρυθμού μετάδοσης από τη γωνία του αντικειμένου (Πειραματικά αποτελέσματα Markstein and de Ris 1975)

5) Επίδραση του περιβάλλοντος

α) Σύνθεση της ατμόσφαιρας

Οποιαδήποτε αύξηση της συγκέντρωσης του οξυγόνου στον αέρα συνοδεύεται από μια αύξηση στο ρυθμό εξάπλωσης της φλόγας. Αυτό συμβαίνει επειδή τότε η φλόγα αποκτά υψηλότερη θερμοκρασία και μπορεί να αποδώσει περισσότερη θερμότητα στο καύσιμο. Στην περίπτωση αυτή η φλόγα τείνει να βρίσκεται πιο κοντά στην επιφάνεια του καυσίμου. Οι Huggett et al. (1966) βρήκαν ότι ο ρυθμός μετάδοσης της φλόγας πάνω από ξύλινες επιφάνειες σε μείγματα O_2/N_2 και O_2/He εξαρτάται από την αναλογία $[O_2]/c_g$ όπου $[O_2]$ είναι η συγκέντρωση του οξυγόνου και c_g η θερμική χωρητικότητα της ατμόσφαιρας.

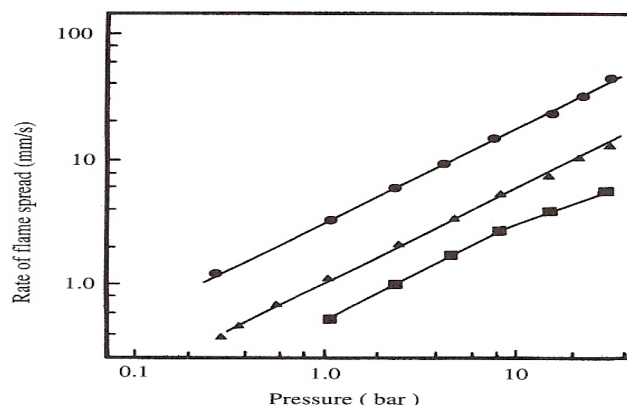
β) Εξαναγκασμένη ροή θερμότητας από ακτινοβολία.

Μία εξαναγκασμένη ροή θερμότητας από ακτινοβολία προκαλεί αύξηση στο ρυθμό μετάδοσης της φλόγας κυρίως επειδή προθερμαίνεται το καύσιμο μπροστά από το μέτωπο της φλόγας. Ο αυξημένος ρυθμός καύσης πίσω από το μέτωπο της φλόγας οδηγεί σε ισχυρότερες φλόγες οι οποίες οδηγούν με τη σειρά τους σε περαιτέρω μεταφορά θερμότητας προς τα εμπρός και έτσι ενισχύεται η διεργασία.

Ακόμη και σχετικά μικρές ποσότητες ακτινοβολίας είναι δυνατό να προκαλέσουν σημαντικό αποτέλεσμα. Ο Alvares (1975) παρατήρησε ότι η ροή θερμότητας από ακτινοβολία ισοδύναμη με 3-4 φορές την ακτινοβολία του καλοκαιρινού ήλιου στο Ηνωμένο Βασίλειο αυξάνει το ρυθμό μετάδοσης της φλόγας κατά 70%. Ένα τέτοιο φαινόμενο είναι σημαντικό κατά τα πρώτα στάδια της φωτιάς σε κτίριο όταν τα επίπεδα ακτινοβολίας, από τα τοιχώματα του κτιρίου και από το ζεστό στρώμα καυσαερίων τα οποία είναι εγκλωβισμένα κάτω από το ταβάνι, αυξάνονται σταδιακά.

γ) Ατμοσφαιρική πίεση

Υψηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης φλόγας παρατηρούνται σε αυξημένη ατμοσφαιρική πίεση εξαιτίας του εμπλουτισμού σε οξυγόνο το οποίο ενισχύει τη σταθερότητα της φλόγας στην επιφάνεια. Σχετικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στην εικόνα 5 (McAlevy and Magee, 1969)



Εικόνα 5 : Διάγραμμα ρυθμού μετάδοσης φλόγας-πίεσης σε μείγματα οξυγόνου-αζώτου. Τα τετράγωνα αντιστοιχούν σε μείγμα με 46% οξυγόνο, τα τρίγωνα σε 62% οξυγόνο και οι κύκλοι σε 100% οξυγόνο.

δ) Κίνηση αέρα (άνεμος)

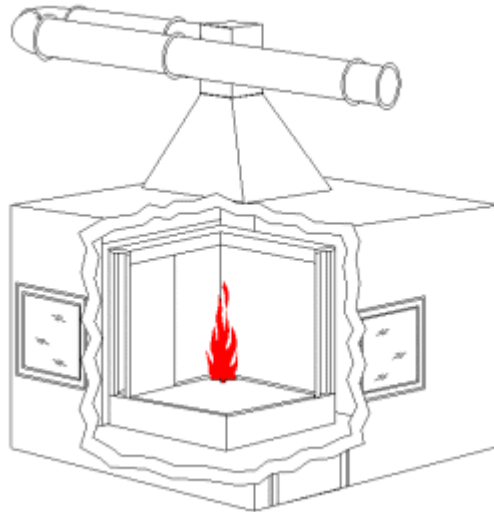
Γενικά, η κίνηση του αέρα πάνω από μια φλόγα αυξάνει το ρυθμό μετάδοσής της σε μια καύσιμη επιφάνεια. Ο μηχανισμός αυτός περιλαμβάνει ώθηση της φλόγας προς τα εμπρός η οποία συνδυασμένη με την ενισχυμένη καύση πίσω από το μέτωπο της φλόγας θα αυξήσει το ρυθμό της μετάδοσης θερμότητας προς τα εμπρός. Αν η ροή του αέρα αντιτίθεται στην εξάπλωση της φλόγας το συνολικό αποτέλεσμα εξαρτάται από την ταχύτητα του αέρα. Αρκετά υψηλές ταχύτητες προκαλούν μείωση του ρυθμού μετάδοσης (και τελικά σβήσιμο της φλόγας), ενώ οι μικρές ταχύτητες αυξάνουν την ταχύτητα μετάδοσης.

1.2 Διεθνείς δοκιμές πιστοποίησης και μέτρησης χαρακτηριστικών της φωτιάς

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται οι σημαντικότερες δοκιμές πιστοποίησης που έχουν αναπτυχθεί για πιστοποίηση συγκεκριμένων ιδιοτήτων υλικών έναντι της φωτιάς.

α) SBI Test (EN 13823)

Το τεστ SBI (Single Burning Item) είναι μία μέθοδος για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς που θα παρουσιάσουν συγκεκριμένα οικοδομικά υλικά όταν εκτεθούν σε ροή θερμότητας από ένα αντικείμενο που καίγεται (στη συγκεκριμένη δοκιμή χρησιμοποιείται ένας καυστήρας προπανίου). Η αντίδραση του υλικού στον καυστήρα παρατηρείται και καταγράφεται. Οι ρυθμοί έκλυσης θερμότητας και καπνού μετρώνται από όργανα και καταγράφονται τα φυσικά χαρακτηριστικά τα οποία γίνονται αισθητά από την παρατήρηση του πειράματος.



Εικόνα 6 :Σχηματική αναπαράσταση του SBI Test



Εικόνα 7 :Εργαστηριακή διάταξη SBI Test

Στην εικόνα 6 απεικονίζεται μια σχηματική αναπαράσταση της δοκιμής , ενώ στην εικόνα 7 παρουσιάζεται μια φωτογραφία μιας πραγματικής διάταξης SBI Test. Σε αυτή τη διάταξη βλέπουμε τα μέρη που απαρτίζουν μία δοκιμή SBI.

- Μία κινούμενη πλατφόρμα πάνω στην οποία βρίσκεται το προς εξέταση δείγμα και η οποία εφαρμόζει πάνω στο ακίνητο πλαίσιο
- Το ακίνητο πλαίσιο
- Κύριους και δευτερεύοντες καυστήρες
- Σύστημα απορροής των καυσαερίων που αποτελείται από ένα συλλέκτη των καυσαερίων και από ένα σύστημα σωληνώσεων
- Θερμοστοιχεία καταγραφής της θερμοκρασίας και σωλήνες Pitot για τη μέτρηση της ταχύτητας. Τα θερμοστοιχεία και οι σωλήνες βρίσκονται στο εσωτερικό των αγωγών του συστήματος απορροής των καυσαερίων.

Η πιστοποίηση που μπορεί να πάρει ένα υλικό μετά από το SBI Test χωρίζεται στις κατηγορίες που παρουσιάζονται στον πίνακα 2:

Πίνακας 2: Κατηγορίες πιστοποίησης του SBI Test

Κατάταξη κατά SBI	Κριτήρια
A2	FIGRA \leq 120W/s LFS \leq ακμή του δείγματος THR _{600s} \leq 7.5 MJ
B	FIGRA \leq 120W/s LFS \leq ακμή του δείγματος THR _{600s} \leq 7.5 MJ
C	FIGRA \leq 250W/s LFS \leq ακμή του δείγματος THR _{600s} \leq 15 MJ
D	FIGRA \leq 750W/s

Όπου FIGRA=Fire Growth Rate (Ρυθμός ανάπτυξης της φωτιάς),LFS=Limit of Fire Spread (Όριο εξάπλωσης της φωτιάς) και THR_{600s}=Total Heat Release after 600 s (Ολική έκλυση θερμότητας μετά από 600 s) (πηγή:www.fire-testing.com/html/instruments/sbi.htm).

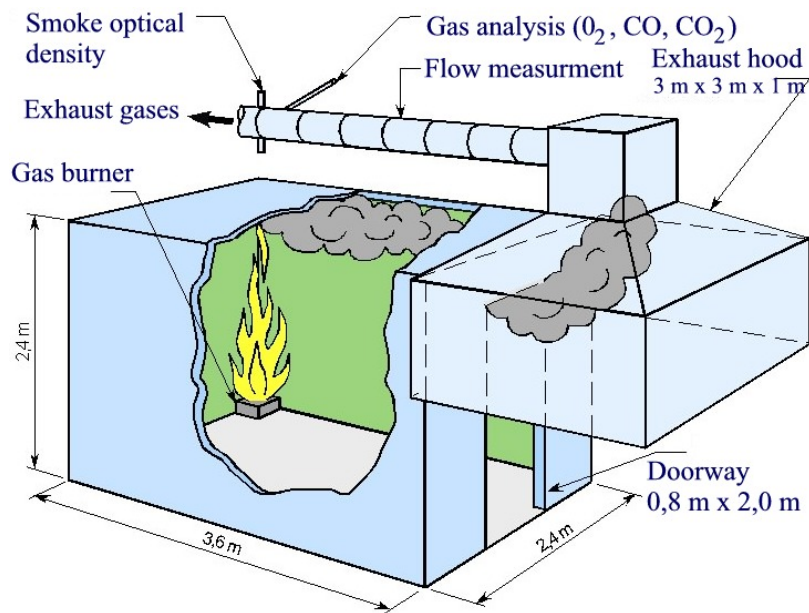
β)Room Corner Test (ISO 9705)

Η δοκιμή προσδιορίζει τις ιδιότητες κάποιων υλικών όταν εκτεθούν σε φωτιά. Συνήθως μετρούνται υλικά τα οποία είναι δύσκολο να μετρηθούν υπό μικρή κλίμακα για παράδειγμα θερμοπλαστικά υλικά και υλικά με μεγάλη ανομοιομορφία. Η βασική διάταξη της πειραματικής εγκατάστασης απεικονίζεται στην εικόνα 8.

Με αυτή τη μέθοδο μετρούνται τα ακόλουθα μεγέθη:ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας (kW), η συνολική έκλυση θερμότητας (MJ) και ο ρυθμός παραγωγής καπνού (m³/s). Μετράται επίσης ο χρόνος κατά τον οποίο παρατηρείται πλήρης ανάφλεξη.

Τρόπος διεξαγωγής του πειράματος : Κατά τη διάρκεια του πειράματος το προς εξέταση δείγμα τοποθετείται στο εσωτερικό του δωματίου , στην οροφή και σε όλους τους τοίχους εκτός από τον τοίχο με το άνοιγμα της πόρτας. Ένας καυστήρας προπανίου τοποθετείται σε μία από τις γωνίες και παρέχει ένα ρυθμό έκλυσης θερμότητας 100 kW για τα πρώτα 10 min και μετά 300 kW για τα επόμενα 10 min. Η συνολική διάρκεια του πειράματος είναι 20 min. Τα καυσαέρια συγκεντρώνονται σε μία καμινάδα όπου μετρώνται ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας και η παραγωγή καπνού. Η εξάπλωση φωτιάς στους τοίχους και το ταβάνι παρατηρείται οπτικά. Αν οι φλόγες βγουν από το άνοιγμα της πόρτας τότε έχει συμβεί πλήρης ανάφλεξη και η δοκιμή διακόπτεται. Μια σχηματική αναπαράσταση της όλης διάταξης απεικονίζεται στην εικόνα 8.

Στην εικόνα 9 παρουσιάζεται μια φωτογραφία της διάταξης κατά την εκτέλεση μιας δοκιμής.



Εικόνα 8: Σχηματική αναπαράσταση του Room Corner Test



Εικόνα 9 : Φωτογραφία κατά τη διάρκεια ενός Room Corner Test

γ) Cone Calorimeter Test (ISO 5660)

Ο κωνικός θερμιδομετρητής είναι το πιο σημαντικό όργανο στον τομέα των μετρήσεων της φωτιάς.

Για να εκτιμηθεί η ανάπτυξη φωτιάς σε υλικά και προϊόντα πρέπει να έχει μετρηθεί η έκλυση θερμότητας. Η συγκεκριμένη μέτρηση είναι πολύ δύσκολη και πιο πρόσφατα πειράματα ευρείας κλίμακας έγιναν δυνατά καίγοντας τα υπό μέτρηση υλικά και υπολογίζοντας την έκλυση θερμότητας χρησιμοποιώντας μια μέθοδο η οποία ονομάζεται θερμιδομετρία με αραίωση του οξυγόνου.

Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην εμπειρική παρατήρηση ότι η θερμότητα που εκλύεται από καιόμενα υλικά είναι ευθέως ανάλογη προς την ποσότητα οξυγόνου που χρησιμοποιείται στη διαδικασία καύσης. Το όργανο που χρησιμοποιείται για τη σχετική μέτρηση ονομάζεται κωνικός θερμιδομετρητής. Το όνομα προέρχεται από το

κωνικό σχήμα του θερμαντήρα ο οποίος χρησιμοποιείται για την εκπομπή θερμικής ακτινοβολίας στο υπό εξέταση υλικό με ροή θερμότητας της τάξης των 100 kW/m^2 . Ένα πλήρες σύστημα κωνικού θερμιδομετρητή αποτελείται από:

- Κωνικό θερμαντήρα. Ο κωνικός θερμαντήρας , ο οποίος στην άκρη του καταλήγει σε καμινάδα , έχει ισχύ 5000 W στα 230 V και μέγιστη έκλυση θερμότητας 100 kW/m^2 , ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί με οριζόντιο αλλά και κάθετο προσανατολισμό.
- Συγκρατητές του δείγματος για δείγμα $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times$ μέχρι 50 mm πάχος στην οριζόντια και στην κάθετη διεύθυνση.
- Ανάφλεξη από σπινθήρα 10 kV
- Σύστημα απαγωγής καυσαερίων. Αποτελείται από μία καμινάδα , όργανα καταγραφής των αερίων , έναν ανεμιστήρα και μία πλάκα με οπές όπου τοποθετούνται θερμοστοιχεία και στοιχεία καταγραφής διαφοράς πίεσης.
- Αναλυτή οξυγόνου
- Μετρητή πυκνότητας καπνού , στον οποίο χρησιμοποιείται ένα σύστημα laser με φωτοδιόδους
- Μετρητή ροής θερμότητας για τη μέτρηση της ροής θερμότητας από το θερμαντήρα προς το δείγμα



Εικόνα 10: Διάταξη κωνικού θερμιδομετρητή

Στην εικόνα 10 απεικονίζεται μια τυπική διάταξη κωνικού θερμιδομετρητή ενώ στην εικόνα 11 παρουσιάζονται τα σημαντικότερα στοιχεία της διάταξης.

Ο κωνικός θερμιδομετρητής μετρά το ρυθμό έκλυσης θερμότητας , τη συνολική θερμότητα που εκλύθηκε και τη θερμότητα καύσης από την κατανάλωση του οξυγόνου. Επίσης μετρά το ρυθμό απώλειας μάζας , το χρόνο για την ανάφλεξη και προαιρετικά τις ποσότητες μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα κατά την καύση ενός υλικού εκτεθειμένου σε ροή θερμότητας από ακτινοβολία η οποία κυμαίνεται από $0-100 \text{ kW/m}^2$.

Η συνολική έκλυση θερμότητας δίνεται από τον τύπο (1.2.1):

$$\dot{q} = (13.1 \cdot 10^3) 1.10 C \sqrt{\frac{\Delta P}{T_e} \frac{0.2095 - X_{O_2}}{1.105 - 1.5 X_{O_2}}} \quad (1.2.1)$$

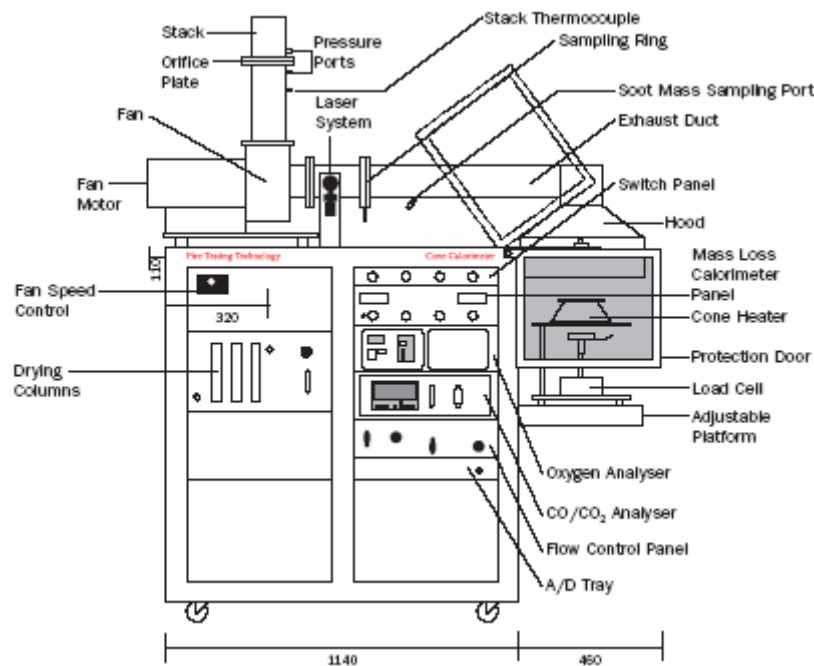
όπου \dot{q} = ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας

$c = \text{kg}^{1/2} \times \text{m}^{1/2} \times \text{K}^{1/2}$ (οι μετρήσεις λαμβάνονται από την πλάκα με τις οπές)

ΔP = η μετρηθείσα διαφορά πίεσης (Pa)

T_e = η θερμοκρασία του αερίου στην πλάκα με τις οπές (K)

X_{O_2} = το μετρηθέν κλάσμα mol στα καυσαέρια (αδιάστατο)



Εικόνα 11: Τυπικός κωνικός θερμιδομετρητής

δ) Θερμοβαρυστική ανάλυση

Η θερμοβαρυστική ανάλυση (thermogravimetric analysis, TGA) είναι ένα είδος μέτρησης το οποίο πραγματοποιείται σε δείγματα για να δείξει και να μετρήσει αλλαγές στο βάρος τους σε συνάρτηση με αλλαγές στη θερμοκρασία. Μία τέτοια ανάλυση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ακρίβεια στη μέτρηση τριών μεταβλητών: το βάρος, τη θερμοκρασία και το ρυθμό μεταβολής της θερμοκρασίας.

Η μέθοδος χρησιμοποιείται στην έρευνα για τον προσδιορισμό χαρακτηριστικών υλικών όπως τα πολυμερή, στον προσδιορισμό του απορροφηθέντος ποσοστού υγρασίας από υλικά, το επίπεδο ανόργανων και οργανικών συστατικών των υλικών, καθώς και στην εκτίμηση του μηχανισμού της διάβρωσης στην οξείδωση υψηλών θερμοκρασιών.

Η διάταξη της μέτρησης συνήθως αποτελείται από μια ζυγαριά υψηλής ακρίβειας με μια πλατφόρμα πάνω στην οποία τοποθετείται το δείγμα. Το δείγμα μπαίνει σε έναν ηλεκτρικό φούρνο στον οποίο υπάρχει και ένα θερμοστοιχείο για την ακριβή μέτρηση της θερμοκρασίας. Η θερμοκρασία ανυψώνεται σταδιακά και το βάρος του υλικού

καταγράφεται ως συνάρτηση της θερμοκρασίας. Στην εικόνα 12 παρουσιάζεται μια τυπική συσκευή θερμοβαρυμετρικής ανάλυσης.



Εικόνα 12 :Συσκευή μέτρησης TGA

2. Παρουσίαση κώδικα υπολογιστικής ρευστομηχανικής FDS

Ο κώδικας υπολογιστικής ρευστομηχανικής που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία για να μοντελοποιηθούν και να προσομοιωθούν οι διαφορετικές περιπτώσεις φωτιάς λέγεται FDS (Fire Dynamics Simulator).

Ο κώδικας FDS είναι κώδικας Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής στον οποίο επιλύονται αριθμητικά οι εξισώσεις Navier-Stokes για περιπτώσεις ροής ρευστού χαμηλής ταχύτητας σε συνδυασμό με μετάδοση θερμότητας. Στο συγκεκριμένο κώδικα δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στη μετάδοση θερμότητας και καπνού (αιθάλης) από φωτιές. Για την επίλυση των εξισώσεων διατήρησης της μάζας, ενέργειας και ορμής, χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών και η λύση ανανεώνεται χρονικά σε ένα τριδιάστατο, ορθογώνιο πλέγμα. Για τον υπολογισμό της θερμικής ακτινοβολίας χρησιμοποιείται μια μέθοδος πεπερασμένου όγκου στο ίδιο πλέγμα στο οποίο γίνεται η επίλυση και της ροής.

Ο κώδικας FDS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση των ακόλουθων φαινομένων:

- Μετάδοση (με χαμηλή ταχύτητα) θερμότητας και προϊόντων φωτιάς
- Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία και συναγωγή μεταξύ των αερίων και των στερεών
- Πυρόλυση
- Διάδοση φλόγας και εξάπλωση φωτιάς
- Ενεργοποίηση ανιχνευτών φωτιάς, θερμότητας και καταιονιστήρων (ψεκαστών νερού)
- Ρίψη νερού από καταιονιστήρες και αλληλεπίδραση της φωτιάς με το νερό από τους ψεκαστές.

Στον κώδικα υπολογίζεται η θερμοκρασία, η πίεση, η πυκνότητα, η ταχύτητα και η χημική σύνθεση σε κάθε κελί του πλέγματος, για κάθε χρονικό βήμα. Επίσης υπολογίζονται στις στερεές επιφάνειες η θερμοκρασία, η ροή θερμότητας, ο ρυθμός απώλειας μάζας όπως επίσης και διάφορες άλλες ποσότητες. Στη συνέχεια αναφέρονται κάποια ενδεικτικά μεγέθη τα οποία είναι δυνατό να υπολογιστούν κατά την εκτέλεση του κώδικα:

- Θερμοκρασία εσωτερικού χώρου καθώς και θερμοκρασία στερεών επιφανειών
- Ροή θερμότητας από συναγωγή αλλά και από ακτινοβολία
- Ρυθμός καύσης
- Μάζα σταγονιδίων ύδατος ανά μονάδα επιφανείας
- Συνολικός ρυθμός έκλυσης θερμότητας (Heat Release Rate-HRR)
- Χρόνοι ενεργοποίησης ψεκαστών και ανιχνευτών
- Ροή μάζας και θερμότητας διαμέσου ανοιγμάτων ή στερεών

Για την απεικόνιση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων γίνεται χρήση του προγράμματος γραφικής απεικόνισης Smokeview.

2.1 Μοντέλα προσομοίωσης φυσικών διεργασιών

Υδροδυναμικό μοντέλο

Στον κώδικα FDS επιλύονται αριθμητικά οι εξισώσεις Navier-Stokes, οι οποίες είναι κατάλληλες για ροή ρευστού χαμηλής ταχύτητας με ταυτόχρονη μετάδοση θερμότητας. Ο αλγόριθμος επίλυσης έχει τη μορφή πρόβλεψης-διόρθωσης (predictor-corrector) με ακρίβεια δεύτερης τάξης στο χώρο και το χρόνο. Η τύρβη επιλύεται

χρησιμοποιώντας τον τύπο Smagorinsky του μοντέλου Προσομοίωσης Μεγάλων Δινών (Large Eddy Simulation-LES).

Μοντέλο καύσης

Για τις περισσότερες εφαρμογές, στον κώδικα FDS χρησιμοποιείται το μοντέλο κλάσματος μείγματος. Με τη θεώρηση ενός συστήματος που χαρακτηρίζεται από τη ροή ενός ρεύματος καυσίμου που αναμειγνύεται με ένα ρεύμα οξειδωτικού, το κλάσμα μείγματος του ρεύματος καυσίμου στο μείγμα ορίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (2.1.1) (Φούντη, 2005):

$$f = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} \quad (2.1.1)$$

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

Στο μοντέλο γίνεται η υπόθεση ότι η καύση είναι ελεγχόμενη από την ανάμειξη και ότι η αντίδραση καυσίμου και οξυγόνου είναι απείρως γρήγορη. Τα κλάσματα μάζας από όλα τα κυριότερα αντιδρώντα και προϊόντα μπορούν να συναχθούν από το συνολικό κλάσμα μείγματος.

Μεταφορά ακτινοβολίας

Η μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας λαμβάνεται υπ' όψη μέσω της επίλυσης της εξίσωσης μεταφοράς ακτινοβολίας για ένα μη διαχέον φαιό αέριο. Σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα μοντέλο ευρείας ζώνης (wide-band model) στη θέση του μοντέλου του φαιού αερίου. Η μεταφορά ακτινοβολίας επιλύεται χρησιμοποιώντας μια τεχνική παρόμοια με μία μέθοδο πεπερασμένου όγκου για μεταφορά μέσω συναγωγής, έτσι το όνομα που δίνεται σε αυτή τη μέθοδο είναι Μέθοδος Πεπερασμένου Όγκου (Finite Volume Method-FVM). Χρησιμοποιώντας περίπου 100 γωνίες η επίλυση πεπερασμένου όγκου απαιτεί περίπου το 15% του συνολικού χρόνου CPU που απαιτείται για έναν υπολογισμό.

Γεωμετρία

Στον κώδικα FDS οι εξισώσεις επιλύονται σε ένα ή περισσότερα ορθογώνια πλέγματα. Τα αντικείμενα που θα τοποθετηθούν εντός του πλέγματος θα πρέπει επίσης να είναι ορθογώνια και να ενσωματώνονται αρμονικά στο πλέγμα του χώρου.

Οριακές συνθήκες

Σε όλες τις στερεές επιφάνειες ορίζονται θερμικές οριακές συνθήκες, ενώ επίσης απαιτείται η παροχή στοιχείων για τη συμπεριφορά που επιδεικνύει κάθε υλικό κατά την καύση του.

Ψεκαστές και ανιχνευτές

Η ενεργοποίηση των ψεκαστών και των ανιχνευτών θερμότητας και καπνού μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας απλούς συσχετισμούς οι οποίοι βασίζονται σε δεδομένα θερμότητας για τους ψεκαστές και τους ανιχνευτές θερμότητας και σε δεδομένα για τον καπνό για τους ανιχνευτές καπνού.

2.1.1 Υδροδυναμικό μοντέλο

Οι εξισώσεις διατήρησης της ορμής, μάζας και ενέργειας οι οποίες χρησιμοποιούνται στο FDS είναι οι εξής:

Διατήρηση της μάζας

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho u = 0 \quad (2.1.1.1)$$

Διατήρηση της ορμής

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \nabla \rho u u + \nabla p = \rho f + \nabla \tau_{ij} \quad (2.1.1.2)$$

Διατήρηση της ενέργειας

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \rho h u = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}''' - \nabla q + \Phi \quad (2.1.1.3)$$

Καταστατική εξίσωση για τέλειο αέριο

$$p = \frac{\rho R T}{M} \quad (2.1.1.4)$$

Οι εξισώσεις (2.1.1.1-2.1.1.4) αποτελούν μια ομάδα μερικών διαφορικών εξισώσεων οι οποίες είναι όλες συναρτήσεις των τριών διαστάσεων του χώρου και του χρόνου και έχουν έξι αγνώστους: την πυκνότητα ρ , τις τρεις συνιστώσες της ταχύτητας $u=(u, v, w)$, τη θερμοκρασία T και την πίεση p . Η αισθητή ενθαλπία είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας:

$$\int_{T_0}^T c_p(T') dT' \quad (2.1.1.5)$$

Ο όρος τ_{ij} που εμφανίζεται στην εξίσωση (2.1.1.2) είναι πίνακας τάσεων που ορίζεται μέσω της σχέσης (2.1.1.6):

$$\tau_{ij} = \mu \left(2S_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} (\nabla \cdot u) \right) \quad (2.1.1.6)$$

Ο όρος Φ ο οποίος παρατηρείται στην εξίσωση (2.1.1.3) είναι γνωστός σαν ο ρυθμός με τον οποίο η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια λόγω της συνεκτικότητας του ρευστού και υπολογίζεται μέσω της σχέσης (2.1.1.7):

$$\Phi = \tau_{ij} \nabla u = \mu (2S_{ij} S_{ij} - \frac{2}{3} (\nabla u)^2) \quad (2.1.1.7)$$

2.1.2 Μοντέλο καύσης

Το μοντέλο καύσης κλάσματος μείγματος το οποίο χρησιμοποιείται στον κώδικα FDS βασίζεται στην παραδοχή ότι φαινόμενα μεταφοράς από συναγωγή και ακτινοβολία τα οποία είναι μεγάλης κλίμακας μπορούν να προσομοιωθούν απευθείας, αλλά οι φυσικές διεργασίες οι οποίες συμβαίνουν σε μικρές κλίμακες μήκους και χρόνου πρέπει να αναπαρασταθούν με έναν προσεγγιστικό τρόπο (μοντελοποίηση).

Το μοντέλο βασίζεται στην αποδοχή ότι η καύση είναι ελεγχόμενη από τη μείξη των αερίων. Όλα τα στοιχεία που εμπλέκονται στην καύση μπορούν να περιγραφούν με όρους του κλάσματος μείγματος $Z(x,t)$ όπου x είναι η συντεταγμένη στο χώρο ενός δεδομένου σημείου και t ο χρόνος. Οι σχέσεις μεταξύ του κλάσματος μάζας του κάθε στοιχείου και του κλάσματος μείγματος είναι γνωστές ως «σχέσεις κατάστασης». Η σχέση κατάστασης για το κλάσμα μάζας του οξυγόνου παρέχει τις πληροφορίες που χρειάζονται για να υπολογιστεί ο τοπικός ρυθμός κατανάλωσης μάζας οξυγόνου. Η μορφή της σχέσης κατάστασης που προκύπτει από την κλασική θεωρία της στρωτής φλόγας διάχυσης είναι μια μερικώς γραμμική συνάρτηση. Ο τοπικός ρυθμός έκλυσης θερμότητας υπολογίζεται από τον τοπικό ρυθμό κατανάλωσης οξυγόνου στην επιφάνεια της φλόγας, υποθέτοντας ότι ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας είναι ευθέως ανάλογος με το ρυθμό κατανάλωσης οξυγόνου ανεξαρτήτως του καυσίμου που εμπλέκεται (FDS Version 4, Technical Reference Guide). Συγκεκριμένα, θεωρείται η γενική εξίσωση καύσης (2.1.2.1)



Οι συντελεστές v_i είναι οι στοιχειομετρικοί συντελεστές για τη συνολική διεργασία καύσης, στην οποία αντιδρά το καύσιμο «F» με το οξυγόνο «O» για να παραχθούν τα προϊόντα «P».

Οι ρυθμοί κατανάλωσης μάζας για το καύσιμο και το οξειδωτικό σχετίζονται μέσω της εξίσωσης (2.1.2.2):

$$\frac{\dot{m}_F}{v_F M_F} = \frac{\dot{m}_O}{v_O M_O} \quad (2.1.2.2)$$

Το κλάσμα μείγματος Z ορίζεται μέσω των σχέσεων (2.1.2.3)-(2.1.2.4):

$$Z = \frac{s Y_F - (Y_O - Y_{O,\infty})}{s Y_{F,I} + Y_{O,\infty}} \quad (2.1.2.3)$$

$$s = \frac{v_O M_O}{v_F M_F} \quad (2.1.2.4)$$

Η τιμή του κλάσματος μείγματος κυμαίνεται από $Z=1$ σε μια περιοχή που περιέχει μόνο καύσιμο έως $Z=0$ όπου το κλάσμα μάζας του οξυγόνου παίρνει την αρχική του τιμή περιβάλλοντος, $Y_{O_2,\infty}$.

Το κλάσμα μείγματος ικανοποιεί το νόμο διατήρησης (Εξίσωση 2.1.2.5)

$$\rho \frac{DZ}{Dt} = \nabla \rho D \nabla Z \quad (2.1.2.5)$$

Από τις εξισώσεις διατήρησης και την καταστατική εξίσωση για το οξυγόνο μπορεί να συναχθεί μία έκφραση για τον τοπικό ρυθμό κατανάλωσης O_2 (Εξίσωση 2.1.2.6):

$$-\dot{m}_{O_2}''' = \nabla \left(\rho D \frac{dY_{O_2}}{dZ} \nabla Z \right) - \frac{dY_{O_2}}{dZ} \nabla \rho D \nabla Z = \rho D \left(\frac{dY_{O_2}}{dZ} \right)' \left| \nabla Z \right|^2 \quad (2.1.2.6)$$

Η εξίσωση (2.1.2.6) εκφράζει το ρυθμό κατανάλωσης οξυγόνου (σε kg/s). Αν αυτός ο ρυθμός πολλαπλασιαστεί με τον όρο EPUMO2 (Energy Per Unit Mass of Oxygen), ο οποίος εκφράζει στον κώδικα FDS την ενέργεια που εκλύεται ανά μονάδα μάζας καταναλωθέντος O_2 (σε kJ/kg), προκύπτει ο τοπικός ρυθμός έκλυσης θερμότητας (σε kJ/s).

2.2 Μοντέλο LES

Στα περισσότερα συστήματα καύσης που χρησιμοποιούνται για πρακτικούς σκοπούς σήμερα όπως πύραυλοι, μηχανές εσωτερικής καύσης, βιομηχανικοί καυστήρες και κλίβανοι το είδος της καύσης το οποίο συναντάται είναι η τυρβώδης καύση (turbulent combustion). Η στρωτή καύση (laminar combustion) γενικά συναντάται σε περιορισμένο αριθμό εφαρμογών όπως κεριά, αναπτήρες και κάποιοι οικιακοί καυστήρες.

Η τύρβη μπορεί να χαρακτηριστεί από διακυμάνσεις όλων των τοπικών ιδιοτήτων μιας φλόγας (θερμοκρασία, ταχύτητα) με το χρόνο και επιτυγχάνεται για αρκετά μεγάλους αριθμούς Reynolds. Κάθε ιδιότητα μπορεί να διαχωριστεί σε μια μέση τιμή (\bar{f}) και τη διακύμανσή της (f') σύμφωνα με την εξίσωση (2.2.1):

$$f = \bar{f} + f' \quad (2.2.1)$$

Θεωρώντας ότι η τυρβώδης διακύμανση έχει κυματική συμπεριφορά διαχωρίζονται οι δίνες (eddies) σε μεγάλες και μικρές ανάλογα με τον αριθμό κύματος τους k ο οποίος ορίζεται στην εξίσωση (2.2.2):

$$k = 2\pi n = 2\pi/\lambda \quad (2.2.2)$$

όπου n είναι η συχνότητα του κύματος και λ το μήκος κύματος. Μια δίνη χαρακτηρίζεται ως μεγάλη ή μικρή ανάλογα με το μήκος κύματός της: όσο πιο μεγάλο το μήκος κύματος ανάλογα μεγάλη θα είναι και η δίνη. Από την εξίσωση

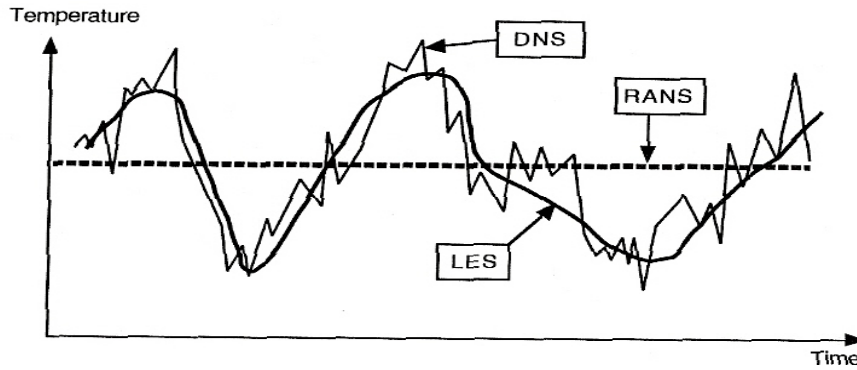
(2.2.2) συνάγεται ότι οι μεγάλες δίνες έχουν μεγάλο μήκος κύματος και μικρή συχνότητα.

Για την περιγραφή των φαινομένων της τυρβώδους καύσης (μεταξύ των οποίων συμπεριλαμβάνονται και οι πυρκαγιές οι οποίες αναπτύσσονται σε κλειστούς χώρους) έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα τρεις διαφορετικές μέθοδοι.

- Η πρώτη μέθοδος λέγεται RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) και είναι η πρώτη ιστορικά προσπάθεια να μελετηθούν υπολογιστικά αυτά τα φαινόμενα. Στη μέθοδο αυτή επιλύονται οι εξισώσεις του πεδίου ροής με τη χρήση των μέσων τιμών όλων των ποσοτήτων που εμφανίζονται σε αυτές τις εξισώσεις. Επίσης, είναι απαραίτητη η χρήση ενός μοντέλου τύρβης, το οποίο συνδυάζεται με ένα μοντέλο τυρβώδους καύσης, για την περιγραφή των χημικών μεταβολών των υλικών που συμμετέχουν στην αντίδραση και τη μεταφορά θερμότητας. Για μια σταθεροποιημένη φλόγα η θερμοκρασία που θα προβλεφθεί με τη μέθοδο RANS σε ένα συγκεκριμένο σημείο θα είναι μια τιμή η οποία θα αντιστοιχεί στη μέση θερμοκρασία σε αυτό το σημείο.

- Η δεύτερη μέθοδος αντιστοιχεί στην προσομοίωση των μεγάλων κλιμάκων τύρβης (Large Eddy Simulation ή LES). Οι μεγάλες κλίμακες τύρβης υπολογίζονται αναλυτικά ενώ οι επιδράσεις των μικρότερων κλιμάκων προσομοιώνονται χρησιμοποιώντας υποπλεγματικά μοντέλα. Οι εξισώσεις ισορροπίας προκύπτουν από την επεξεργασία με συγκεκριμένα μαθηματικά φίλτρα των στιγμιαίων εξισώσεων ισορροπίας. Με τη μέθοδο LES είναι εφικτός ο καθορισμός της στιγμιαίας θέσης του κινούμενου «μετώπου» φλόγας μεγάλης κλίμακας, ενώ για τις μικρές τυρβώδεις κλίμακες χρησιμοποιείται ένα μοντέλο υποπλέγματος. Η συγκεκριμένη μέθοδος υπολογίζει τις μικρής συχνότητας διαταραχές (μεγάλες δίνες) για μεγέθη τα οποία χρειάζεται να μετρηθούν.

- Η τρίτη μέθοδος βασίζεται στην απευθείας αριθμητική προσομοίωση (Direct Numerical Simulations-DNS) όπου οι πλήρεις στιγμιαίες εξισώσεις Navier-Stokes επιλύονται χωρίς κανένα μοντέλο τύρβης: όλες οι κλίμακες τύρβης υπολογίζονται αναλυτικά και οι επιδράσεις τους στην καύση απεικονίζονται στην προσομοίωση. Αυτή η μέθοδος έχει αναπτυχθεί τα τελευταία είκοσι χρόνια χάρις στην ανάπτυξη των υπολογιστών και έχει αλλάξει την ανάλυση της τυρβώδους καύσης αλλά η χρήση της περιορίζεται σε απλές ελεγχόμενες πειραματικές ροές. Στην εικόνα 13 παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα με τη χρήση των 3 παραπάνω μεθοδολογιών.



Εικόνα 13 :Μεταβολή της θερμοκρασίας με το χρόνο χρησιμοποιώντας τα τρία διαφορετικά μοντέλα προσομοίωσης της τύρβης (Poinsot, 2001)

Όσον αφορά τις υπολογιστικές απαιτήσεις η μέθοδος DNS είναι η πιο απαιτητική και περιορίζεται σε σχετικά χαμηλούς αριθμούς Reynolds και απλοποιημένες γεωμετρίες. Το LES χρησιμοποιείται σε αραιά πλέγματα (όπου μόνο οι μεγαλύτερες κλίμακες τύρβης πρέπει να επιλυθούν) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για μεγαλύτερους αριθμούς Reynolds αλλά εκεί χρειάζεται μοντέλα υποπλέγματος. Η ποιότητα των υπολογισμών και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων συνδέονται άμεσα με αυτά τα μοντέλα υποπλέγματος.

Η μέθοδος DNS περιορίζεται μέχρι στιγμής σε χρήση σε ακαδημαϊκά πειράματα. Για παράδειγμα, ένας υπολογισμός DNS μιας τρισδιάστατης τυρβώδους φλόγας σε ατμοσφαιρική πίεση τυπικά απαιτεί 1 με 2 εκατομμύρια σημεία πλέγματος και ο υπολογιστικός χώρος θα αντιστοιχούσε σε $5 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$.

Η μέθοδος LES εμφανίζεται σαν η κοντινότερη και ρεαλιστικότερη προσέγγιση στη μελέτη της καύσης για τους εξής λόγους:

- Οι μεγάλες δίνες στις τυρβώδεις ροές γενικά θεωρείται ότι εξαρτώνται από τη γεωμετρία της ροής ενώ οι μικρές έχουν πιο καθολικά χαρακτηριστικά. Οπότε με μοντέλα γίνεται πιθανότατα πιο πιστή περιγραφή των μικρών δινών.
- Οι περισσότερες αντιδρώσες ροές δημιουργούν στο χώρο συνεκτικές δίνες μεγάλης κλίμακας. Αυτές οι δίνες παρατηρούνται επίσης όταν συμβαίνουν αστάθειες κατά την καύση. Αυτές οι αστάθειες οφείλονται σε αλληλεπιδράσεις μεταξύ της μεταφοράς θερμότητας, του υδροδυναμικού πεδίου ροής και των δημιουργούμενων ακουστικών κυμάτων. Πρέπει να αποφεύγονται επειδή προκαλούν θόρυβο, μεταβολές στα χαρακτηριστικά του συστήματος, μεγάλη μεταφορά θερμότητας και μπορεί να οδηγήσουν στην καταστροφή του συστήματος. Το LES μπορεί να προβλέψει τη δημιουργία τέτοιων ασταθειών.
- Η γνώση των τυρβωδών ροών μεγάλης κλίμακας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να προβλεφθεί η συμπεριφορά των άλλων ροών μικρότερης κλίμακας. Για την ακρίβεια τα μοντέλα υποπλέγματος γενικά βασίζονται σε συμπεράσματα που απορρέουν από τις ομοιότητες μεταξύ μικρών και μεγάλων κλιμάκων.
- Το LES επίσης επιτρέπει μία καλύτερη περιγραφή των αλληλεπιδράσεων τύρβης/καύσης επειδή σε αυτή τη μέθοδο οι μεγάλες δίνες επιλύονται αριθμητικά: οι στιγμιαίες ζώνες αντιδρώντων και προϊόντων που δημιουργούνται κατά την επίλυση

είναι εύκολα αναγνωρίσιμες τουλάχιστον ύστερα από την επίλυση. Αυτό είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα έναντι της μεθόδου RANS όπου τα μοντέλα πρέπει να συμπεριλάβουν στον υπολογισμό (σε μία συγκεκριμένη θέση) και την πιθανότητα αυτή η θέση να βρίσκεται στη ζώνη αντιδρώντων ή στη ζώνη προϊόντων. Ο πίνακας 3 δείχνει συνοπτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου.

Πίνακας 3: Βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των τριών βασικών μεθόδων προσομοίωσης τύρβης

Μέθοδος	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
RANS	-αραιό αριθμητικό πλέγμα -γεωμετρικές απλουστεύσεις (2-Δ ροές, συμμετρία κλπ.) -χαμηλές υπολογιστικές απαιτήσεις	-μόνο η μέση τιμή του πεδίου ροής εμφανίζεται στα αποτελέσματα -χρειάζονται μοντέλα για τη λειτουργία της μεθόδου
LES	-σχετικά πιστή περιγραφή των διακυμάνσεων και ασταθειών της ροής -μειωμένη ανάγκη για μοντελοποίηση (σε σχέση με το RANS)	-χρειάζεται μοντελοποίηση -απαιτούνται 3-Δ προσομοιώσεις -χρειάζονται ακριβείς κώδικες -υψηλές υπολογιστικές απαιτήσεις
DNS	-δεν απαιτείται μοντελοποίηση για την αλληλεπίδραση τύρβης/καύσης -εργαλείο για τη μελέτη μοντέλων καύσης	-απαγορευτικές υπολογιστικές απαιτήσεις -μέχρι στιγμής περιορίζεται η χρήση του σε ακαδημαϊκά πειράματα

2.2.1 Φίλτρα LES

Στη μέθοδο LES οι μεγάλες δίνες επιλύονται αριθμητικά ενώ οι μικρότερες δίνες φιλτράρονται και μοντελοποιούνται καθ' αναλογία προς τις μεγάλες δίνες. Θεωρείται μια συχνότητα (η συχνότητα αποκοπής) πέρα από την οποία τα μεγέθη δεν επιλύονται αριθμητικά. Αντίθετα με τη χρήση φίλτρων εξάγονται τα νέα φιλτραρισμένα μεγέθη και αυτά στη συνέχεια εισάγονται σε συγκεκριμένα μοντέλα τα οποία θα αναφερθούν στη συνέχεια αυτής της παραγράφου.

Οι ροϊκές μεταβλητές φιλτράρονται είτε στο φασματικό χώρο (όπου τα ροϊκά μεγέθη τα μεγαλύτερα από τη θεωρούμενη συχνότητα αποκοπής αμελούνται) ή στο φυσικό χώρο (όπου εξάγεται μια μέση τιμή από ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών). Η φιλτραρισμένη ποσότητα f ορίζεται μέσω της εξίσωσης (2.2.1.1):

$$f(x) = \int f(x') F(x-x') dx' \quad (2.2.1.1)$$

όπου F είναι το φίλτρο LES.

Τα συνηθισμένα φίλτρα LES είναι τα εξής:

- Φίλτρο αποκοπής :

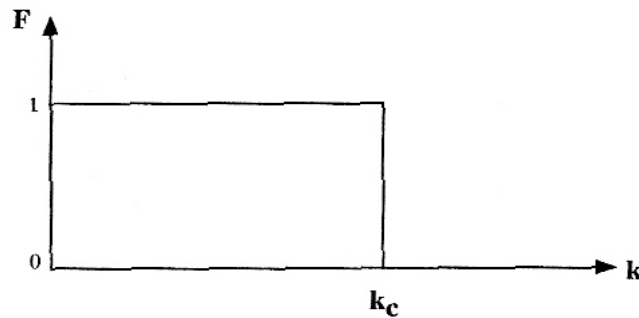
$$F(k) = \begin{cases} 1, & \text{αν } k \leq k_c = \pi / \Delta \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (2.2.1.2)$$

όπου k είναι ο αριθμός κύματος της μεταβλητής. Ο αριθμός κύματος k ορίζεται μέσω της εξίσωσης (2.2.2). Αυτό το φίλτρο κρατά τις κλίμακες μήκους μεγαλύτερες από την κλίμακα μήκους 2Δ όπου Δ είναι το μέγεθος του φίλτρου και ορίζεται από τις διαστάσεις του κελιού του υπολογιστικού χώρου σύμφωνα με την εξίσωση (2.2.1.3):

$$\Delta = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3} \quad (2.2.1.3)$$

όπου Δx , Δy , Δz είναι οι διαστάσεις του κελιού του εκάστοτε χρησιμοποιούμενου πλέγματος.

Το φίλτρο αποκοπής απεικονίζεται σχηματικά στην εικόνα 14.

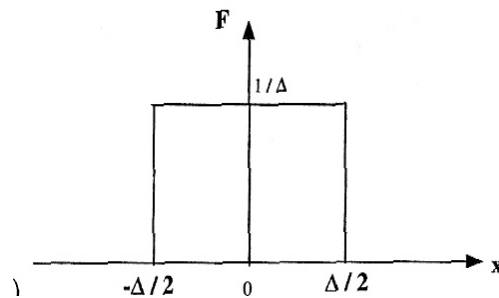


Εικόνα 14: Φίλτρο αποκοπής

- Τετραγωνικό φίλτρο στο φυσικό χώρο:

$$F(x) = f(x_1, x_2, x_3) = \begin{cases} 1/\Delta^3 & \text{αν } |x_i| \leq \Delta/2, i=1,2,3 \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (2.2.1.4)$$

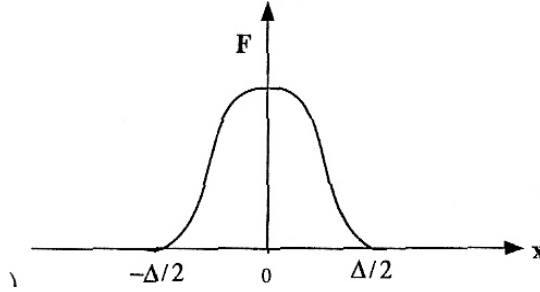
Όπου (x_1, x_2, x_3) είναι οι φυσικές συντεταγμένες της τοποθεσίας x . Αυτό το φίλτρο αντιστοιχεί σε μια ισοστάθμιση σε ένα κυβικό κουτί μεγέθους Δ και απεικονίζεται σχηματικά στην εικόνα 15.



Εικόνα 15: Τετραγωνικό φίλτρο

- Φίλτρο κανονικής κατανομής στο φυσικό χώρο:

$$F(\mathbf{x})=F(x_1,x_2,x_3)=(6/\pi\Delta^2)^{3/2} \exp [-6/\Delta^2(x_1^2+x_2^2+x_3^2)] \quad (2.2.1.5)$$



Εικόνα 16: Φίλτρο κανονικής κατανομής

Στην εικόνα 16 απεικονίζεται σχηματικά το φίλτρο κανονικής κατανομής.

Προκύπτουν οι εξής φιλτραρισμένες εξισώσεις ισορροπίας:

- Μάζα

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i) = 0 \quad (2.2.1.6)$$

- Ορμή

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) + \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} [\bar{\tau}_{ij} - \bar{\rho} (\widetilde{u_i u_j} - \tilde{u}_i \tilde{u}_j)] \quad (2.2.1.7)$$

- Χημική αντίδραση

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{Y}_k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{Y}_k) = \frac{\partial}{\partial x_i} [\overline{V_{k,i} Y_k} - \bar{\rho} (\widetilde{u_i Y_k} - \tilde{u}_i \tilde{Y}_k)] + \bar{\omega}_k \quad (2.2.1.8)$$

- Ενθαλπία

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{h}_s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{h}_s) = \frac{\overline{Dp}}{Dt} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\lambda \frac{\partial \overline{\Gamma}}{\partial x_i} - \bar{\rho} (\widetilde{u_i h_s} - \tilde{u}_i \tilde{h}_s) \right] + \overline{\tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}} \quad (2.2.1.9)$$

$$- \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\bar{\rho} \sum_{k=1}^N \overline{V_{k,i} Y_k h_{s,k}} \right) + \bar{\omega}_\Gamma$$

όπου

$$\overline{\frac{Dp}{Dt}} = \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \overline{u_i \frac{\partial p}{\partial x_i}} \quad (2.2.1.10)$$

Από αυτή την ομάδα εξισώσεων οι ακόλουθες άλυτες ποσότητες πρέπει να μοντελοποιηθούν:

- Άλυτες τάσεις Reynolds ($\overline{u_i u_j} - \tilde{u}_i \tilde{u}_j$), οι οποίες απαιτούν ένα μοντέλο υποπλέγματος τύρβης

- Άλυτες ροές στοιχείων ($\overline{u_i Y_k} - \tilde{u}_i \tilde{Y}_k$) και ροές ενθαλπίας ($\overline{u_i h_s} - \tilde{u}_i \tilde{h}_s$).

- Φιλτραρισμένες ροές γραμμικής διάχυσης για στοιχεία και ενθαλπία. Όπως στη μέθοδο RANS αυτές οι μοριακές ροές μπορούν είτε να αμεληθούν είτε να μοντελοποιηθούν με τη χρήση των εξισώσεων (2.2.1.10-2.2.1.11):

$$\overline{V_{k,i} Y_k} = -\bar{\rho} \bar{D}_k \frac{\partial \tilde{Y}_k}{\partial x_i} \quad (2.2.1.11)$$

και

$$\overline{\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i}} = \bar{\lambda} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_i} \quad (2.2.1.12)$$

- Φιλτραρισμένος ρυθμός χημικής αντίδρασης $\bar{\omega}_k$.

2.3 Τρόποι μοντελοποίησης των άλυτων ποσοτήτων

Σε αυτή την ενότητα αναφέρονται οι κύριοι τρόποι με τους οποίους γίνεται η μοντελοποίηση των άλυτων ποσοτήτων:

Μοντέλο Smagorinsky

Το μοντέλο υποπλέγματος Smagorinsky είναι δημοφιλές εξαιτίας της απλής διαμόρφωσής του. Οι άλυτες ροές ορμής (momentum fluxes) εκφράζονται σύμφωνα με το θεώρημα Boussinesq με χρήση της εξίσωσης (2.3.1):

$$\tau_{ij} - \frac{\delta_{ij}}{3} \tau_{kk} = -\nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) = -2\nu_t \bar{S}_{ij} \quad (2.3.1)$$

όπου ν_t είναι η συνεκτικότητα κλίμακας υποπλέγματος η οποία μοντελοποιείται με χρήση της εξίσωσης (2.3.2):

$$\nu_t = C_S^2 \Delta^{4/3} I_t^{2/3} |S| \quad (2.3.2)$$

όπου l_t είναι το μήκος κλίμακας της τύρβης, C_s η σταθερά Smagorinsky και S οι επιλυμένες τάσεις (τα στοιχεία των τάσεων S_{ij} από την εξίσωση Boussinesq). Η σχέση (2.3.2) είναι δυνατό να απλοποιηθεί περισσότερο αν θεωρηθεί ότι $l_t \approx \Delta$:

$$\nu_t = (C_s \Delta)^2 |S| \quad (2.3.3)$$

Σε περίπτωση ομογενούς ισότροπης τύρβης τότε $C_s \approx 0.2$. Η σταθερά αυτή εξαρτάται από τη διαμόρφωση της ροής.

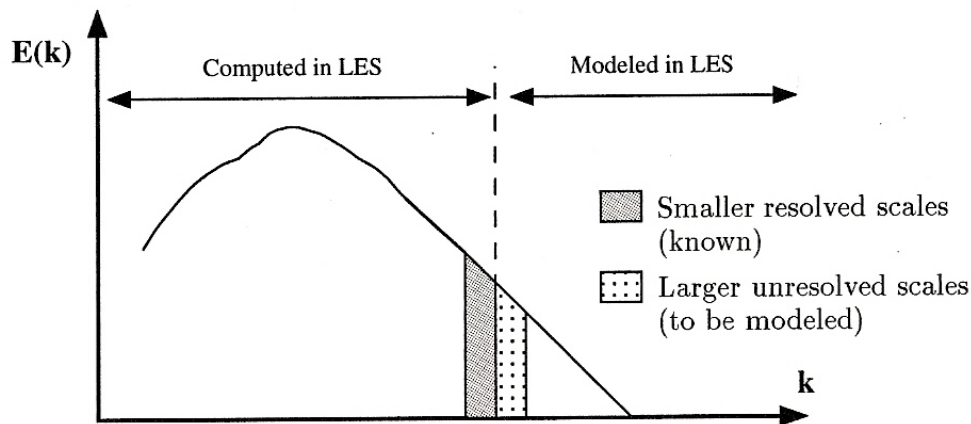
Το μοντέλο Smagorinsky είναι το μοντέλο που χρησιμοποιείται στον κώδικα FDS.

Μοντέλο ομοιότητας κλίμακας

Αυτό το μοντέλο υποπλέγματος υποθέτει ότι οι άλυτες τάσεις κυρίως ελέγχονται από τις μεγαλύτερες άλυτες μορφές, όμοια προς τις μικρότερες κλίμακες που έχουν επιλυθεί. Έτσι γίνεται χρήση της εξίσωσης (2.3.4):

$$\tau_{ij} = \overline{\overline{u_i u_j}} - \overline{u_i} \overline{u_j} \quad (2.3.4)$$

Το μοντέλο ομοιότητας κλίμακας συνοψίζεται στην εικόνα 17.



Εικόνα 17 : Μοντέλο ομοιότητας κλίμακας (Poinsot, 2001)

Στην εικόνα 17 παρατηρείται ότι η μεθοδολογία LES υπολογίζει αναλυτικά τις μεγαλύτερες κλίμακες ενώ μοντελοποιεί τις μικρότερες. Οι μεγαλύτερες κλίμακες από αυτές που μοντελοποιούνται, ακολουθούν τη μορφή των μικρότερων από αυτές που υπολογίζονται.

Δυναμικό μοντέλο Germano

Ο στόχος του δυναμικού μοντέλου Germano είναι η εκτίμηση της απόκλισης των μικρών κλιμάκων από τους επιλυμένους στροβίλους. Η μέθοδος Smagorinsky βελτιώνεται μέσω ενός αυτόματου προσδιορισμού της σταθεράς του μοντέλου $C_s(\underline{x}, t)$ συναρτήσεως του χώρου και του χρόνου. Οι άλυτες ροές ορμής του υπομοντέλου δίνονται από τη σχέση (2.3.5):

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (2.3.5)$$

Οι άλυτες ροές ορμής στο επίπεδο δοκιμής είναι:

$$T_{ij} = \widehat{u_i u_j} - \hat{u}_i \hat{u}_j \quad (2.3.6)$$

Αυτές οι δύο προηγούμενες εξισώσεις συνδυάζονται και δίνουν την ταυτότητα Germano:

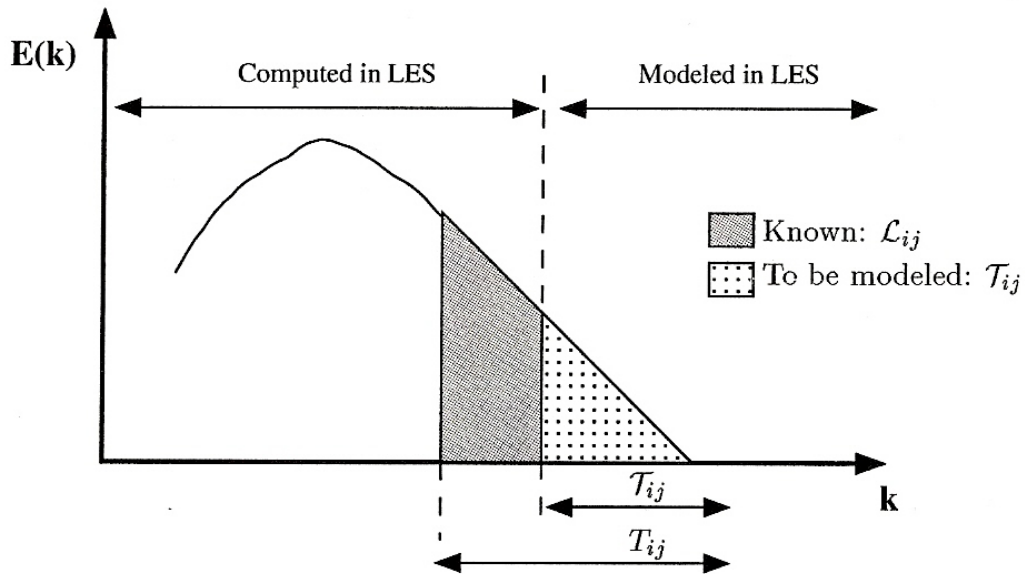
$$\underbrace{\widehat{u_i u_j} - \hat{u}_i \hat{u}_j}_{L_{ij}} = T_{ij} - \hat{T}_{ij} \quad (2.3.7)$$

Το αριστερό μέλος της εξίσωσης (2.3.7) υπολογίζεται φιλτράροντας το επιλυμένο στο LES πεδίο ταχυτήτων u_i στο επίπεδο δοκιμής Δ . Εκτιμώντας τις τάσεις Reynolds T_{ij} από το μοντέλο Smagorinsky προκύπτουν οι εξισώσεις (2.3.8)-(2.3.9):

$$\tau_{ij} - \frac{\delta_{ij}}{3} \tau_{kk} = -2C \bar{\Delta}^2 |\bar{S}| \bar{S}_{ij} = -2C a_{ij} \quad (2.3.8)$$

$$\tau_{ij} - \frac{\delta_{ij}}{3} \tau_{kk} = -2C \hat{\Delta}^2 |\hat{S}| \hat{S}_{ij} = -2C \beta_{ij} \quad (2.3.9)$$

όπου C είναι η παράμετρος που απαιτείται να προσδιοριστεί.



Εικόνα 18 :Δυναμικό μοντέλο Germano

Στην εικόνα 18 απεικονίζεται μια γραφική αναπαράσταση της ταυτότητας Germano στο ενεργειακό φάσμα. Οι άγνωστες άλυτες τάσεις Reynolds στο φιλτραρισμένο επίπεδο (μικρό T_{ij}) και στο δοκιμαστικό φιλτραρισμένο επίπεδο (μεγάλο T_{ij}) συνδέονται μέσω του L_{ij} το οποίο είναι το επιλυμένο από το LES μέρος των άλυτων τάσεων Reynolds T_{ij} .

Οπότε η ταυτότητα Germano ξαναγράφεται υπό τη μορφή της εξίσωσης (2.3.10):

$$L_{ij} - \frac{\delta_{ij}}{3} L_{kk} = 2C(\hat{a}_{ij} - \beta_{ij}) \quad (2.3.10)$$

3.Προσομοίωση φωτιάς σε τυπικό δωμάτιο (Περίπτωση STECKLER)

Για την πιστοποίηση της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων του κώδικα FDS , είναι απαραίτητη η σύγκριση με πειραματικά δεδομένα. Η στοχαστική φύση όμως του φαινομένου της φωτιάς και η δυσκολία που παρουσιάζει ως προς τη μελέτη της μέσω πειραμάτων έχουν ως αποτέλεσμα να υπάρχουν μέχρι στιγμής λίγα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα.

Μία περίπτωση στην οποία έγιναν πειράματα φωτιάς και τα αποτελέσματα καταγράφηκαν είναι τα πειράματα τα οποία έγιναν από τους Steckler et al. (1982). Τα πειράματα είχαν ως εξής: Σε ένα δωμάτιο διαστάσεων 2.8m x 2.8m x 2.18m τοποθετήθηκε ένας καυστήρας μεθανίου ο οποίος λειτουργούσε για 30 min. Το μοναδικό άνοιγμα του δωματίου ήταν μία πόρτα , οι διαστάσεις της οποίας ήταν δυνατό να μεταβληθούν. Κατά μήκος και καθ' ύψος της πόρτας τοποθετήθηκαν θερμοστοιχεία για τη μέτρηση της θερμοκρασίας και καθώς και σωλήνες Pitot για τη μέτρηση της κάθετης στο επίπεδο της πόρτας ταχύτητας. Έτσι μετρήθηκε η θερμοκρασία και η ταχύτητα του αέρα στην πόρτα. Επίσης μία στήλη θερμοστοιχείων μετρούσε τις θερμοκρασίες στη μπροστά αριστερή γωνία του δωματίου.

Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 45 πειράματα. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας , χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας FDS για την πιστοποίηση 15 διαφορετικών πειραματικών σειρών μετρήσεων. Δεδομένου του υπολογιστικού χρόνου που απαιτείται για την προσομοίωση ενός πειράματος 30 min (ο οποίος χρόνος είναι περίπου μία εβδομάδα σε υπολογιστή με επεξεργαστή 3 GHz και RAM 512 MB) και κατόπιν διαπίστωσης ότι μετά από περίπου 3-4 min το φαινόμενο επιτυγχάνει μία σταθερή κατάσταση και από εκεί και πέρα παρουσιάζονται απλώς μικρές τυρβώδεις διακυμάνσεις αποφασίστηκε τα αριθμητικά πειράματα με τον κώδικα FDS να πραγματοποιηθούν για υπολογιστικό χρόνο 5 min. Οι τελικές τιμές που προέκυπταν από τις προσομοιώσεις ήταν οι μέσες τιμές των μεγεθών στα τελευταία 100 s όταν δηλαδή το φαινόμενο έχει φτάσει πλέον σε μια σταθερή κατάσταση.

Κατά τις υπολογιστικές προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε ένα πλέγμα 75x96x50 κελιών (σύνολο 360000 κελιά). Αυτό σημαίνει ότι είχαμε ένα κελί διαστάσεων 0.04m x 0.035m x 0.047 m. Επειδή σε κάθε κελί γίνεται θεώρηση σταθερής θερμοκρασίας , ταχύτητας και γενικά σταθερών ιδιοτήτων συνιστάται κάθε κελί να βρίσκεται εξ' ολοκλήρου σε μία ροϊκή περιοχή π.χ. ένα κελί να αντιστοιχεί ολόκληρο σε στερεά ή αέρια φάση. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτή η απαίτηση , οι τελικές διαστάσεις του υπολογιστικού χώρου ήταν 3m x 3.36 m x 2.35 m.

Το δωμάτιο είχε διαστάσεις 3m x 2.905 m x 2.35 m. Ο υπόλοιπος χώρος (3m x 0.455m x 2.35m) ήταν κενός και χρησίμευε απλώς για να φανεί οπτικά η μορφή που παίρνουν τα καυσαέρια και η πορεία που ακολουθούν μετά την έξοδό τους από το δωμάτιο.

Οι 15 διαφορετικές περιπτώσεις που εξετάστηκαν ήταν οι εξής:

1) Φωτιά έντασης 62.9kW , καυστήρας τοποθετημένος στο κέντρο του δωματίου, πόρτα διαστάσεων 0.74 m x 1.83 m

2) Φωτιά έντασης 62.9kW , καυστήρας τοποθετημένος στο κέντρο του δωματίου, πόρτα διαστάσεων 0.49 m x 1.83 m (2/3 του πλάτους της περίπτωσης 1)

3) Φωτιά έντασης 62.9 kW , καυστήρας τοποθετημένος στο κέντρο του δωματίου, πόρτα διαστάσεων 0.99 m x 1.83 m (4/3 του πλάτους της περίπτωσης 1)

4) Φωτιά έντασης 62.9 kW , καυστήρας τοποθετημένος στο κέντρο του δωματίου, παράθυρο διαστάσεων 0.92 m x 0.74 m , τοποθετημένο σε ύψος 0.91 m από το έδαφος

5) Φωτιά έντασης 31.6kW , καυστήρας τοποθετημένος στο κέντρο του δωματίου, πόρτα διαστάσεων 0.74 m x 1.83 m

6) Φωτιά έντασης 105.3kW , καυστήρας τοποθετημένος στο κέντρο του δωματίου, πόρτα διαστάσεων 0.74 m x 1.83 m

7) Φωτιά έντασης 62.9kW , καυστήρας τοποθετημένος στην πίσω αριστερή γωνία του δωματίου , πόρτα διαστάσεων 0.74 m x 1.83 m

8) Φωτιά έντασης 62.9kW , καυστήρας τοποθετημένος στην πίσω αριστερή γωνία του δωματίου , πόρτα διαστάσεων 0.49 m x 1.83 m

9) Φωτιά έντασης 62.9 kW , καυστήρας τοποθετημένος στην πίσω αριστερή γωνία του δωματίου , πόρτα διαστάσεων 0.99 m x 1.83 m

10) Φωτιά έντασης 62.9 kW , καυστήρας τοποθετημένος στην πίσω αριστερή γωνία του δωματίου , παράθυρο διαστάσεων 0.92 m x 0.74 m , τοποθετημένο σε ύψος 0.91 m από το έδαφος

11) Φωτιά έντασης 31.6kW , καυστήρας τοποθετημένος στην πίσω αριστερή γωνία του δωματίου , πόρτα διαστάσεων 0.74 m x 1.83 m

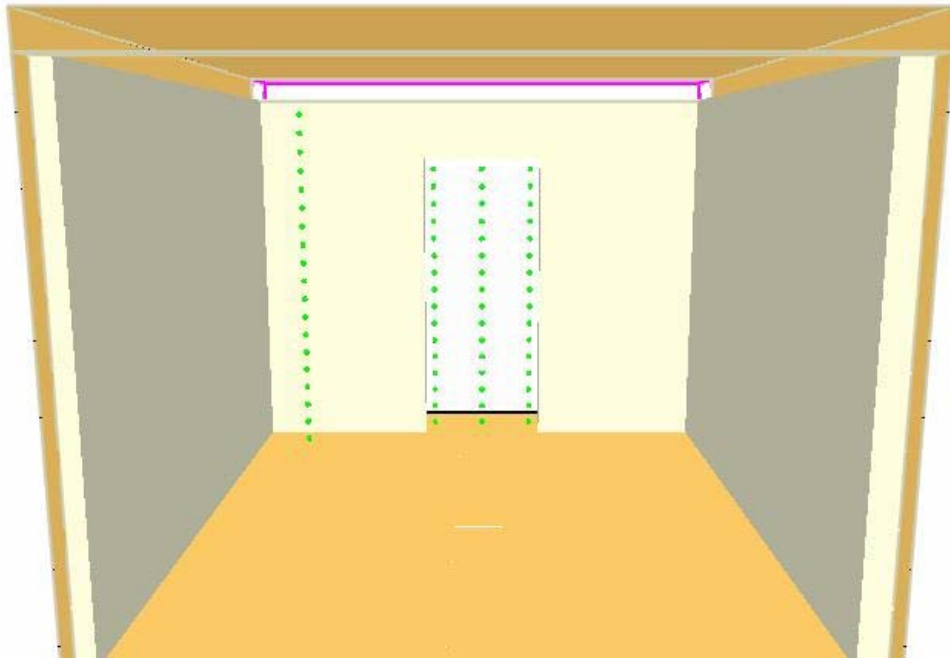
12) Φωτιά έντασης 105.3kW , καυστήρας τοποθετημένος στην πίσω αριστερή γωνία του δωματίου , πόρτα διαστάσεων 0.74 m x 1.83 m

13) Φωτιά έντασης 62.9kW τοποθετημένη στο κέντρο του δωματίου σε ύψος 0.3 m από το έδαφος με πόρτα διαστάσεων 0.74 m x 1.83 m

14) Φωτιά έντασης 62.9kW , καυστήρας τοποθετημένος στην πίσω αριστερή γωνία του δωματίου σε ύψος 0.3 m από το έδαφος , πόρτα διαστάσεων 0.74 m x 1.83 m

15) Φωτιά έντασης 62.9kW , καυστήρας τοποθετημένος στο κέντρο του πίσω τοίχου του δωματίου σε ύψος 0.3 m από το έδαφος , πόρτα διαστάσεων 0.74 m x 1.83 m

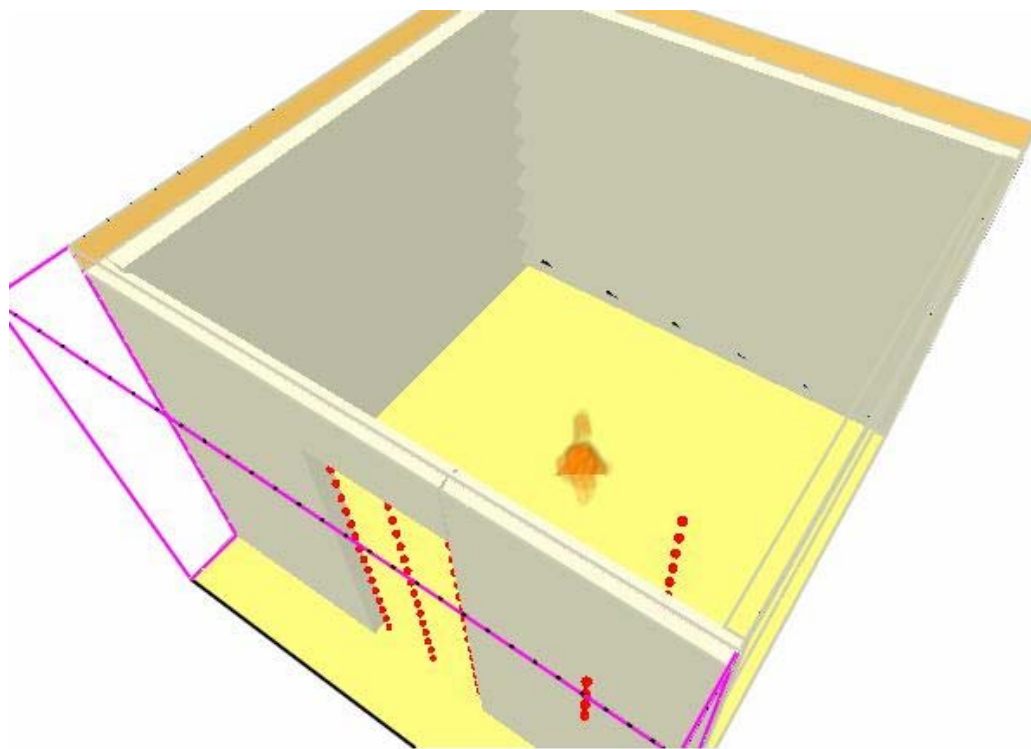
Τα υπολογιστικά αποτελέσματα όλων αυτών των διαφορετικών περιπτώσεων παρέχουν μια εμπειριστατωμένη εικόνα για τον τρόπο συμπεριφοράς του κώδικα FDS κατά την αλλαγή διαφόρων παραμέτρων.



Εικόνα 19 :Οπίσθια όψη του δωματίου.

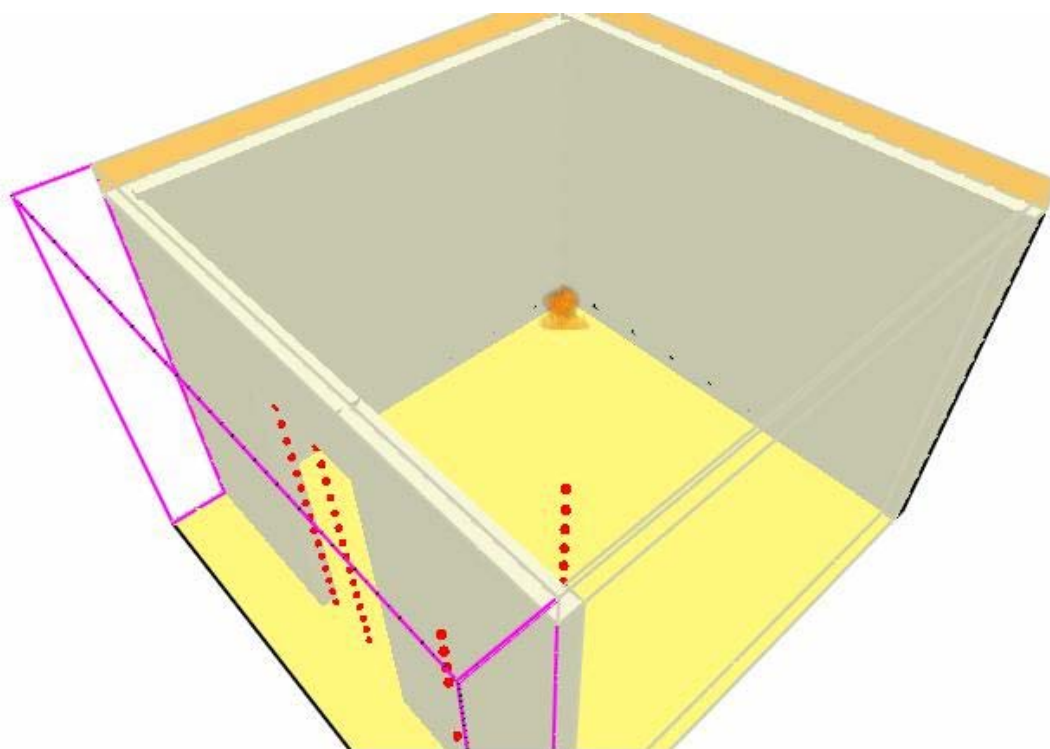
Στην εικόνα 19 διακρίνονται στην πόρτα οι τρεις στήλες θερμοστοιχείων (μία αριστερά , μία στο κέντρο και μία δεξιά) των οποίων τα υπολογιστικά αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τις πειραματικές μετρήσεις. Επίσης διακρίνεται μια επιπλέον σειρά θερμοστοιχείων στη γωνία του δωματίου.

Στις εικόνες 20-22 φαίνονται οι τρεις διαφορετικές θέσεις στις οποίες τοποθετήθηκε ο καυστήρας.



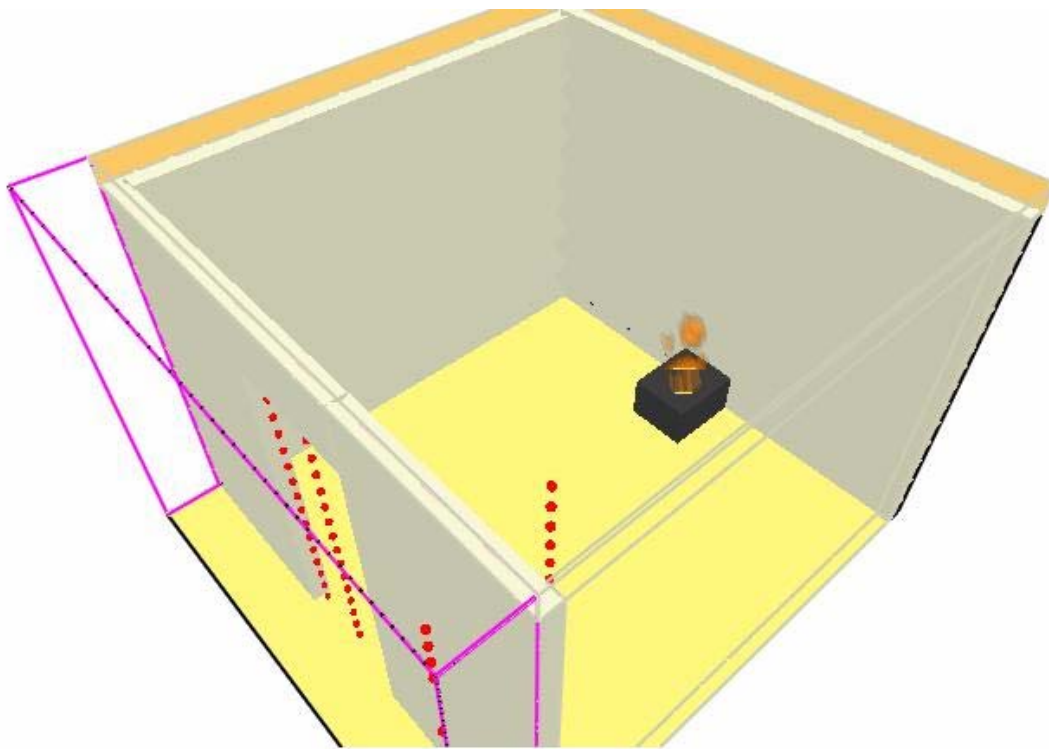
Time: 0.92

Εικόνα 20 : Καυστήρας στο κέντρο του δωματίου (περιπτώσεις 1-6, 13)



Time: 0.71

Εικόνα 21: Καυστήρας πίσω αριστερά (περιπτώσεις 7-12, 14)



Time: 0.75

Εικόνα 22 :Καυστήρας στο κέντρο πίσω (περίπτωση 15)

Περίπτωση	Ισχύς φωτιάς (kW)	Θέση καυστήρα	Διαστάσεις ανοίγματος(MxY)
1	62.9	Κέντρο δωματίου	0.74x1.83
2	62.9	Κέντρο δωματίου	0.49x1.83
3	62.9	Κέντρο δωματίου	0.99x1.83
4	62.9	Κέντρο δωματίου	0.92x0.74
5	31.6	Κέντρο δωματίου	0.74x1.83
6	105.3	Κέντρο δωματίου	0.74x1.83
7	62.9	Πίσω αριστερά	0.74x1.83
8	62.9	Πίσω αριστερά	0.49x1.83
9	62.9	Πίσω αριστερά	0.99x1.83
10	62.9	Πίσω αριστερά	0.92x0.74
11	31.6	Πίσω αριστερά	0.74x1.83
12	105.3	Πίσω αριστερά	0.74x1.83
13	62.9	Κέντρο δωματίου	0.74x1.83
14	62.9	Πίσω αριστερά	0.74x1.83
15	62.9	Πίσω κέντρο	0.74x1.83

Πίνακας 4: Βασικές λειτουργικές παράμετροι περιπτώσεων

Στον πίνακα 4 παρουσιάζονται οι βασικές λειτουργικές παράμετροι για την κάθε περίπτωση που εξετάστηκε.

3.1 Παραμετρική μελέτη

Στα πειράματα που έγιναν από τους Steckler et al. (1982) καθορίζονται επακριβώς οι διαστάσεις του χώρου, η θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά την ώρα διεξαγωγής του πειράματος, οι ιδιότητες και η ένταση της φωτιάς καθώς και η θέση της φωτιάς μέσα στο χώρο. Εισάγοντας τα στοιχεία αυτά στον κώδικα FDS προκειμένου να γίνει υπολογιστική προσομοίωση των αντίστοιχων πειραμάτων διαπιστώθηκε ότι με αλλαγή κάποιων παραμέτρων υπήρξε βελτίωση της ποιότητας των αποτελεσμάτων.

Όσον αφορά τις διαστάσεις του χώρου έγιναν μικρές αλλαγές προκειμένου να συμπίπτει το πλέγμα με τις διαστάσεις του υπολογιστικού χώρου. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος που χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις προσομοιώσεις ήταν ταυτόσημη με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος του αντίστοιχου πειράματος. Για τη φωτιά στα πειράματα χρησιμοποιήθηκε καυστήρας μεθανίου ο οποίος παρήγαγε φλόγα συγκεκριμένης έντασης. Κατά συνέπεια, για την υπολογιστική προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν οι χημικές ιδιότητες του μεθανίου και η εκάστοτε ένταση της φωτιάς.

Πραγματοποιήθηκε μελέτη και σύγκριση τεσσάρων παραμέτρων οι οποίες θεωρητικά μπορούν να επηρεάσουν τα μεγέθη που μετρήθηκαν πειραματικά δηλαδή τις θερμοκρασίες και τις ταχύτητες. Οι τέσσερις αυτές παράμετροι είναι:

- Η εκπομπή καπνού. Η εκπομπή καπνού εκφράζεται στον κώδικα μέσω της εντολής SOOT_YIELD και η προεπιλεγμένη τιμή είναι 0.01. Ο καπνός αποθηκεύει κάποιο ποσοστό θερμότητας έτσι θεωρητικά αν μειωθεί το ποσοστό εκπομπής καπνού, τότε πρόκειται να διοχετευθεί περισσότερη θερμότητα μέσω ακτινοβολίας στα μόρια του αέρα κοντά στη φλόγα. Η θερμότητα που παράγεται κατά την καύση μεταφέρεται μέσω των καυσαερίων. Από τις εξισώσεις (4.1.8), (4.1.10) οι οποίες χρησιμοποιούνται στον κώδικα FDS φαίνεται ότι υπάρχει αλληλεξάρτηση του ποσοστού εκπομπής καπνού με τις εκπομπές των καυσαερίων. Άρα τυχόν αλλαγές αυτής της παραμέτρου είναι πιθανό να επηρεάζουν τις θερμοκρασίες στην προσομοίωση.

- Η σταθερά Smagorinsky. Η σταθερά Smagorinsky χρησιμοποιείται στην εξίσωση υπολογισμού της τυρβώδους συνεκτικότητας (εξίσωση 3.1.1):

$$\mu_{LES} = \rho(C_S \Delta)^2 (2\bar{S}_{ij}^2 - \frac{2}{3}(\nabla \bar{u})^2)^{1/2} \quad (3.1.1)$$

Όπου μ_{LES} είναι η συνεκτικότητα, C_S είναι η σταθερά Smagorinsky και Δ είναι ένα χαρακτηριστικό μήκος (της τάξης των διαστάσεων ενός κελιού του υπολογιστικού πλέγματος). Η παύλα πάνω από ορισμένες ποσότητες υποδηλώνει ότι αυτές οι ποσότητες είναι φιλτραρισμένες δηλαδή υπολογίζονται στο αριθμητικό πλέγμα.

Το μοντέλο υπολογισμού της τυρβώδους συνεκτικότητας, μ_{LES} , εξυπηρετεί δύο σκοπούς: πρώτον, δρα σταθεροποιητικά στον αριθμητικό αλγόριθμο εξουδετερώνοντας τυχόν αριθμητικές αστάθειες οι οποίες προκύπτουν στο πεδίο ροής, ειδικά στις περιοχές δημιουργίας τύρβης. Δεύτερον έχει τον κατάλληλο μαθηματικό τύπο για να περιγράψει την απορρόφηση της κινητικής ενέργειας από τη ροή και τη μετατροπή της σε θερμική ενέργεια λόγω της συνεκτικότητας του ρευστού (dissipation function).

Από τις μέχρι στιγμής προσομοιώσεις που έχουν γίνει χρησιμοποιώντας το μοντέλο LES προέκυψε ότι τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα λαμβάνονται όταν τεθεί η σταθερά Smagorinsky όσο πιο χαμηλά γίνεται χωρίς να προκύπτει αριθμητική αστάθεια (FDS Technical Reference Guide).

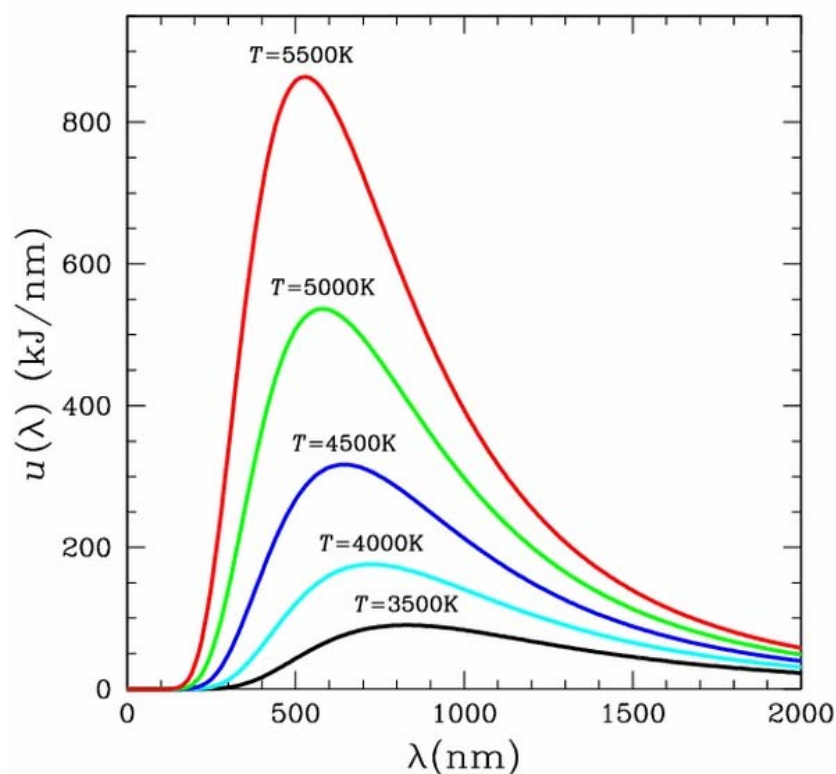
Στον κώδικα FDS η προεπιλεγμένη τιμή είναι 0.2.

- Το κλάσμα ακτινοβολίας. Το κλάσμα ακτινοβολίας αντιστοιχεί στο ποσοστό της ενέργειας το οποίο απελευθερώνεται και εκλύεται κατά την καύση υπό τη μορφή θερμικής ακτινοβολίας.

Στον κώδικα FDS η προεπιλεγμένη τιμή είναι 0.35.

- Το μοντέλο ακτινοβολίας.

Η θερμότητα μεταφέρεται μέσω της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Αναλόγως με τη θερμοκρασία και το μήκος κύματος κάθε σώμα εκπέμπει θερμότητα διαφορετικής έντασης. Στην εικόνα 21 φαίνεται η συνάρτηση της έντασης της ακτινοβολίας από το μήκος κύματος και τη θερμοκρασία για ένα μαύρο σώμα (ένα σώμα το οποίο απορροφά πλήρως οποιουδήποτε είδους ακτινοβολία).



Εικόνα 23 : Εξάρτηση της έντασης ακτινοβολίας από το μήκος κύματος και τη θερμοκρασία

Υπό πραγματικές συνθήκες η εξάρτηση από το εύρος των μηκών κύματος της ακτινοβολίας δυσκολεύει την ακριβή επίλυση. Έτσι το συνολικό φάσμα των μηκών κύματος διαιρείται σε ένα σχετικά μικρό αριθμό από ζώνες σε κάθε μία από τις οποίες η ένταση της ακτινοβολίας θεωρείται σταθερή και επιλύεται μία εξίσωση μεταφοράς ακτινοβολίας για την κάθε συχνότητα. Τα όρια των συχνοτήτων επιλέγονται ώστε να δίνουν μια ακριβή αναπαράσταση των πιο σημαντικών

συχνοτήτων ακτινοβολίας για το CO₂ και το νερό. Η εξίσωση μεταφοράς ακτινοβολίας για κάθε συχνότητα εκφράζεται μέσω της σχέσης (3.1.2):

$$s \nabla I_n(x,s) = \kappa_n(x) [I_{b,n}(x) - I_n(x,s)], \quad n=1, \dots, N \quad (3.1.2)$$

όπου I_n είναι το ολοκλήρωμα της έντασης για όλη τη συχνότητα n , κ_n είναι ο κατάλληλος συντελεστής απορρόφησης (absorption coefficient) για τη συχνότητα, x το μέτρο του διανύσματος της έντασης και s η διεύθυνσή του. Όταν οι εντάσεις που αντιστοιχούν σε κάθε συχνότητα είναι γνωστές η συνολική ένταση της ακτινοβολίας υπολογίζεται αθροίζοντας όλες τις συχνότητες (εξίσωση 3.1.3).

$$I(x, s) = \sum_{n=1}^N I_n(x, s) \quad (3.1.3)$$

Έχει βρεθεί από αριθμητικά πειράματα ότι έξι συχνότητες είναι συνήθως αρκετές ($N=6$) (σελ.27, FDS Technical Reference Guide). Σε περίπτωση κατά την οποία η απορρόφηση ακτινοβολίας από το καύσιμο είναι σημαντική, είναι δυνατό να εισαχθούν επιπλέον συχνότητες για το καύσιμο και τότε ο συνολικός αριθμός των συχνοτήτων ανέρχεται σε $N=10$.

Στους πίνακες 5 και 6 παρουσιάζονται τα όρια των συχνοτήτων.

Συχνότητες	1	2	3	4	5	6
Μήκος κύματος (μm)	Καπνός	CO ₂ , H ₂ O, καπνός	CH ₄ , καπνός	CO ₂ , καπνός	H ₂ O, CH ₄ , καπνός	Καπνός
	1-2.63	2.63-2.94	2.94-4.17	4.17-4.7	4.7-10.0	10-200

Πίνακας 5: Όρια συχνοτήτων για τα σημαντικότερα στοιχεία στο μοντέλο 6 συχνοτήτων

Συχνότητες	1	2	3	4	5	6	7
Μήκος κύματος (μm)	Καπνός	CO ₂ , H ₂ O, καπνός	CH ₄ , καπνός	Καπνός	CO ₂ , καπνός	H ₂ O, καπνός	H ₂ O, CH ₄ , καπνός
	1-2.63	2.63- 2.94	2.94-3.57	3.57-4.17	4.17-4.7	4.7-7	7-8.62

Συχνότητες	8	9
Μήκος κύματος (μm)	Καπνός	Καπνός
	8.62-10	10-200

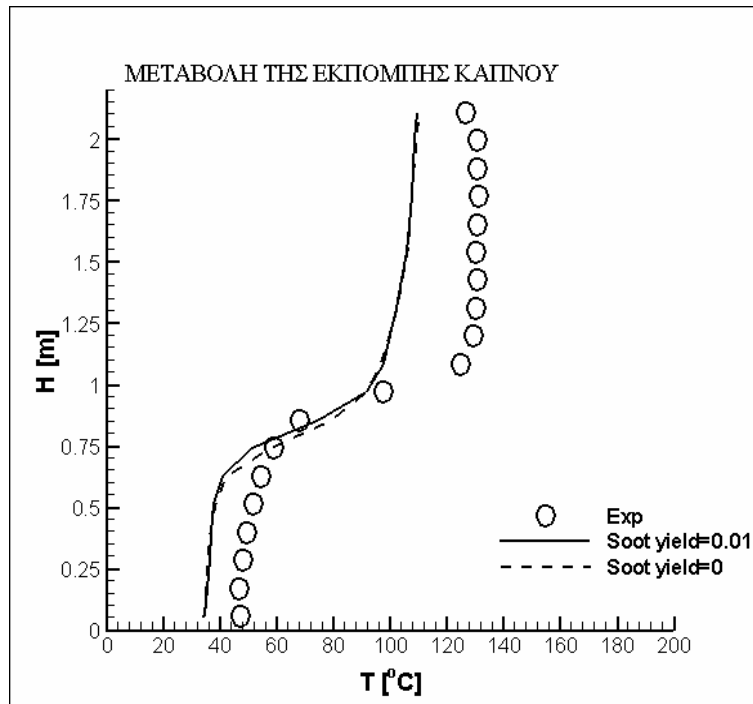
Πίνακας 6: Όρια συχνοτήτων για τα σημαντικότερα στοιχεία στο μοντέλο 10 συχνοτήτων

Για κάθε μία παράμετρο συγκρίθηκε η αρχική κατάσταση και η κατάσταση έπειτα από την αλλαγή της παραμέτρου (μόνο μία παράμετρος άλλαζε κάθε φορά ώστε να υπάρχει μια σαφής εικόνα των αιτίων τυχόν μεταβολών στα αποτελέσματα). Η

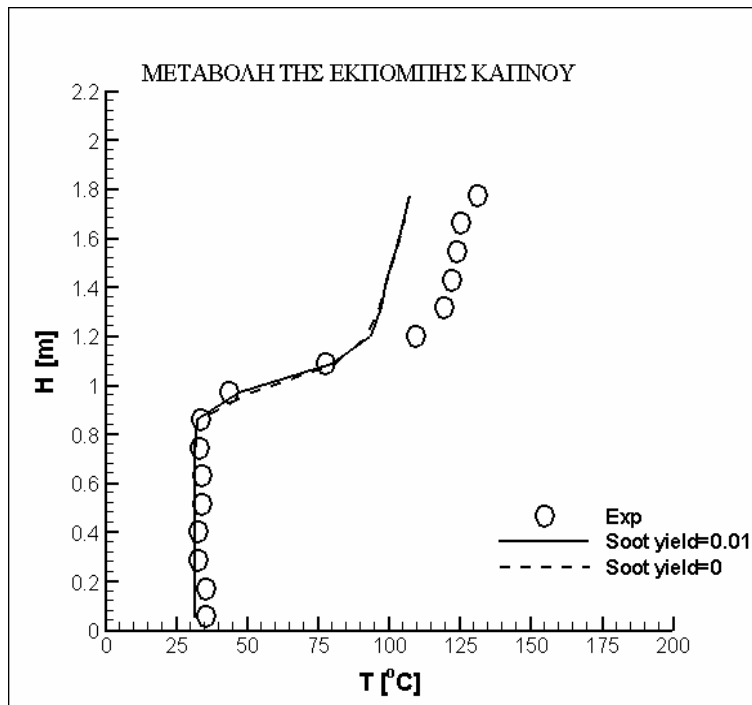
σύγκριση αφορούσε τις θερμοκρασίες στο κέντρο της πόρτας και στη γωνία του δωματίου και τις ταχύτητες στο κέντρο της πόρτας.

3.1.1 Εκπομπή καπνού

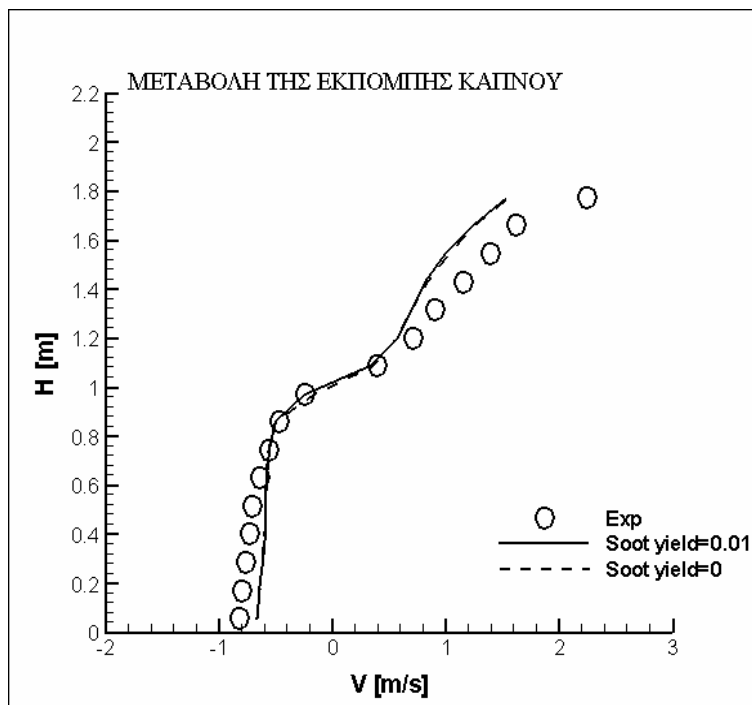
Στην παράγραφο αυτή συγκρίνονται οι θερμοκρασίες και οι ταχύτητες όταν μεταβάλλεται ο συντελεστής εκπομπής καπνού από 0.01 σε 0.



Εικόνα 24: Σύγκριση θερμοκρασιών στη γωνία του δωματίου με μεταβαλλόμενη παράμετρο την εκπομπή καπνού



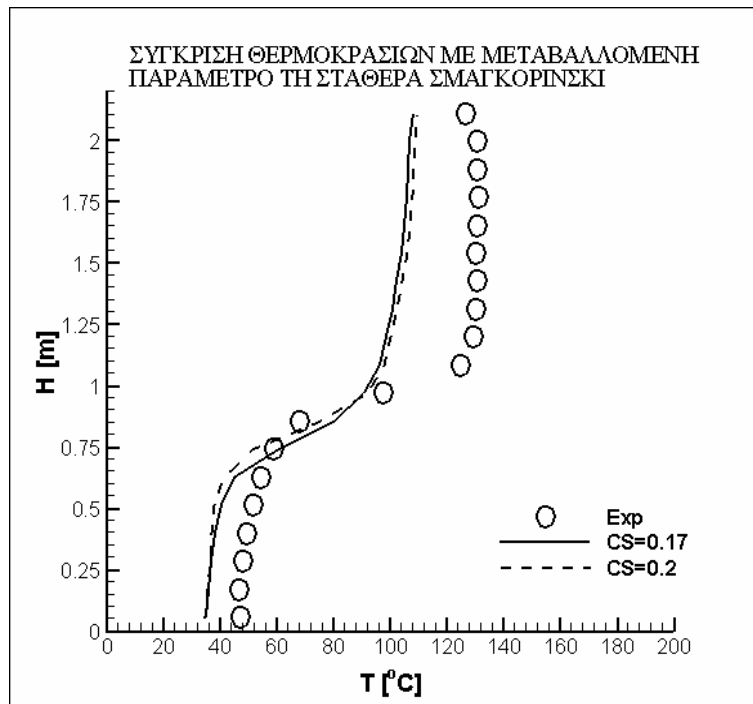
Εικόνα 25 : Σύγκριση θερμοκρασιών στο κέντρο της πόρτας με μεταβαλλόμενη παράμετρο την εκπομπή καπνού



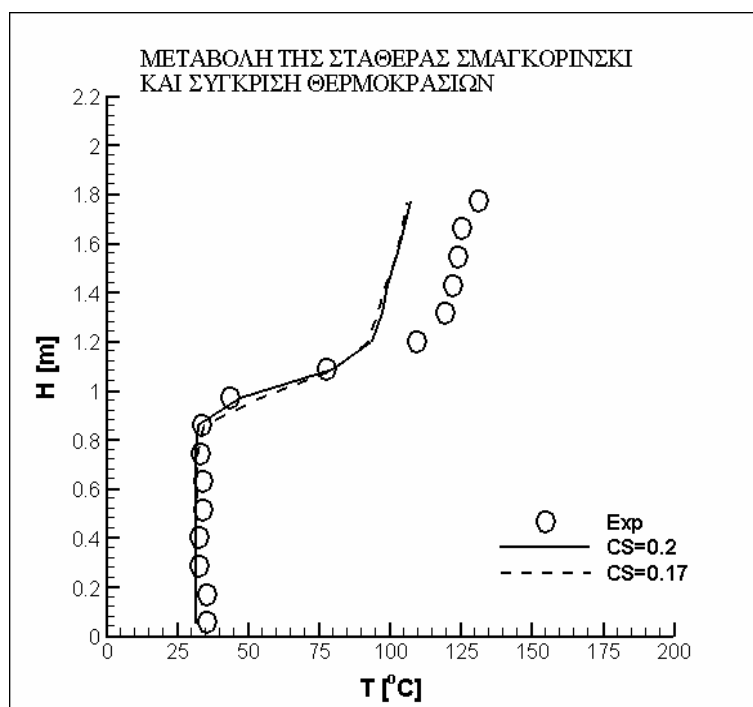
Εικόνα 26: Σύγκριση ταχυτήτων στο κέντρο της πόρτας με μεταβαλλόμενη παράμετρο την εκπομπή καπνού

Όπως φαίνεται και στα διαγράμματα (εικόνες 24-26) δεν παρατηρήθηκε κάποια σημαντική αλλαγή επομένως για το σύνολο των υπολογιστικών προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκε τελικά η τιμή 0.01.

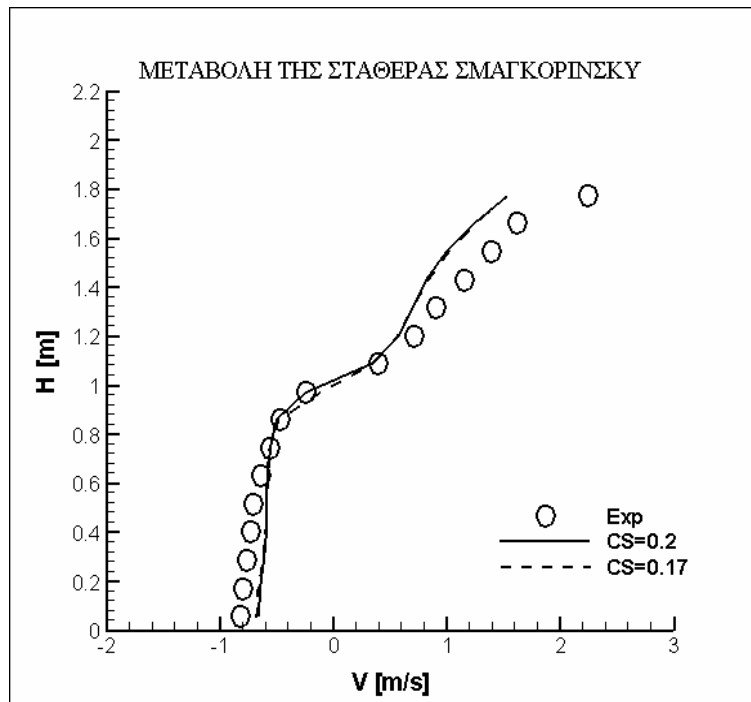
3.1.2 Σταθερά Smagorinsky



Εικόνα 27 :Σύγκριση θερμοκρασιών στη γωνία του δωματίου με μεταβαλλόμενη παράμετρο τη σταθερά Smagorinsky



Εικόνα 28: Σύγκριση θερμοκρασιών στο κέντρο της πόρτας με μεταβαλλόμενη παράμετρο τη σταθερά Smagorinsky



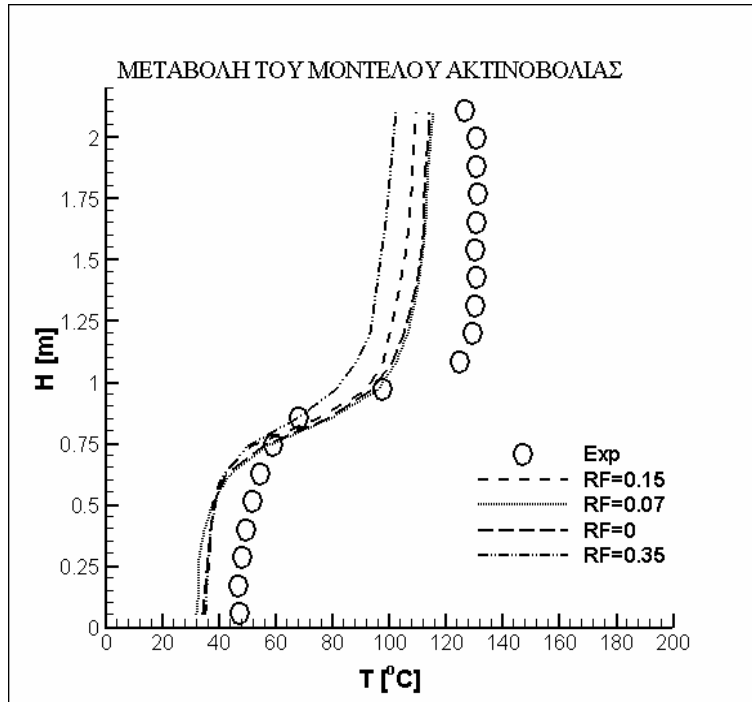
Εικόνα 29: Σύγκριση ταχυτήτων στο κέντρο της πόρτας με μεταβαλλόμενη παράμετρο τη σταθερά Smagorinsky

Για τη σταθερά Smagorinsky δοκιμάστηκαν οι εξής τιμές: 0.2 , 0.17 και 0.14. Για $C_S=0.14$ το πρόγραμμα παρουσίασε αριθμητική αστάθεια οπότε παρατίθενται τα αποτελέσματα για τις υπόλοιπες δύο τιμές. Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα (εικόνες 27-29) στις ταχύτητες δεν παρατηρείται σχεδόν καμία διαφορά ενώ στις θερμοκρασίες εμφανίζεται μια ελάχιστη διαφορά μεταξύ των δύο καμπυλών με τη $C_S=0.2$ να είναι οριακά λίγο πιο κοντά στα πειραματικά αποτελέσματα. Τελικά για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε η τιμή $C_S=0.2$.

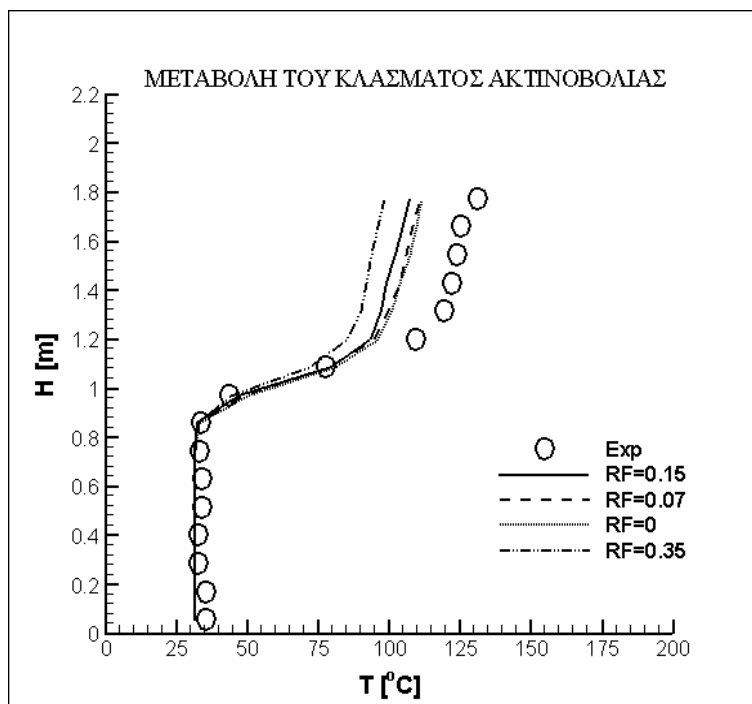
3.1.3 Κλάσμα ακτινοβολίας

Στην περίπτωση αυτή έγινε σύγκριση τεσσάρων τιμών της παραμέτρου: 0.35 , 0.15 , 0.07 και 0.

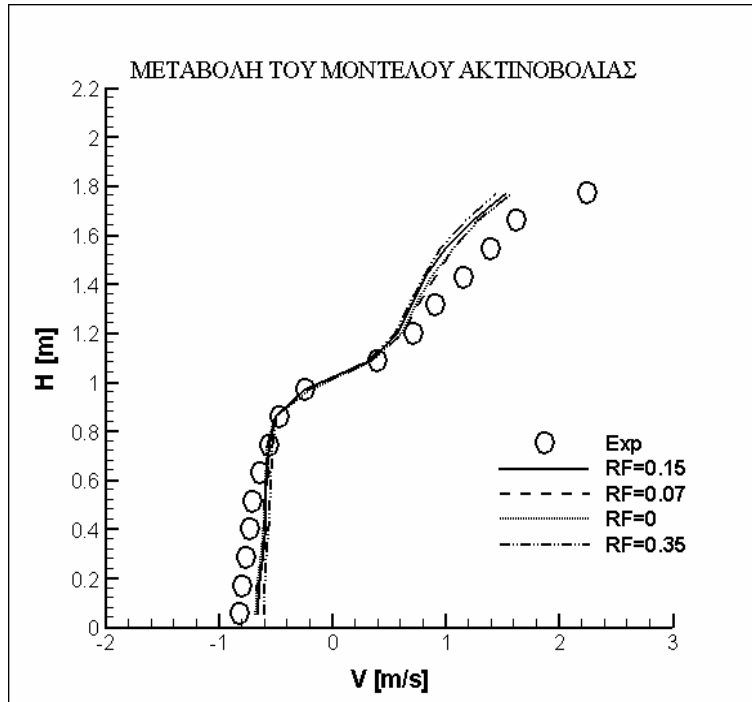
Η μεταβολή αυτής της παραμέτρου οδηγεί (εικόνες 30-32) σε ουσιαστική αλλαγή των αποτελεσμάτων. Όσο μειώνεται το κλάσμα ακτινοβολίας οι θερμοκρασίες αυξάνονται καθ' ύψος (Εικόνα 30) , κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο αφού το κλάσμα ακτινοβολίας στην ουσία αντιστοιχεί στο ποσοστό της ενέργειας που εκλύεται κατά την καύση, το οποίο διαχέεται υπό μορφή ακτινοβολίας. Όσο μεγαλύτερο είναι το κλάσμα ακτινοβολίας τόσο μεγαλύτερες θερμοκρασίες αναμένονται στη γειτονική περιοχή της φλόγας και λόγω της αρχής διατήρησης της ενέργειας , θα παρατηρούνται χαμηλότερες θερμοκρασίες σε μεγαλύτερο ύψος. Αυτό επαληθεύεται από τα διαγράμματα καθώς για $RF=0.35$ έχουμε τις χαμηλότερες θερμοκρασίες ψηλά και τις υψηλότερες χαμηλά και το αντίστροφο για $RF=0$.



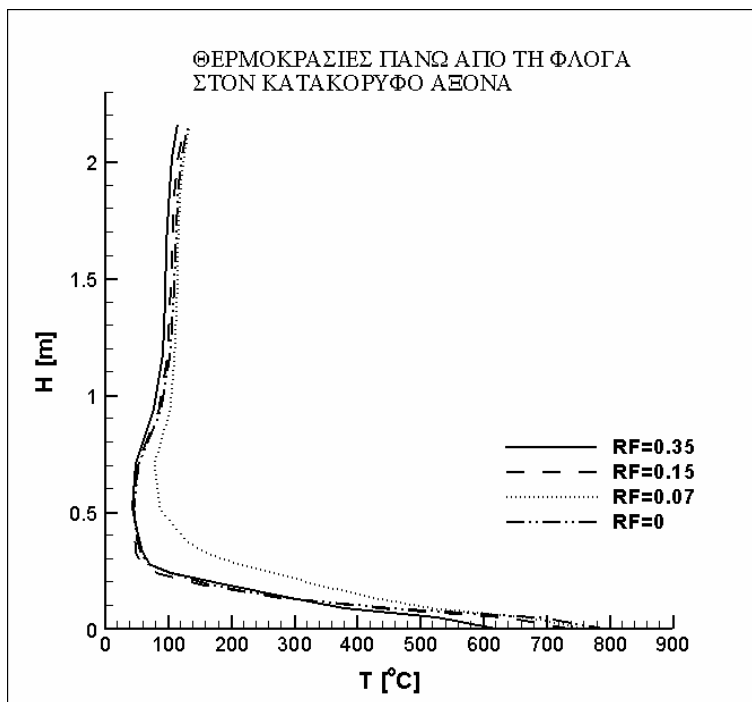
Εικόνα 30 :Σύγκριση θερμοκρασιών στη γωνία του δωματίου με μεταβαλλόμενη παράμετρο το κλάσμα ακτινοβολίας



Εικόνα 31: Σύγκριση θερμοκρασιών στο κέντρο της πόρτας με μεταβαλλόμενη παράμετρο το κλάσμα ακτινοβολίας



Εικόνα 32: Σύγκριση ταχυτήτων στο κέντρο της πόρτας με μεταβαλλόμενη παράμετρο το κλάσμα ακτινοβολίας



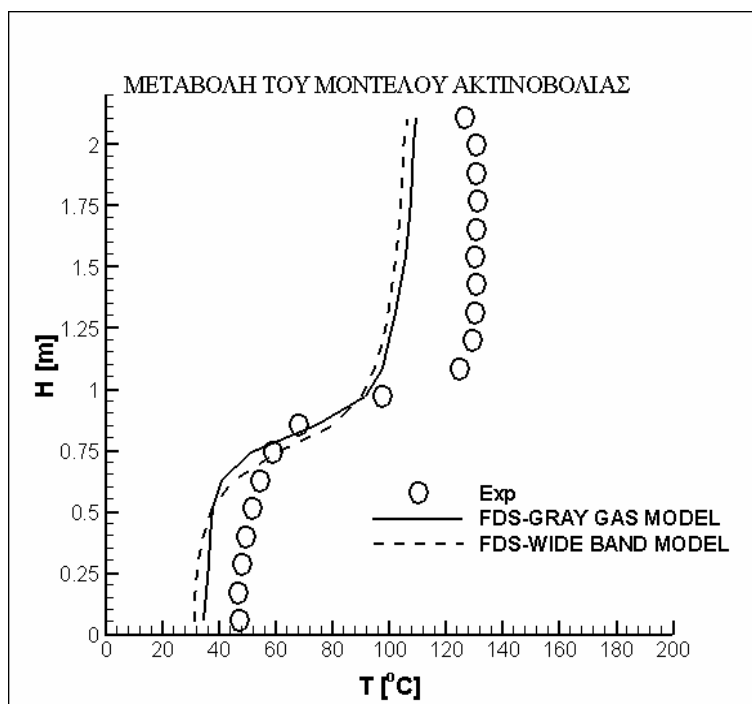
Εικόνα 33: Θερμοκρασίες καθ' ύψος πάνω από τη φλόγα για μεταβαλλόμενο κλάσμα ακτινοβολίας

Στην εικόνα 33 παρουσιάζεται η αλλαγή στη συμπεριφορά της φωτιάς όταν μεταβληθεί η τιμή του κλάσματος ακτινοβολίας. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι για υψηλή τιμή του κλάσματος ακτινοβολίας οι θερμοκρασίες του αέρα ακριβώς κοντά στην περιοχή της φλόγας μειώνονται και αυξάνονται οι θερμοκρασίες σε ύψος

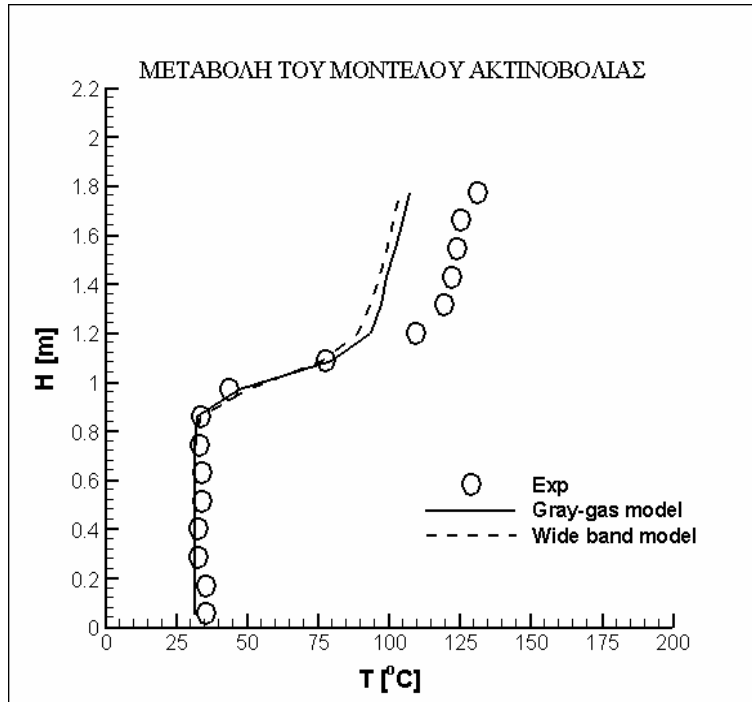
περίπου 2.1 m από τη φλόγα κοντά δηλαδή στην οροφή του δωματίου. Για χαμηλή τιμή του κλάσματος ακτινοβολίας συμβαίνει ακριβώς το αντίστροφο. Στις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε η τιμή $RF=0.07$.

3.1.4 Μοντέλο ακτινοβολίας

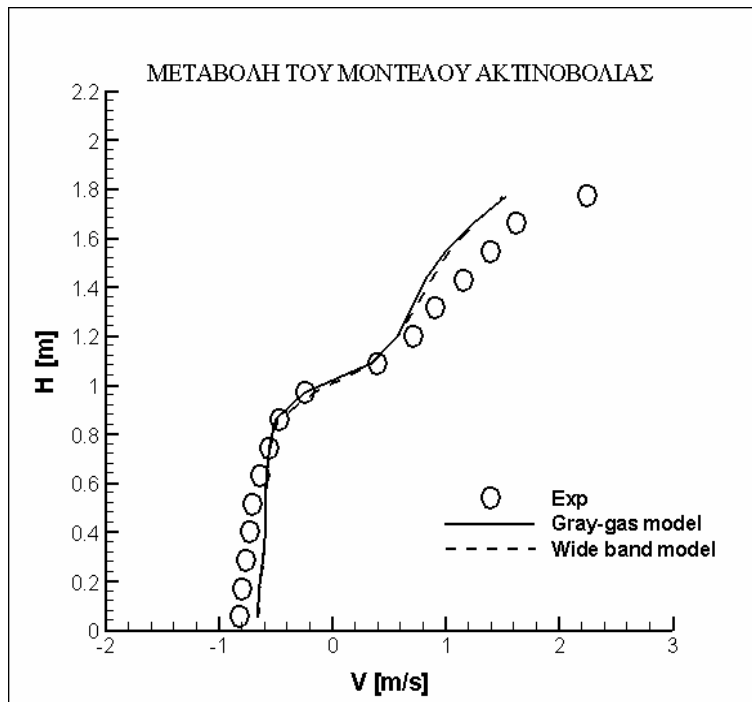
Πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ δύο περιπτώσεων. Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο έξι συχνοτήτων και στη δεύτερη περίπτωση αυξήθηκε ο αριθμός των συχνοτήτων σε 10 (μοντέλο ευρείας ζώνης -wide band model).



Εικόνα 34: Σύγκριση θερμοκρασιών στη γωνία του δωματίου με μεταβαλλόμενη παράμετρο το μοντέλο ακτινοβολίας (gray gas model-μοντέλο έξι συχνοτήτων, wide band model-μοντέλο δέκα συχνοτήτων)



Εικόνα 35 : Σύγκριση θερμοκρασιών στο κέντρο της πόρτας με μεταβαλλόμενη παράμετρο το μοντέλο ακτινοβολίας

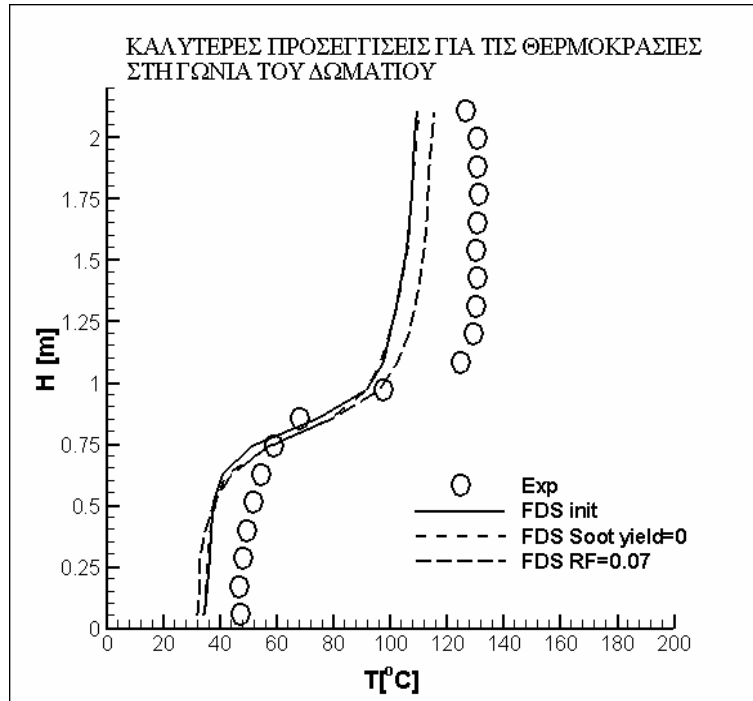


Εικόνα 36: Σύγκριση ταχυτήτων στο κέντρο της πόρτας με μεταβαλλόμενη παράμετρο το μοντέλο ακτινοβολίας

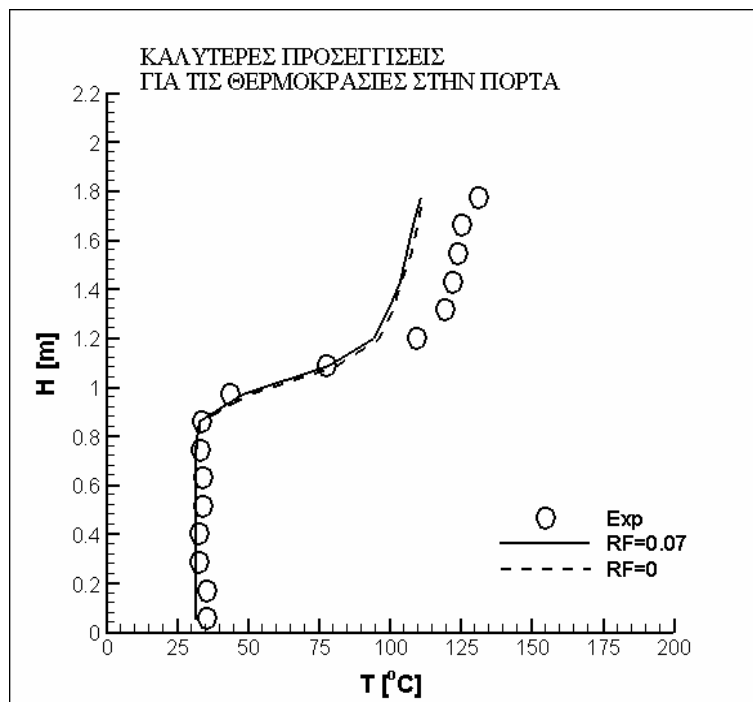
Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα (εικόνες 34-36) η αύξηση του αριθμού των συχνοτήτων στο μοντέλο ακτινοβολίας οδηγεί σε μια μικρή μείωση των θερμοκρασιών ψηλά ενώ οι ταχύτητες παραμένουν πρακτικά αναλλοίωτες. Τελικά στις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο έξι συχνοτήτων.

3.1.5 Σύγκριση των καλύτερων προσεγγίσεων

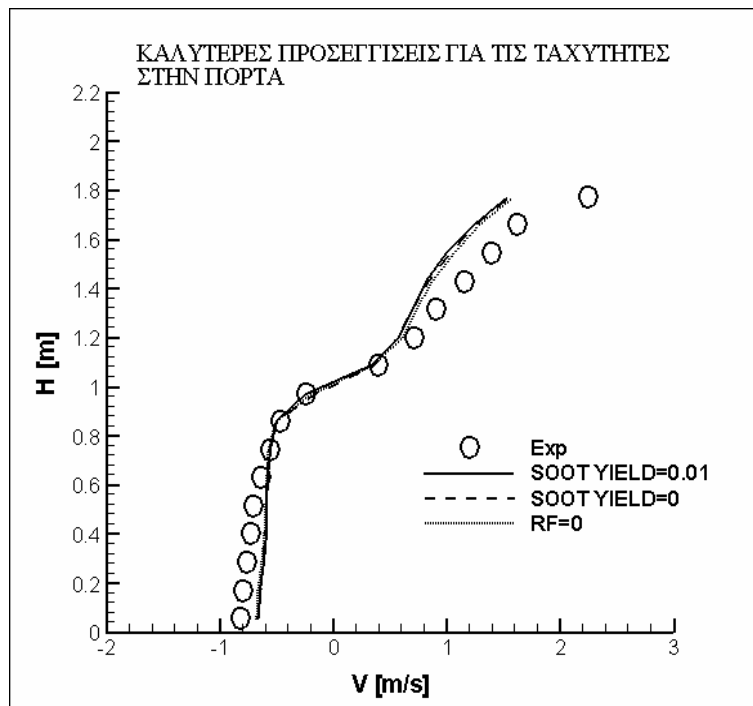
Προκειμένου να προσδιοριστεί η τελική καλύτερη προσέγγιση προς τα πειραματικά αποτελέσματα, έγινε συγκριτική αξιολόγηση των καλύτερων προσεγγίσεων της παραμετρικής μελέτης.



Εικόνα 37 :Οι καλύτερες προσεγγίσεις των θερμοκρασιών στη γωνία του δωματίου (FDS init:η αρχική περίπτωση με όλες τις προεπιλεγμένες τιμές)



Εικόνα 38 :Καλύτερες προσεγγίσεις των θερμοκρασιών στο κέντρο της πόρτας

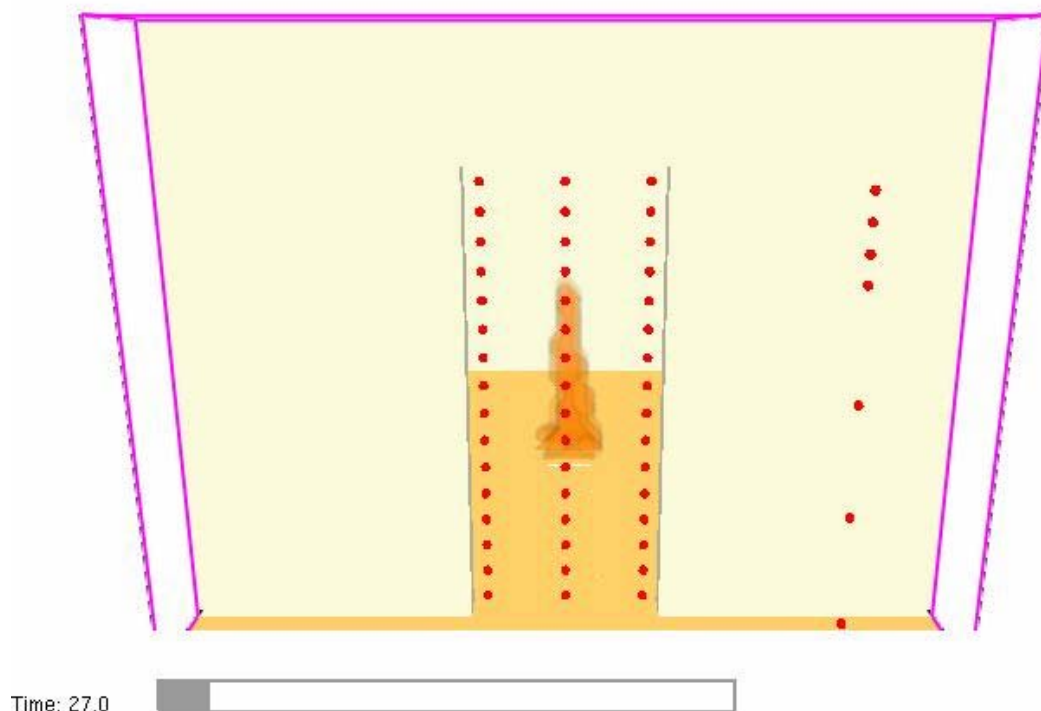


Εικόνα 39 :Καλύτερες προσεγγίσεις των ταχυτήτων στο κέντρο της πόρτας

Όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα (εικόνες 37-39) η καλύτερη συνολικά προσέγγιση επιτυγχάνεται στην περίπτωση που τεθεί $RF=0.07$ καθώς η αντίστοιχη καμπύλη προσεγγίζει καλύτερα τις πειραματικές θερμοκρασίες. Στην περίπτωση των ταχυτήτων όλες οι καμπύλες είναι παραπλήσιες χωρίς να παρατηρείται κάποια ουσιαστική διαφορά μεταξύ τους οπότε μπορεί να θεωρηθεί ότι επιτυγχάνεται η καλύτερη προσέγγιση συνολικά για $RF=0.07$.

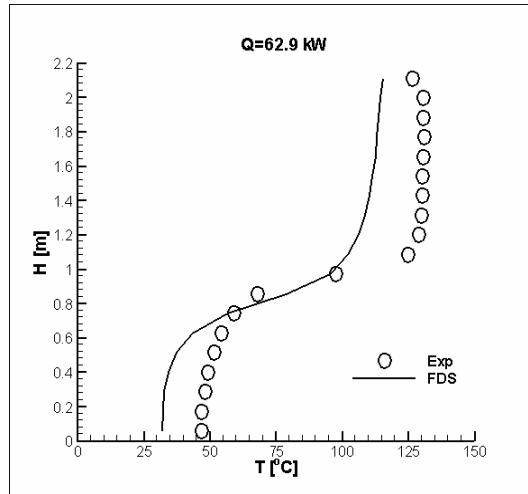
3.2 Αποτελέσματα

Περίπτωση 1:

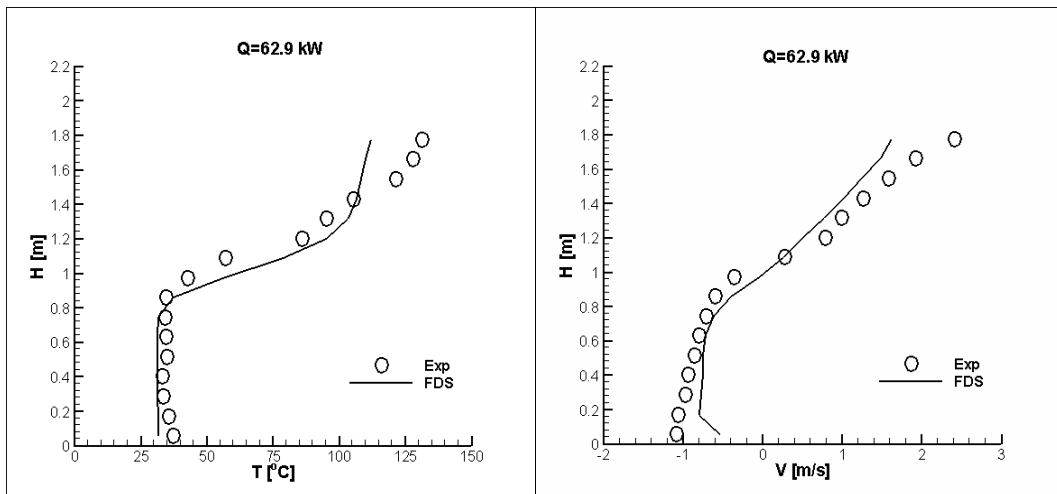


Εικόνα 40 :Σχηματική απεικόνιση της γεωμετρίας του υπολογιστικού χωρίου στη περίπτωση 1

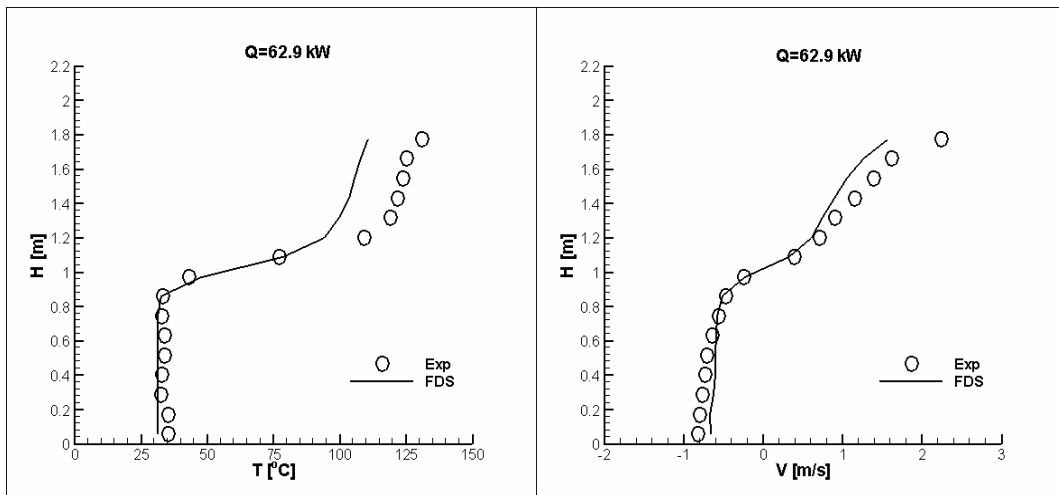
Η πρώτη περίπτωση είναι η τυπική γεωμετρία του δωματίου με τη φωτιά στο κέντρο του δωματίου. Στις εικόνες 41-44 γίνεται σύγκριση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων σε σχέση με τα πειραματικά. Γενικά παρατηρείται μια καλή προσέγγιση των πειραματικών μετρήσεων. Για τις θερμοκρασίες στη γωνία του δωματίου παρατηρείται μια υποεκτίμηση καθ'όλο το ύψος του δωματίου με το μέσο σφάλμα να είναι 17.89% (συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τα σφάλματα σε όλες τις περιπτώσεις στον πίνακα 5). Στην πόρτα σε χαμηλά ύψη κοντά στο πάτωμα παρατηρείται σχεδόν απόλυτη ταύτιση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων θερμοκρασιών ενώ κοντά στην οροφή της πόρτας παρατηρείται μια υποεκτίμηση στα υπολογιστικά αποτελέσματα της τάξης του 10%. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να οφείλεται σε απώλειες λόγω ακτινοβολίας. Πιο συγκεκριμένα είναι πιθανό ακόμα και με αυτή τη τιμή του κλάσματος ακτινοβολίας ο κώδικας να υπολογίζει περισσότερες απώλειες από αυτές που πραγματικά παρατηρούνται. Στην περίπτωση των ταχυτήτων παρατηρείται επίσης πολύ καλή προσέγγιση, αν και αριστερά και δεξιά στην πόρτα κοντά στο πάτωμα, ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών της ανακυκλοφορίας του αέρα εμφανίζει ανακρίβειες.



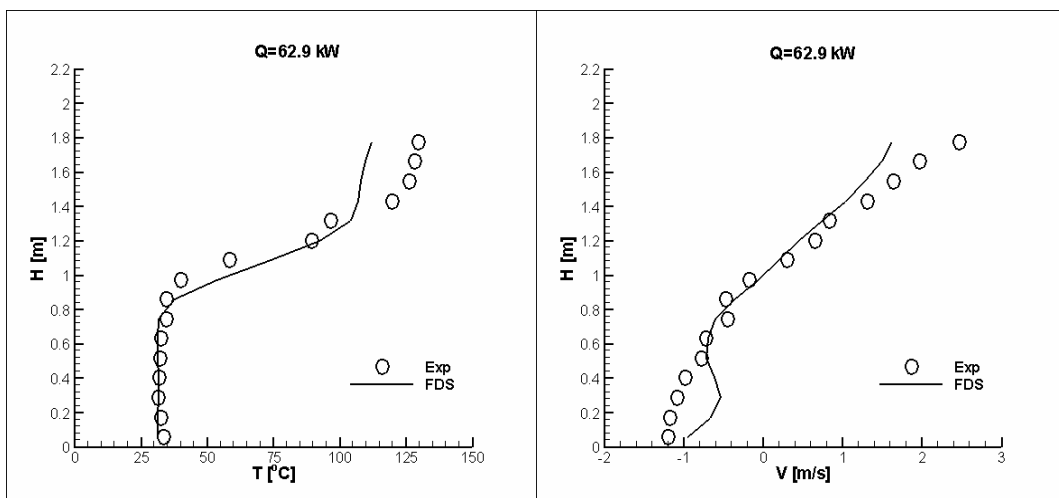
Εικόνα 41 : Διανομή θερμοκρασιών στη γωνία του δωματίου (εξρ:πειραματικά αποτελέσματα, FDS:υπολογιστικά αποτελέσματα)



Εικόνα 42 : Κατανομή στη δεξιά πλευρά της πόρτας: α)θερμοκρασιών, β)ταχυτήτων

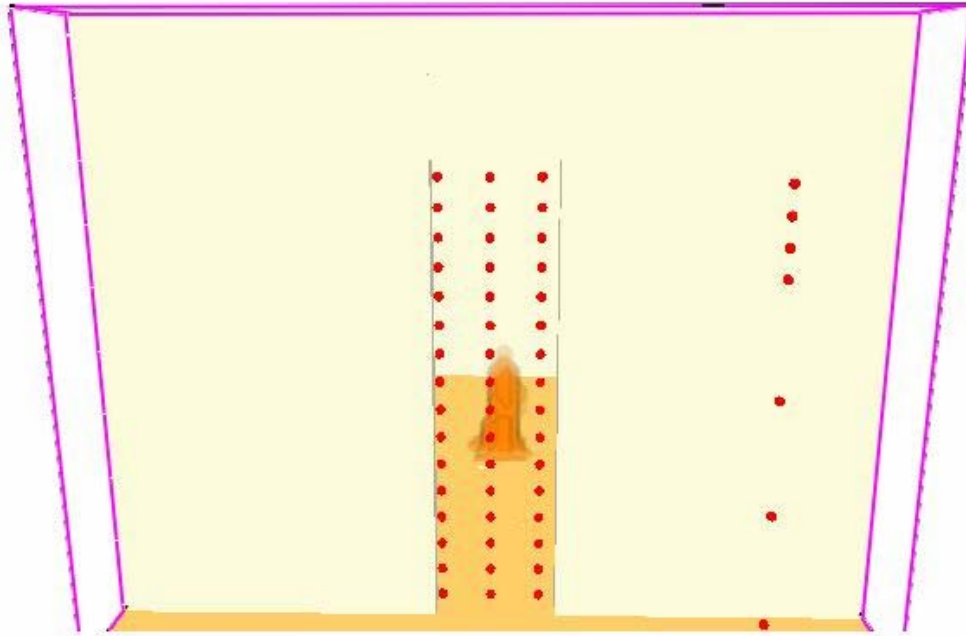


Εικόνα 43: Κατανομή στο κέντρο της πόρτας: α)θερμοκρασιών, β)ταχυτήτων



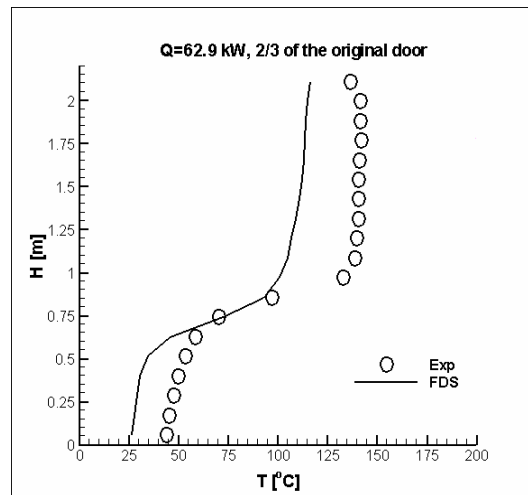
Εικόνα 44 :Κατανομή στην αριστερή πλευρά της πόρτας: α)θερμοκρασιών, β)ταχυτήτων

Περίπτωση 2:

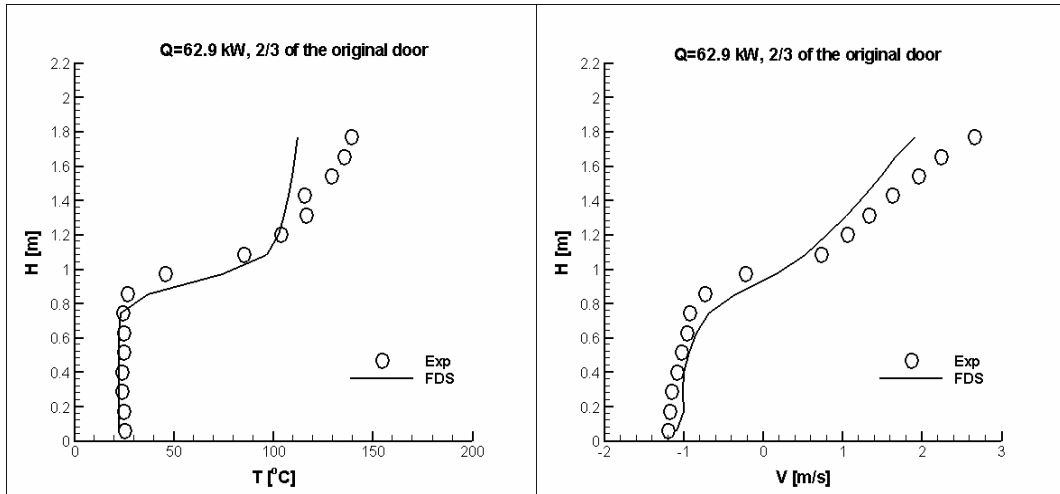


0:00:10.5

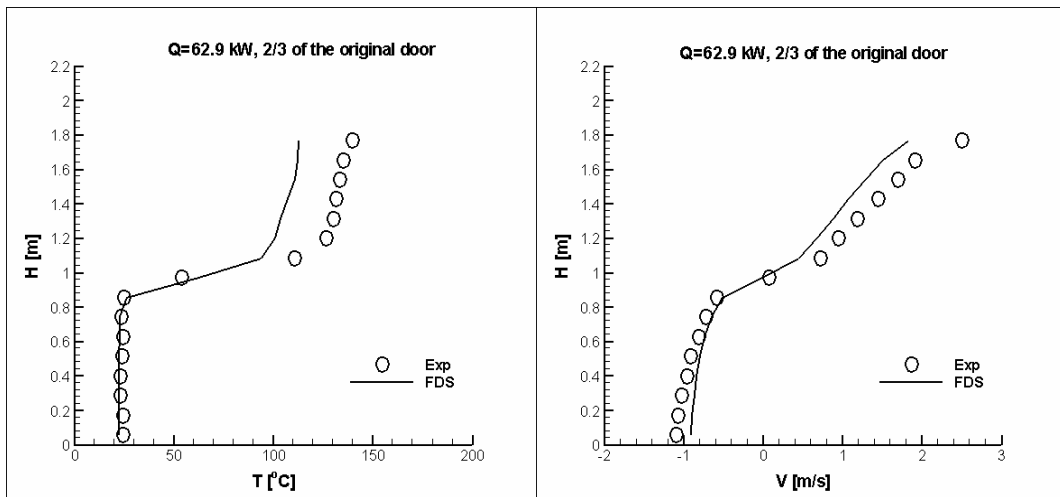
Εικόνα 45: Σχηματική απεικόνιση της γεωμετρίας του δωματίου στην περίπτωση 2



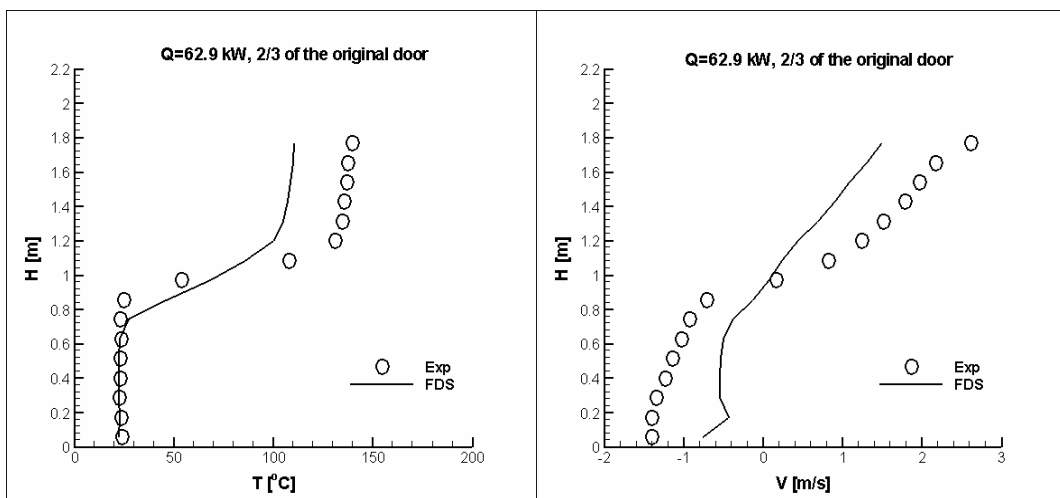
Εικόνα 46 : Κατανομή θερμοκρασιών στη γωνία του δωματίου



Εικόνα 47: Κατανομή στη δεξιά πλευρά της πόρτας:α)θερμοκρασιών, β)ταχυτήτων



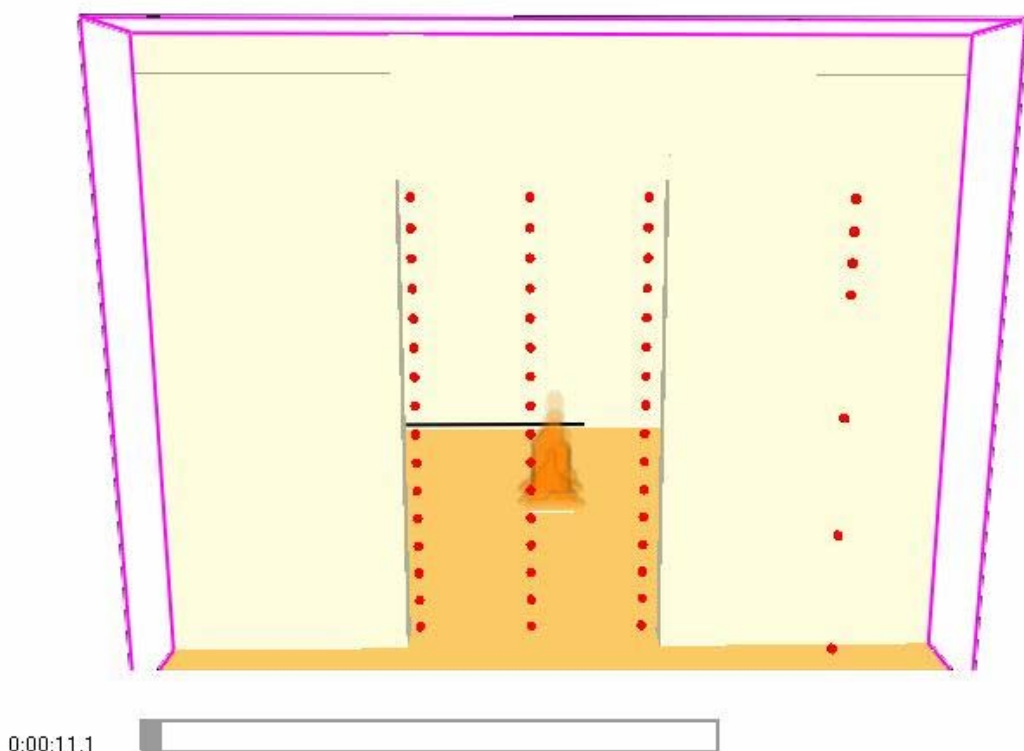
Εικόνα 48 : Κατανομή στο κέντρο της πόρτας:α)θερμοκρασιών, β)ταχυτήτων



Εικόνα 49: Κατανομή στην αριστερή πλευρά της πόρτας:α)θερμοκρασιών, β)ταχυτήτων

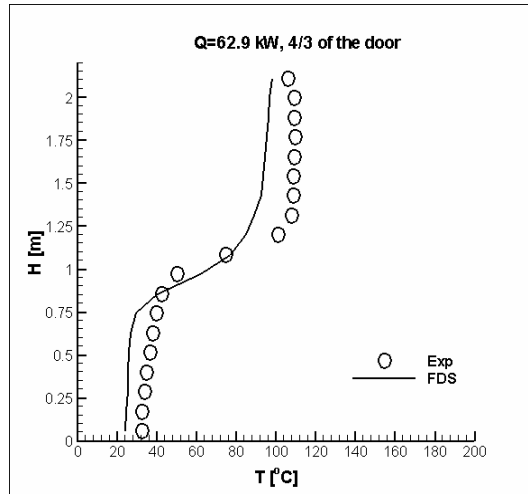
Στην περίπτωση 2 έχει μειωθεί το άνοιγμα της πόρτας κατά το 1/3. Από το θεώρημα διατήρησης της ορμής αναμένονται αυξημένες ταχύτητες σε σχέση με την περίπτωση 1 καθώς οι ίδιες ποσότητες αερίων μαζών αναγκάζονται να περάσουν από ένα μικρότερο άνοιγμα άρα αυξάνεται η ταχύτητά τους. Επίσης αναμένεται να κατέλθει το μηδενικό επίπεδο (το οριζόντιο επίπεδο στο οποίο μηδενίζεται η κάθετη ταχύτητα στην πόρτα) διότι τα θερμά αέρια καθώς διέρχονται από ένα στενότερο άνοιγμα θα συγκεντρώνονται αρχικά ψηλά και σταδιακά κατεβαίνουν και καθώς έχουμε την ίδια ποσότητα αερίων μαζών με την περίπτωση 1 αναμένεται να κατεβούν πιο χαμηλά. Στις εικόνες 46-49 φαίνεται ότι όντως έχουν αυξανόνται οι ταχύτητες σε σχέση με την περίπτωση 1. Το μηδενικό επίπεδο είναι επίσης πιο χαμηλό σε σχέση με την περίπτωση 1 (≈ 0.9 m στην περ.2 σε αντίθεση με ≈ 1.05 m στην περίπτωση 1). Το μηδενικό επίπεδο είναι το σημείο στα διαγράμματα των ταχυτήτων στο οποίο η ταχύτητα μηδενίζεται.

Περίπτωση 3:

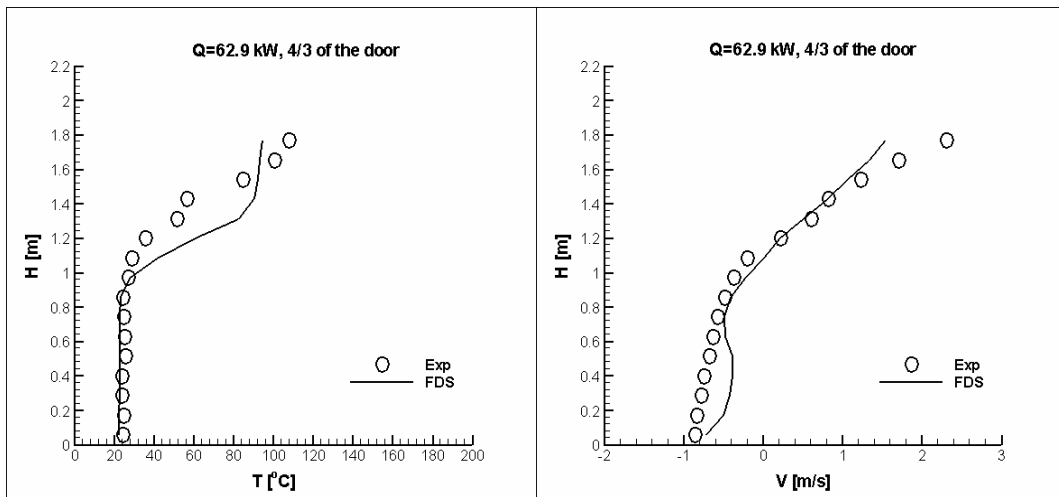


Εικόνα 50: Σχηματική απεικόνιση της γεωμετρίας του δωματίου στην περίπτωση 3

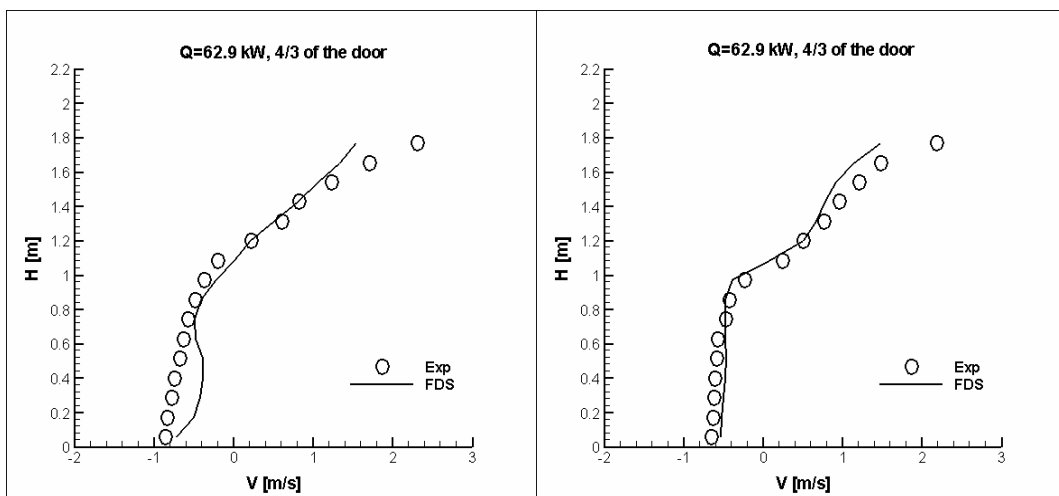
Στην περίπτωση 3 έχει αυξηθεί το άνοιγμα της πόρτας κατά το 1/3 σε σχέση με την περίπτωση 1. Εδώ αναμένονται τα αντίστροφα αποτελέσματα σε σχέση με την περίπτωση 2 δηλαδή το μηδενικό επίπεδο να ανέλθει και να εμφανιστούν γενικά χαμηλότερες ταχύτητες (συγκριτικά με την περίπτωση 1). Όντως, όπως φαίνεται και στις εικόνες 51-54, η μέγιστη ταχύτητα στην πόρτα είναι $\approx 2.3-2.4$ m/s μικρότερη από την αντίστοιχη στην περίπτωση 2 (≈ 2.9 m/s) καθώς και από την περίπτωση 1 όπου είναι ≈ 2.5 m/s. Το μηδενικό επίπεδο εμφανίζεται σε μεγαλύτερο ύψος και βρίσκεται στα 1.1 m (σε αντίθεση με 1.05 m στην περίπτωση 1 και 0.9 m στην περίπτωση 2).



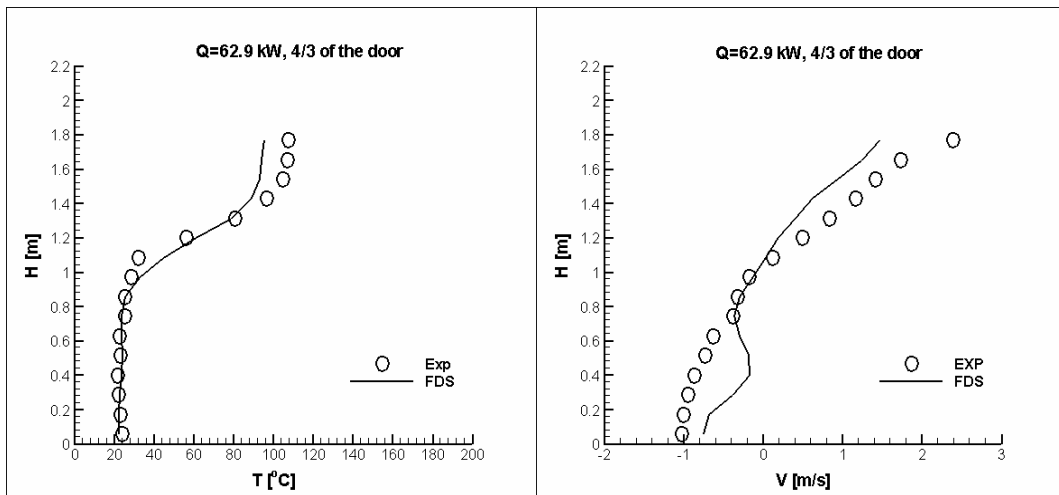
Εικόνα 51 : Κατανομή θερμοκρασιών στη γωνία του δωματίου



Εικόνα 52: Κατανομή στη δεξιά πλευρά της πόρτας: α)θερμοκρασιών, β)ταχυτήτων

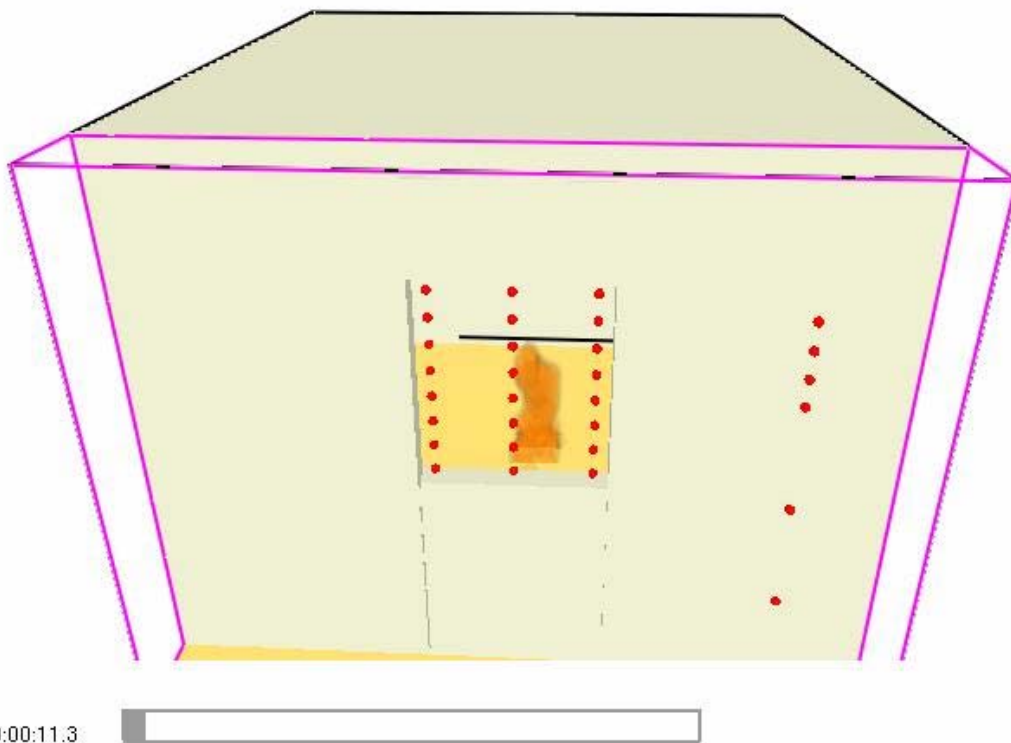


Εικόνα 53 : Κατανομή στο κέντρο της πόρτας: α)θερμοκρασιών, β)ταχυτήτων



Εικόνα 54 : Κατανομή στην αριστερή πλευρά της πόρτας:α)θερμοκρασιών , β)ταχυτήτων

Περίπτωση 4:

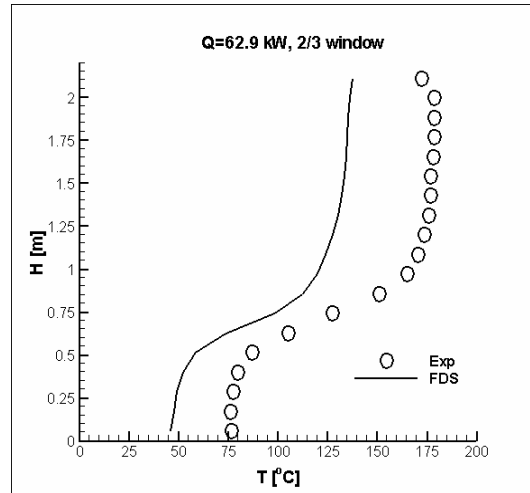


Εικόνα 55: Σχηματική απεικόνιση της γεωμετρίας του δωματίου στην περίπτωση 4

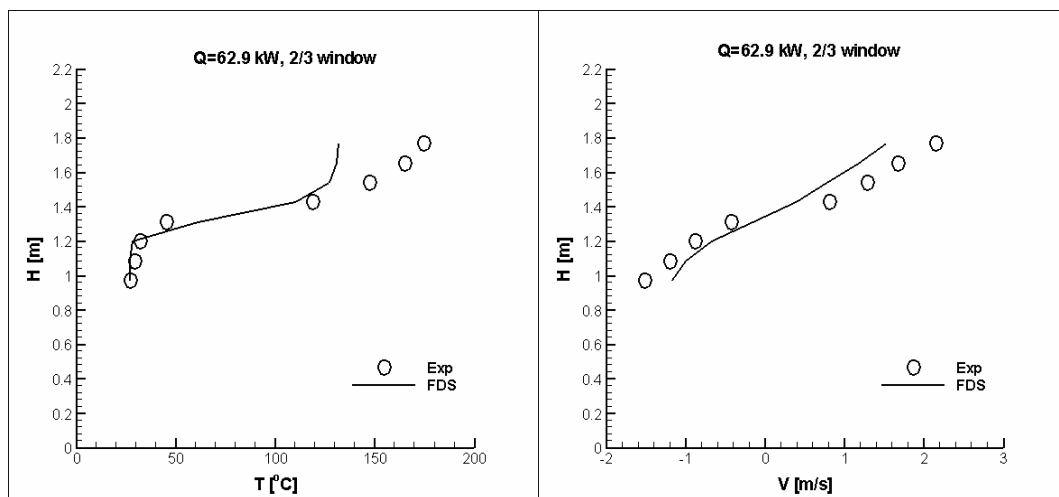
Στην περίπτωση 4 το άνοιγμα της πόρτας έχει μετατραπεί σε παράθυρο , με αποτέλεσμα να παρατηρείται το μικρότερο άνοιγμα από όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Σε αυτή την περίπτωση λόγω του μικρού ανοίγματος αναμένονται οι υψηλότερες ταχύτητες.

Όπως φαίνεται στις εικόνες 56-59 οι ταχύτητες δεν είναι πολύ υψηλότερες σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις ενώ αναμενόταν το αντίθετο. Ίσως το φαινόμενο

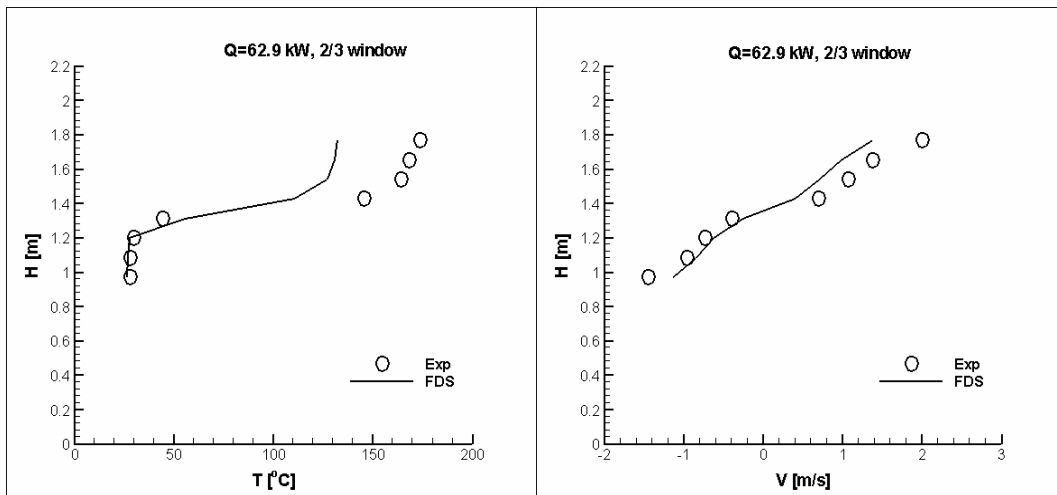
αυτό οφείλεται στο ότι το μικρό άνοιγμα περιόρισε την κίνηση των αερίων και τα εγκλώβισε μέσα στο δωμάτιο. Οι θερμοκρασίες είναι αρκετά αυξημένες σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις λόγω της παρουσίας μεγάλης ποσότητας καπνού και καυσαερίων μέσα στο δωμάτιο. Λόγω της μικρότερης ροής σε αυτή την περίπτωση η θερμότητα δε βγαίνει από το δωμάτιο.



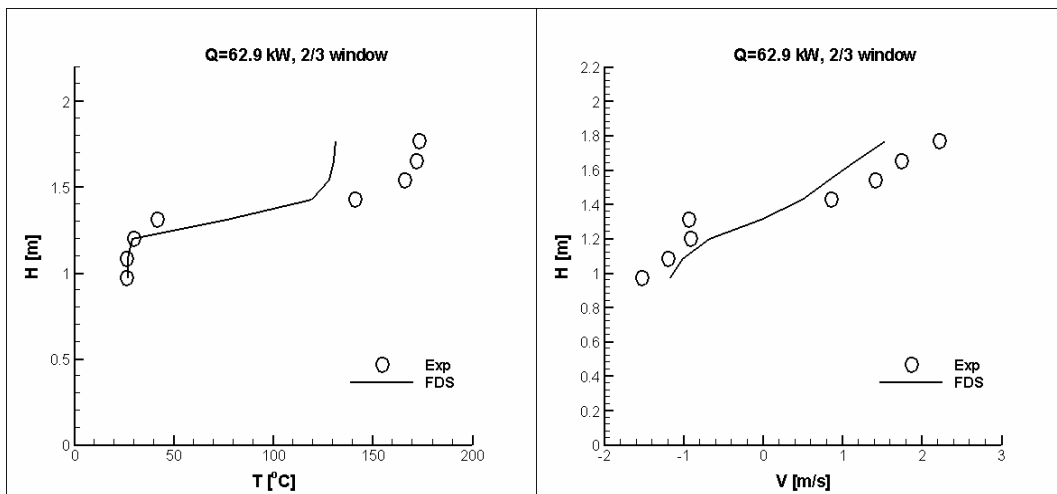
Εικόνα 56 : Κατανομή θερμοκρασιών στη γωνία του δωματίου



Εικόνα 57 : Κατανομή στη δεξιά πλευρά της πόρτας: α)θερμοκρασιών, β)ταχυτήτων



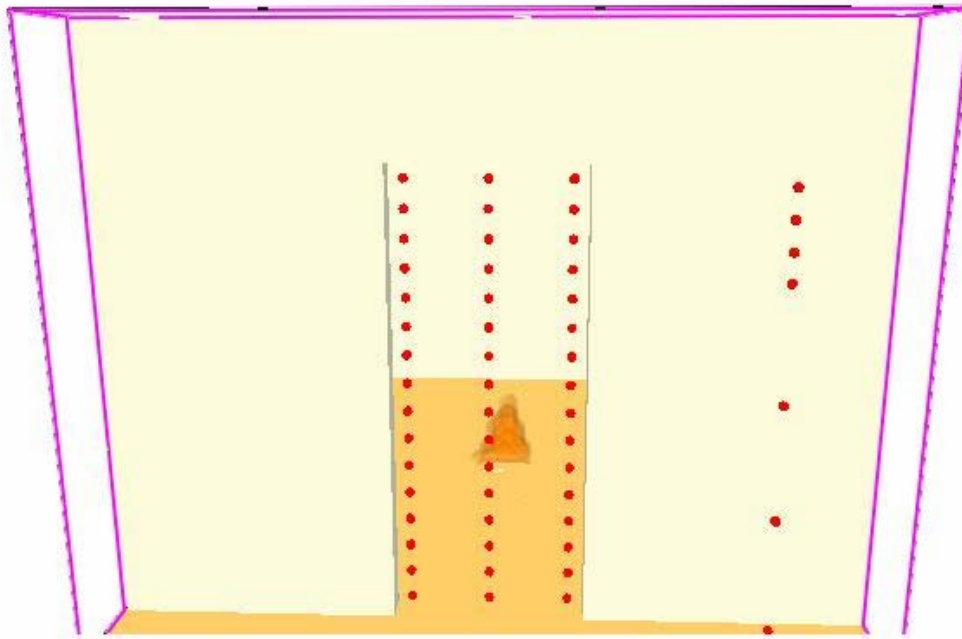
Εικόνα 58 : Κατανομή στο κέντρο της πόρτας:α)θερμοκρασιών, β)ταχυτήτων



Εικόνα 59: Κατανομή στην αριστερή πλευρά της πόρτας:α)θερμοκρασιών, β)ταχυτήτων

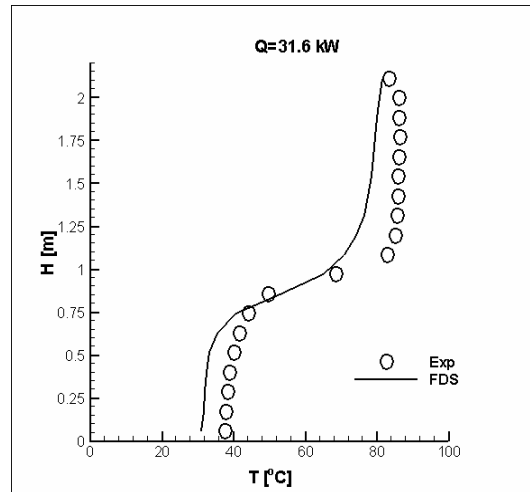
Περίπτωση 5:

Στην περίπτωση 5 η ένταση της φωτιάς έχει μειωθεί περίπου στο μισό σε σχέση με την περίπτωση 1. Στην περίπτωση αυτή αναμένονται γενικά χαμηλότερες θερμοκρασίες και ταχύτητες σε σχέση με την περίπτωση 1. Η παρατήρηση αυτή επαληθεύεται στις εικόνες 61-64 όπου φαίνονται σαφώς μειωμένες ταχύτητες και θερμοκρασίες. Στην περίπτωση αυτή παρατηρήθηκε πολύ υψηλή συμφωνία μεταξύ των πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων με το μέσο σχετικό σφάλμα στις θερμοκρασίες να είναι $\approx 12-13\%$ και στις ταχύτητες $\approx 20\%$.

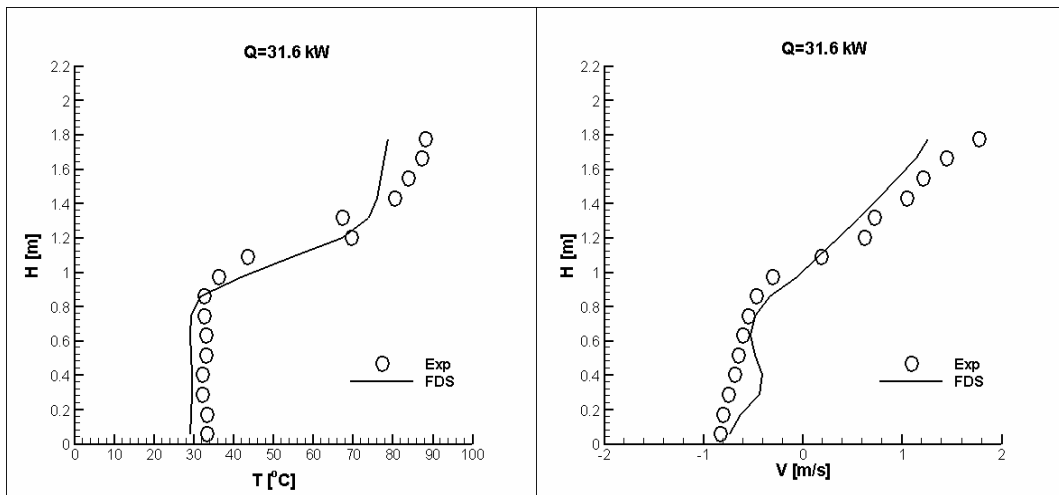


0:00:14.1

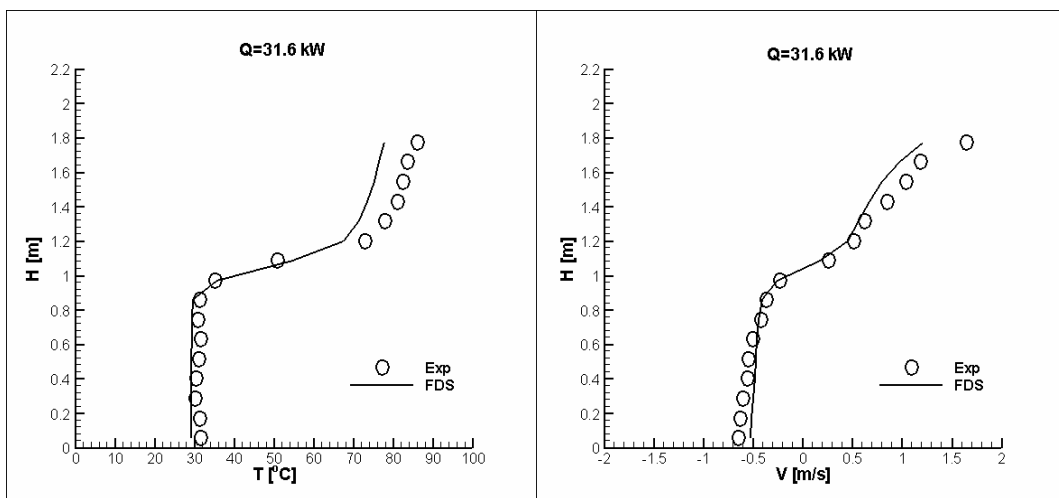
Εικόνα 60 : Σχηματική απεικόνιση της φωτιάς στην περίπτωση 5



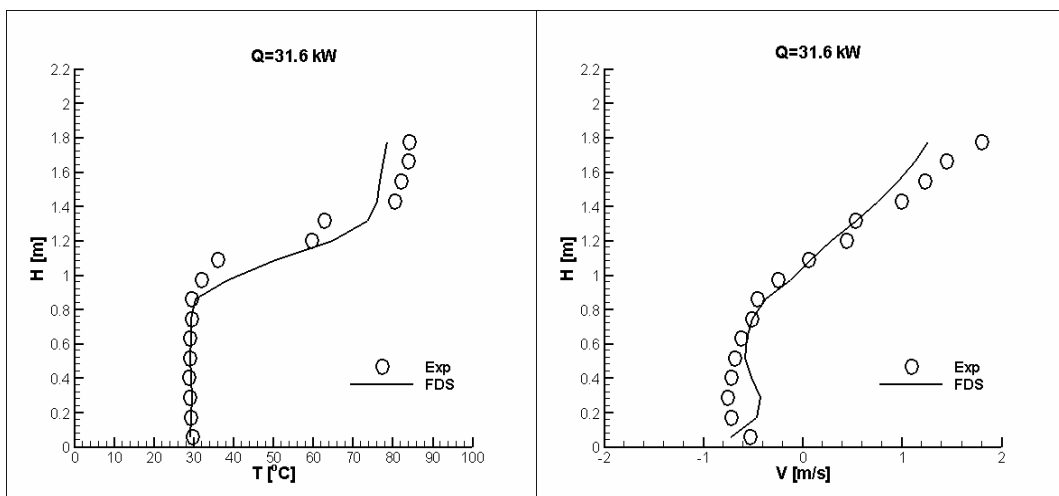
Εικόνα 61: Κατανομή θερμοκρασιών στη γωνία του δωματίου



Εικόνα 62 :Κατανομή στη δεξιά πλευρά της πόρτας:α)θερμοκρασιών, β)ταχυτήτων

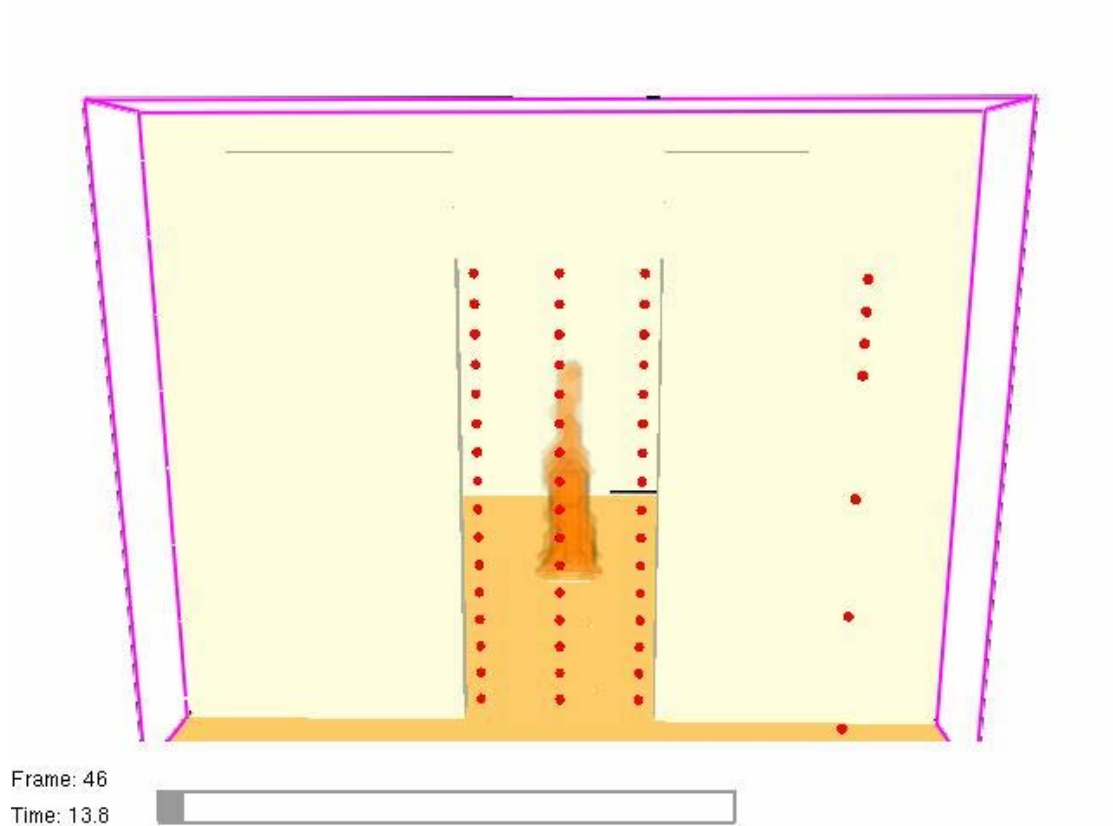


Εικόνα 63: Κατανομή στο κέντρο της πόρτας:α)θερμοκρασιών, β)ταχυτήτων



Εικόνα 64: Κατανομή στην αριστερή πλευρά της πόρτας:α)θερμοκρασιών, β)ταχυτήτων

Περίπτωση 6:

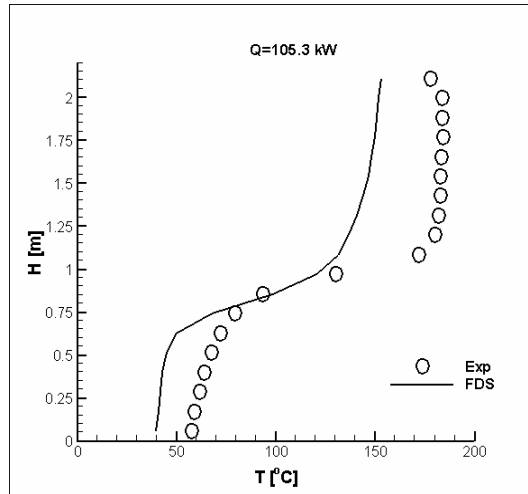


Εικόνα 65 : Σχηματική απεικόνιση της περίπτωσης 6

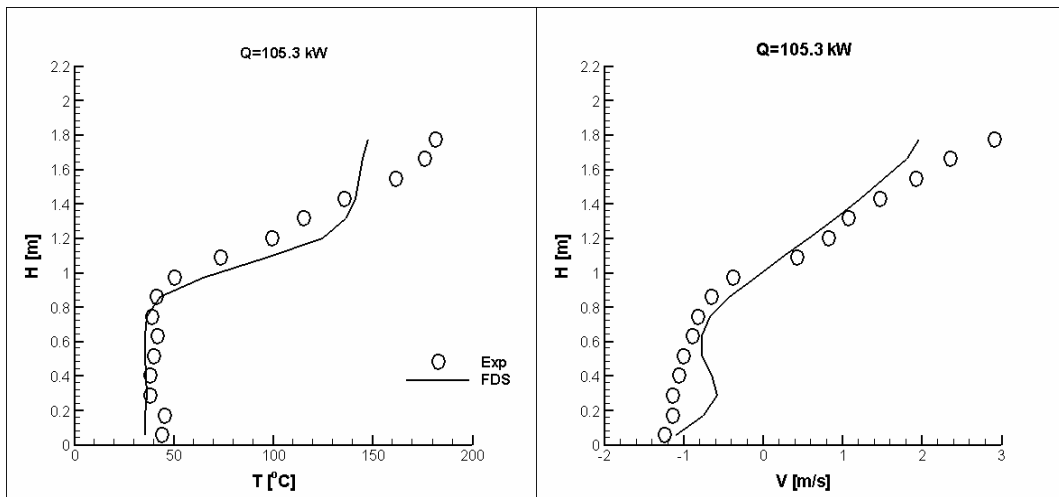
Στην περίπτωση 6 αυξάνεται η ένταση της φλόγας κατά τα 2/3 σε σχέση με την περίπτωση 1. Από την αύξηση αυτή αναμένονται υψηλές θερμοκρασίες και ταχύτητες. Στα καυσαέρια αποθηκεύεται κυρίως η θερμότητα που παράγεται κατά την καύση έτσι σε αυτή την περίπτωση αναμένονται υψηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις λόγω της αυξημένης παραγωγής καυσαερίων εξαιτίας της μεγαλύτερης φωτιάς. Αφού οι αέριες μάζες είναι αυξημένες αναμένονται και υψηλότερες ταχύτητες σε σχέση με την περίπτωση 1 αφού παραμένει το ίδιο άνοιγμα .

Στις εικόνες 66-69 επαληθεύονται αυτές οι παρατηρήσεις .Οι πειραματικές μετρημένες τιμές στη γωνία του δωματίου φθάνουν μέχρι τους 180°C και οι αντίστοιχες ταχύτητες αγγίζουν τα 3 m/s στην οροφή και το 1 m/s στο έδαφος.

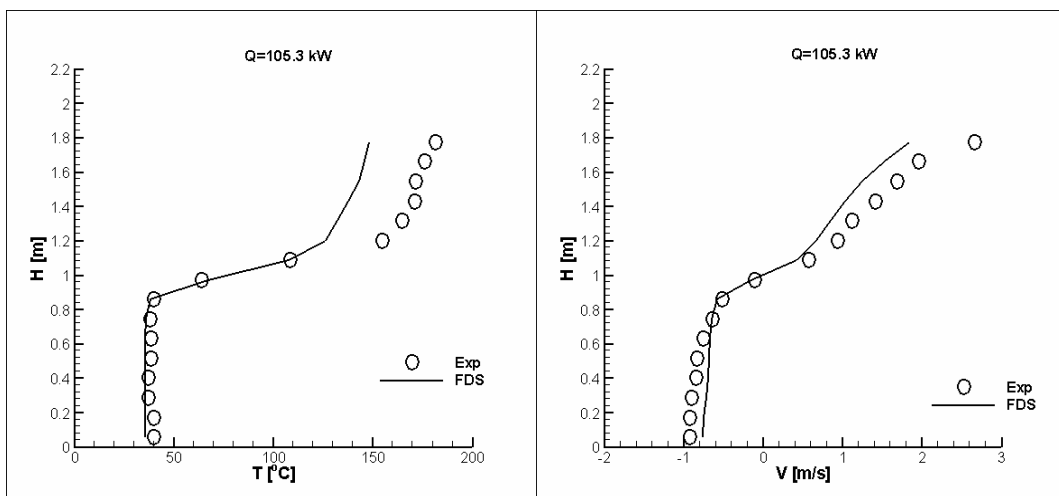
Το μέσο σφάλμα για τις θερμοκρασίες στην πόρτα είναι $\approx 12\%$ ενώ για τις ταχύτητες $\approx 28\%$.



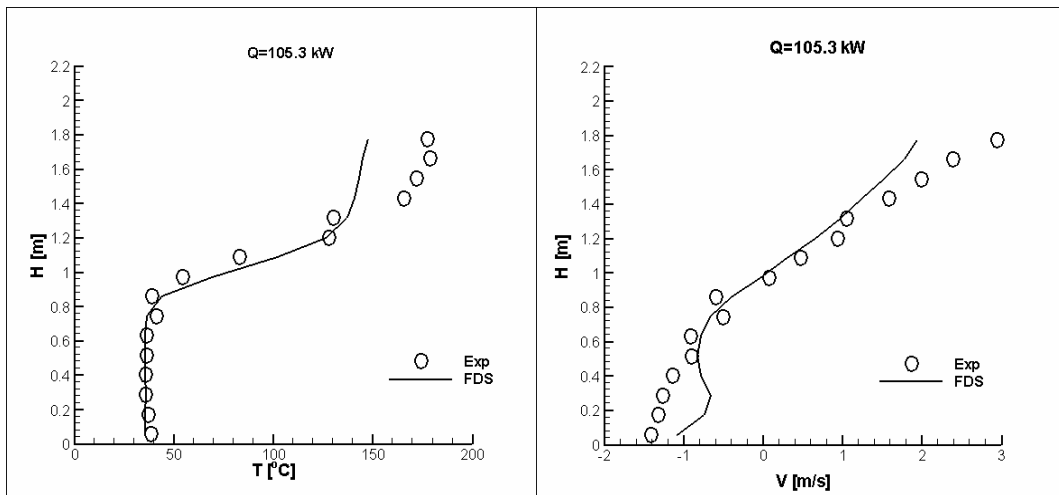
Εικόνα 66: Κατανομή θερμοκρασιών στη γωνία του δωματίου



Εικόνα 67: Κατανομή στη δεξιά πλευρά της πόρτας: α)θερμοκρασιών, β)ταχυτήτων

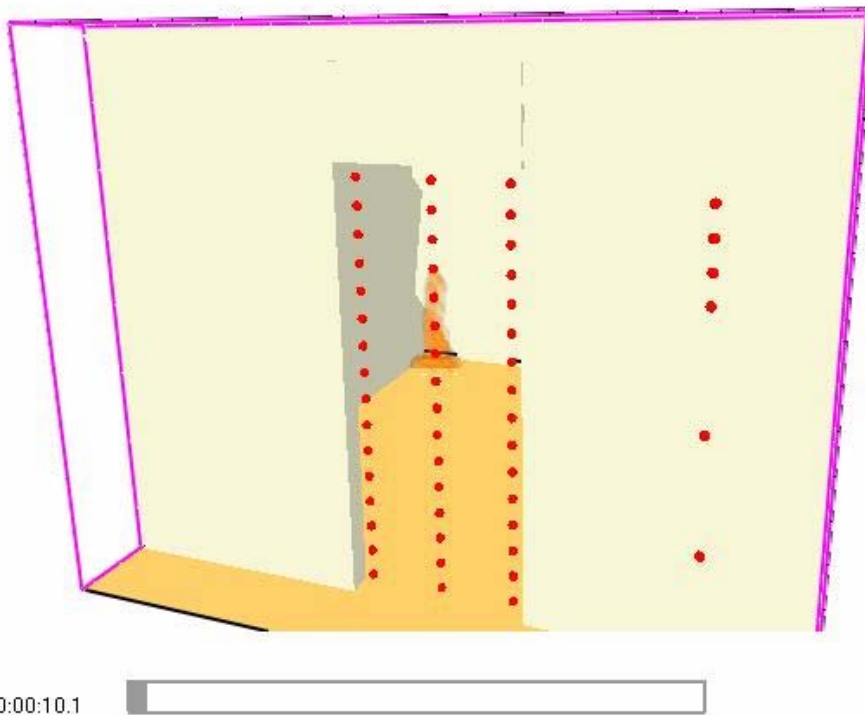


Εικόνα 68 : Κατανομή στο κέντρο της πόρτας: α)θερμοκρασιών, β)ταχυτήτων



Εικόνα 69 : Κατανομή στην αριστερή πλευρά της πόρτας: α)θερμοκρασιών, β)ταχυτήτων

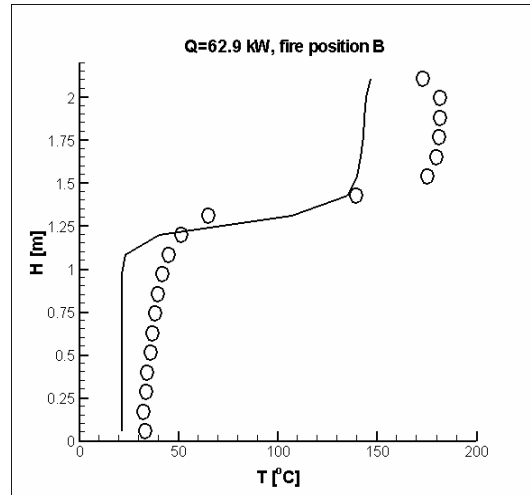
Περίπτωση 7:



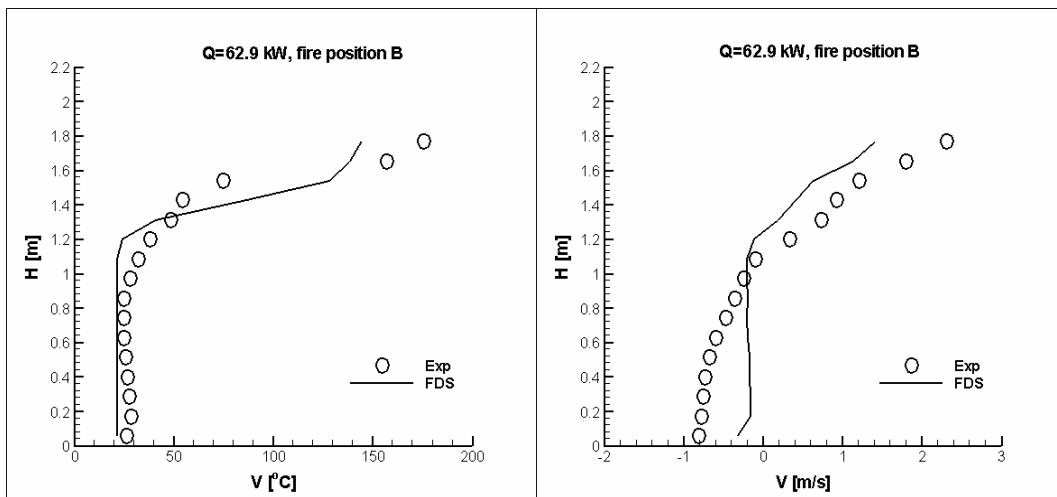
Εικόνα 70 : Σχηματική απεικόνιση της γεωμετρίας στην περίπτωση 7

Στην περίπτωση 7 η γεωμετρία είναι ίδια με την περίπτωση 1 , όπως και η ένταση της φωτιάς , μόνο που σε αυτή την περίπτωση ο καυστήρας έχει τοποθετηθεί στην πίσω αριστερή γωνία του δωματίου. Από την εικόνα 70 παρατηρείται ότι η κοντινότερη έξοδος των καυσαερίων από το δωμάτιο είναι η δεξιά πλευρά της πόρτας (όπως βλέπει κάποιος την πόρτα μέσα από το δωμάτιο). Κατά συνέπεια , αναμένονται σχετικά υψηλότερες θερμοκρασίες και ταχύτητες δεξιά από ό,τι αριστερά στην πόρτα.

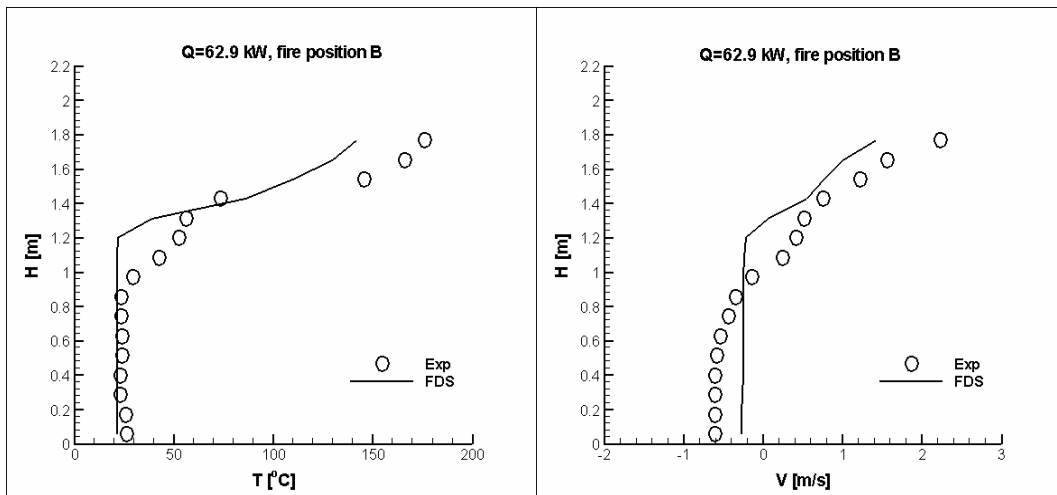
Στις εικόνες 71-74 φαίνεται ότι τελικά τα καυσαέρια ισομοιράζονται καθώς δεν παρατηρείται κάποια σημαντική διαφορά μεταξύ των τριών θέσεων.



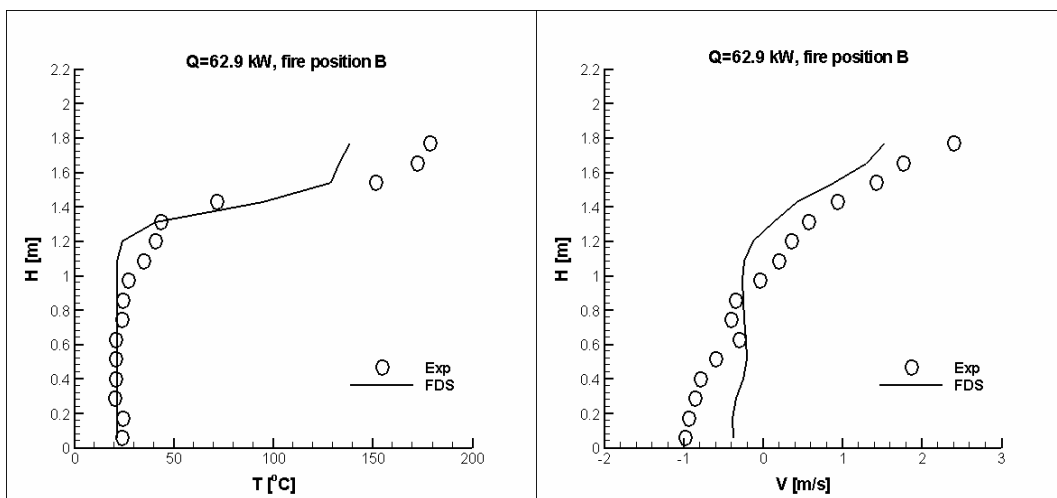
Εικόνα 71: Κατανομή θερμοκρασιών στη γωνία του δωματίου



Εικόνα 72 : Κατανομή στη δεξιά πλευρά της πόρτας:α)θερμοκρασιών, β)ταχυτήτων



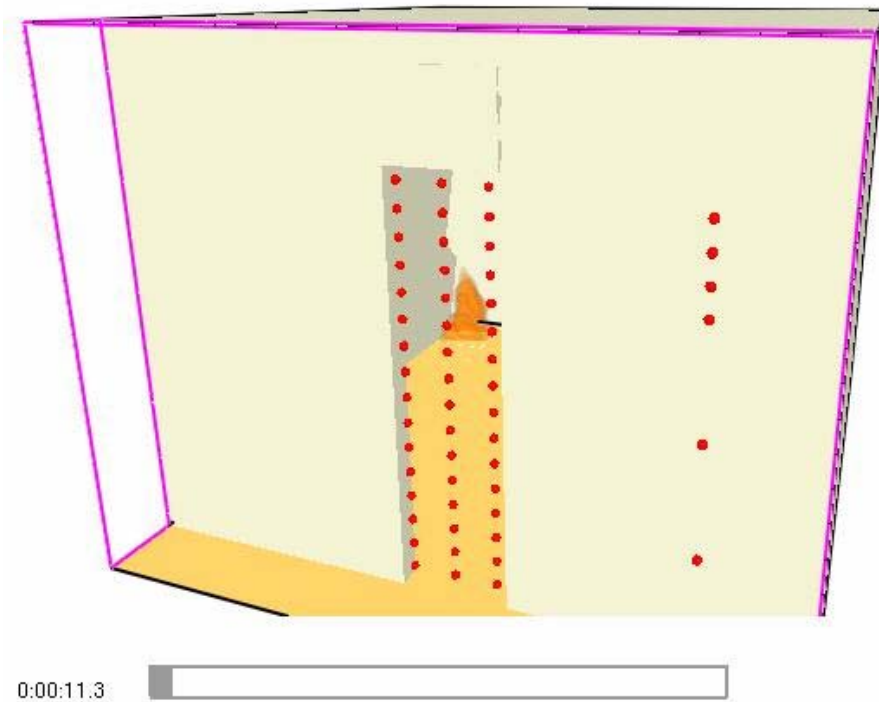
Εικόνα 73 : Κατανομή στο κέντρο της πόρτας:α)θερμοκρασιών, β)ταχυτήτων



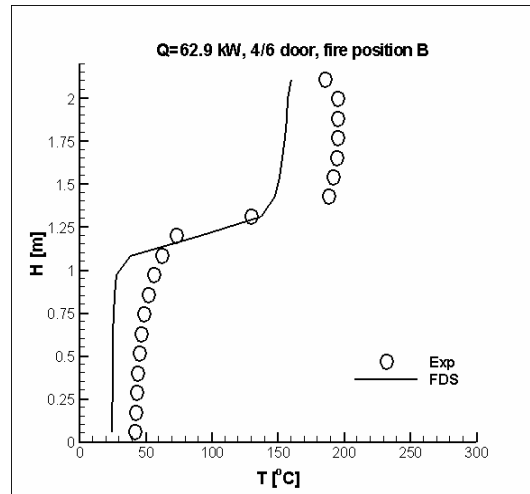
Εικόνα 74 : Κατανομή στην αριστερή πλευρά της πόρτας:α)θερμοκρασιών, β)ταχυτήτων

Περίπτωση 8:

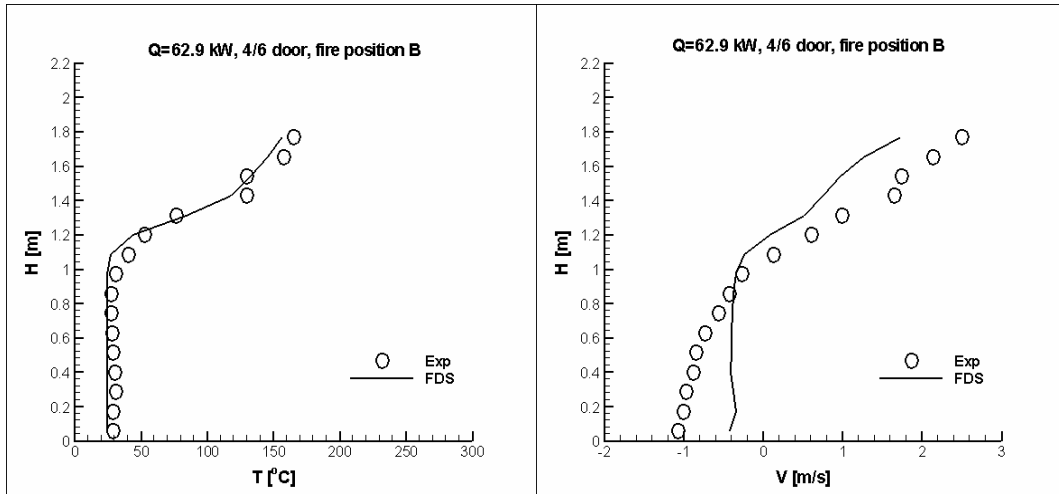
Στην περίπτωση 8 ο καυστήρας είναι τοποθετημένος πίσω αριστερά και το άνοιγμα της πόρτας έχει μειωθεί κατά το 1/3. Εδώ αναμένεται συνδυασμός των αποτελεσμάτων της περίπτωσης 2 με αυτά της περίπτωσης 7 δηλαδή υψηλότερες ταχύτητες σε σχέση με την περίπτωση 7 και υψηλότερες ταχύτητες και θερμοκρασίες δεξιά από ό,τι αριστερά. Στις εικόνες 76-79 παρατηρείται ότι όντως οι ταχύτητες έχουν αυξηθεί ελαφρά. Παρατηρείται πολύ καλή προσέγγιση των πειραματικών θερμοκρασιών στην πόρτα (στη δεξιά πλευρά παρατηρείται σχεδόν πλήρης ταύτιση των καμπυλών).



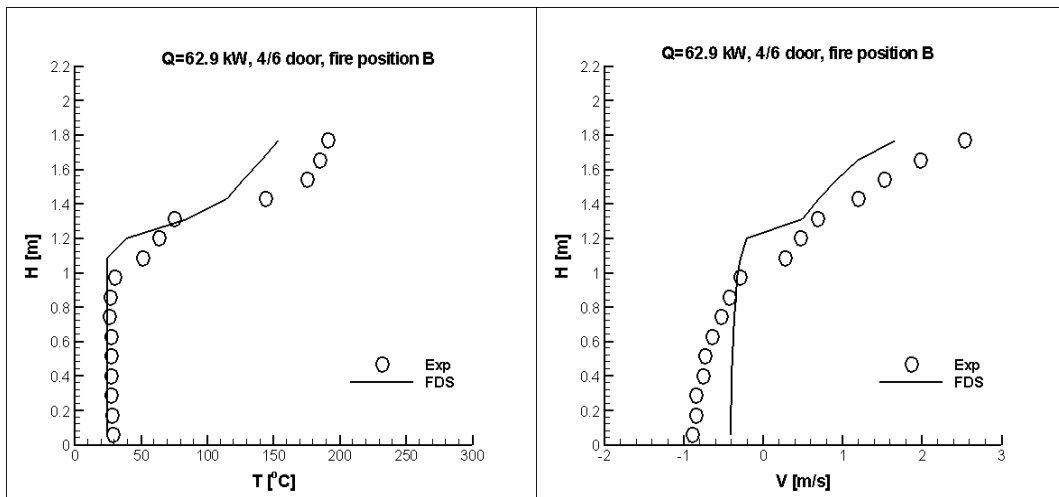
Εικόνα 75 : Σχηματική απεικόνιση της γεωμετρίας στην περίπτωση 8



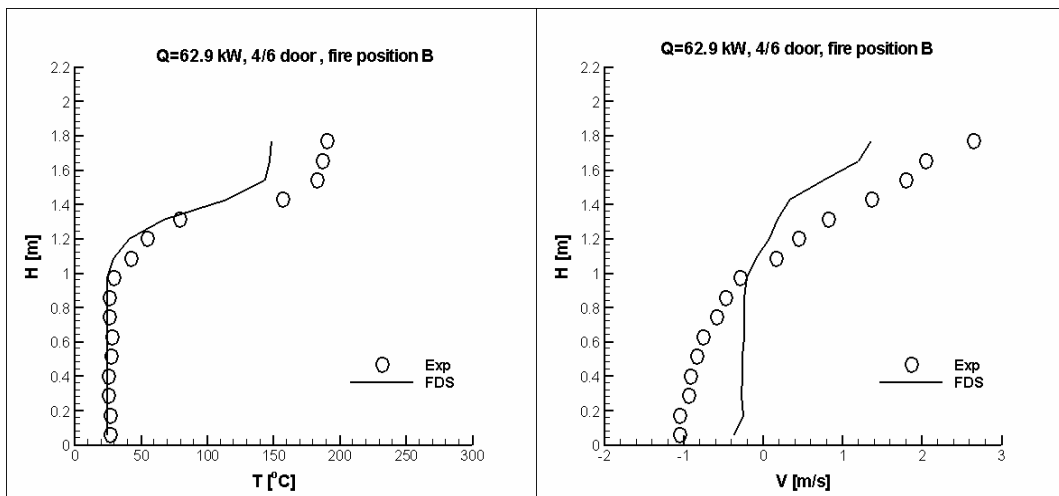
Εικόνα 76: Κατανομή θερμοκρασιών στη γωνία του δωματίου



Εικόνα 77 : Κατανομή στη δεξιά πλευρά της πόρτας:α)θερμοκρασιών, β)ταχυτήτων

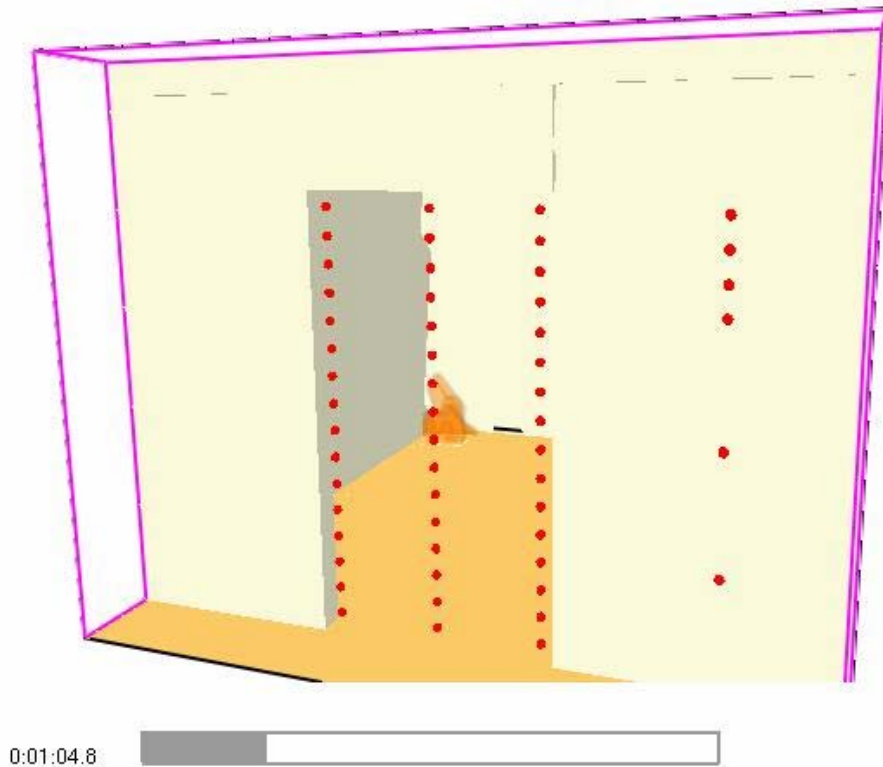


Εικόνα 78: Κατανομή στο κέντρο της πόρτας:α)θερμοκρασιών, β)ταχυτήτων



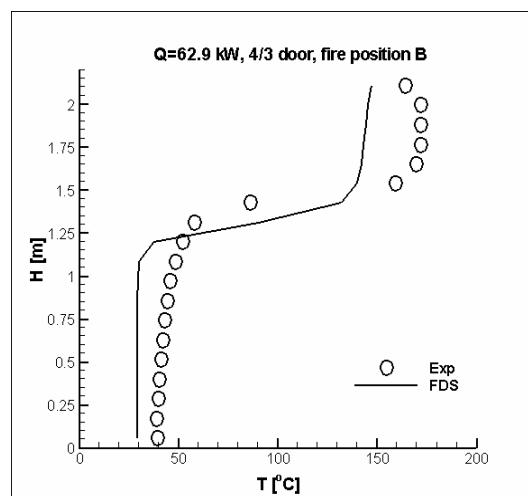
Εικόνα 79 : Κατανομή στην αριστερή πλευρά της πόρτας:α)θερμοκρασιών, β)ταχυτήτων

Περίπτωση 9:

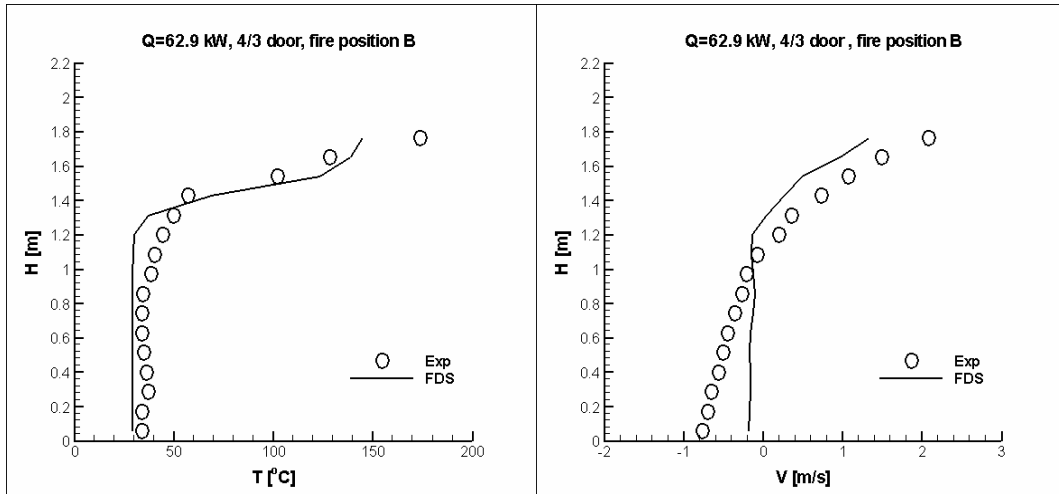


Εικόνα 80 : Σχηματική απεικόνιση της γεωμετρίας στην περίπτωση 9

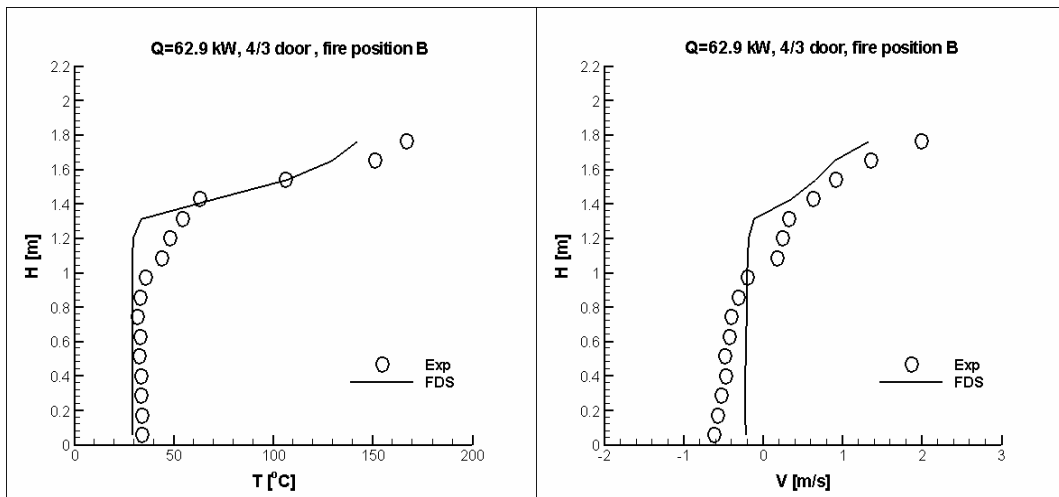
Στην περίπτωση 9 ο καυστήρας είναι τοποθετημένος πίσω αριστερά και το άνοιγμα της πόρτας έχει αυξηθεί κατά το 1/3. Στην περίπτωση αυτή αναμένονται τα αντίστροφα αποτελέσματα από την περίπτωση 8 δηλαδή ελαφρώς μειωμένες ταχύτητες και θερμοκρασίες σε σχέση με την περίπτωση 7. Όπως φαίνεται και στις εικόνες 81-84 οι ταχύτητες είναι ελαφρά μειωμένες όπως επίσης και οι θερμοκρασίες.



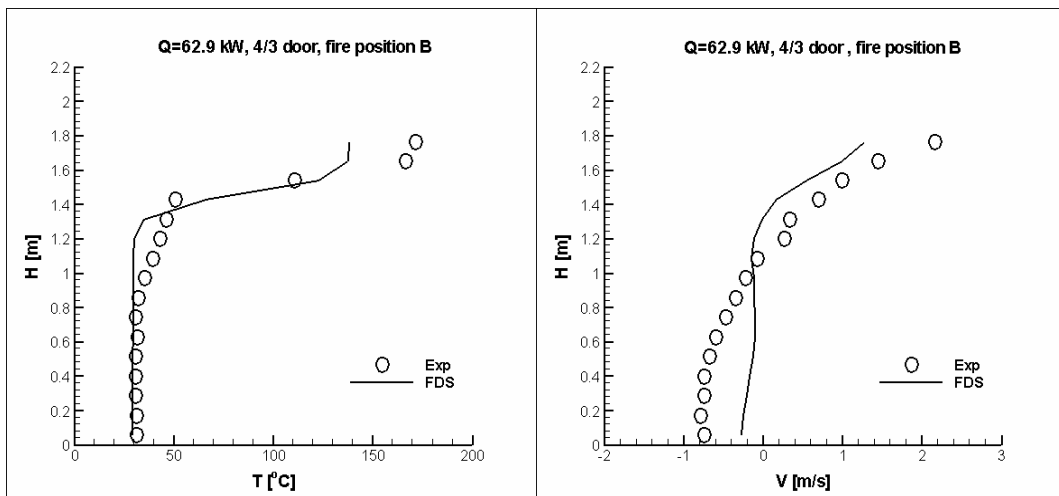
Εικόνα 81: Κατανομή θερμοκρασιών στη γωνία του δωματίου



Εικόνα 82: Κατανομή στη δεξιά πλευρά της πόρτας:α)θερμοκρασιών, β)ταχυτήτων

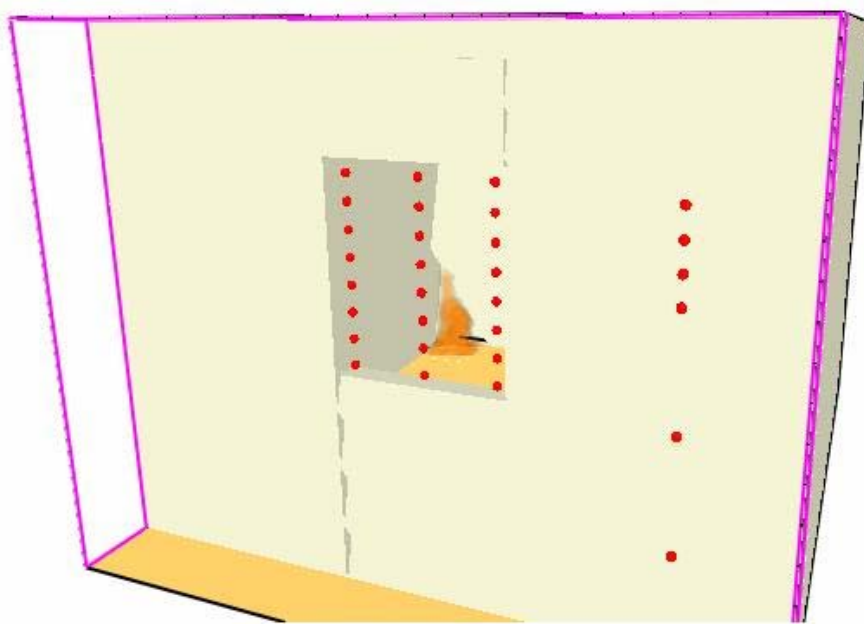


Εικόνα 83: Κατανομή στο κέντρο της πόρτας:α)θερμοκρασιών, β)ταχυτήτων



Εικόνα 84: Κατανομή στην αριστερή πλευρά της πόρτας:α)θερμοκρασιών, β)ταχυτήτων

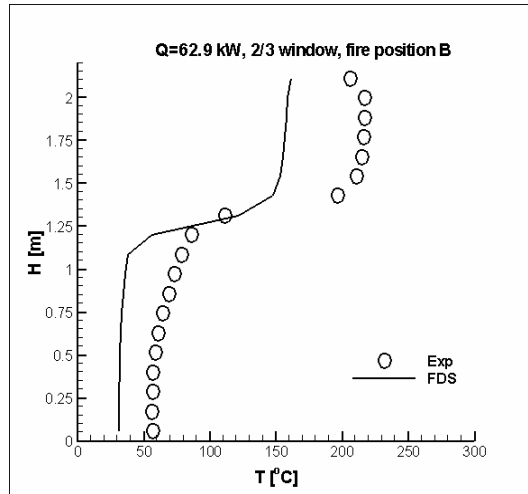
Περίπτωση 10:



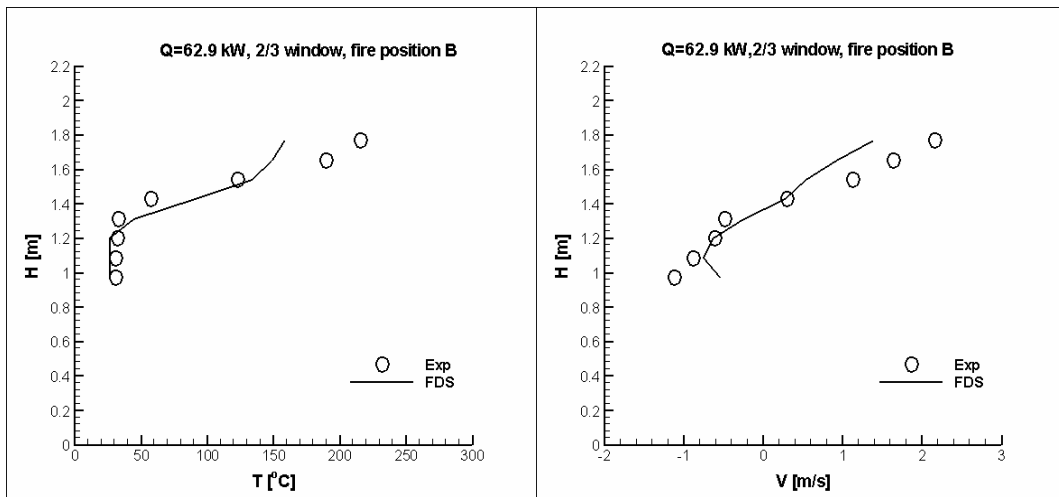
0:00:18.8

Εικόνα 85 : Σχηματική απεικόνιση της γεωμετρίας στην περίπτωση 10

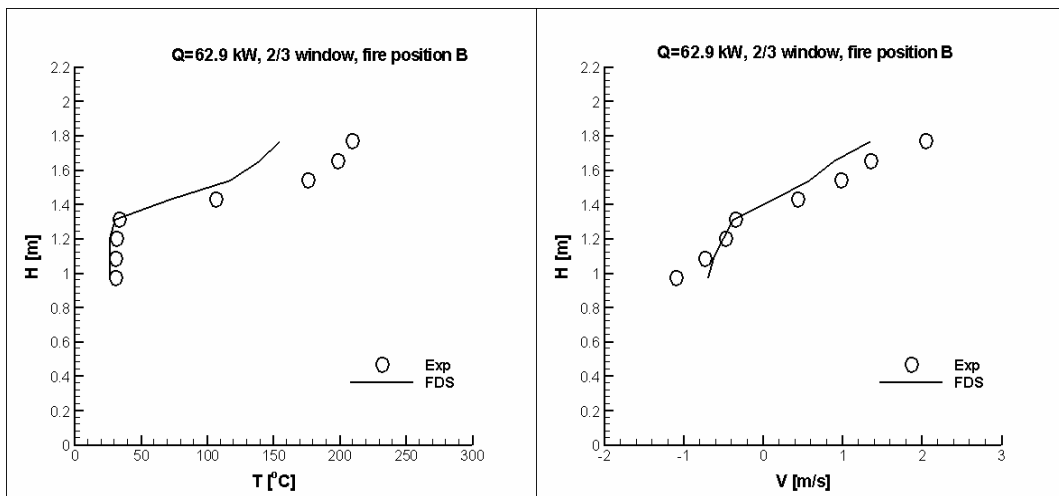
Στην περίπτωση 10 το άνοιγμα του δωματίου έχει τη μορφή παραθύρου κάτι που σημαίνει ότι σε αυτή την περίπτωση υπάρχει το μικρότερο άνοιγμα από όλες τις περιπτώσεις για να διαφύγουν τα καυσαέρια. Στις εικόνες 86-89 φαίνεται ότι εμφανίζονται ελαφρώς αυξημένες θερμοκρασίες στη δεξιά πλευρά της πόρτας σε σχέση με την αριστερή κάτι που υποδηλώνει ότι τα καυσαέρια διαφεύγουν από το δωμάτιο ακολουθώντας τη συντομότερη οδό διαφυγής που είναι η δεξιά πλευρά της πόρτας. Επίσης η υπολογιστική καμπύλη προσεγγίζει αρκετά καλά την πειραματική καμπύλη με μέσο σχετικό σφάλμα στις θερμοκρασίες στην πόρτα $\approx 20\%$ και στις ταχύτητες στην πόρτα $\approx 30\%$.



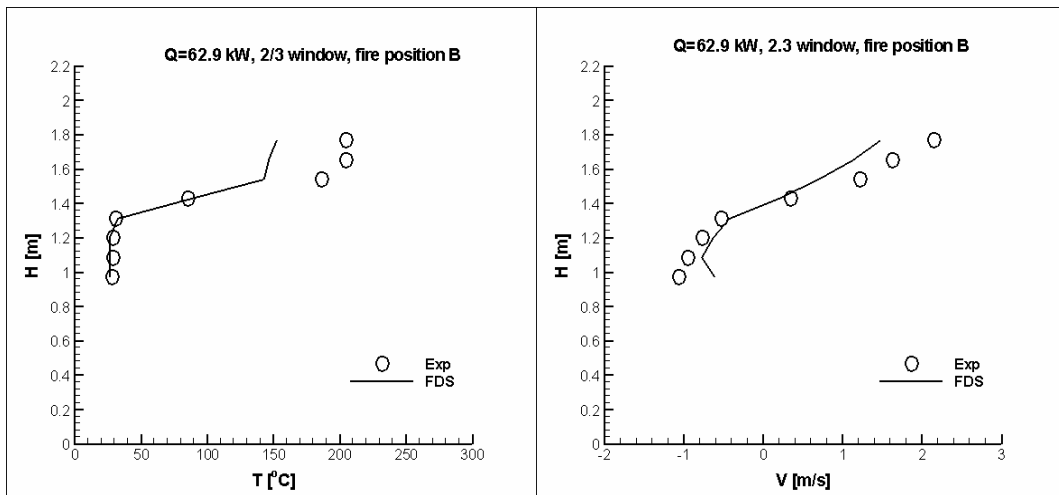
Εικόνα 86: Κατανομή θερμοκρασιών στη γωνία του δωματίου



Εικόνα 87: Κατανομή στη δεξιά πλευρά της πόρτας: α)θερμοκρασιών, β)ταχυτήτων

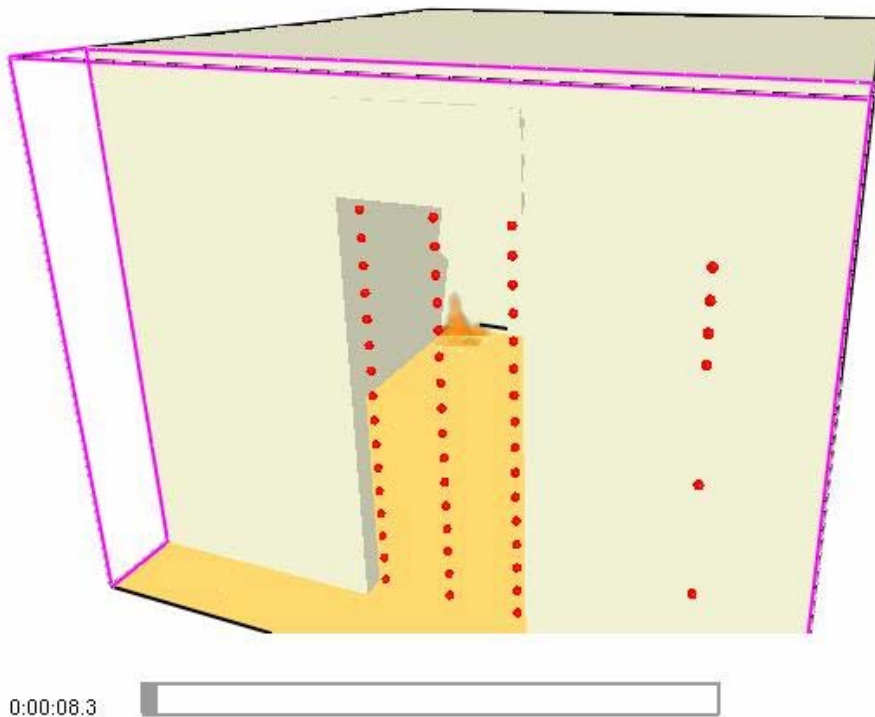


Εικόνα 88: Κατανομή στο κέντρο της πόρτας: α)θερμοκρασιών, β)ταχυτήτων



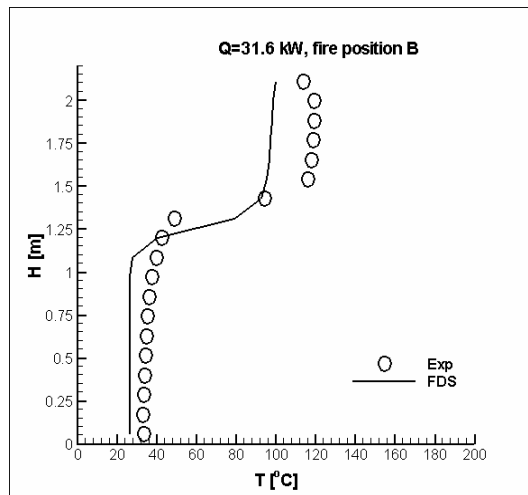
Εικόνα 89: Κατανομή στην αριστερή πλευρά της πόρτας: α) θερμοκρασιών, β) ταχυτήτων

Περίπτωση 11:

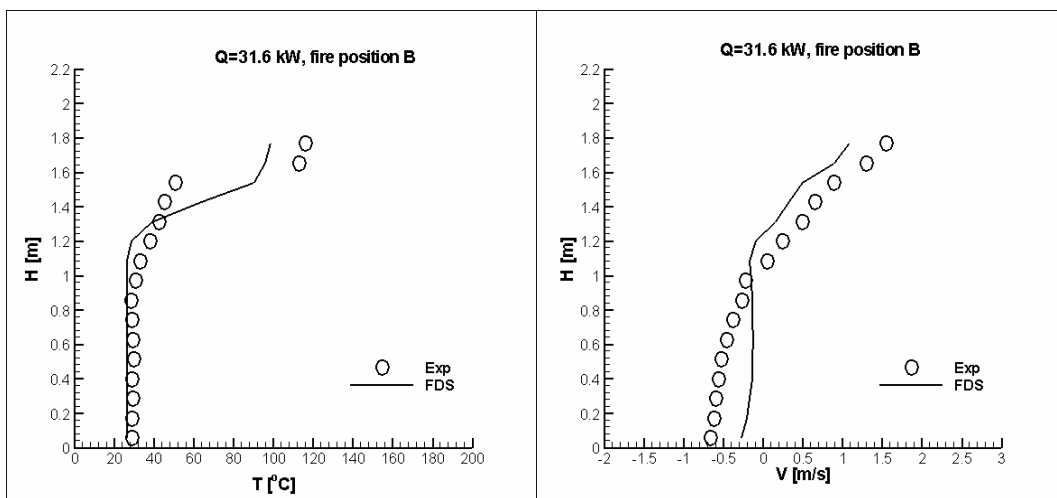


Εικόνα 90: Σχηματική απεικόνιση της γεωμετρίας στην περίπτωση 11

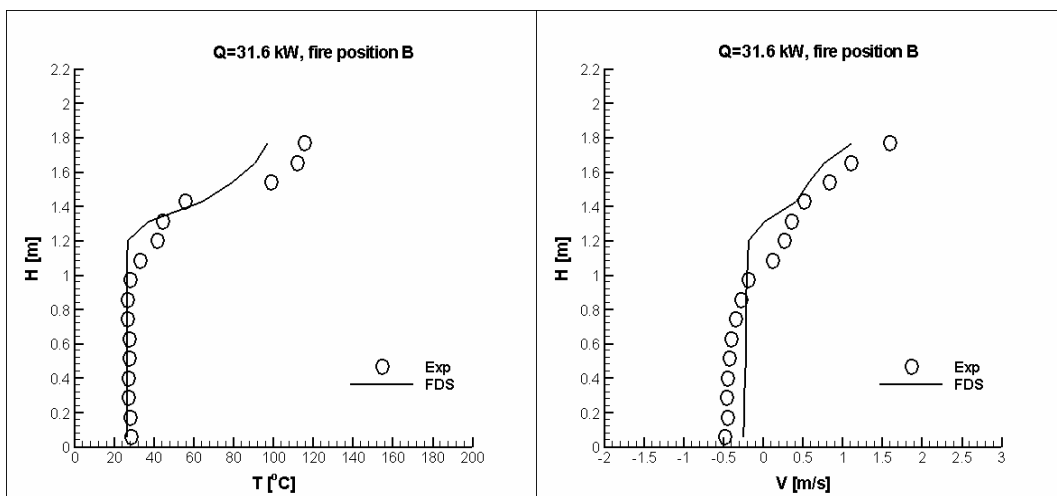
Σε αυτή την περίπτωση (περίπτωση 11) η ένταση της φωτιάς έχει μειωθεί στο μισό με τον καυστήρα να είναι τοποθετημένος πίσω αριστερά. Όπως φαίνεται στις εικόνες 91-94, η συμφωνία με τις μετρήσεις είναι αρκετά καλή στις θερμοκρασίες στην πόρτα με μέσο σχετικό σφάλμα $\approx 13\%$. Στις ταχύτητες στην πόρτα το σφάλμα είναι αρκετά μεγάλο λόγω του μη καλού υπολογισμού του μηδενικού επιπέδου.



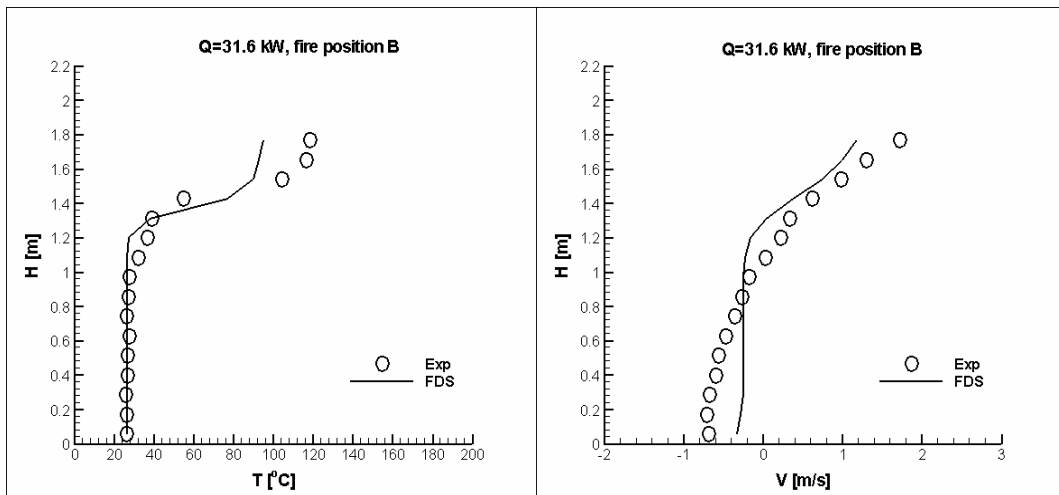
Εικόνα 91: Διανομή θερμοκρασιών στη γωνία του δωματίου



Εικόνα 92: Κατανομή στη δεξιά πλευρά της πόρτας: α)θερμοκρασιών, β)ταχυτήτων

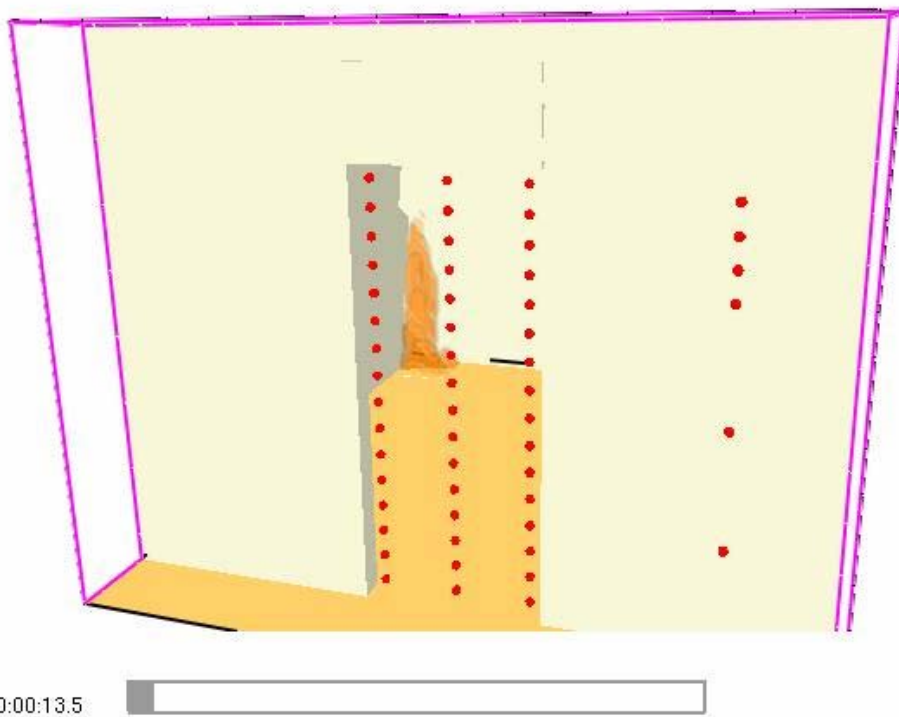


Εικόνα 93 : Κατανομή στο κέντρο της πόρτας: α)θερμοκρασιών, β)ταχυτήτων



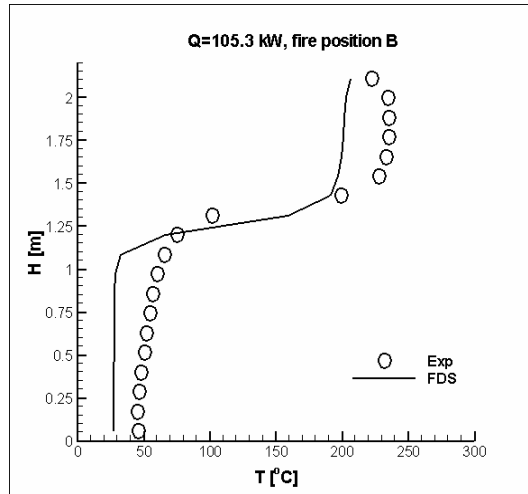
Εικόνα 94: Κατανομή στην αριστερή πλευρά της πόρτας: α)θερμοκρασιών, β)ταχυτήτων

Περίπτωση 12:

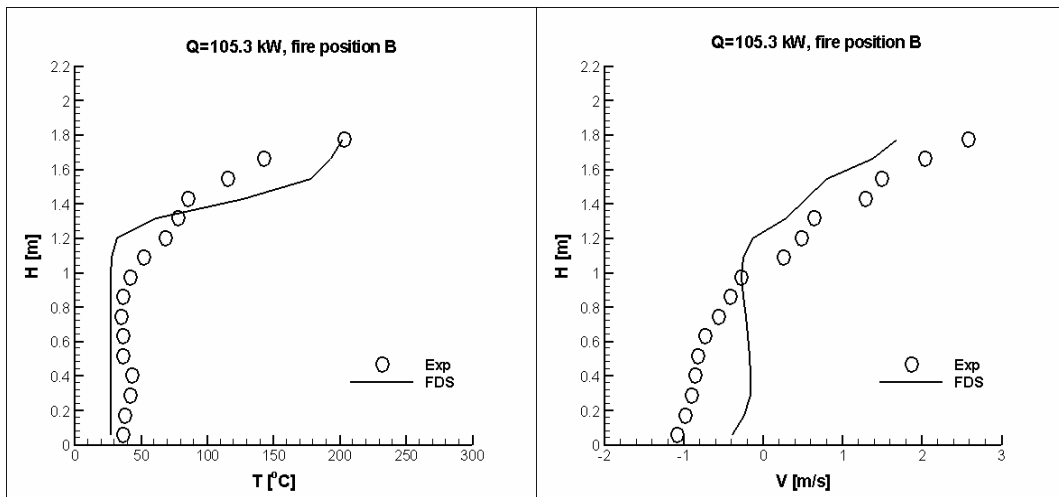


Εικόνα 95 : Σχηματική διάταξη της γεωμετρίας στην περίπτωση 12

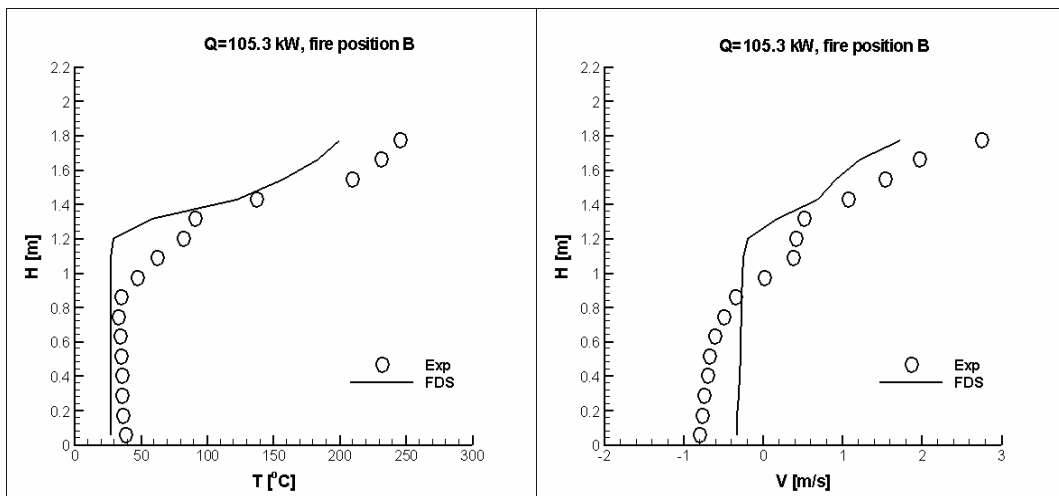
Στην περίπτωση 12 ο καυστήρας είναι τοποθετημένος πίσω αριστερά στο δωμάτιο και η ένταση της φωτιάς έχει αυξηθεί κατά τα 2/3. Όπως φαίνεται στις εικόνες 96-99 οι θερμοκρασίες και οι ταχύτητες είναι αρκετά αυξημένες λόγω της αυξημένης παραγωγής καυσαερίων (όπως και στην περίπτωση 6) εξαιτίας της μεγάλης φωτιάς.



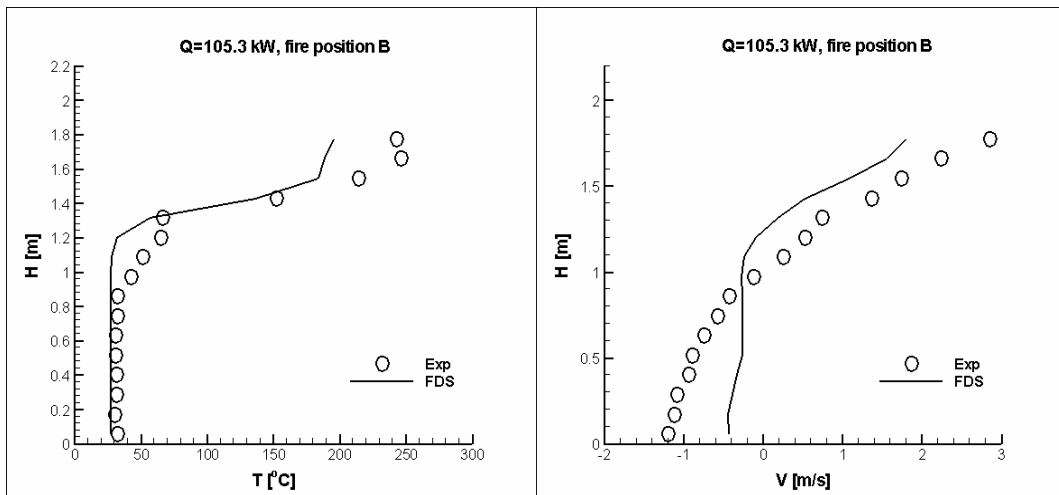
Εικόνα 96 : Κατανομή θερμοκρασιών στη γωνία του δωματίου



Εικόνα 97: Κατανομή στη δεξιά πλευρά της πόρτας: α)θερμοκρασιών, β)ταχυτήτων

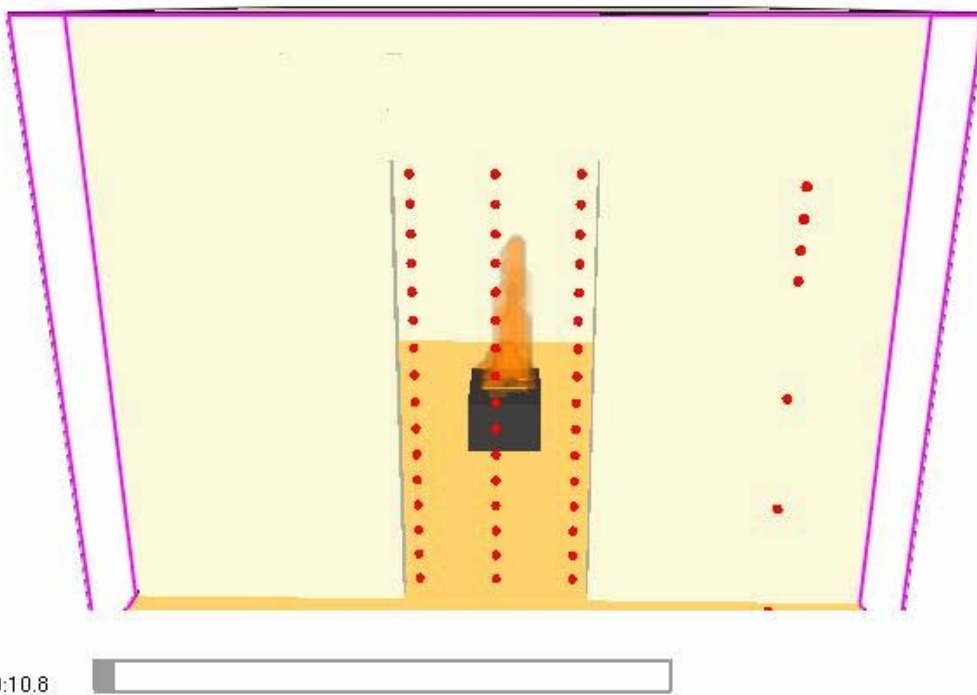


Εικόνα 98: Κατανομή στο κέντρο της πόρτας: α)θερμοκρασιών, β)ταχυτήτων



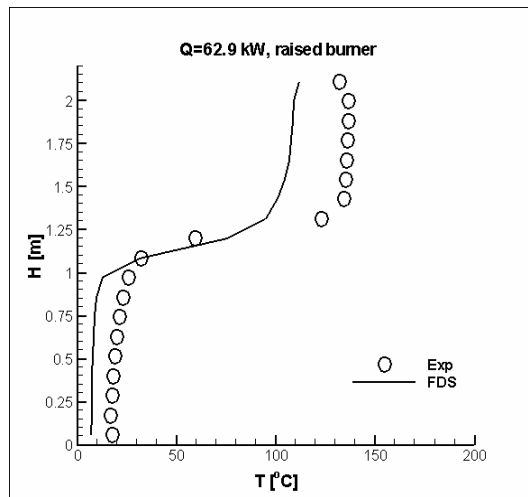
Εικόνα 99: Κατανομή στην αριστερή πλευρά της πόρτας: α) θερμοκρασιών, β) ταχυτήτων

Περίπτωση 13:

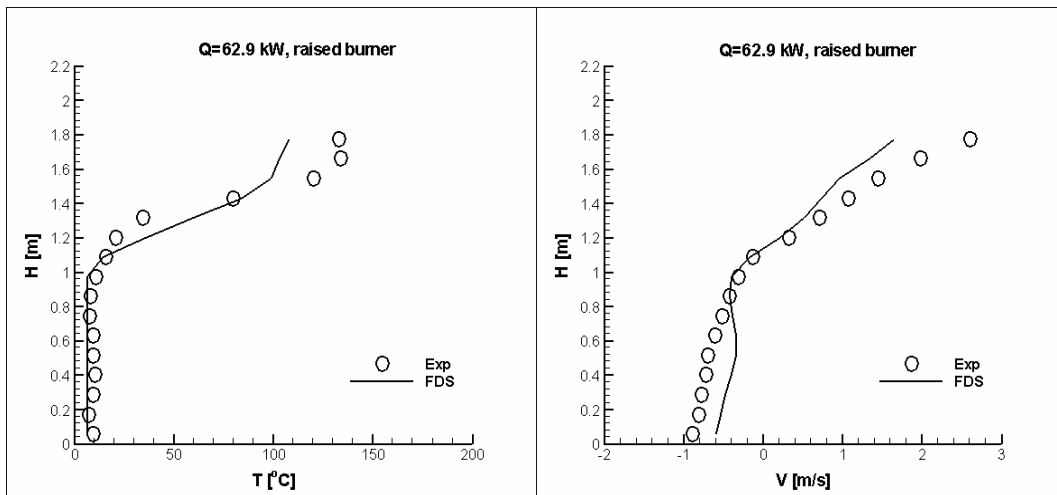


Εικόνα 100: Σχηματική απεικόνιση της περίπτωσης 13

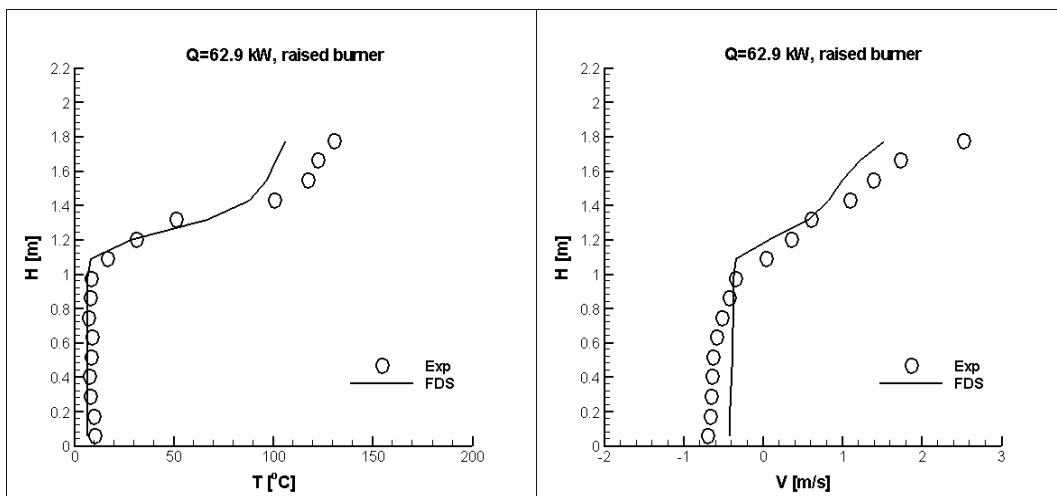
Στην περίπτωση 13 ο καυστήρας είναι υπερυψωμένος 30 cm από το έδαφος και τοποθετημένος στο κέντρο του δωματίου. Στις εικόνες 101-104 φαίνονται τα αποτελέσματα από όπου φαίνεται ότι η υπολογιστική καμπύλη προσεγγίζει ικανοποιητικά την πειραματική. Μέχρι το μηδενικό επίπεδο στις θερμοκρασίες η ταύτιση πειραματικής και υπολογιστικής καμπύλης είναι σχεδόν απόλυτη. Στις θερμοκρασίες το μηδενικό επίπεδο είναι αναγνωρίσιμο ως το σημείο στο οποίο αρχίζει η καμπύλη απότομα να παρουσιάζει μια αρκετά έντονη καμυλότητα.



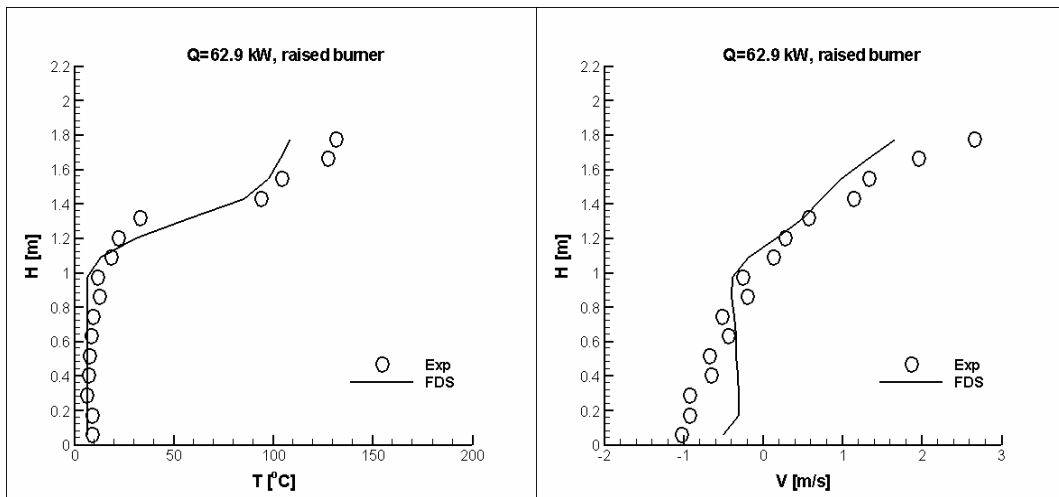
Εικόνα 101: Κατανομή θερμοκρασιών στη γωνία του δωματίου



Εικόνα 102: Κατανομή στη δεξιά πλευρά της πόρτας: α)θερμοκρασιών, β)ταχυτήτων

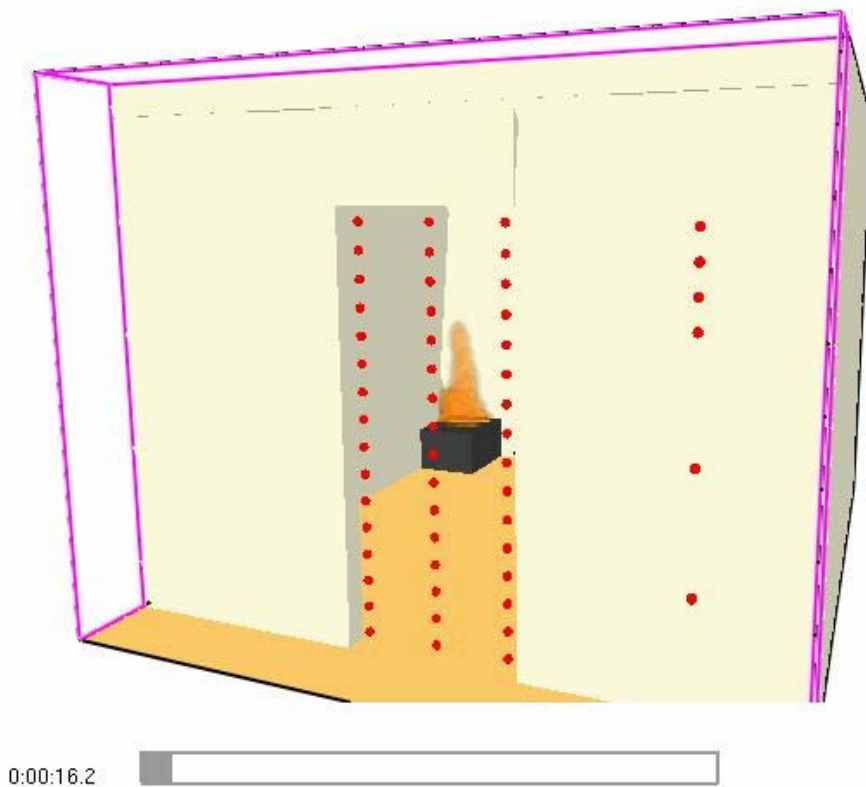


Εικόνα 103: Κατανομή στο κέντρο της πόρτας: α)θερμοκρασιών, β)ταχυτήτων



Εικόνα 104: Κατανομή στην αριστερή πλευρά της πόρτας: α)θερμοκρασιών, β)ταχυτήτων

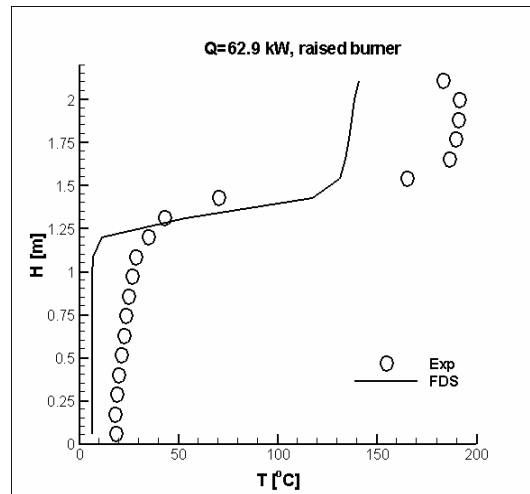
Περίπτωση 14:



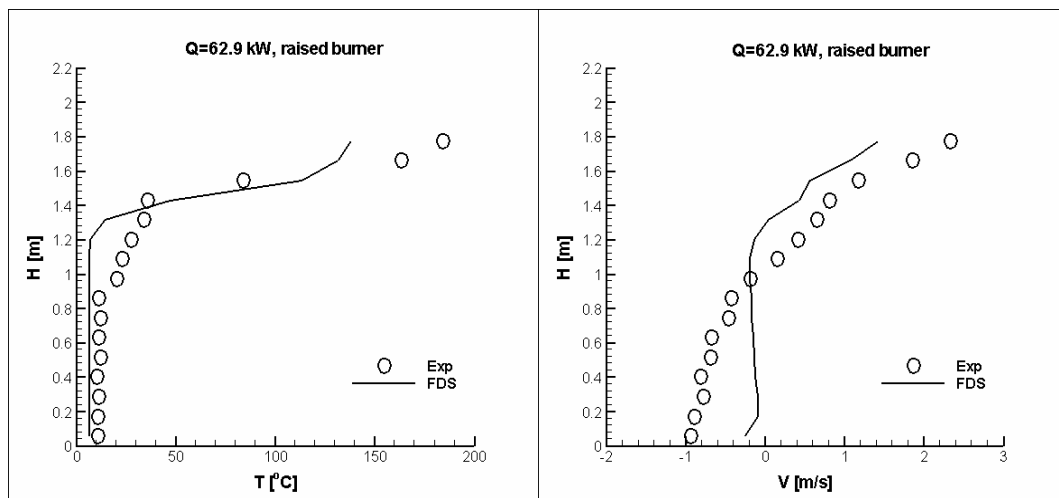
Εικόνα 105: Θέση φωτιάς Β , υπερυψωμένος καυστήρας

Στην περίπτωση 14 ο καυστήρας είναι υπερυψωμένος και τοποθετημένος στην πίσω αριστερή γωνία του δωματίου. Σε αυτή την περίπτωση , όπως φαίνεται και στις εικόνες 106-109 , υπάρχει μια σχετικά μεγάλη απόκλιση κοντά στην οροφή της πόρτας και του δωματίου. Το μέσο σφάλμα για τις θερμοκρασίες στην πόρτα είναι κοντά στο 43% ενώ για τις ταχύτητες είναι λίγο πάνω από 70%.

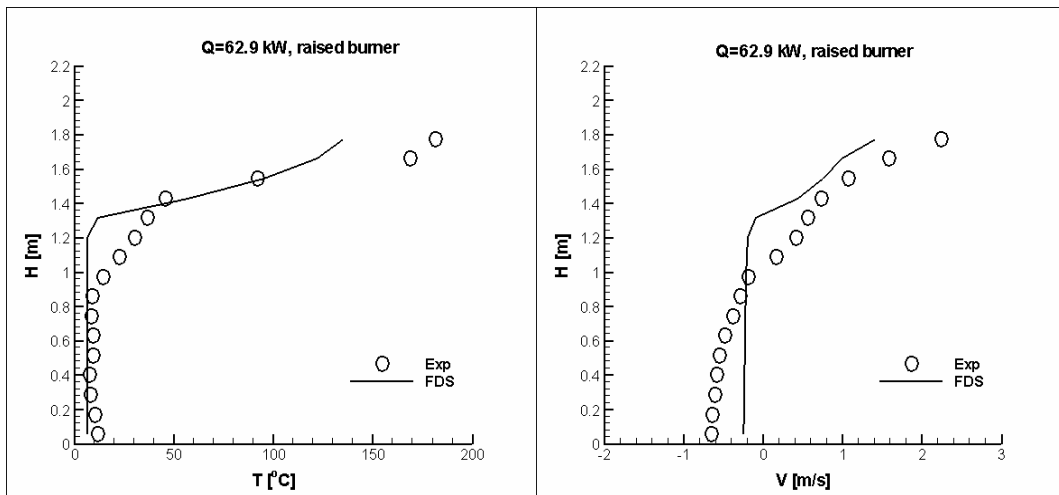
Σε αυτή την περίπτωση η ροή βρίσκεται κοντά στα τοιχώματα (από τις δύο πλευρές του καυστήρα αλλά και πιο κοντά στην οροφή σε σχέση με τον επίπεδο καυστήρα). Αυτό έχει ως συνέπεια τη μεγαλύτερη πιθανότητα δημιουργίας ζωνών ανακυκλοφορίας οι οποίες διαταράσσουν τη ροή και των οποίων η προσομοίωση είναι δύσκολη.



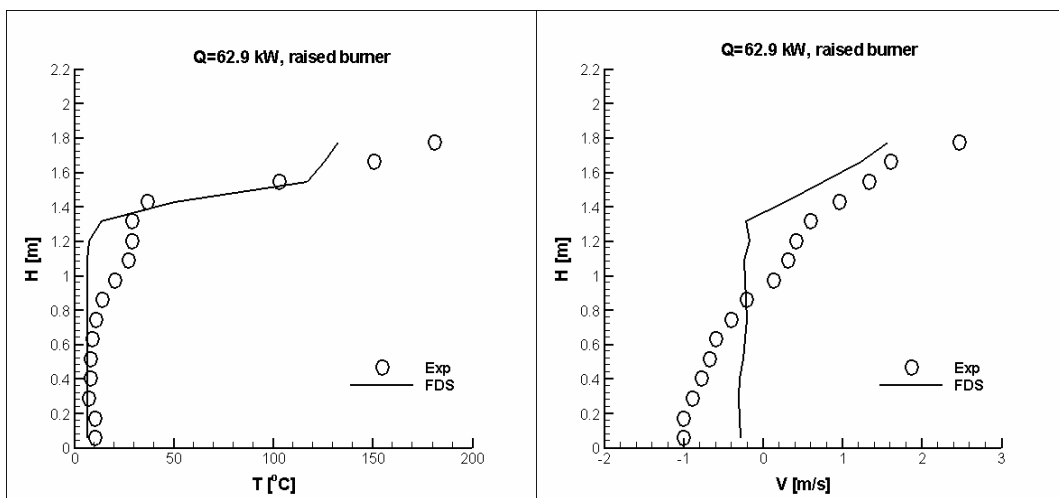
Εικόνα 106: Διανομή θερμοκρασιών στη γωνία του δωματίου



Εικόνα 107: Κατανομή στη δεξιά πλευρά της πόρτας: α) θερμοκρασιών, β) ταχυτήτων

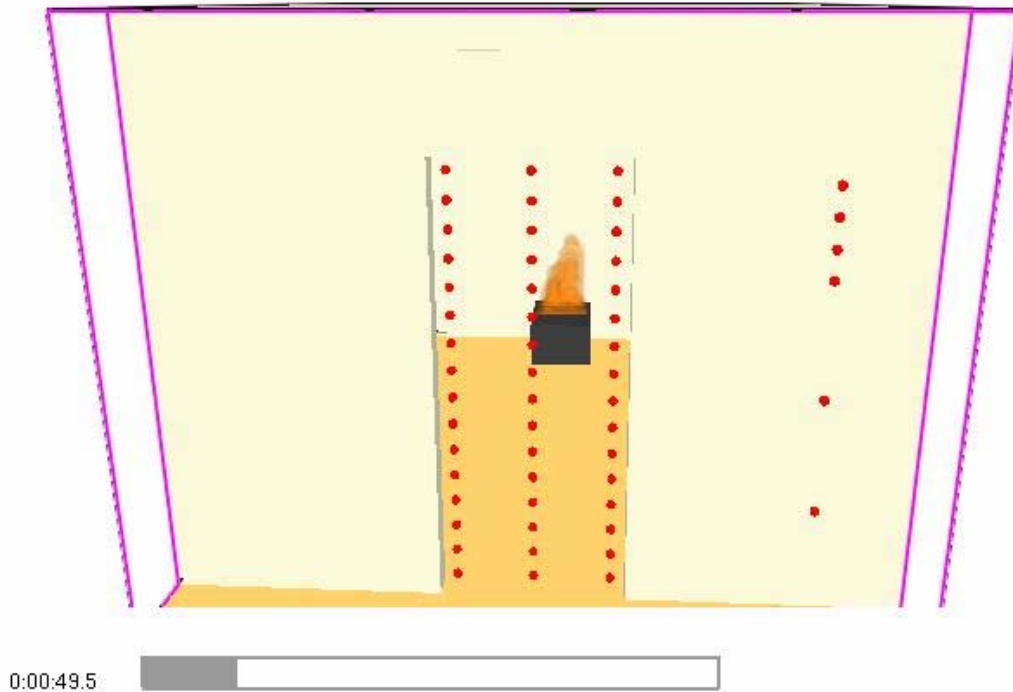


Εικόνα 108: Κατανομή στο κέντρο της πόρτας: α) θερμοκρασιών, β) ταχυτήτων



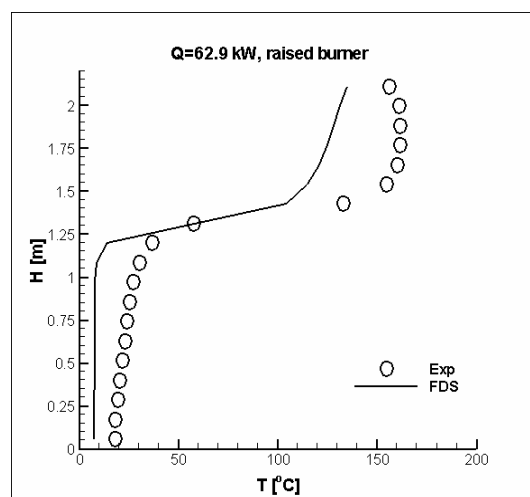
Εικόνα 109: Κατανομή στην αριστερή πλευρά της πόρτας: α) θερμοκρασιών, β) ταχυτήτων

Περίπτωση 15:

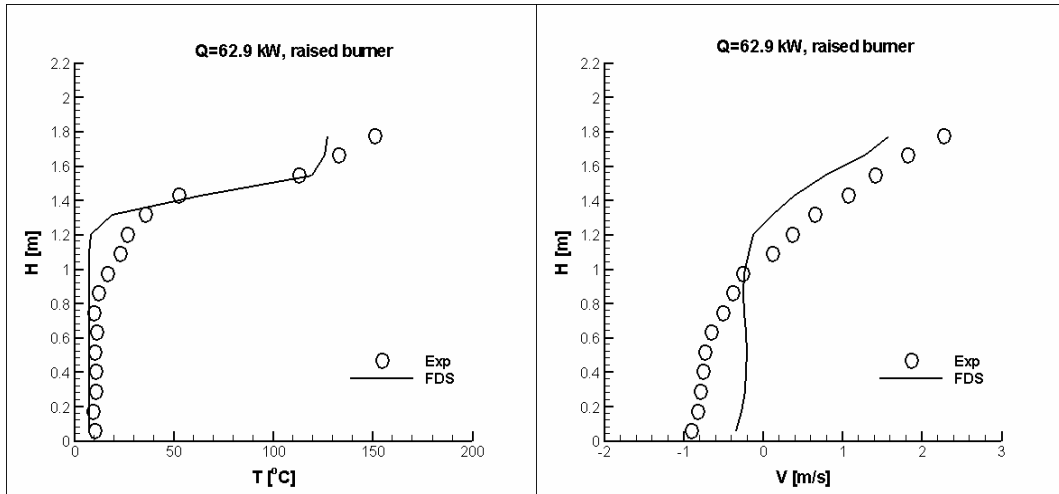


Εικόνα 110: Σχηματική απεικόνιση της περίπτωσης 15

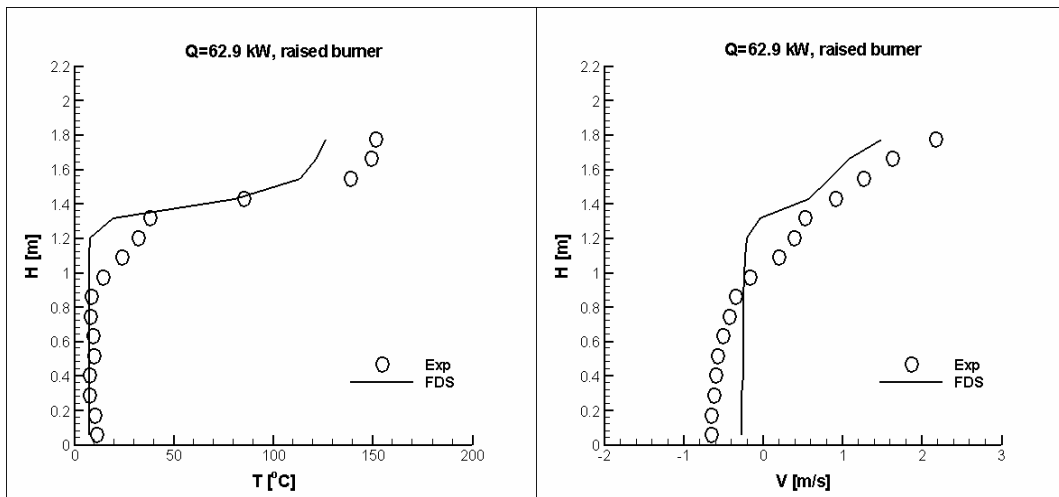
Στην περίπτωση 15 ο καυστήρας είναι υπερυψωμένος και τοποθετημένος στο κέντρο του πίσω τοίχου του δωματίου. Όπως φαίνεται στις εικόνες 111-114 η συμφωνία που επιτυγχάνεται με τα πειραματικά δεδομένα είναι αρκετά καλή με το μέσο σφάλμα για τις θερμοκρασίες στην πόρτα να είναι $\approx 30\%$ ενώ για τις ταχύτητες $\approx 70\%$.



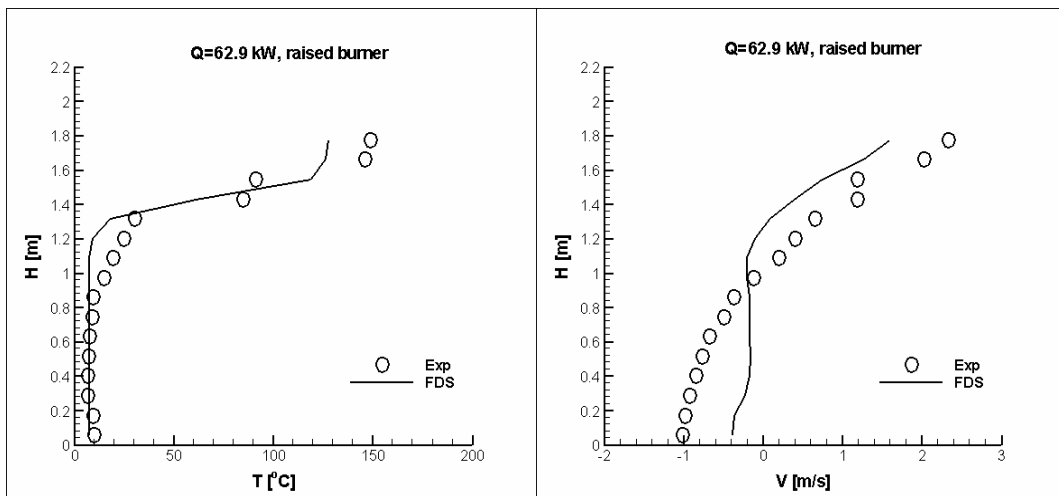
Εικόνα 111: Διανομή θερμοκρασιών στη γωνία του δωματίου



Εικόνα 112: Κατανομή στη δεξιά πλευρά της πόρτας: α)θερμοκρασιών, β)ταχυτήτων



Εικόνα 113: Κατανομή στο κέντρο της πόρτας: α)θερμοκρασιών, β)ταχυτήτων



Εικόνα 114: Κατανομή στην αριστερή πλευρά της πόρτας: α)θερμοκρασιών, β)ταχυτήτων

3.3 Συμπερασματικά σχόλια

Στον πίνακα 5 παρουσιάζεται το μέσο σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ των υπολογιστικών αποτελεσμάτων και των διαθέσιμων πειραματικών μετρήσεων , για κάθε σειρά μέτρησης , για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν.

Περίπτωση	Γωνία δωματίου	Πόρτα						
		Θερμοκρασία	Δεξιά		Κέντρο		Αριστερά	
			Μέσο σφάλμα(%)	Σφάλμα T(%)	Σφάλμα V(%)	Σφάλμα T(%)	Σφάλμα V(%)	Σφάλμα T(%)
1	17.89	12.92	26.82	9.81	15.86	10.15	28.92	
2	23.85	15.93	30.51	12.23	24.46	18.77	56.34	
3	18.10	20.91	30.07	9.67	23.16	9.41	43.54	
4	28.21	15.72	34.66	17.18	27.66	21.99	38.76	
5	11.06	10.55	28.41	6.75	15.97	7.71	25.07	
6	22.02	15.55	30.21	11.15	20.72	10.75	35.16	
7	32.95	26.58	66.79	22.11	56.21	16.44	97.91	
8	29.26	15.16	62.17	19.98	55.22	16.64	68.38	
9	28.06	19.13	71.82	16.93	67.69	14.40	74.05	
10	36.96	25.39	32.13	22.58	30.83	13.82	30.71	
11	22.39	19.07	85.25	11.91	62.36	10.25	104.05	
12	32.43	32.61	69.10	29.27	149.04	20.57	72.32	
13	38.38	31.22	32.56	25.47	88.96	28.43	57.45	
14	54.48	47.23	78.56	39.05	66.52	41.05	84.38	
15	45.95	34.24	71.36	29.62	66.11	26.08	76.01	

Πίνακας 5: Μέσο σχετικό σφάλμα υπολογιστικών αποτελεσμάτων

Από τον πίνακα 5 συνάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα:

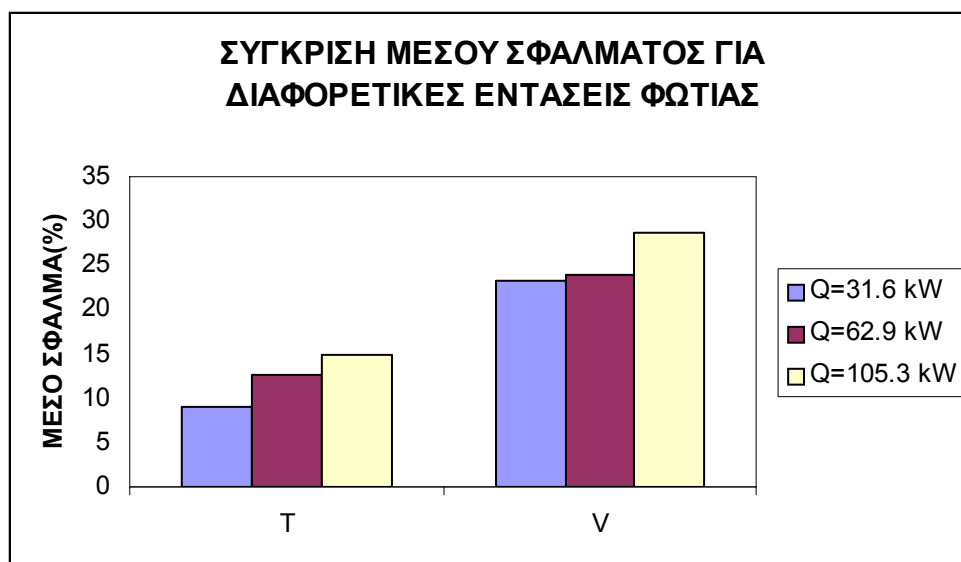
- Το σχετικό σφάλμα όταν υπολογίζεται για τιμές κοντά στο 0 όπως οι περισσότερες τιμές των ταχυτήτων μπορεί να γίνει πολύ μεγάλο. Το σχετικό σφάλμα υπολογίζεται από τη σχέση (3.3.1):

$$err = \frac{exp - num}{exp} \quad (3.3.1)$$

όπου exp οι πειραματικές τιμές και num οι υπολογιστικές στα ίδια σημεία. Από τη σχέση (3.3.1) συνάγεται ότι αν οι πειραματικές και οι υπολογιστικές τιμές έχουν διαφορετικό πρόσημο και βρίσκονται κοντά στο 0 τότε προκύπτουν μεγάλες τιμές σχετικού σφάλματος ενώ για τις ίδιες τιμές το απόλυτο σφάλμα θα είναι μικρό. Έτσι εξηγούνται οι μεγάλες τιμές του σχετικού σφάλματος που παρατηρούνται σε κάποιες περιπτώσεις στις ταχύτητες , ειδικά σε περίπτωση που η πειραματική τιμή βρίσκεται πολύ κοντά στο 0 και η υπολογιστική τιμή έχει αντίθετο πρόσημο.

- Στις περιπτώσεις χαμηλής έντασης της φωτιάς (περιπτώσεις 5 , 11) παρατηρείται καλύτερη συμφωνία μεταξύ πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων. Με αύξηση της ισχύος της έντασης παρατηρείται γενικά μια αύξηση του μέσου σφάλματος.

Αυτό το φαινόμενο οφείλεται στην ενίσχυση των ανωστικών φαινομένων όταν η ένταση είναι μεγαλύτερη, η οποία οδηγεί στην αλληλεπίδραση μεγαλύτερου όγκου αερίων με τα τοιχώματα (συγκριτικά με όταν η ένταση είναι χαμηλή), με αποτέλεσμα να δημιουργούνται περισσότερες και εντονότερες ζώνες ανακυκλοφορίας οι οποίες είναι δύσκολο να περιγραφούν με ακρίβεια.

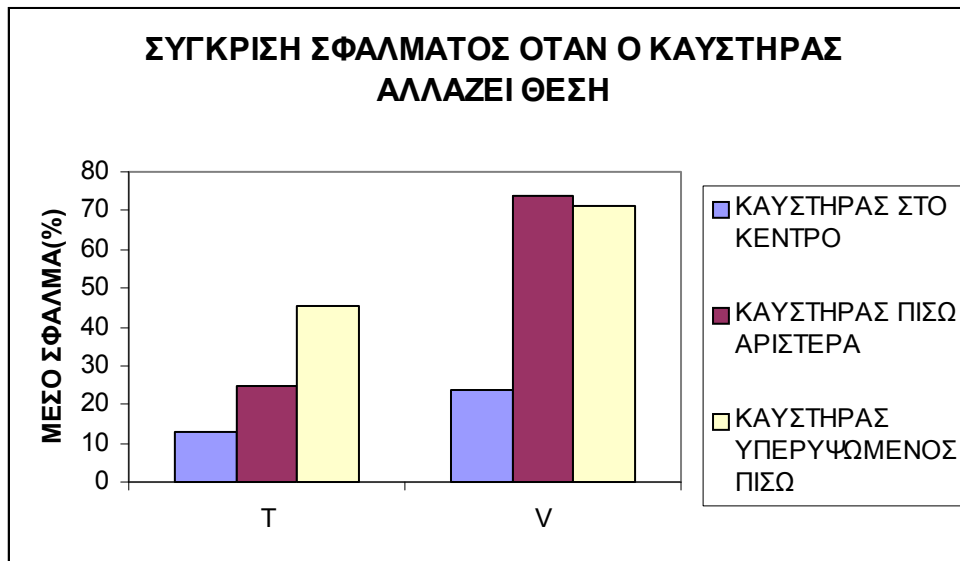


Εικόνα 115 :Σύγκριση του μέσου σφάλματος όταν μεταβάλλεται η ένταση του καυστήρα

Στην εικόνα 115 παρατηρείται η αύξηση του μέσου σχετικού σφάλματος όταν αυξάνεται η ένταση της φωτιάς.

- Παρατηρείται γενικά καλύτερη συμφωνία με τις πειραματικές μετρήσεις στην πόρτα παρά στη γωνία του δωματίου. Η ροή στην πόρτα είναι πιο ομαλή σε σχέση με τη γωνία του δωματίου. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην αλληλεπίδραση της ροής με τα τοιχώματα, η οποία οδηγεί στην εμφάνιση ζωνών ανακυκλοφορίας οι οποίες είναι δύσκολο να προσομοιωθούν. Στη γωνία του δωματίου η αλληλεπίδραση με τον τοίχο ο οποίος βρίσκεται κοντά δημιουργεί αρκετές ανακυκλοφορίες και έτσι μεγαλύτερη απόκλιση από τα πειραματικά δεδομένα.

Στο ίδιο φαινόμενο οφείλεται και η καλύτερη συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα όταν ο καυστήρας είναι στο κέντρο του δωματίου παρά πίσω αριστερά. Στη δεύτερη περίπτωση τα τοιχώματα τα οποία βρίσκονται αρκετά κοντά στη φωτιά, οδηγούν στη δημιουργία σε περισσότερων ζωνών ανακυκλοφορίας και κατά συνέπεια σε μεγαλύτερες αποκλίσεις.



Εικόνα 116: Σύγκριση μέσου σφάλματος όταν ο καυστήρας αλλάζει θέση

Στην εικόνα 116 παρατηρείται η μείωση του σχετικού σφάλματος όσο πιο μακριά από τα τοιχώματα βρίσκεται ο καυστήρας.

- Σε όλες τις περιπτώσεις οι υπολογιστικές τιμές είναι χαμηλότερες από τις πειραματικές. Υπάρχουν μεμονωμένα σημεία στα οποία η υπολογιστική τιμή είναι υψηλότερη από την πειραματική αλλά στη μεγάλη πλειοψηφία των περιπτώσεων παρατηρείται μια υποεκτίμηση από τον κώδικα σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα.

- Γενικά οι θερμοκρασίες προσεγγίζονται πολύ καλύτερα από τις ταχύτητες. Οι ανακυκλοφορίες οι οποίες δημιουργούνται κοντά στα τοιχώματα δυσκολεύουν τη σωστή πρόλεξη των ταχυτήτων.

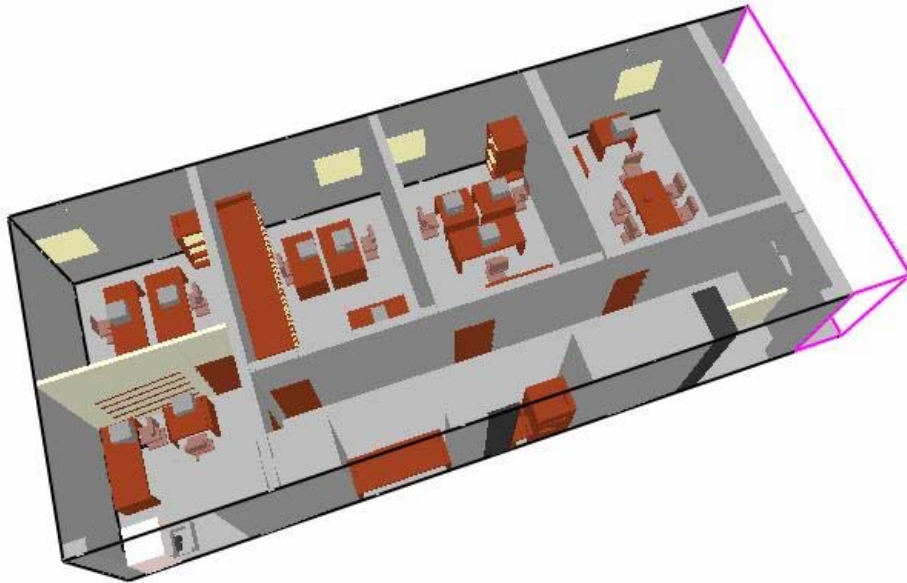
- Τα χαμηλότερα σφάλματα από όλες τις περιπτώσεις παρατηρούνται στην περίπτωση 5 με δεύτερη την περίπτωση 1 ενώ τα μεγαλύτερα σφάλματα παρατηρούνται στις τρεις περιπτώσεις του υπερυψωμένου καυστήρα (περιπτώσεις 15-17).

Όταν ο καυστήρας είναι υπερυψωμένος, οι ζώνες ανακυκλοφορίας αυξάνονται επειδή τα καυσαέρια βρίσκονται πιο κοντά στην οροφή σε σχέση με όταν ο καυστήρας είναι στο έδαφος και έτσι δημιουργούνται περισσότερες περιοχές ανακυκλοφορίας και στροβιλισμών. Μεταξύ των τριών περιπτώσεων των υπερυψωμένων καυστήρων τα μεγαλύτερα σφάλματα παρατηρούνται σε εκείνη την περίπτωση που ο καυστήρας είναι πιο κοντά στα τοιχώματα δηλαδή στην περίπτωση 14.

4.Προσομοίωση φωτιάς σε κτίριο

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας , πραγματοποιήθηκε με τον κώδικα FDS προσομοίωση πυρκαγιάς στο Εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Το εργαστήριο μοντελοποιήθηκε με τις ακριβείς διαστάσεις του χώρου και με τα έπιπλα που βρίσκονται στο εσωτερικό του. Χρησιμοποιήθηκε ένα πλέγμα 160 x 75 x36 κελιών (σύνολο 432000 κελιά) και οι συνολικές διαστάσεις του χώρου ήταν 17.6m x 7.5m x 3.6m. Έτσι το κάθε κελί ήταν διαστάσεων 0.11m x 0.1m x 0.1m. Χρησιμοποιήθηκε κενός χώρος διαστάσεων 1.6m x 7.5m x 3.6m για να απεικονιστεί η πορεία των καυσαερίων μετά την έξοδό τους από την πόρτα εξόδου.

Στην εικόνα 117 παρουσιάζεται μια προοπτική απεικόνιση των χώρων του εργαστηρίου ΕΜΣΚ.



Εικόνα 117 :Κάτοψη-πλάγια όψη του εργαστηρίου ΕΜΣΚ



Εικόνα 118 :Κάτοψη του εργαστηρίου

Επιλέχθηκε να προσομοιωθεί μια υποθετική περίπτωση κατά την οποία ανάβει φωτιά στο δωμάτιο 1 , στον κάλαθο αχρήστων ο οποίος βρίσκεται τοποθετημένος κάτω από το ένα τραπέζι του δωματίου και παρατηρείται η εξέλιξη της πυρκαγιάς. Το φαινόμενο παρακολουθείται για 400 s. Στα πρώτα 10 s η ένταση της φωτιάς είναι 10 kW και στα 15 s η έντασή της μετατρέπεται σε 6 kW.

Στην εικόνα 118 παρουσιάζεται μια κάτοψη του εργαστηρίου , στην οποία φαίνεται η αρίθμηση των δωματίων.

Θεωρείται ότι σε όλα τα δωμάτια υπάρχουν εργαζόμενοι , πλην του δωματίου 1 , από όπου και ξεκινά η φωτιά. Αρχικά όλες οι πόρτες είναι κλειστές. Στα 50 s οι ένοικοι του δωματίου 2 αντιλαμβάνονται κάτι στο διπλανό δωμάτιο και ανοίγουν την πόρτα μεταξύ των δωματίων 1-2. Μετά από 10 s ανοίγουν την πόρτα μεταξύ δωματίου 1-διαδρόμου και ειδοποιούν τους ενοίκους των υπολοίπων δωματίων. Στα 70 s ανοίγουν οι πόρτες των δωματίων 3 , 4 , 5. Οι ένοικοι κατευθύνονται προς την έξοδο και έτσι στα 80 s ανοίγει η εξωτερική πόρτα , στο τέλος του διαδρόμου.

Η φωτιά είναι έντασης 10 kW και ξεκινά από το καλάθι αχρήστων που βρίσκεται κάτω από το ένα τραπέζι του δωματίου 1.

Η φωτιά θεωρείται ότι καίει το ξύλο του τραπεζιού έτσι η κυρίαρχη χημική αντίδραση στην προσομοίωση είναι η καύση του ξύλου.

4.1 Καύση του ξύλου

Σε αυτή την ενότητα γίνεται αναλυτική παρουσίαση των υπολογισμών που έγιναν , προκειμένου να προσομοιωθεί με όσο το δυνατό μεγαλύτερη ακρίβεια , το φαινόμενο της καύσης του ξύλου.

Έστω ότι ο χημικός τύπος του ξύλου είναι $C_xH_yO_zN_w$.

$$\text{Ισχύει: } m_{\text{tot}} = \rho V_{\text{tot}} \quad (4.1.1)$$

Θεωρώντας όγκο $V_{\text{tot}} = 1 \text{ m}^3$ και ποσότητα 1 mol της ουσίας από την εξίσωση (4.1.1.) είναι δυνατό να προσδιοριστεί το m_{tot} .

Έστω η μέση τιμή για την πυκνότητα του ξύλου (Ragland&Baker, 1990):

$$\rho_{\text{tot}} = 213.1 \text{ kg/m}^3 \quad (4.1.2)$$

Μια τυπική σύσταση σκληρού ξύλου παρουσιάζεται στον πίνακα 5.1(Tillman et al, 1981)

Στοιχείο	Κατά μάζα σύσταση (%)
C	0.502
H	0.062
O	0.435
N	0.001

Πίνακας 7: Κατά μάζα σύσταση σκληρού ξύλου

Με βάση την κατά μάζα σύσταση του ξύλου είναι δυνατό να υπολογιστούν οι συντελεστές των επιμέρους στοιχείων στο γενικό χημικό τύπο του ξύλου (Εξισώσεις 4.1.3-4.1.6)

$$\mu_C = \frac{m_C}{m_{\text{tot}}} = \frac{12x}{m_{\text{tot}}} \Rightarrow x = \frac{\mu_C m_{\text{tot}}}{12} = \frac{0.504 * 213.1}{12} = 8.95 \quad (4.1.3)$$

$$\mu_H = \frac{m_H}{m_{\text{tot}}} = \frac{y}{m_{\text{tot}}} \Rightarrow y = \mu_H * m_{\text{tot}} = 0.062 * 213.1 = 12.83 \quad (4.1.4)$$

$$\mu_O = \frac{m_O}{m_{\text{tot}}} = \frac{16z}{m_{\text{tot}}} \Rightarrow z = (\mu_O * m_{\text{tot}}) / 16 = 5.19 \quad (4.1.5)$$

$$\mu_N = \frac{m_N}{m_{\text{tot}}} = \frac{14w}{m_{\text{tot}}} \Rightarrow w = (\mu_N * m_{\text{tot}}) / 14 = 0.03 \quad (4.1.6)$$

Αποτέλεσμα αυτών των υπολογισμών είναι ο προσδιορισμός του χημικού τύπου του ξύλου: $C_{8.95}H_{12.83}O_{5.19}N_{0.03}$

Κατά τη διαδικασία πυρόλυσης του ξύλου , προκύπτουν δύο κατηγορίες προϊόντων , τα αέρια και τα στερεά. Τα αέρια προϊόντα είναι ατμός , CO , CO₂ , H₂ και ελαφροί υδρογονάνθρακες (κυρίως CH₄). Τα στερεά κατάλοιπα είναι πίσσα (tar) και τέφρα (char).

Η τυπική σύσταση των προϊόντων της πυρόλυσης του ξύλου δίνεται στον πίνακα 5.2 (Bowersox et al.(1979) και Forests Products Laboratory(1987)):

Προϊόν	Κλάσμα μάζας
H ₂ O	0.25
CO	0.183
CO ₂	0.115
H ₂	0.005
Ελαφροί υδρογονάνθρακες	0.047
Πίσσα	0.2
Τέφρα	0.2

Πίνακας 8: Κατανομή των προϊόντων της πυρόλυσης ξηρού ξύλου

Θεωρείται ότι στα προϊόντα της πυρόλυσης συμπεριλαμβάνεται και 2% καπνός (αιθάλη) (EPA Report, 1993). Ο καπνός θεωρείται ότι αποτελείται κυρίως από άκαυστα μόρια άνθρακα. Κατά συνέπεια , γίνεται αναδιανομή των κλασμάτων μάζας του πίνακα 5.2 , προκειμένου να ληφθούν υπόψη και οι εκπομπές καπνού (Πίνακας 5.3).

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

Πίνακας 9: Σύσταση των προϊόντων της πυρόλυσης ξηρού ξύλου

Στον κώδικα FDS χρησιμοποιούνται τέσσερις μεταβλητές για την προσομοίωση μιας αντίδρασης καύσης: ο αριθμός moles του νερού , ο αριθμός moles του CO , ο αριθμός moles του CO₂ και ο αριθμός moles του καπνού.

Στον κώδικα FDS γίνεται υπολογισμός των αερίων προϊόντων της καύσης και σε αυτά συμπεριλαμβάνεται και το CO το οποίο παράγεται λόγω ατελούς καύσης. Έτσι αφαιρώντας τα ποσοστά των στερεών καταλοίπων της καύσης , δηλαδή της πίσσας και της τέφρας , το άθροισμα από όλα τα υπόλοιπα προϊόντα προκύπτει 0.608. Αυτό είναι το άθροισμα των αερίων προϊόντων της πυρόλυσης του ξύλου. Τα στερεά κατάλοιπα , η πίσσα και η τέφρα , έχουν άθροισμα 0.392 επί της αρχικής μάζας του ξύλου.

Η τελική κατά μάζα σύσταση του αερίου μείγματος υπολογίζεται ως εξής: $y_{H_2O}=0.403$, $y_{CO}=0.378$, $y_{CO_2}=0.186$ και $y_{soot}=0.033$.

Ο μοριακός τύπος του ξύλου προσδιορίστηκε ως $C_{8.95}H_{12.83}O_{5.19}N_{0.03}$.Με χρήση αυτού του τύπου , το μοριακό βάρος του ξύλου βρίσκεται ίσο με 203.27.

Οι στοιχειομετρικοί συντελεστές των αερίων προϊόντων της καύσης υπολογίζονται στον κώδικα FDS (User's Manual) με τη χρήση των εξισώσεων (4.1.7-4.1.11)

$$v_{soot} = \frac{M_f}{M_c} y_s = \frac{203.27}{12} * 0.033 = 0.559 \quad (4.1.7)$$

$$v_{CO} = \frac{M_f}{M_{CO}} * y_{CO} = \frac{203.27}{28} * 0.378 = 2.744 \quad (4.1.8)$$

$$v_{H_2O} = y/2 = 12.83/2 = 6.415 \quad (4.1.9)$$

$$v_{CO_2} = x - v_{CO} - v_{soot} = 8.95 - 2.744 - 0.559 = 5.647 \quad (4.1.10)$$

$$v_{O_2} = x - \frac{v_{CO}}{2} * v_{soot} + (y/4) - (z/2) = 8.95 - (2.744/2) - 0.559 + (12.83/4) - (5.54/2) = 7.632 \quad (4.1.11)$$

Με βάση αυτούς τους υπολογισμούς, οι παράμετροι υπολογισμού που εισάγονται στον κώδικα FDS είναι οι εξής:

Fuel=Hardwood
 MB_{fu}=203.27
 NU_CO₂=5.647
 NU_H₂O=6.415
 NU_O₂=7.632
 SOOT_YIELD=0.033
 CO_YIELD=0.378

4.2 Ιδιότητες υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση

Κάθε αντικείμενο που χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν την προσομοίωση έγινε προσπάθεια να μοντελοποιηθεί με όσο το δυνατό μεγαλύτερη ακρίβεια. Στην παρούσα προσομοίωση υπάρχουν τα εξής αντικείμενα: οι τοίχοι και τα παράθυρα όσον αφορά τα δομικά στοιχεία του υπολογιστικού χώρου και τα διάφορα έπιπλα που βρίσκονται μέσα στα δωμάτια, τα οποία τοποθετήθηκαν κατά τρόπο που να πλησιάζει την πραγματικότητα, δηλαδή όπως ακριβώς είναι τοποθετημένα στο πραγματικό κτίριο. Τα έπιπλα είναι: τραπέζια, καρέκλες, υπολογιστές, ένα καλάθι αχρήστων στο δωμάτιο 1 από το οποίο ξεκινά και η φωτιά και ένα ψυγείο στο δωμάτιο 1.

Για τα τραπέζια θεωρήθηκε ότι αποτελούνται από ξύλο. Το ξύλο εισάγεται στον κώδικα ως 'charring' υλικό δηλαδή υλικό το οποίο αλλάζει χημική σύσταση όταν πυρολύεται και μετατρέπεται σε τέφρα. Από τους υπολογισμούς που έγιναν στην ενότητα 4.1 βρέθηκε ότι η πυκνότητα του στερεού υπολείμματος είναι το 39,2% της πυκνότητας του αρχικού υλικού. Θεωρήθηκε ξηρό ξύλο (δηλαδή υγρασία=0). Οι ιδιότητες του ξύλου που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση ήταν:

Υγρασία=0%

Θερμοκρασία ανάφλεξης=360°C (Drysdale, 1999)

Θερμότητα ατμοποίησης=500 kJ/kg (database FDS 4)

Πυκνότητα=400 kg/m³ (database FDS 4)

Πυκνότητα τέφρας=156.8 kg/m³ (από προηγούμενη παράγραφο)

c_p(T)=0.1031+0.003867T(για το ξύλο) (TenWolde et al, 1988)

c_p(T)=1.39+0.00036T(για την τέφρα) (TenWolde et al, 1988)

k(T)=S(0.1941+0.4064M)+0.01864+0.002T(για το ξύλο) (TenWolde et al, 1988)

k(S)=0.67S-0.071(για την τέφρα) (TenWolde et al, 1988)

Όπου S είναι η ειδική βαρύτητα βασισμένη στον όγκο για συγκεκριμένη υγρασία και βάρος.

Για το τραπέζι το οποίο βρίσκεται πάνω από το καλάθι αχρήστων θεωρήθηκε μια 'τεχνητή' χαμηλή θερμοκρασία ανάφλεξης (80°C) έτσι ώστε να επιταχυνθεί η αρχική ανάφλεξη του αντικειμένου.

Στο NIST Special Publication SP-1021 (Cook County Administration Building Fire) παρατίθενται τιμές σχετικές με την καύση διαφόρων αντικειμένων οι οποίες προήλθαν από πραγματική ελεγχόμενη καύση των εν λόγω αντικειμένων και μέτρηση των ιδιοτήτων τους. Κάποια από αυτά τα αντικείμενα που κάηκαν ήταν αντικείμενα τα οποία βρίσκονται και στη συγκεκριμένη προσομοίωση όπως οι καρέκλες, οι υπολογιστές, ο κάδος απορριμμάτων. Η εισαγωγή των μετρήσεων από αυτά τα πειράματα στην προσομοίωση, οδηγεί στην αύξηση της ακρίβειας στον προσδιορισμό της συμπεριφοράς αυτών των αντικειμένων κατά την καύση τους.

Σε κάθε περίπτωση τροποποιήθηκαν κάποιες από τις ιδιότητες σύμφωνα με τις πειραματικές τιμές και οι υπόλοιπες ιδιότητες διατηρήθηκαν όπως υπάρχουν στη βάση δεδομένων του FDS 4. Οι ιδιότητες οι οποίες είναι οι πιο σημαντικές για τη συμπεριφορά του υλικού σε καύση είναι η πυκνότητα, η ειδική θερμότητα, η θερμική αγωγιμότητα, ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας ανά m² υλικού, η θερμότητα που εκλύεται κατά την καύση του υλικού (αναφέρεται στη συνέχεια ως θερμότητα καύσης) και η θερμοκρασία ανάφλεξης του υλικού.

Για τις καρέκλες θεωρήθηκε υλικό ακρυλικό ύφασμα (upholstery) και τροποποιήθηκαν κάποιες από τις ιδιότητες σύμφωνα με τις τιμές που υπήρχαν στο NIST Special Publication SP-1021. Οι ιδιότητες που τροποποιήθηκαν ήταν ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας και η θερμότητα καύσης.

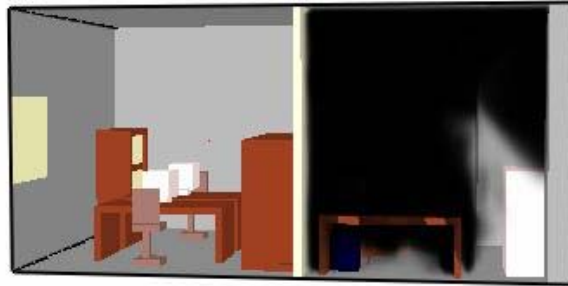
Για τους υπολογιστές θεωρήθηκε υλικό πλαστικό και τροποποιήθηκε επίσης ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας και η θερμότητα καύσης.

Για το σκουπιδοτενεκέ θεωρήθηκε υλικό επίσης πλαστικό και τροποποιήθηκαν οι ίδιες ιδιότητες.

Για το ψυγείο θεωρήθηκε υλικό μέταλλο και διατηρήθηκαν ακριβώς οι ίδιες ιδιότητες, οι οποίες βρίσκονται στη βάση δεδομένων του FDS 4.

4.3 Εξέλιξη της φωτιάς και σχολιασμός των αποτελεσμάτων

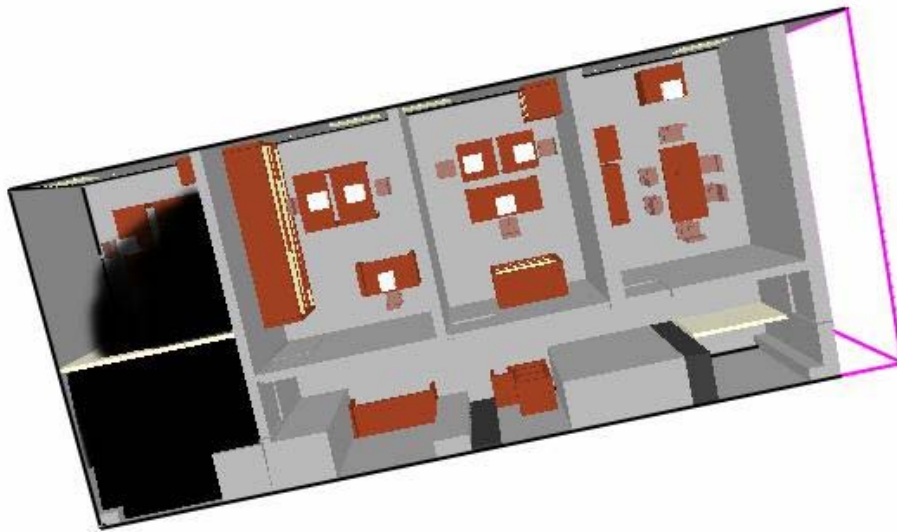
α) Καπνός



0:00:04.0



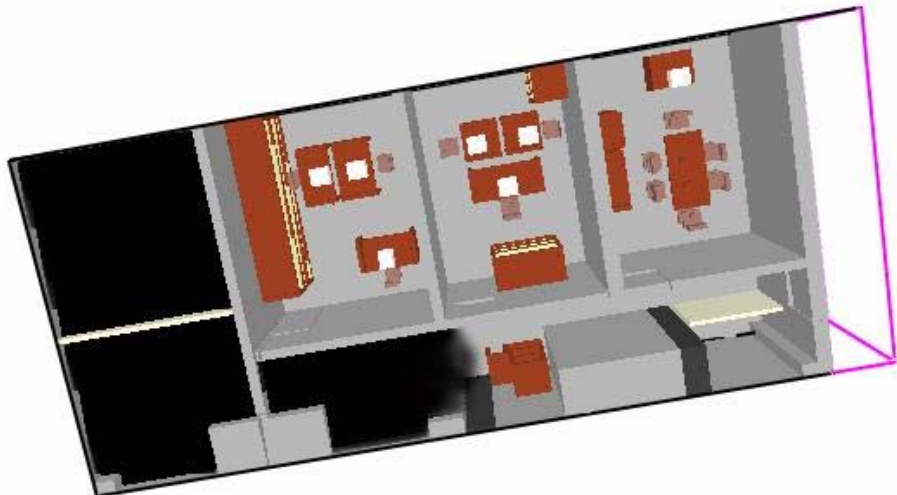
Εικόνα 119: Κατανομή καπνού στο δωμάτιο 1 , 4 s μετά την έναρξη της προσομοίωσης



0:00:52.0



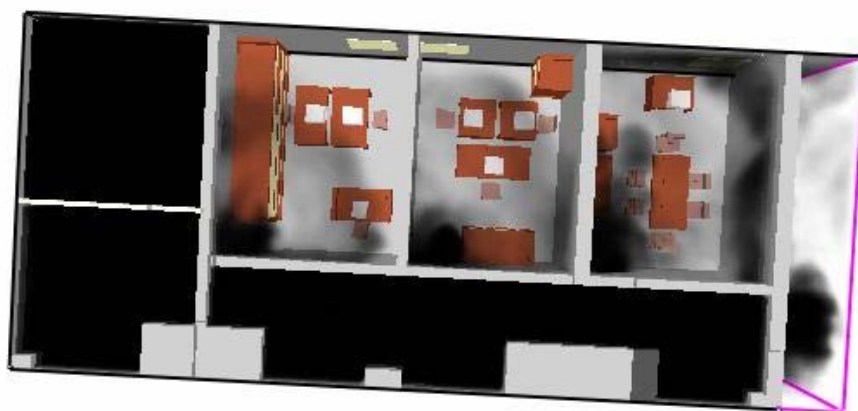
Εικόνα 120: Κατανομή καπνού στο χώρο , 2 s μετά το άνοιγμα της πόρτας μεταξύ των δωματίων 1-2



0:01:04.0



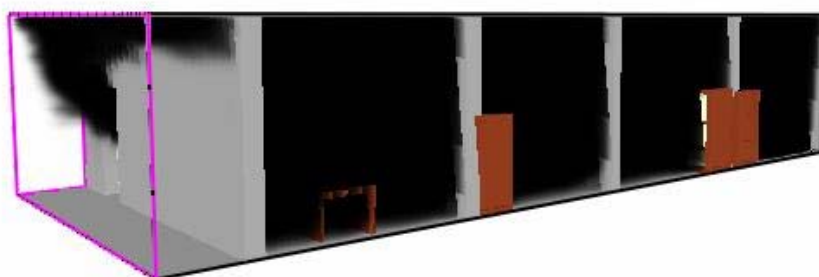
Εικόνα 121: Κατανομή καπνού στο χώρο , 4 s μετά το άνοιγμα της πόρτας μεταξύ των δωματίων 1-διαδρόμου



0:01:28.0



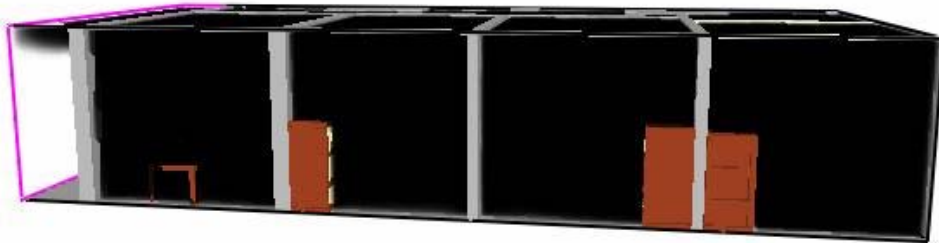
Εικόνα 122: Κατανομή καπνού στο χώρο , 8 s αφού έχουν ανοίξει όλες οι πόρτες



0:05:08.0



Εικόνα 123: Εικόνα του κτιρίου όπως φαίνεται απ' έξω



0:06:36.0

Εικόνα 124: Κατανομή καπνού στο χώρο λίγο πριν από το τέλος της προσομοίωσης, άποψη των δωματίων 2 , 3 , 4 , 5

Όπως παρατηρείται στις εικόνες 119-124 η εκπομπή καπνού είναι τόσο μεγάλη που τελικά καλύπτει ολόκληρο τον υπολογιστικό χώρο παρ'όλο που υπάρχει και ένα εξωτερικό άνοιγμα στο χώρο το οποίο είναι η εξωτερική πόρτα. Ο καπνός αρχικά γεμίζει το δωμάτιο 1 το οποίο είναι και το δωμάτιο στο οποίο δημιουργείται η φωτιά (Εικόνα 119). Στα 50 s ανοίγει η πόρτα μεταξύ των δωματίων 1-2 και ο καπνός γεμίζει και το δωμάτιο 2 (Εικόνα 120). Στα 60 s ανοίγει η πόρτα μεταξύ δωματίου 1-διαδρόμου και ο καπνός αρχίζει να γεμίζει το διάδρομο (Εικόνα 121). Αυτή τη φορά ο χώρος που έχει να γεμίσει ο καπνός είναι μεγαλύτερος έτσι στα 70 s που ανοίγουν οι πόρτες των δωματίων 3 , 4 και 5 ο διάδρομος δεν έχει γεμίσει ακόμα εντελώς από καπνό. Όταν ανοίγουν οι πόρτες των δωματίων το τελευταίο δωμάτιο που γεμίζει είναι το 3 καθώς είναι το μακρινότερο από την πορεία του καπνού κατά τη δεδομένη χρονική στιγμή (Εικόνα 122). Προς το τέλος της προσομοίωσης όλος ο χώρος έχει γεμίσει με καπνό (Εικόνες 123-124).

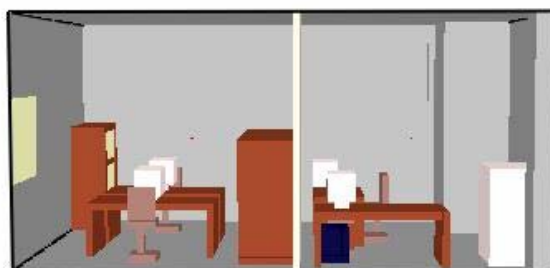
β)Φωτιά



0:00:04.0



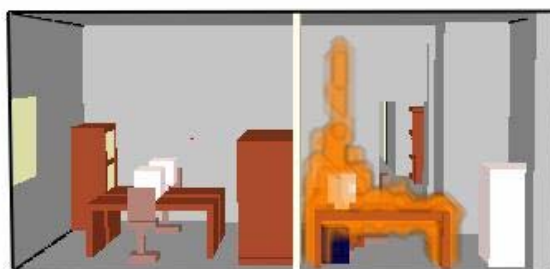
Εικόνα 125: Κατανομή ρυθμού έκλυσης θερμότητας , 4 s μετά την έναρξη της προσομοίωσης



0:00:28.0



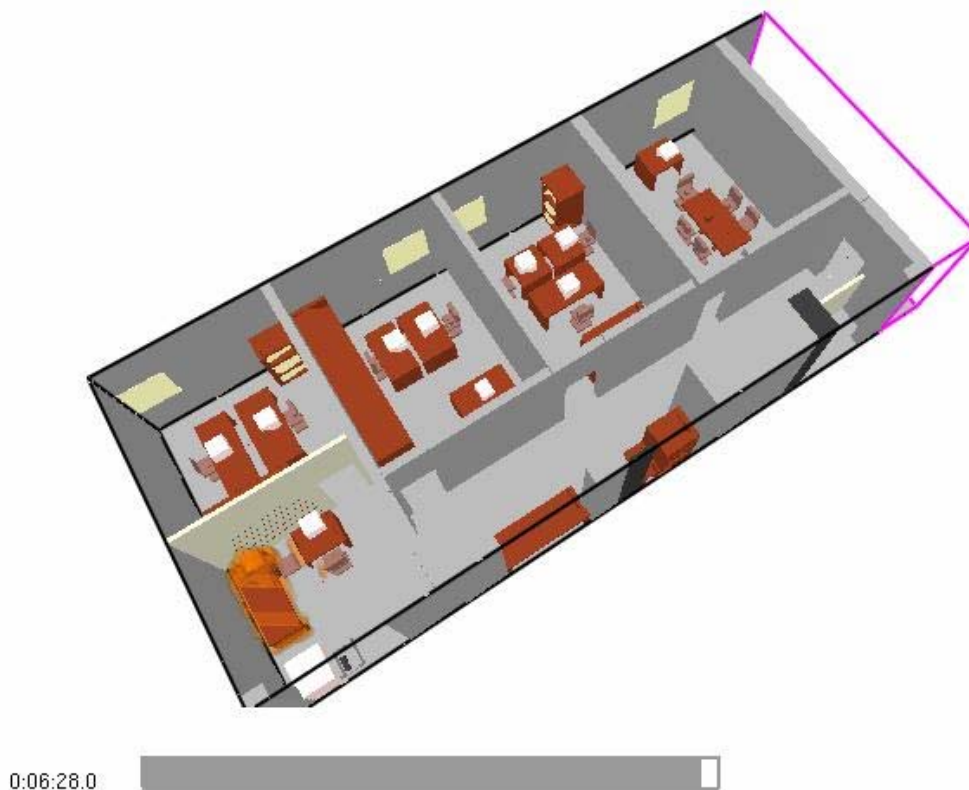
Εικόνα 126: Κατανομή ρυθμού έκλυσης θερμότητας , 28 s μετά την έναρξη της προσομοίωσης



0:01:36.0



Εικόνα 127: Κατανομή ρυθμού έκλυσης θερμότητας , 96 s μετά την έναρξη της προσομοίωσης



Εικόνα 128: Κατανομή ρυθμού έκλυσης θερμότητας , προς το τέλος της προσομοίωσης

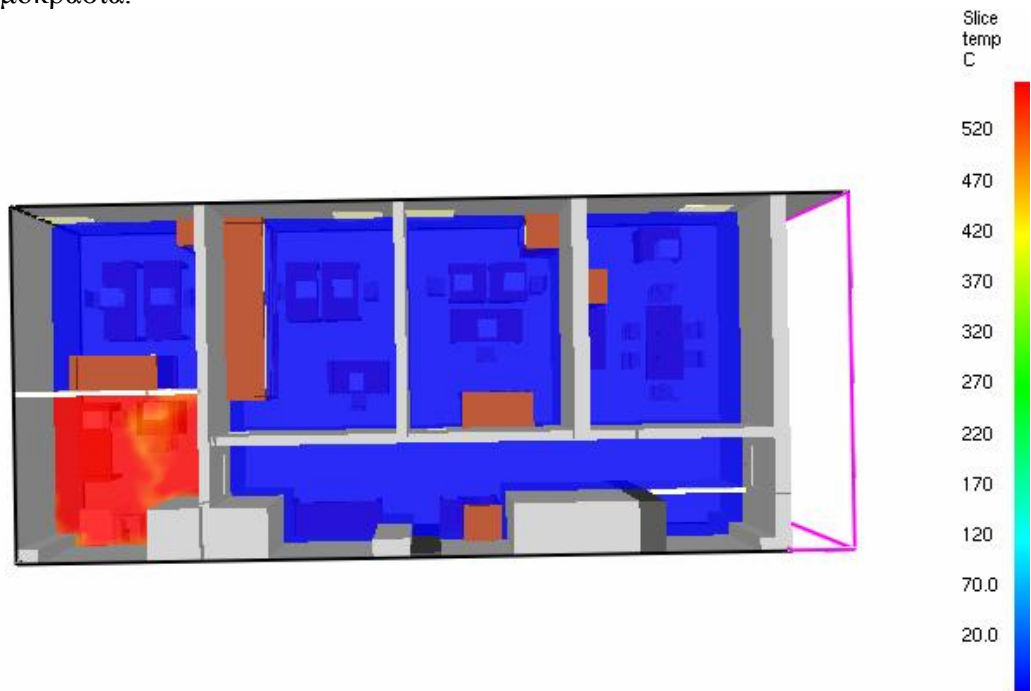
Στις εικόνες 125-128 απεικονίζεται η εξέλιξη της φωτιάς. Αρχικά η φωτιά αναπτύσσεται με μεγάλη ένταση (Εικόνα 125) ύστερα όμως ηρεμεί λόγω της εξάντλησης του οξυγόνου στο δωμάτιο 1 (Εικόνα 126). Όταν ανοίγουν όλες οι πόρτες εισέρχονται νέες ποσότητες οξυγόνου με αποτέλεσμα η φωτιά να επανενισχύεται (Εικόνα 127). Στο τέλος της προσομοίωσης (Εικόνα 128) έχει εξαφανιστεί ο υπολογιστής του τραπέζιού και σχεδόν ολόκληρη η καρέκλα , γεγονός το οποίο υποδηλώνει την ολοκληρωτική καταστροφή τους..

Στον κώδικα FDS , η μάζα κάθε υπολογιστικού κελιού υπολογίζεται μέσω της πυκνότητας και του όγκου του εκάστοτε κελιού. Όταν η μάζα του κάθε κελιού «καυσίμου» καταναλωθεί (το κελί γίνεται κελί «ρευστού») , τότε το αντικείμενο εξαφανίζεται από την προσομοίωση. Ο ρυθμός πυρόλυσης υπολογίζεται από την εξίσωση (4.2.1):

$$\dot{m}'' = A\rho_s e^{-E_A/RT} \quad (4.2.1.)$$

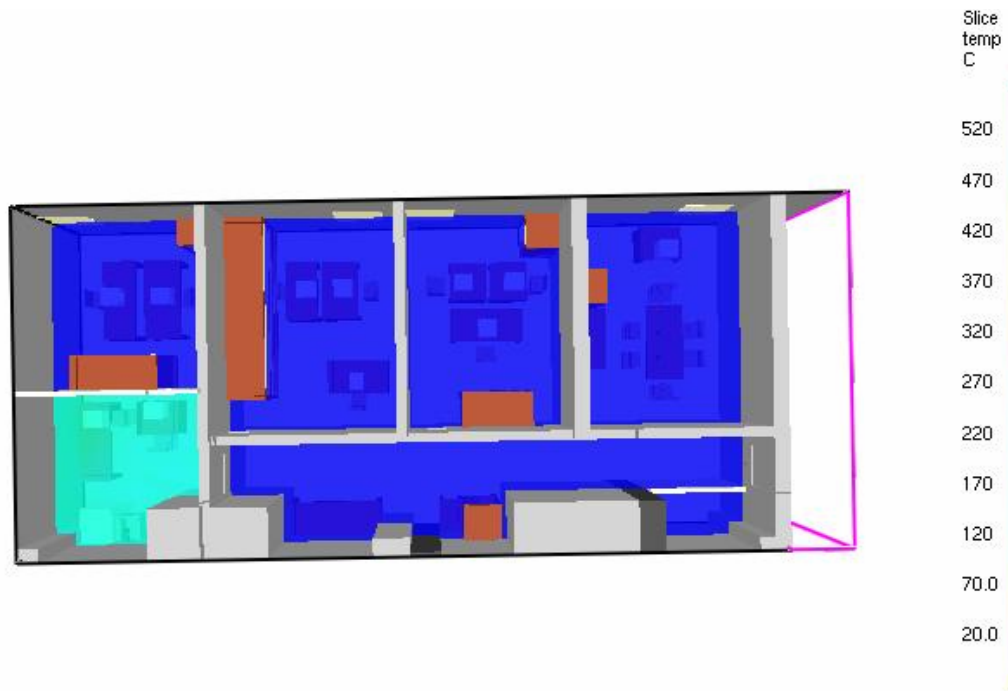
όπου A είναι η σταθερά Arrhenius και E_A η ενέργεια ενεργοποίησης , ρ_s η πυκνότητα του καυσίμου , R η παγκόσμια σταθερά των αερίων και T η θερμοκρασία.

γ)Θερμοκρασία.



0:00:16.0

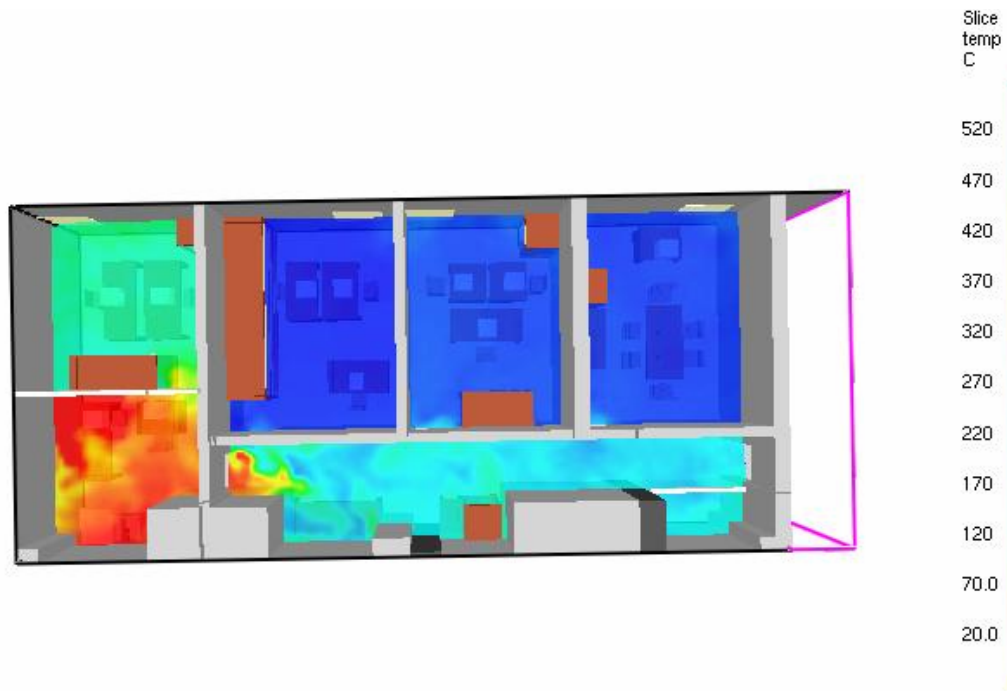
Εικόνα 129: Κατανομή θερμοκρασίας σε ύψος $h=1.8$ m από το έδαφος , 16 s μετά την έναρξη της προσομοίωσης



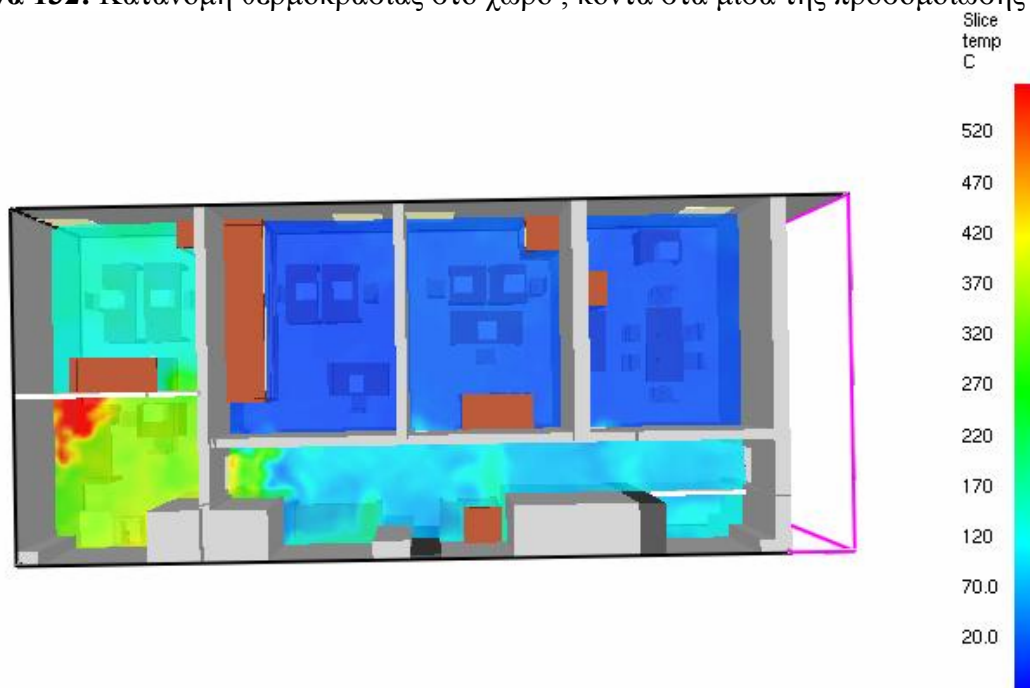
Εικόνα 130: Κατανομή θερμοκρασίας στο χώρο , 2s πριν ανοίξει η πόρτα μεταξύ δωματίων 1-2



Εικόνα 131: Κατανομή θερμοκρασίας στο χώρο , τη στιγμή που ανοίγει η πόρτα μεταξύ δωματίου 1-διαδρόμου



Εικόνα 132: Κατανομή θερμοκρασίας στο χώρο , κοντά στα μισά της προσομοίωσης

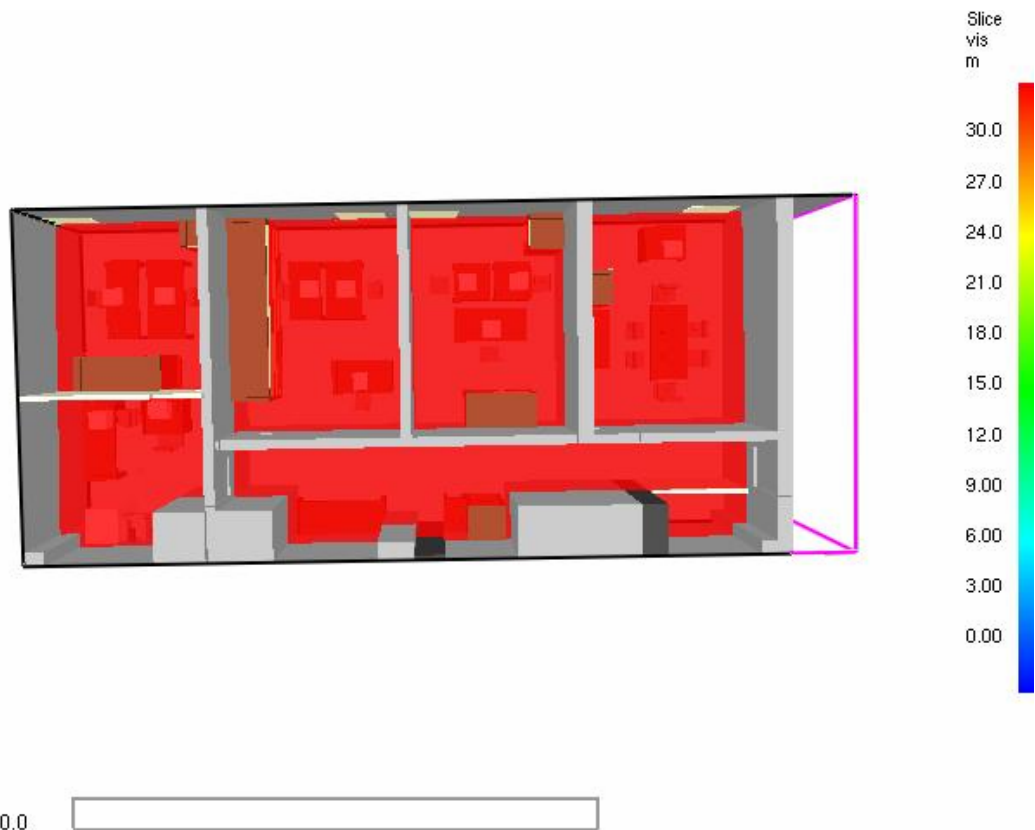


Εικόνα 133: Κατανομή θερμοκρασίας στο χώρο προς το τέλος της προσομοίωσης

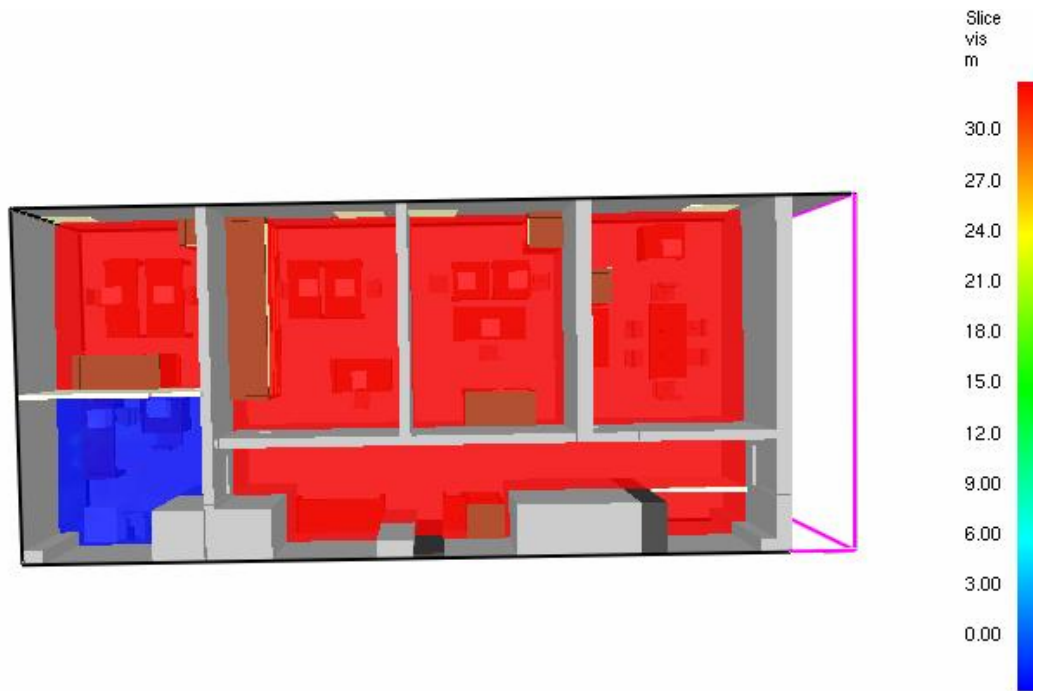
Στις εικόνες 129-133 παρουσιάζεται η εξέλιξη των προλέξεων θερμοκρασίας σε ύψος $h=1.8$ m από το έδαφος. Ενώ στο δωμάτιο 1 παρατηρούνται θερμοκρασίες που

ξεπερνούν τους 500°C στα δωμάτια 3,4 και 5 παρατηρούνται χαμηλότερες θερμοκρασίες. Τα καυσαέρια, τα οποία είναι και το κυριότερο μέσο μεταφοράς της θερμότητας της φωτιάς, συγκεντρώνονται κατά κύριο λόγο στα δωμάτια 1 και 2 καθώς και στο διάδρομο. Έτσι εξηγείται και η ανεπαίσθητη αύξηση της θερμοκρασίας σε αυτά τα δωμάτια σε σχέση με τη μεγάλη αύξηση στο δωμάτιο 1 (λόγω της φωτιάς) και στο δωμάτιο 2 (μεγάλη εισροή καυσαερίων τα οποία αυξάνουν και τη θερμοκρασία στο δωμάτιο).

δ)Ορατότητα.



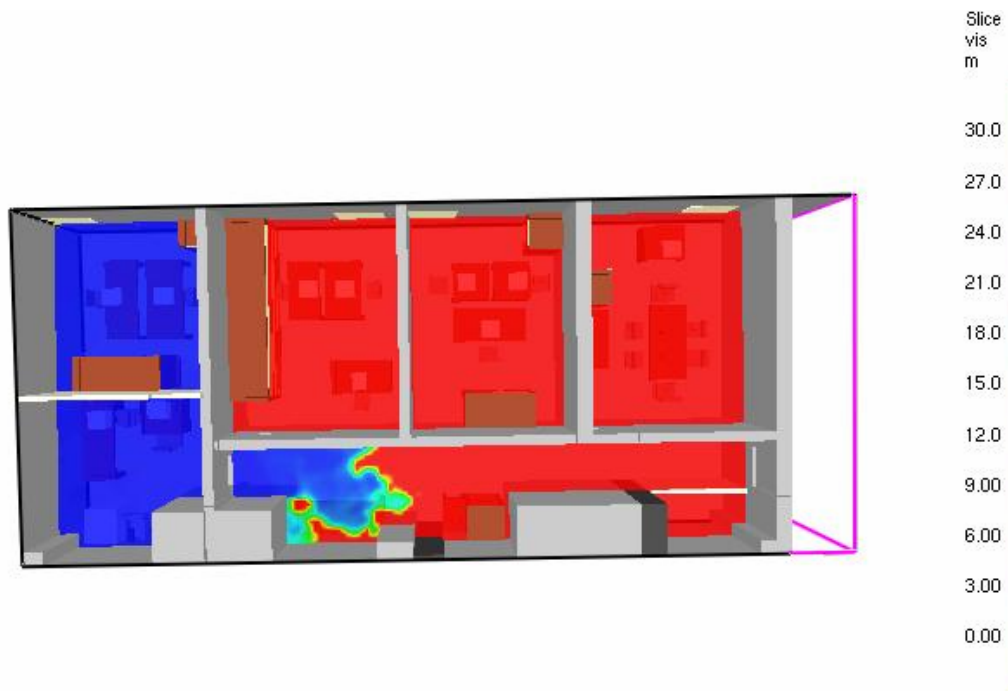
Εικόνα 134: Κατανομή μεγέθους ορατότητας κατά την έναρξη της προσομοίωσης σε ύψος $h=1.8\text{ m}$ από το έδαφος



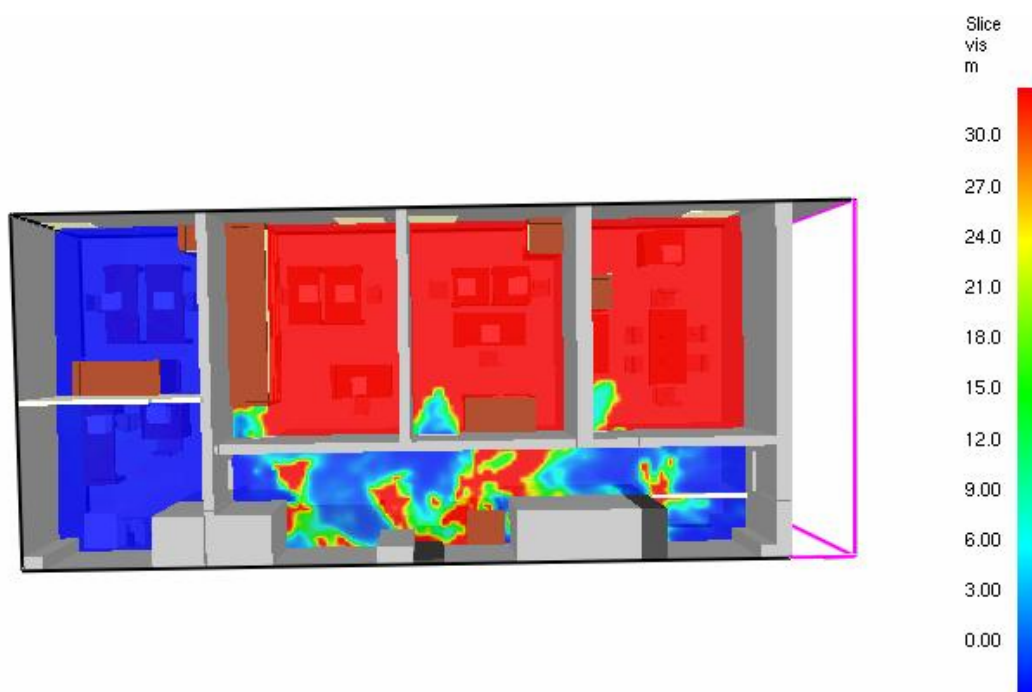
Εικόνα 135: Μετά από 8 s το δωμάτιο 1 έχει γεμίσει από καπνό και η ορατότητά του είναι 0



Εικόνα 136: Κατανομή της ορατότητας στο χώρο , 6 s μετά το άνοιγμα της πόρτας μεταξύ των δωματίων 1-2



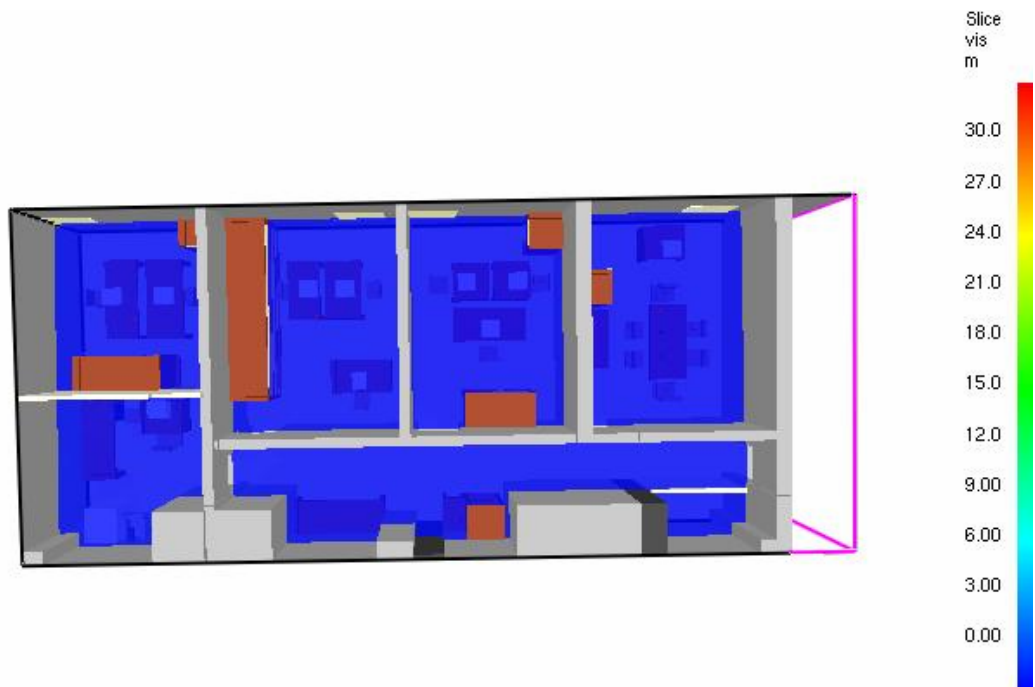
Εικόνα 137: Ορατότητα στο χώρο , 4 s μετά το άνοιγμα της πόρτας μεταξύ δωματίων 1-διαδρόμου



Εικόνα 138: Ορατότητα στο χώρο , 2 s μετά το άνοιγμα των πορτών των δωματίων 3,4,5



Εικόνα 139: Ορατότητα στο χώρο , 8 s αφού έχει ανοίξει η εξωτερική πόρτα



Εικόνα 140: Ορατότητα στο χώρο , λίγο πριν το τέλος της προσομοίωσης

Στον κώδικα FDS , για τον υπολογισμό του μεγέθους της ορατότητας , χρησιμοποιείται η εξίσωση (4.2.2) :

$$S = C / K \quad (4.2.2)$$

Όπου C είναι μια αδιάστατη σταθερά που χαρακτηρίζει τον τύπο του αντικειμένου που γίνεται ορατό μέσα από τον καπνό , π.χ. C=8 για ένα αντικείμενο που εκπέμπει φως και C=3 για ένα αντικείμενο που ανακλά φως (G.W.Mullholland, 2002), ενώ K είναι ο συντελεστής έκλειψης του φωτός. Ισχύει η σχέση (4.2.3):

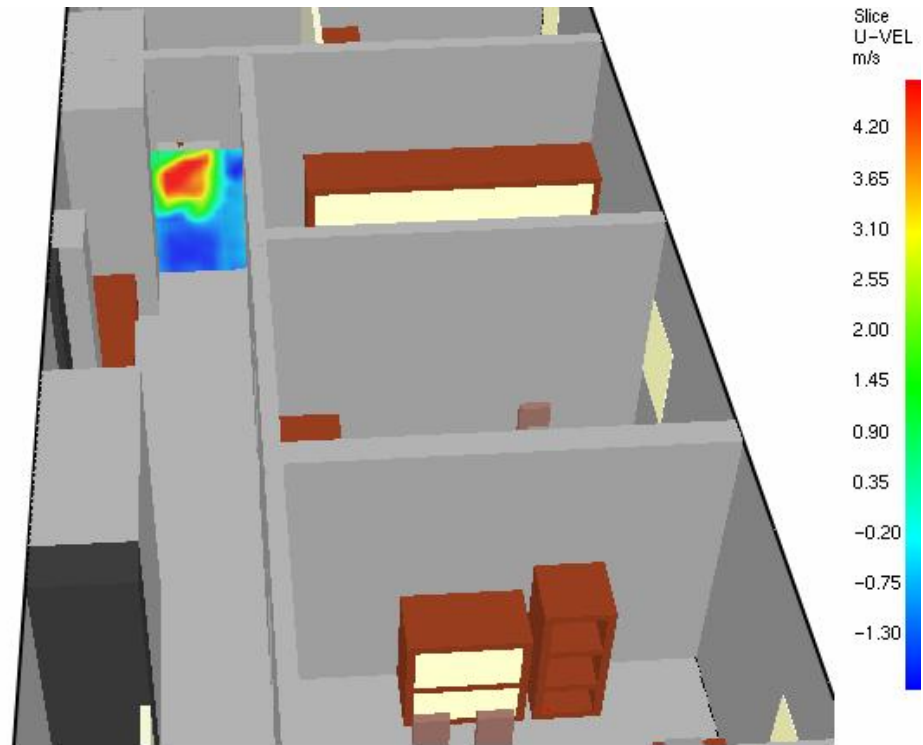
$$K = K_m \rho Y_s \quad (4.2.3)$$

Όπου K_m είναι ο συντελεστής έκλειψης μάζας. Στην παρούσα προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε η αρχική τιμή που είναι $7600 \text{ m}^2/\text{kg}$ μια τιμή που προτείνεται για την ανάφλεξη ξύλου και πλαστικών (FDS User's Guide Version 4).

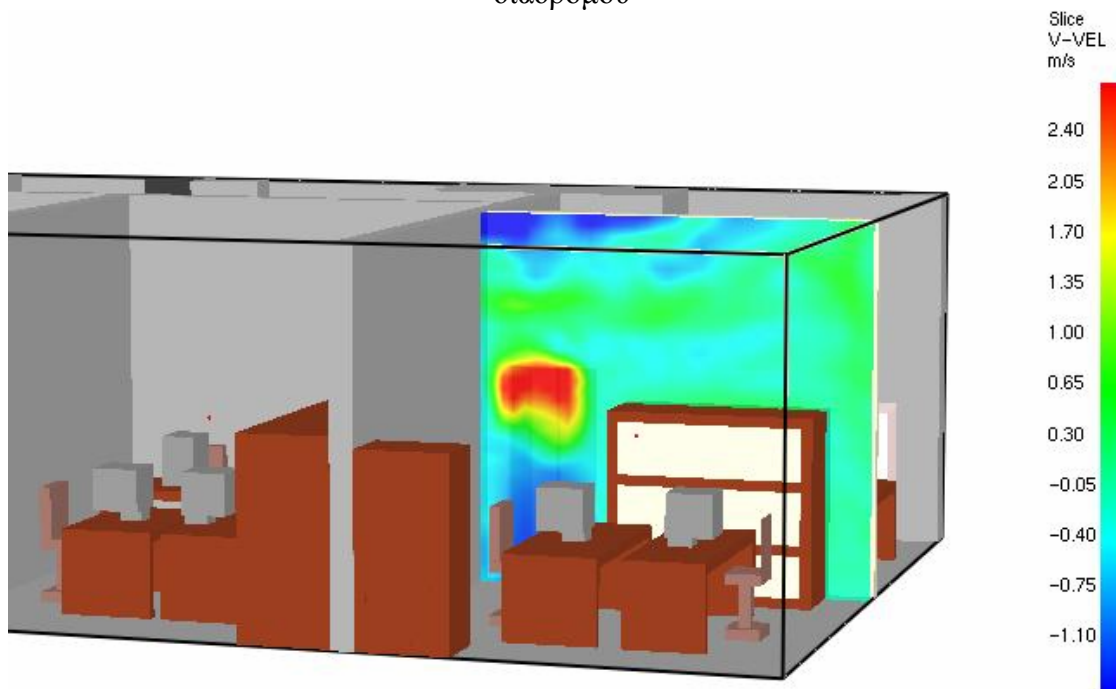
Ο όρος ρ αντιστοιχεί στην πυκνότητα του καπνού , ενώ το Y_s αντιπροσωπεύει το κλάσμα όγκου του καπνού στον αέρα. Κατά συνέπεια , αναλόγως με την πυκνότητα του καπνού σε κάθε σημείο στον υπολογιστικό χώρο υπολογίζεται ο συντελεστής K από την εξίσωση (4.2.3) και στη συνέχεια υπολογίζεται η ορατότητα από την εξίσωση (4.2.2).

Στις εικόνες 134-140 επαληθεύεται η εξάρτηση της ορατότητας από την παρουσία καπνού. Το δωμάτιο 1 είναι το πρώτο που γεμίζει από καπνό (Εικόνα 135) και το δωμάτιο 3 είναι το τελευταίο (Εικόνα 139). Κατά σειρά τα δωμάτια στα οποία η ορατότητα γίνεται μηδενική είναι τα 1,2, διάδρομος, 5,4,3.

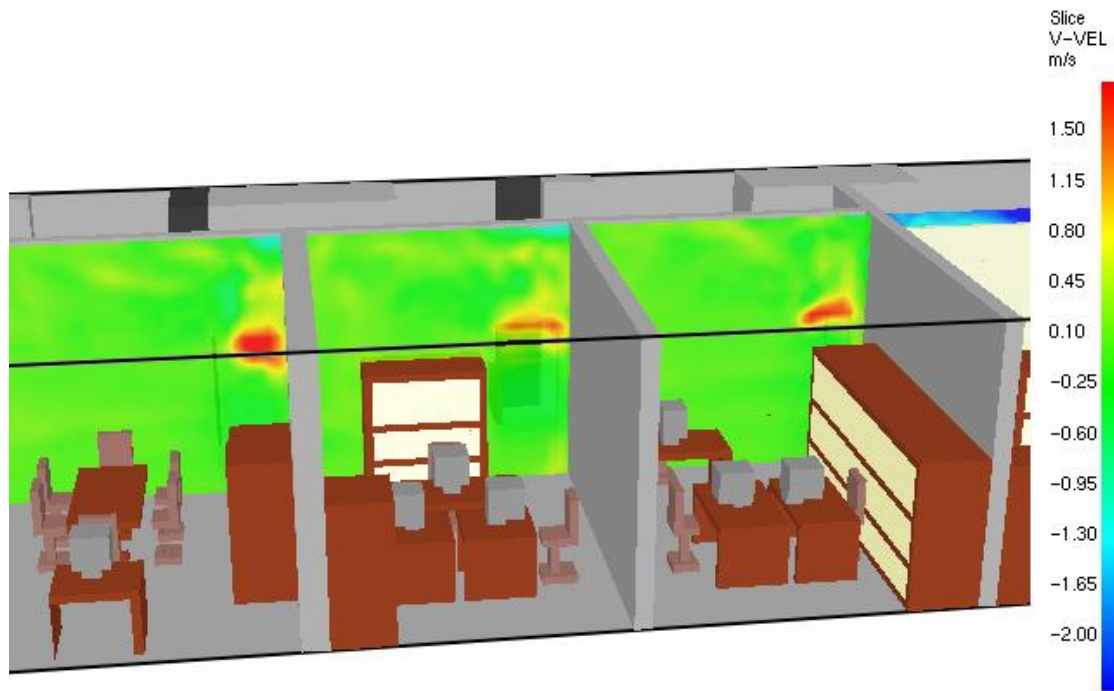
ε) Ταχύτητα.



Εικόνα 141: Κατανομή κάθετης ταχύτητας στην πόρτα μεταξύ δωματίου 1- διαδρόμου



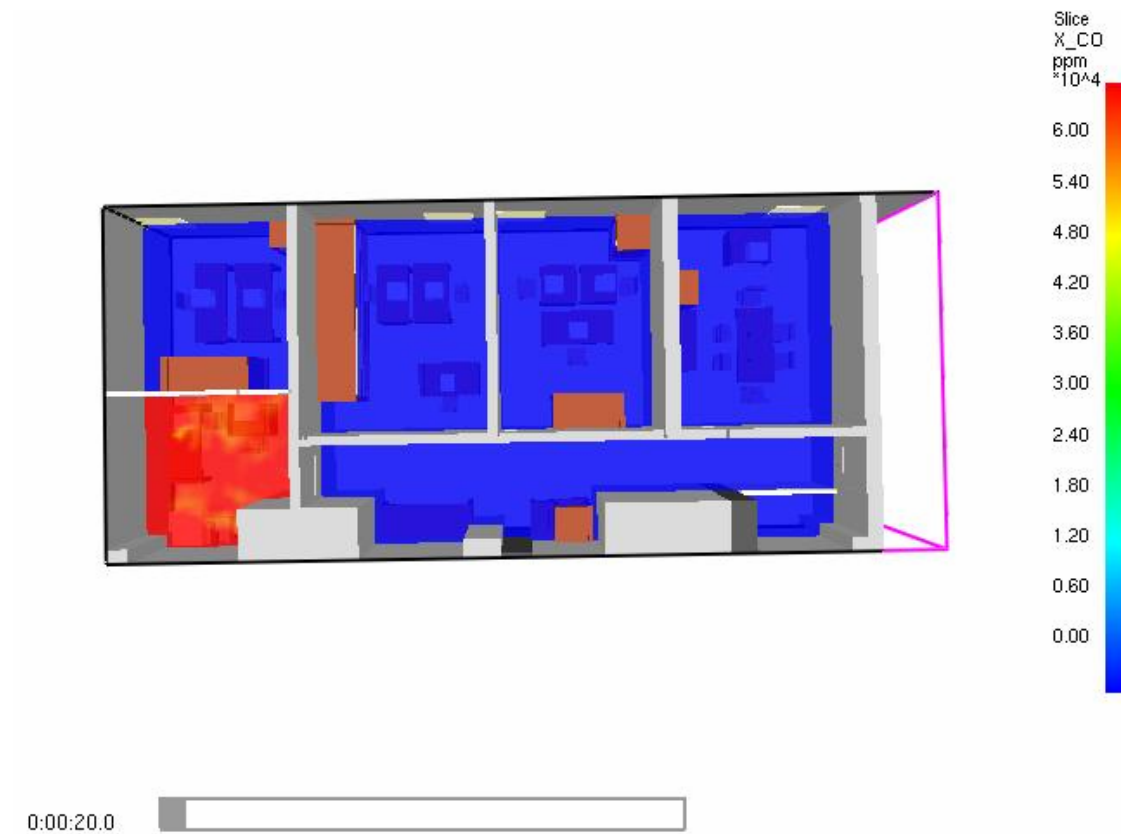
Εικόνα 142: Κατανομή κάθετης ταχύτητας στην πόρτα μεταξύ δωματίων 1-2



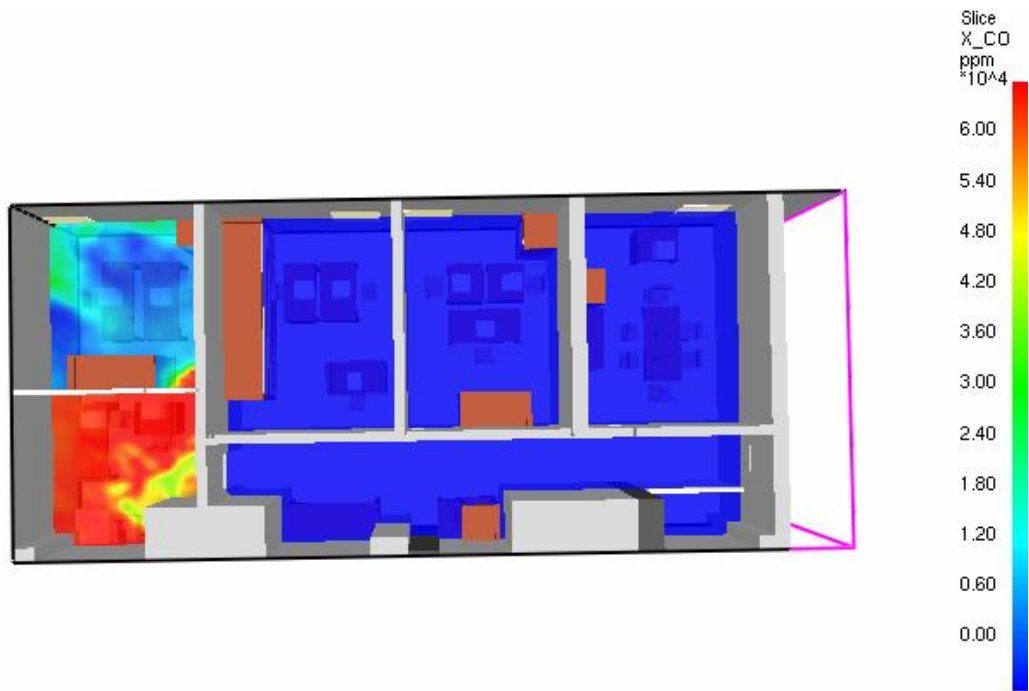
Εικόνα 143: Κατανομή κάθετης ταχύτητας στις πόρτες των δωματίων 3,4,5

Όπως φαίνεται στις εικόνες 141-143 οι μεγαλύτερες ταχύτητες παρατηρούνται στην πόρτα μεταξύ δωματίου 1-διαδρόμου καθώς στο δωμάτιο αυτό υπάρχει η μεγαλύτερη συγκέντρωση καυσαερίων. Ένα μέρος αυτών των καυσαερίων, εισέρχεται και στο δωμάτιο 2 εξ ου και οι επίσης υψηλές ταχύτητες εκεί οι οποίες είναι όμως χαμηλότερες από αυτές στην πόρτα μεταξύ δωματίου 1-διαδρόμου. Οι χαμηλότερες ταχύτητες παρατηρούνται στις πόρτες των δωματίων 3, 4 και 5 καθώς βρίσκονται κοντά στην έξοδο και το μεγαλύτερο μέρος των καυσαερίων εξέρχεται από την πόρτα εξόδου.

στ) Συγκέντρωση CO.

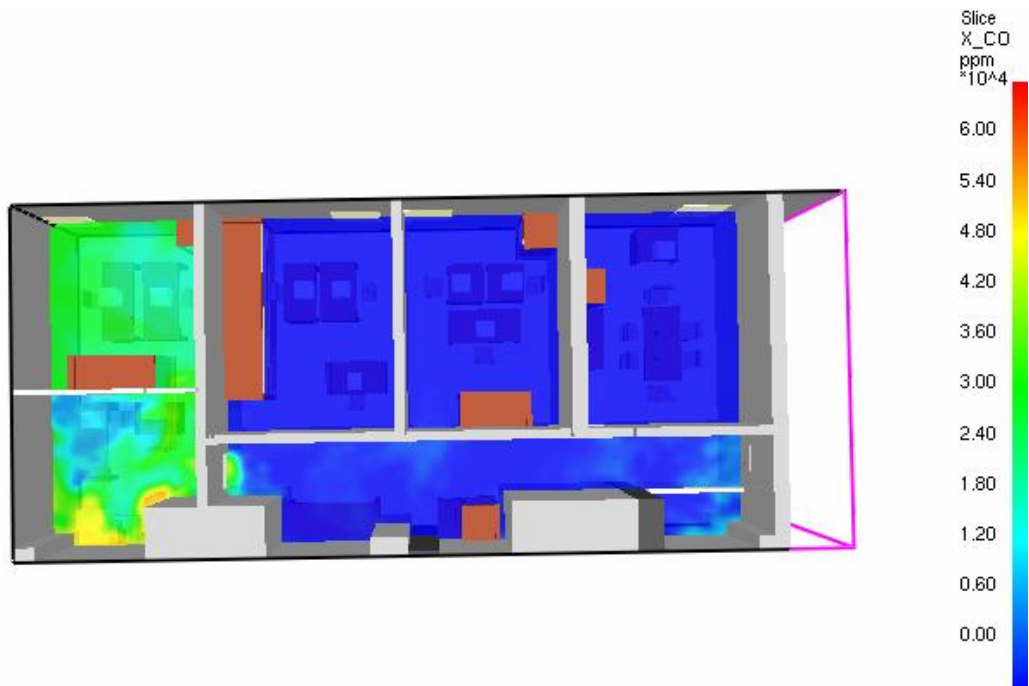


Εικόνα 144: Κατανομή συγκέντρωσης CO στο χώρο σε ύψος $h=1.8$ m από το έδαφος, 20 s μετά την έναρξη της προσομοίωσης



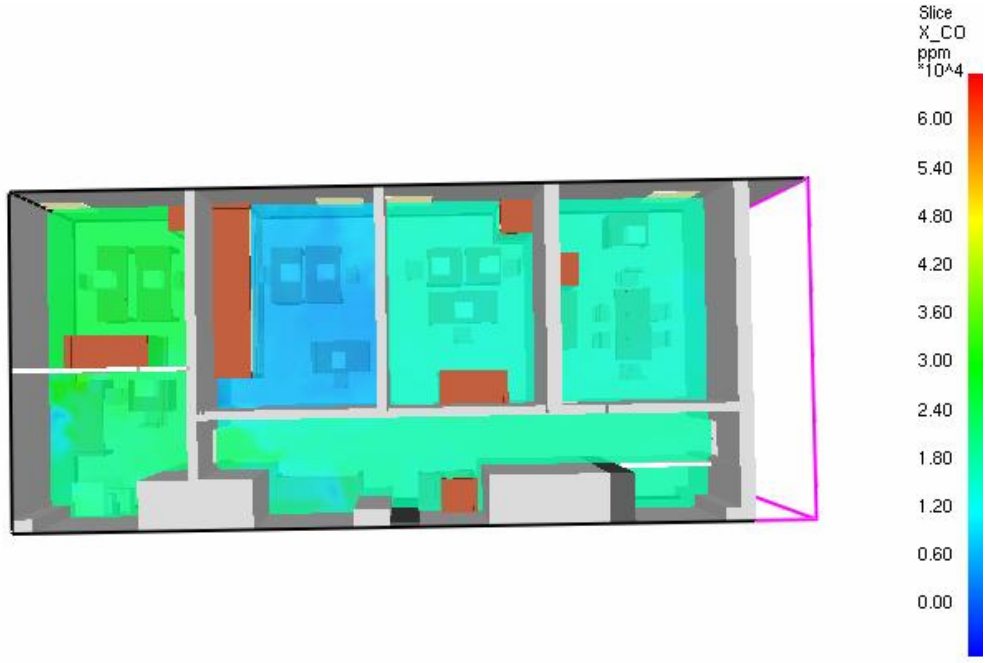
0:01:00.0

Εικόνα 145: Κατανομή συγκέντρωσης CO στο χώρο τη στιγμή που ανοίγει η πόρτα μεταξύ δωματίου 1-διαδρόμου.

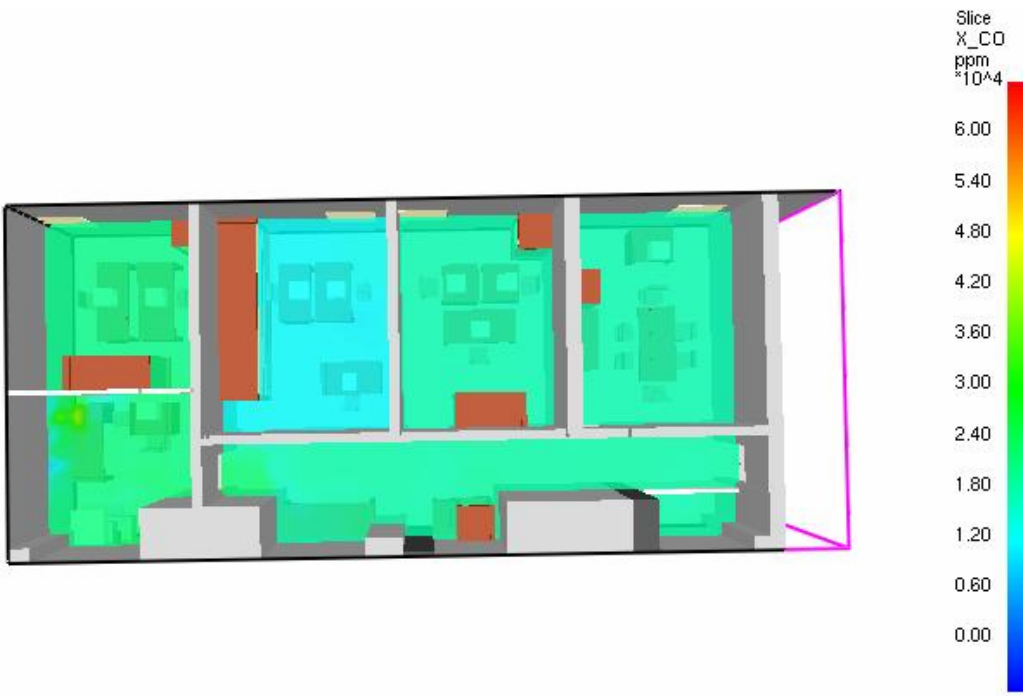


0:01:12.0

Εικόνα 146: Κατανομή συγκέντρωσης CO στο χώρο τη στιγμή που ανοίγουν οι πόρτες των δωματίων 3,4,5



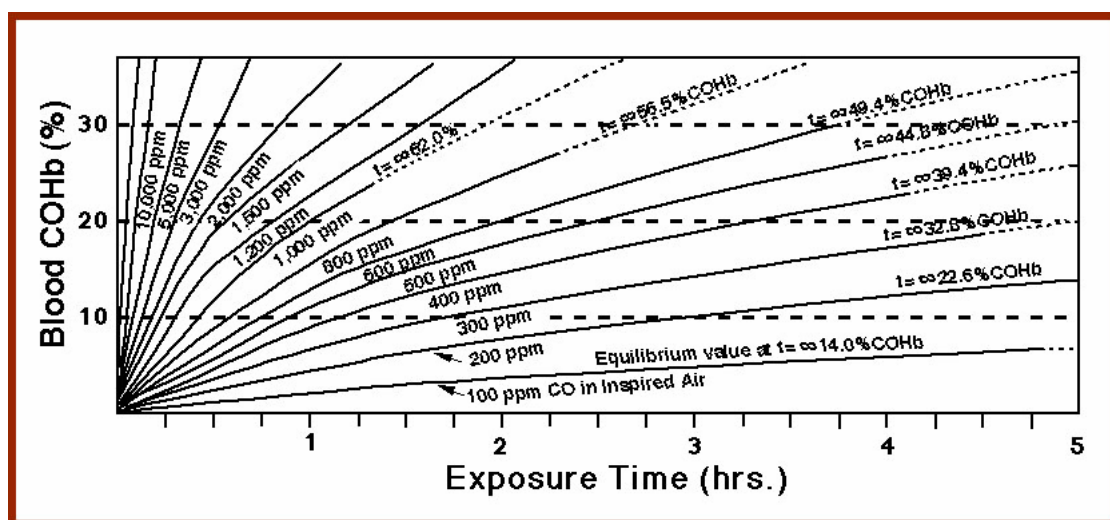
Εικόνα 147: Κατανομή συγκέντρωσης CO στο χώρο , λίγο μετά τα μισά της προσομοίωσης



Εικόνα 148: Κατανομή συγκέντρωσης CO στο χώρο , λίγο πριν το τέλος της προσομοίωσης

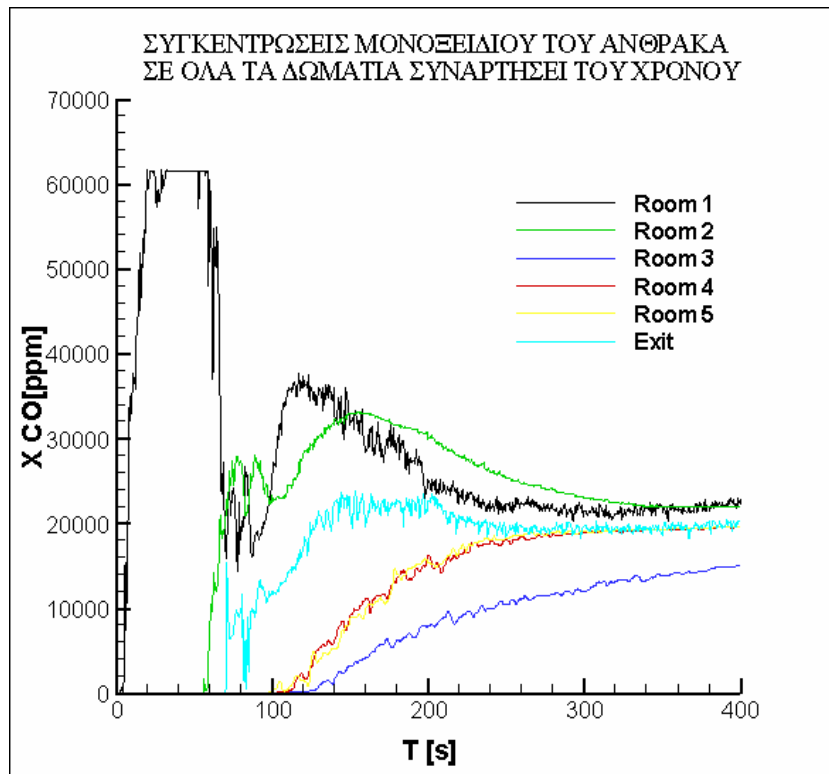
Οι συγκεντρώσεις CO ίσως είναι και το πιο ζωτικό σημείο για την επιβίωση ανθρώπων μέσα σε κτίριο κατά τη διάρκεια φωτιάς. Όπως φαίνεται στις εικόνες 144-148, οι συγκεντρώσεις CO είναι υψηλότερες στο δωμάτιο 1, ακολουθεί το δωμάτιο 2, έπειτα τα δωμάτια 4,5 και ο διάδρομος και η χαμηλότερη συγκέντρωση καταγράφεται στο δωμάτιο 3.

Οι συγκεντρώσεις αυτές είναι εξαιρετικά υψηλές αλλά για να διαπιστωθεί η επίδραση μιας τέτοιας συγκέντρωσης στον ανθρώπινο οργανισμό πρέπει να συνυπολογιστεί και η χρονική διάρκεια για την οποία μένει εκτεθειμένος κάποιος σε αυτή τη συγκέντρωση.



Εικόνα 149 :Διάγραμμα που δείχνει την επίδραση του CO στον ανθρώπινο οργανισμό συναρτήσει του χρόνου (Forbes,1945)

Στην εικόνα 149 απεικονίζεται το ποσοστό απορρόφησης του CO από το αίμα συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στο CO και της συγκέντρωσης του CO στον αέρα. Για να χρησιμοποιηθεί αυτό το διάγραμμα πρέπει να υποθεθεί μια σταθερή τιμή συγκέντρωσης CO στον αέρα. Αντί για αυτό το διάγραμμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι εξισώσεις (4.2.4) και (4.2.5) οι οποίες χρησιμοποιούν συντελεστές επικινδυνότητας οι οποίοι δείχνουν τον κίνδυνο από τη στιγμιαία συγκέντρωση CO σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή.



Εικόνα 150 : Συγκεντρώσεις CO σε όλα τα δωμάτια συναρτήσε του χρόνου

Στην εικόνα 150 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις CO σε όλα τα δωμάτια συναρτήσε του χρόνου . Οι συγκεντρώσεις αντιστοιχούν στο κέντρο κάθε δωματίου , ενώ επιπλέον αναφέρεται και η συγκέντρωση CO στο κέντρο της πόρτας εξόδου. Η υψηλότερη συγκέντρωση παρατηρείται στο δωμάτιο 1 , αφού εκεί βρίσκεται και η φωτιά, γεγονός το οποίο σημαίνει συνεχή παραγωγή CO μέσα στο δωμάτιο. Ακολουθεί το δωμάτιο 2 το οποίο βρίσκεται ακριβώς δίπλα και έπειτα κατά σειρά η πόρτα εξόδου, τα δωμάτια 4,5 (περίπου ίδια συγκέντρωση) και τέλος η χαμηλότερη συγκέντρωση καταγράφεται στο δωμάτιο 3.

Το έγγραφο ISO 13571 περιλαμβάνει εξισώσεις για τον υπολογισμό του ορίου πάνω από το οποίο θεωρείται ότι ο ανθρώπινος οργανισμός γίνεται ανίκανος να δράσει προς την προστασία του εαυτού του εξαιτίας υπερβολικής θερμότητας ή λόγω της επίδρασης δηλητηριωδών αερίων (CO,HCN).

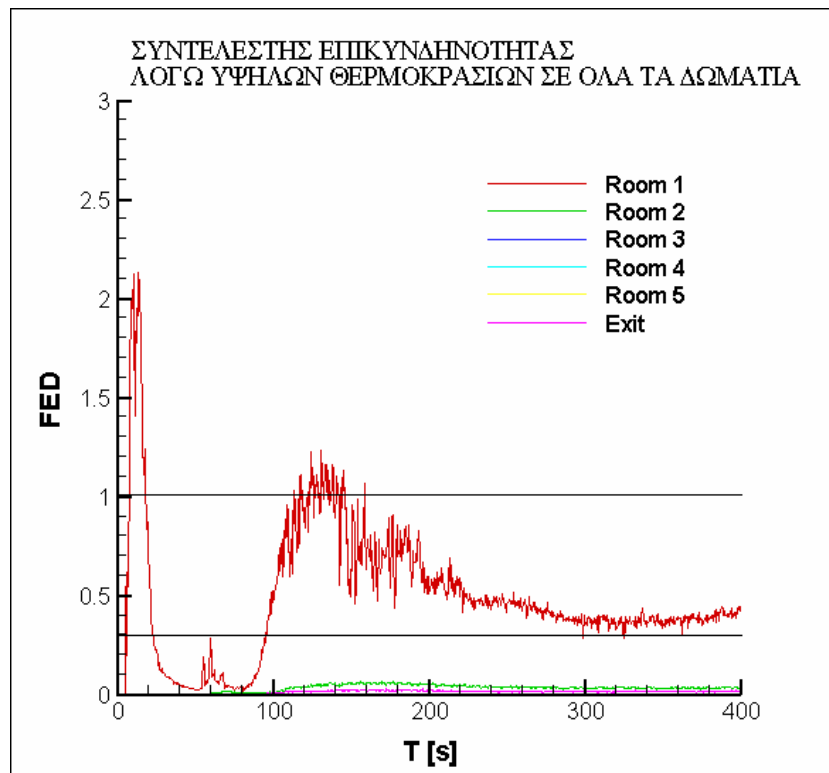
$$FED_{HEAT} = \sum_{t_1}^{t_2} \frac{q^{1.33}}{1.33} \Delta t + \sum_{t_1}^{t_2} \frac{T^{3.4}}{5 \cdot 10^7} \Delta t \quad (4.2.4)$$

Με χρήση της εξίσωσης (4.2.4) υπολογίζεται ο συντελεστής FED (Fractional Effective Dose) ο οποίος δείχνει το μέγεθος της επίδρασης των υψηλών θερμοκρασιών στον ανθρώπινο οργανισμό. Στην εξίσωση (4.2.4) όπου q η ένταση θερμότητας από ακτινοβολία (σε kW/m²) και T η θερμοκρασία (σε °C). Η κρίσιμη τιμή είναι FED=0.3 (Peacock, 2004) . Πάνω από αυτή την τιμή θεωρείται ότι η θερμότητα επιδρά πλέον με τέτοιο τρόπο ώστε κάποιος δε μπορεί να διαφύγει από το δωμάτιο που βρίσκεται εξαιτίας δυσμενών επιπτώσεων της θερμότητας στον οργανισμό του.

$$FED_{GASES} = \sum_{t_1}^{t_2} \frac{CO}{35000} \Delta t + \sum_{t_1}^{t_2} \frac{\exp(HCN/43)-1}{220} \Delta t \quad (4.2.5)$$

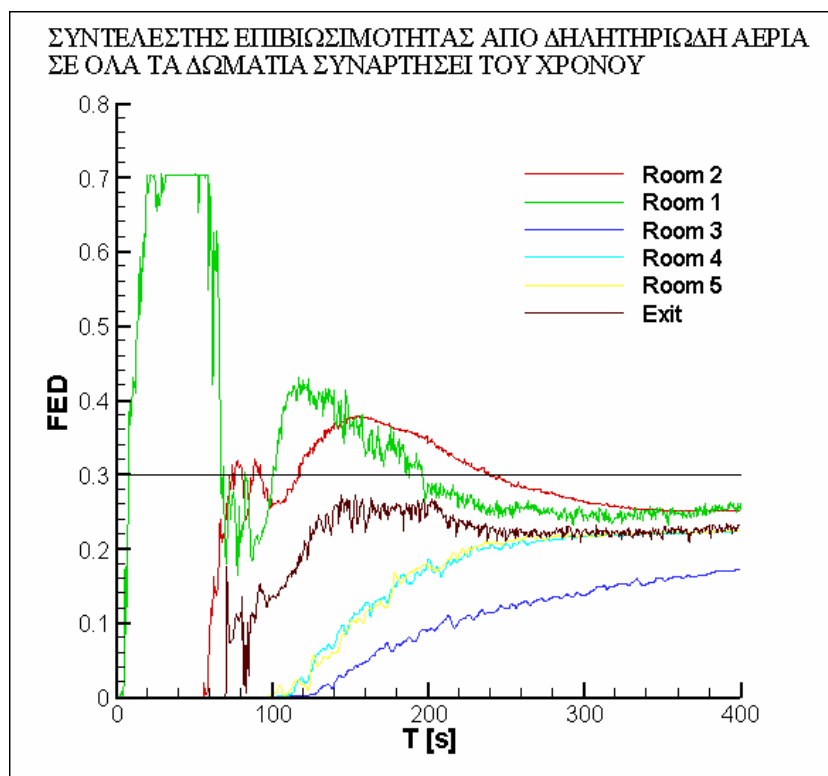
Ο αντίστοιχος συντελεστής FED για την έκθεση σε δηλητηριώδη αέρια υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης (4.2.5) όπου CO και HCN οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις σε ppm. Στη συγκεκριμένη προσομοίωση ο όρος που περιέχει τη συγκέντρωση του HCN αγνοήθηκε λόγω του ότι κατά την καύση του ξύλου, το οποίο είναι το κυρίαρχο καύσιμο υλικό στη συγκεκριμένη προσομοίωση, δεν παράγεται HCN ως προϊόν της αντίδρασης.

Η κρίσιμη τιμή για το συντελεστή FED_{GASES} είναι επίσης 0.3.



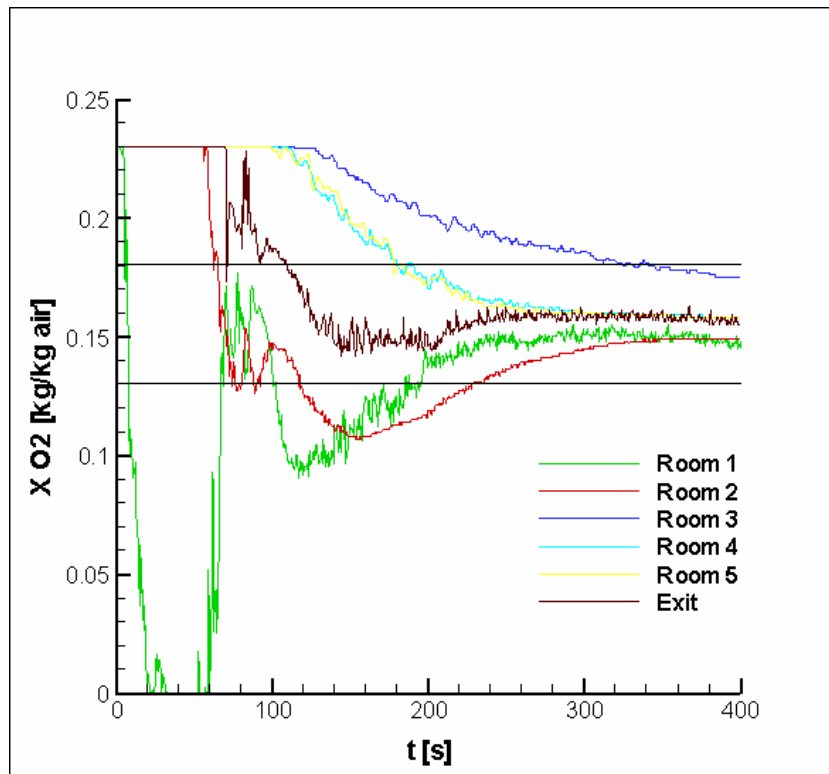
Εικόνα 151: FED_{HEAT} σε όλα τα δωμάτια συναρτήσει του χρόνου

Στην εικόνα 151 απεικονίζεται η διακύμανση του FED_{HEAT} σε όλα τα δωμάτια συναρτήσει του χρόνου. Σε όλα τα δωμάτια πλην του δωματίου 1 οι τιμές είναι εξαιρετικά χαμηλές και σε κανένα δωμάτιο οι τιμές δεν πλησιάζουν την κρίσιμη τιμή 0.3. Αντιθέτως στο δωμάτιο 1 για το διάστημα $t=0-20s$ η τιμή του FED_{HEAT} ξεπερνά κατά πολύ την τιμή μη επιβίωσης ($FED_{HEAT}=1$) οπότε αν σε αυτό το χρονικό διάστημα βρεθεί κάποιος μέσα στο δωμάτιο 1 η επιβίωσή του θεωρείται αδύνατη. Μετά τα 30 s η τιμή μειώνεται ραγδαία (κάτω από την κρίσιμη τιμή 0.3) για να επανυζηθεί μετά τα 90 s. Στη συνέχεια παραμένει σε υψηλά επίπεδα μέχρι και το τέλος της προσομοίωσης (>0.3) οπότε η επιβίωση κάποιου ανθρώπου που θα βρίσκεται μέσα στο δωμάτιο 1 καθίσταται εξαιρετικά αμφίβολη.



Εικόνα 152: FED_{GASES} σε όλα τα δωμάτια συναρτήσει του χρόνου

Στην εικόνα 152 παρουσιάζεται η χρονική μεταβολή του FED_{GASES} σε όλα τα δωμάτια. Στο δωμάτιο 1 παρατηρούνται οι υψηλότερες τιμές καθώς στο διάστημα $t=20s-60s$ η τιμή του συντελεστή φτάνει την τιμή 0.7 η οποία βρίσκεται πολύ κοντά στην τιμή μη επιβίωσης ($FED_{CO}=1$). Μετά τα 60 s η τιμή πέφτει ραγδαία για να επαναυξηθεί σε επικίνδυνα επίπεδα (>0.3) στα 100 s. Ο συντελεστής παραμένει σε επικίνδυνα επίπεδα για 100 s και έπειτα πέφτει σε ασφαλείς τιμές. Στο δωμάτιο 2 ο συντελεστής είναι στην επικίνδυνη περιοχή για το διάστημα $t=120s-240s$. Η πόρτα του δωματίου 2 ανοίγει στα 50 s. Αν οι ένοικοι του δωματίου 2 μετακινηθούν αμέσως στο δωμάτιο 1 τότε θα βρεθούν αντιμέτωποι με εξαιρετικά υψηλή και επικίνδυνη συγκέντρωση CO. Το μόνο ασφαλές χρονικό διάστημα για να μετακινηθούν στο δωμάτιο 1 (κατά το οποίο οι τιμές και των δύο δωματίων είναι σε ασφαλή επίπεδα) είναι για $t=70-100$ s. Στα υπόλοιπα δωμάτια ο συντελεστής παραμένει σε ασφαλή επίπεδα με ασφαλέστερο να αποδεικνύεται το δωμάτιο 3, να ακολουθούν τα δωμάτια 4,5 με περίπου ίδιες τιμές μεταξύ τους και τελευταίος ο διάδρομος.



Εικόνα 153: Ποσοστό κατά μάζα του O_2 στον αέρα σε όλα τα δωμάτια συναρτήσει του χρόνου

Στην εικόνα 153 παρουσιάζεται η κατά μάζα συγκέντρωση του O_2 στον αέρα σε όλα τα δωμάτια συναρτήσει του χρόνου. Σε όλα τα δωμάτια το αρχικό ποσοστό είναι 0.23 (το ποσοστό του O_2 στον ατμοσφαιρικό αέρα) και μετά την έναρξη της προσομοίωσης μειώνεται. Στο δωμάτιο 1 το O_2 μειώνεται με ραγδαίο ρυθμό αφού καταναλώνεται από τη φωτιά και περίπου στα 30 s εξαντλείται. Αυτό δικαιολογεί και το σβήσιμο της φωτιάς περίπου στον ίδιο χρόνο (Εικόνα 126). Όταν ανοίγουν οι πόρτες η φωτιά βρίσκει καινούριο O_2 προς κατανάλωση το οποίο προέρχεται από τα γειτονικά δωμάτια. Ο αέρας ο οποίος εισέρχεται στο δωμάτιο 1 προέρχεται κυρίως από το διάδρομο και κατά δεύτερο λόγο από το δωμάτιο 2. Αυτό φαίνεται στις εικόνες 141-143 όπου στις δύο εισόδους του δωματίου 1 παρατηρούνται οι μεγαλύτερες ταχύτητες εισερχομένων κρύνων αερίων (1.25 m/s από το διάδρομο και 0.95 m/s από το δωμάτιο 2). Αντίθετα στα δωμάτια 3,4 και 5 η απώλεια οξυγόνου είναι περιορισμένη όπως φαίνεται στην εικόνα 153. Αυτό επιβεβαιώνεται και από την εικόνα 143 στην οποία φαίνεται ότι σε αυτά τα δωμάτια παρατηρείται μικρή ταχύτητα εξερχομένων κρύνων αερίων (0.35 m/s).

Συγκέντρωση O_2 στον αέρα κάτω από 18% θεωρείται επικίνδυνη ενώ το όριο κάτω από το οποίο επέρχεται απώλεια των αισθήσεων για τον άνθρωπο είναι το 13% (Fermilab, 2003). Από την εικόνα 153 παρατηρείται ότι στα δωμάτια 1 και 2 η συγκέντρωση κατεβαίνει κάτω από το 13% ενώ στην επικίνδυνη περιοχή (<18%) εισέρχονται όλα τα δωμάτια. Στα δωμάτια 3,4,5 η συγκέντρωση εισέρχεται στην επικίνδυνη περιοχή σε χρόνο κατά τον οποίο θεωρείται ότι τα δωμάτια έχουν ήδη εκκενωθεί.

5.Συμπεράσματα-Προοπτικές

Η φωτιά παραμένει ένα εξαιρετικά απρόβλεπτο ως προς τη συμπεριφορά του φαινόμενο και ως εξ'αυτού είναι δύσκολη η ακριβής προσομοίωσή της. Παρ'όλα αυτά η προσομοίωση του φαινομένου με τον κώδικα FDS μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι αρκετά καλή λόγω της καλής προσέγγισης των υπολογιστικών με τα πειραματικά αποτελέσματα στο κεφάλαιο 3.

Υπάρχουν ωστόσο κάποιοι περιορισμοί οι οποίοι προκύπτουν από τη μελέτη των αποτελεσμάτων του κεφαλαίου 3:

- Όσο περισσότερο ελεγχόμενη είναι η ροή , τόσο καλύτερα αποτελέσματα μπορούν να αναμένονται. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι σε ένα κτίριο με πολλά μικρά δωμάτια η φωτιά μπορεί να προσομοιωθεί με πιο μεγάλη ακρίβεια από π.χ. ένα κλειστό γήπεδο. Αυτό οφείλεται στις πολλές εναλλακτικές διαδρομές που έχει η φωτιά στη δεύτερη περίπτωση ως προς τη διάδοσή της . Ακόμα πιο δύσκολη είναι η προσομοίωση σε ανοιχτούς χώρους (όχι όμως αδύνατη) όπως π.χ. ένα δάσος ή ένα ανοιχτό γήπεδο ποδοσφαίρου. Σε αυτές τις περιπτώσεις θα πρέπει να εισαχθούν στην προσομοίωση παράμετροι όπως η ταχύτητα του εξωτερικού αέρα η οποία είναι δύσκολο να προβλεφθεί με μεγάλη ακρίβεια. Επίσης οι ταχύτητες της φλόγας μπορεί να φτάσουν σε εξαιρετικά υψηλά επίπεδα κάτι που μπορεί να οδηγήσει τον κώδικα σε αριθμητική αστάθεια. Ακόμα , οι διαστάσεις ενός γηπέδου είναι δυνατό να εισαχθούν σε προσομοίωση με ένα κελί όμως που θα είναι αρκετά μεγάλο άρα η ακρίβεια των υπολογισμών θα είναι μικρή.

Αντιθέτως σε περιπτώσεις φωτιάς σε σπίτια , ξενοδοχεία και μικρά σχετικά κτίρια μπορεί να θεωρηθεί ότι θα υπάρξει αρκετά ακριβής προσομοίωση της πορείας της φωτιάς.

- Για να λειτουργήσει ο κώδικας με ακρίβεια θα πρέπει κάθε κελί του υπολογιστικού χώρου να ανήκει εξ'ολοκλήρου σε μια ροϊκή περιοχή π.χ. ή εξ'ολοκλήρου ρευστό ή εξ'ολοκλήρου αέριο. Αυτό δυσχεραίνει την ακριβή μοντελοποίηση ενός χώρου στον οποίο τα αντικείμενα έχουν πολλές μικρολεπτομέρειες στη γεωμετρία τους καθώς ή θα πρέπει αυτές να παραλειφθούν ή θα πρέπει το κελί να γίνει τόσο μικρό ώστε οι υπολογιστικές απαιτήσεις θα αυξηθούν σε τόσο μεγάλο βαθμό ώστε η προσομοίωση να είναι αδύνατη.

Θεωρώντας ότι η προσέγγιση των πειραματικών αποτελεσμάτων είναι ικανοποιητική τα συμπεράσματα που προκύπτουν από το κεφάλαιο 4 είναι:

- Σε περίπτωση φωτιάς σε κλειστό χώρο βοηθά πολύ στη μη εξάπλωση της φωτιάς το να παραμένει περιορισμένη σε ένα μόνο χώρο στον οποίο δε θα υπάρχει ανανέωση του αέρα. Η φωτιά θα καταναλώσει όλο το O_2 του χώρου και θα σβήσει από μόνη της. Έτσι συνέβη στο δωμάτιο 1. Αν η πόρτα του δωματίου δεν είχε ανοίξει πιθανότατα η φωτιά θα είχε σβήσει εντελώς.

- Ο καπνός τείνει να συγκεντρωθεί αρχικά στην οροφή του εκάστοτε δωματίου και κατόπιν κατεβαίνει γεμίζοντας σταδιακά όλο το χώρο.

- Ο καπνός ως ρευστό στην πορεία του προς την έξοδο ακολουθεί τη συντομότερη δυνατή διαδρομή (από το δωμάτιο 1 διαμέσου του διαδρόμου προς την πόρτα εξόδου). Στην πορεία του αυτή ο κύριος όγκος καυσαερίων διέρχεται από το διάδρομο και τα δωμάτια 3,4,5 δέχονται πολύ λίγα καυσαέρια. Για να μπει σε αυτά τα δωμάτια ο καπνός πρέπει να κάνει στροφή 90° από την κύρια πορεία του. Καθώς δεν υπάρχει κάποιο εμπόδιο στην πορεία του ώστε να τον αναγκάσει να στρίψει ο κύριος όγκος καυσαερίων και καπνού οδηγείται ευθεία. Έτσι τα δωμάτια αυτά παραμένουν σχετικά ασφαλή.

Ασφαλέστερο όλων αναδεικνύεται το δωμάτιο 3. Ο καπνός και τα καυσαέρια όταν περνούν την πόρτα μεταξύ του δωματίου 1 και του διαδρόμου δε συναντούν άλλο εμπόδιο μέχρι την πόρτα εξόδου. Εκεί ένα μέρος από τα καυσαέρια βγαίνει έξω και ένα μέρος προσκρούει στον τοίχο προκαλώντας τοπικές ανακυκλοφορίες και συνωστισμό των καυσαερίων που έρχονται συνεχώς από πίσω. Αυτός ο συνωστισμός προκαλεί την είσοδο των καυσαερίων στο κοντινότερο άνοιγμα δηλαδή στο δωμάτιο 5. Ο συνωστισμός σταδιακά προχωρεί προς τα πίσω , ο καπνός και τα καυσαέρια μπαίνουν στο δωμάτιο 4 και τελικά το τελευταίο δωμάτιο που γεμίζει από καπνό είναι το 3.

• Παρατηρούνται φαινόμενα μετάδοσης θερμότητας από αγωγή , συναγωγή και ακτινοβολία:

- 1) Αγωγή. Στο τραπέζι από το οποίο ξεκινά η φωτιά φαίνεται η εξάπλωση της φωτιάς από το ένα πόδι του τραπεζιού (στο οποίο έχει γίνει η ανάφλεξη) σταδιακά σε όλο το τραπέζι.
- 2) Συναγωγή. Οι θερμοκρασίες αυξάνονται πολύ σε όλα τα δωμάτια στα οποία υπάρχει μεγάλη εισροή καυσαερίων.
- 3) Ακτινοβολία. Η φωτιά από το τραπέζι μεταδίδεται στην καρέκλα και στο πόδι του γειτονικού τραπεζιού.

Το γενικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι μπορεί να γίνει αρκετά πιστή και ακριβής προσομοίωση φωτιάς σε εσωτερικούς χώρους ενώ υπάρχουν ακόμα αρκετά περιθώρια περαιτέρω βελτίωσης του υπολογιστικού κώδικα. Η φωτιά είναι ένα εξαιρετικά απρόβλεπτο φαινόμενο και ως εκ τούτου η προσομοίωσή της και η ακριβής πρόβλεψη της συμπεριφοράς της παραμένει αρκετά δύσκολη προσπάθεια αλλά μέχρι στιγμής μπορεί να γίνει αρκετά καλή προσέγγιση του φαινομένου με υπολογιστικές μεθόδους.

Στη βελτίωση της προσπάθειας για την έρευνα της συμπεριφοράς της φωτιάς θα βοηθούσαν πολύ περαιτέρω πειράματα ελεγχόμενης φωτιάς σε κτίρια για τη σύγκριση με τα υπολογιστικά αποτελέσματα. Ένας παράγοντας που επίσης παίζει αποφασιστικό ρόλο είναι η υπολογιστική ισχύς. Όσο αυξάνεται η υπολογιστική ισχύς θα αυξάνεται και η ακρίβεια στην προσομοίωση του φαινομένου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) Alvares,N.J, 1975, 'Some experiments to delineate the conditions for flashover in enclosure fires', International Symposium on Fire Safety of Combustible Materials, pp.375-383, University of Edinburgh
- 2) Drysdale, D.,1999, 'An introduction to fire dynamics',John Wiley&Sons Ltd., Sussex, England
- 3) EPA Report, EPA-453/R-93-036, 1993 , 'A Summary of the Emissions Characterization and Noncancer Respiratory Effects of Wood Smoke'
- 4) Fermilab, FESHM, 5064, 2003
- 5) [http:// www.fire-testing.com/html/instruments/sbi.htm](http://www.fire-testing.com/html/instruments/sbi.htm)
- 6) Forbes, W.H.,Sargent, F.,Roughton, F.J.W.,1945, 'The rate of carbon monoxide uptake by normal men', Am.J. Physiol., 143, 594-608
- 7) Huggett,C.,von Elbe,G.,and Haggerty, W., 1966, 'The combustibility of materials in O₂/He and O₂/N₂ atmospheres', Report SAM-TR-66-85
- 8) Magee,R.S, and McAlevy,R.F. 1971, 'The mechanism of flame spread'. J.Fire and Flammability, 2 ,271-297
- 9) Markstein,G.H,de Ris,J.N., 1972, 'Upward fire spread over textiles', 14th Symposium(International) on Combustion, pp.1085-1097, The Combustion Institute, Pittsburgh
- 10) McGrattan, K., 2006 ,Fire Dynamics Simulator (Version 4) Technical Reference Guide,NIST Special Publication 1019
- 11) McGrattan, K., 2006 ,Fire Dynamics Simulator (Version 4) User's Guide, NIST Special Publication 1018
- 12) NIST Special Publication SP-1021 (Cook County Administration Building Fire)
- 13) Peacock,R.D., Averill, J.D.,Reneke ,P.A., Jones, W.W., 2004, 'Characteristics of Fire Scenarios in Which Sublethal Effects of Smoke are Important', Fire Technology, 40, 127-147
- 14) Poinsoot,T.,Veynante,D,2001,Theoretical&Numerical Combustion, R.T.Edwards, Philadelphia, USA
- 15) Ragland, K.W., Aerts, D.J., Baker, A.J., 1990 , 'Properties of Wood for Combustion Analysis', Bioresource Technology, 37, 161-168
- 16) Royal,J.H., 1970, 'The influence of fuel bed thickness on flame spreading rate'. Honours Report, Stevens Institute of Technology
- 17) Steckler, K.D, Quintiere, J.G., Rinkinen, W.J. ,1982, 'Flow induced by fire in a compartment',NBSIR-82-2520
- 18) Suzuki ,M., Dobashi, R.,and Hirano,T.,1994, 'Behaviour of fire spreading downward over thick paper', 25th Symposium(International) on Combustion, pp.1439-1446, The Combustion Institute, Pittsburgh
- 19) Thomas,P.H.,Webster,C.T., and Raftery,M.M., 1960, 'Some experiments on buoyant diffusion flames', Combustion and Flame, 5, 359-367
- 20) Φούντη, Μ.,2005, Θεωρία Καύσης και Συστήματα Καύσης, Ε.Μ.Π.